

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PIEZOELEKTRİK YAMALI KATMANLI KOMPOZİT
BİR KİRİŞİN TİTREŞİM ANALİZİ VE KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hafize Ebru SEVGİ**

Anabilim Dalı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PİEZOELEKTRİK YAMALI KATMANLI KOMPOZİT
BİR KİRİŞİN TİTREŞİM ANALİZİ VE KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hafize Ebru SEVGİ
(511071114)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin Orhan KAYA (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU (İTÜ)
Prof. Dr. Ata MUĞAN (İTÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

İlk olarak, lisans ve lisansüstü eğitimimin tüm safhalarında desteğini, engin tecrübesini ve değerli vaktini benden esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Metin Orhan Kaya'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam esnasında fikirleri ve önerilerinin yanı sıra, deney düzeneğinin hazırlanması ile ilgili her türlü konuda zaman ayırarak bana yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu'na teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca sonsuz sevgilerini, desteklerini ve güvenlerini bir an olsun yanımdan eksik etmeyen aileme, şimdiye kadar yanımda oldukları ve bundan sonra da yanımda olacakları için bu çalışma vasıtasıyla teşekkür eder her zaman onlara layık olmaya çalışacağımı belirtmek isterim. Lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca sıra arkadaşım, bitmek tükenmek bilmeyen projelerde grup ve takım arkadaşım, hepsinden önemlisi bu uzun ve zorlu yolda acı ve tatlı birçok şey paylaştığım arkadaşım Müh. Akın Ömercikoğlu'na her zaman yanımda olduğu için tüm kalbimle sonsuz teşekkür ederim.

Deneysel çalışma esnasında bana her konuda yardım eden ve vakitlerini ayıran UUBF Kompozit ve Yapı Laboratuvarı teknisyenleri Sn. Aytekin Güven ve Sn. Müslüm Çakır'a teşekkürlerimi belirtmek isterim.

Ayrıca, deney düzeneğiyle ilgili malzemelerin temin edilmesinde verdiği destekten ötürü İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Lisansüstü Tezlerini Destekleme Programı'na teşekkür ederim.

Son olarak, lisansüstü eğitimimi Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB) tarafından verdiği burs ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2009

Hafize Ebru Sevgi
(Uçak Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı	7
2. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER.....	9
2.1 Akıllı Yapılar.....	9
2.1.1 Akıllı yapıların sınıflandırılması	11
2.1.1.1 Piezoelektrik malzemeler.....	13
2.1.1.2 Şekil hafızalı alaşımlar.....	13
2.1.1.3 Elektrostrikatif malzemeler.....	13
2.1.1.4 Magnetostriktif malzemeler.....	14
2.1.1.5 Magnetoreolojik/Elektroreolojik akışkanlar.....	14
2.1.1.6 Fiber optikler.....	15
2.1.2 Akıllı yapıların kullanım alanları	17
2.2 Piezoelektrik Malzemeler	19
2.2.1 Piezoelektrik malzemelerin sınıflandırılması.....	23
2.2.1.1 Piezopolimerler.....	23
2.2.1.2 Piezoseramikler.....	23
2.2.2 Piezoelektrik malzemelerin özellikleri.....	24
2.2.2.1 Curie sıcaklığı.....	26
2.2.2.2 Etkileşim katsayısı.....	26
2.2.2.3 Elektriksel geçirgenlik katsayısı.....	27
2.2.2.4 Geçirgenlik kayıp katsayısı.....	27
2.2.2.5 Mekanik kalite katsayısı.....	28
2.2.2.6 Frekans sabiti.....	28
2.2.2.7 Elastik uygunluk katsayısı.....	28
2.2.2.8 Piezoelektrik gerinim katsayısı.....	29
2.2.2.9 Piezoelektrik gerilim katsayısı.....	30
2.2.3 Piezoelektrik bünye denklemleri.....	31
2.2.4 Piezoelektrik malzemelerin kullanım alanları.....	36
2.3 Modern Kompozit Yapılar	38
2.3.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	39
2.3.2 Kompozit malzemelerin özellikleri.....	41
2.3.3 Kompozit malzemelerin kullanım alanları.....	47
3. KİRİŞ YAPININ DİNAMİK DAVRANIŞI	51
3.1 Serbest Titreşim Durumu	51
3.2 Piezoelektrik Yamalar	54

3.3 Kiriş Yapının Modellenmesi	55
3.3.1 Asimetrik yamalı kiriş	56
3.3.2 Simetrik yamalı kiriş	57
3.4 Kiriş Yapının Hareket Denklemleri	59
3.4.1 Asimetrik yamalı kiriş	59
3.4.1.1 Asimetrik yamalı izotropik kiriş	60
3.4.1.2 Asimetrik yamalı katmanlı kiriş	65
3.4.2 Simetrik yamalı kiriş	68
3.4.2.1 Simetrik yamalı izotropik kiriş	69
3.4.2.2 Simetrik yamalı katmanlı kiriş	72
3.5 Titreşim Kontrolü	73
3.6 Sayısal Sonuçlar	76
3.6.1 Kiriş doğal frekansı	76
3.6.2 Kiriş titreşim cevabı	78
4. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ	83
4.1 Katmanlı Kiriş Yapının Modellenmesi	83
4.1.1 Geometri	84
4.1.2 Malzeme özellikleri	85
4.1.3 Kullanılan sonlu elemanlar	87
4.1.4 Çözüm ağı	88
4.2 Katmanlı Kiriş Yapının Analizleri	89
4.2.1 Modal analiz	90
4.2.2 Piezoelektrik analiz	92
4.3 Analiz Sonuçları	93
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	99
5.1 Katmanlı Kompozit Kirişin İmalatı	99
5.2 Deney Düzenegi	100
5.2.1 Piezoelektrik yama	102
5.2.2 Voltaj yükseltici	103
5.2.3 Veri toplama kartı ve voltaj çıkış terminali	103
5.2.4 Gerinim ölçer	104
5.2.5 Gerinim ölçüm cihazı	105
5.2.6 Çekiç seti	105
5.3 Çekiç Seti Deneyleri	106
5.4 Dinamik Gerinim Ölçümü	109
5.5 Deneysel Sonuçlar	111
5.5.1 Doğal frekans sonuçları	111
5.5.2 Dinamik gerinim sonuçları	112
6. DEĞERLENDİRME	119
KAYNAKLAR	121
EKLER	125
ÖZGEÇMİŞ	129

KISALTMALAR

İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
ODTÜ	: Orta Doğu Teknik Üniversitesi
FBE	: Fen Bilimleri Enstitüsü
A/D	: Analog veriden dijital veriye
D/A	: Dijital veriden analog veriye
PZT	: Kurşun Zirkonat Titanat
PVDF	: Poliviniliden Florid
SMA	: Şekil hafızalı alaşım
ES	: Elektrostrikatif malzeme
MS	: Magnetrostriktif malzeme
MR	: Magnetoreolojik akışkan
ER	: Elektoreolojik akışkan
PMN	: Kurşun magnezyum niyobat
LMN	: Kurşun metaniyobat
LT	: Kurşun titanat
IEEE	: Uluslar Arası Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
DPE	: Doğrudan piezoelektrik etki
TPE	: Ters piezoelektrik etki
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistem
FRP	: Elyaf takviyeli polimer
FFT	: Fast Fourier Transform
BM-BM	: Basit mesnet-Basit mesnet

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Akıllı malzemelerin kıyaslanması [43].	16
Çizelge 2.2 : Piezoelektrik bünye denklemlerinde yer alan terimler.....	32
Çizelge 3.1 : Katmanlı kompozit kiriş ve piezoelektrik yama özellikleri [51,52].....	78
Çizelge 4.1 : Kiriş yapının katmanlı kompozit malzeme özellikleri [50].....	85
Çizelge 4.2 : Piezoelektrik yama malzeme özellikleri [51].....	86
Çizelge 4.3 : Modal analiz sonuçları.	90
Çizelge 5.1 : PCB 086C03 hassas çekicinin özellikleri.....	105
Çizelge 5.2 : PCB 352B10 ivme sensörünün özellikleri.	106
Çizelge 5.3 : Katmanlı kompozit kiriş için elde edilen doğal frekanslar.	111
Çizelge 5.4 : Piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş için elde edilen doğal frekanslar.....	112

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : a)Yüzeye gömülü algılayıcı/eyleyici, b) Yüzeye yapıştırılmalı algılayıcı/eyleyici.	11
Şekil 2.2 : Piezoseramik kristalinin kutuplaşma öncesinde ve sonrasında yapısı [44].	19
Şekil 2.3 : Kutuplanma süreci: a) Serbest durum, b) Elektrik alan etkisi altında, c) Elektrik alan kaldırıldıktan sonra [44].	20
Şekil 2.4 : Kutuplanmış piezoelektrik malzemenin farklı uyaranlara karşı davranışı [44].	21
Şekil 2.5 : a) Doğrudan piezoelektrik etki, b) Ters piezoelektrik etki [45].	22
Şekil 2.6 : Malzeme özellikleri için belirlenen eksen takımı [44].	25
Şekil 2.7 : Takviye malzemesinin düzenlenişine göre kompozit malzeme çeşitleri.	41
Şekil 2.8 : Kompozit malzeme ve bileşenlerinin çekme gerilmesi-gerinim değişimi [46].	43
Şekil 2.9 : Yaygın yapı malzemelerinin akma dayanımı değerleri [46].	44
Şekil 2.10 : Yaygın yapı malzemelerinin Elastisite modülü değerleri [46].	45
Şekil 2.11 : Yaygın yapı malzemelerinin özgül ağırlık değerleri [46].	46
Şekil 3.1 : İncelenen basit kiriş.	51
Şekil 3.2 : Piezoelektrik dönüştürücülerin çalışma prensibi.	54
Şekil 3.3 : Basit bir piezoelektrik dönüştürücü [44].	55
Şekil 3.4 : Asimetrik yamalı kiriş yapısı.	56
Şekil 3.5 : Asimetrik yamalı kiriş yapıda gerinim dağılımı [44].	56
Şekil 3.6 : Asimetrik yamalı kirişte gerinim dağılımı: a) toplam gerinim, b) eğilme bileşeni, c) uzama bileşeni.	57
Şekil 3.7 : Simetrik yamalı kiriş yapısı.	57
Şekil 3.8 : Simetrik yamalı kiriş yapıda gerinim dağılımı [44].	58
Şekil 3.9 : Sonlu (N) sayıda ve asimetrik konumlandırılmış piezoelektrik yamalı kiriş yapısı.	59
Şekil 3.10 : Tek piezoelektrik yamalı kiriş yapısı.	60
Şekil 3.11 : Sonlu ($2N$) sayıda ve simetrik konumlandırılmış piezoelektrik yamalı kiriş yapısı.	68
Şekil 3.12 : Çift piezoelektrik yamalı kiriş yapısı.	69
Şekil 3.13 : Ankastre ve iki ucundan basit mesnetlenmiş kiriş için mod şekillleri. ...	77
Şekil 3.14 : Serbest, $G=10$ ve $G=50$ için titreşim cevabı (birinci mod)	79
Şekil 3.15 : Serbest ve kontrollü titreşim cevabı (birinci mod)	79
Şekil 3.16 : Farklı yama konumları için modal sönümlleme oranı ile kazanç değişimi (birinci mod)	80
Şekil 3.17 : Farklı yama boyları için modal sönümlleme oranı ile kazanç değişimi (birinci mod)	80

Şekil 3.18 : Farklı yama kalınlıkları için modal sönümlleme oranı ile kazanç değişimi (birinci mod).....	81
Şekil 3.19 : Farklı kazançlar için modal sönümlleme oranı ile kiriş boyu ve kiriş kalınlığı değişimi (ankastre kiriş).....	81
Şekil 3.20 : Farklı β ve α değerleri için modal sönümlleme oranı ile kiriş boyu ve kiriş kalınlığı değişimi (ankastre kiriş, $G=10$).....	82
Şekil 4.1 : Modellenen yamasız kiriş geometrisi.....	84
Şekil 4.2 : Modellenen tek yamalı kiriş geometrisi.....	84
Şekil 4.3 : Oluşturulan modelleme: a)yamasız kiriş, b)tek yamalı kiriş.....	84
Şekil 4.4 : Kullanılan sonlu elemanlar [53].	88
Şekil 4.5 : Oluşturulan çözüm ağı.....	89
Şekil 4.6 : Uygulanan sınır şartları.....	90
Şekil 4.7 : Yamasız ve yamalı katmanlı kompozit kiriş için mod şekilleri.....	91
Şekil 4.8 : Piezoelektrik yamalı katmanlı kirişin zamandan bağımsız elektriksel potansiyel fark etkisinde toplam yer değiştirmesi (m).	93
Şekil 4.9 : Farklı genliklerdeki zamandan bağımsız sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri.....	94
Şekil 4.10 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri (2,2 Hz).	95
Şekil 4.11 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri (6,6 Hz).	96
Şekil 4.12 : Farklı frekanslardaki sinüzoidal sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri (90 V).	97
Şekil 4.13 : Farklı frekanslardaki sinüzoidal sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri (90 V – 0,5 s).....	97
Şekil 5.1 : Katmanlı kompozit kirişin imalat aşamaları.....	100
Şekil 5.2 : Katmanlı kompozit kirişin ankastre bağlantısı.....	100
Şekil 5.3 : Deney düzeneği işleyiş şeması.....	102
Şekil 5.4 : BM 120/36/350 piezoelektrik yama.....	103
Şekil 5.5 : SVR 150-3 voltaj yükseltici.....	103
Şekil 5.6 : 6062E veri toplama kartı ve BNC-2110 terminali.....	104
Şekil 5.7 : BFLA 5-5 gerinim ölçer.....	104
Şekil 5.8 : EX 1629 gerinim ölçüm cihazı.....	105
Şekil 5.9 : NI 9234 Veri toplama kartı.....	106
Şekil 5.10 : Çekiç testi deney düzeneği.....	107
Şekil 5.11 : Yamasız kiriş için çekiç testi sonucunda elde edilen frekans tepki fonksiyonu.....	108
Şekil 5.12 : Tek yamalı kiriş için çekiç testi sonucunda elde edilen frekans tepki fonksiyonu.....	108
Şekil 5.13 : Dinamik gerinim ölçümü deney düzeneği.....	109
Şekil 5.14 : Yamasız kiriş için elde edilen genlik spektrumu.....	110
Şekil 5.15 : Tek yamalı kiriş için elde edilen genlik spektrumu.....	110
Şekil 5.16 : Farklı genliklerdeki zamandan bağımsız sinyaller için deneysel olarak ve analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri.....	113
Şekil 5.17 : Farklı genliklerdeki zamandan bağımsız sinyaller için dinamik gerinim ölçümü.....	114
Şekil 5.18 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü (2,2 Hz).	115
Şekil 5.19 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü (2,2 Hz – 1 s).....	115

Şekil 5.20 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü ($6,6 \text{ Hz}$).	116
Şekil 5.21 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü ($6,6 \text{ Hz} - 0,5 \text{ s}$).	117
Şekil 5.22 : Farklı frekanslardaki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü (90 V).	118
Şekil 5.23 : Farklı frekanslardaki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü ($90 \text{ V} - 0,5 \text{ s}$).	118
Şekil B.1 : Yamasız giriş için çekiç testi ile elde edilen kuvvet-zaman grafiği.	126
Şekil B.2 : Yamasız giriş için çekiç testi ile elde edilen ivme-zaman grafiği.	126
Şekil B.3 : Tek yamalı giriş için çekiç testi ile elde edilen kuvvet-zaman grafiği. .	126
Şekil B.4 : Tek yamalı giriş için çekiç testi ile elde edilen ivme-zaman grafiği.	127
Şekil B.5 : Yamasız giriş için dinamik gerinim ölçümü ile elde edilen ivme-zaman grafiği.	127
Şekil B.6 : Yamalı giriş için dinamik gerinim ölçümü ile elde edilen ivme-zaman grafiği.	128

PİEZOELEKTRİK YAMALI KATMANLI KOMPOZİT BİR KİRİŞİN TİTREŞİM ANALİZİ VE KONTROLÜ

ÖZET

Başta havacılık ve uzay olmak üzere tüm mühendislik uygulamalarında kullanım alanları gün geçtikçe genişleyen piezoelektrik malzemeler, son yıllarda oldukça ilgi çeken, araştırma ve geliştirmeye oldukça uygun bir konu olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Mekanik gerilmeye maruz kaldıklarında elektrik alan oluşturan ve tersinir yönde elektrik alan etkisinde ise gerinim oluşturan piezoelektrik malzemeler, yüksek elastisite modülleri sayesinde ana yapının katılık ve kütle matrislerine ihmal edilebilir boyutta bir artış sağladığından ana yapıda çok sayıda kullanılıp titreşim ve şekil kontrolünün sağlanması işlevini görmektedirler. Özellikle algılayıcı ve eyleyici olarak kullanılabilme kabiliyetine sahip piezoelektrik malzemelerin geniş kullanım alanları hızla gelişen piezoelektrik teknolojisine paralel olarak artmaktadır. Yan sistemlerin desteğini almaksızın sağladıkları bu özellikleri ile piezoelektrik malzemeler havacılık ve uzay sanayinde aktif titreşim kontrolünde yaygın olarak tercih edilmektedirler. Bu çalışmada, piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit bir kirişin titreşim analizinin yapılması ve sönümleme kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır. Farklı sınır koşulları için kiriş davranışının incelendiği teorik çalışmanın yanı sıra sonlu elemanlar yöntemine dayanan paket programlar kullanılarak gerçeğe en uygun biçimde yapılmış olan modellemelerle kirişin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Son olarak yapılmış olan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin teorik çalışma ve analiz sonuçlarıyla tutarlılığı değerlendirilmiştir. Teorinin deneylerle doğrulanmasının amaçlandığı bu çalışma ile ülkemizde piezoelektrik malzeme teknolojisinin geliştirilmesi; bu sayede bilim ve mühendislik alanlarında kullanımının daha da yaygın hale gelmesi hedeflenmiştir.

VIBRATION ANALYSIS AND CONTROL OF A LAMINATED COMPOSITE BEAM WITH PIEZOELECTRIC PATCHES

SUMMARY

Piezoelectric materials are getting popular in engineering applications recently. Especially in aerospace engineering fields, piezoelectric materials have been favorable subjects to be researched and developed. When piezoelectric materials are subjected to mechanical stress, an electric field is created and vice versa strain is created when subjected to electrical field. Due to their superior elasticity modulus, they have negligible effects to the stiffness and mass matrices of the structure. Hence, they can be used numerously for vibration and shape controlling without any necessity of secondary systems. Having the capability of performing as both actuators and sensors, their application areas increase rapidly parallel to developing piezoelectric technology. Consequently, piezoelectric materials are widely used for active vibration control in aviation and space industry. In this work, vibration analysis and control of a laminated composite beam with piezoelectric patches is achieved. Firstly, the mathematical modeling of the laminated beam is created with various patch configurations. Next, the equations of motions are derived and additionally the natural frequencies and mode shapes of the beam will be obtained. Various boundary conditions of the laminated beam are examined. After theoretical study, finite element modeling of the beam is performed and the laminated beam is analyzed by using ANSYS software. After the experimental study is performed, the consistency of the theoretical study with the experimental study will be considered. By the way, the piezoelectric technology in Turkey is intended to be developed.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit bir kirişin titreşim analizi ve kontrolü yapılmıştır. Katmanlı kompozit kiriş, yüzeyine yapıştırılmış piezoelektrik yamalar ile teorik olarak modellenmiş ve farklı sınır koşulları için çözümlenmesi yapılmıştır. Teorik olarak elde edilen sonuçların tutarlılığı ANSYS 11.0 sonlu elemanlar programı ile değerlendirilmiş ve çalışmanın pratik kısmına geçilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçları da göz önünde bulundurularak hazırlanan deney düzeneği ile, hali hazırda teorik olarak modellenen kiriş, gerçeğe mümkün mertebe en yakın biçimde deneysel olarak incelenmiştir.

Her türlü mühendislik uygulamasında özellikle son yıllarda yaygın olarak kullanılan kompozit malzemeler, gelişen teknoloji ile birlikte daha çok tercih edilirken; hafiflikleri ve üstün mekanik özellikleri ile havacılık sanayinin vazgeçilmez unsurları olmuşlardır.

Piezoelektrik malzemelerdeki gelişmeler, araştırmacıları akıllı yapılar ile ilgili çalışmalar yapmaya teşvik etmiştir. Piezoelektrik malzemeler, dış ortamdaki değişiklikleri algılayıp aktif kontrol ile ihtiyaca yönelik tepki verme yetisindeki akıllı yapılardır. Temel olarak pasif yapıyla bütünleştirilmiş algılayıcı ve eyleyiciler ile işlemciler içeren akıllı yapıların, üstün kabiliyetleri ile özellikle askeri ve sivil havacılıkta, devrim niteliğinde yenilikler sağlayacakları öngörülmektedir.

Günümüzde geliştirilen hava araçları bu yeni teknolojiye mutlak suretle yararlanmakta; özellikle uçak kanadı, helikopter palası, motor hava alığı gibi bileşenlerde akıllı malzeme ve yapıların üstün kabiliyetleri kullanılmaktadır. Kontrol yüzeylerinin şeklini değiştirmek ya da uçak kanadı ve helikopter palasında burulma yaratarak taşıma yüzeyleri üzerindeki akışı değiştirmek suretiyle taşıma ve sürüklemenin istenilen mertebede ayarlanması ve panel çırpınması, kuyruk sarsılması, pala vorteks etkileşiminin azaltılması ile performans artışının sağlanması akıllı yapıların hava araçlarında sağlayabileceği yararları birkaç örnektir [1].

Uzay araçlarında ise mevcut ve geleceğe yönelik pek çok sorunun çözümünde akıllı sistem teknolojisi uygulanmaktadır. Akıllı yapıların uçuş testleri ve uzay görevlerinde doğrudan ve hızlı uygulanabilirliği, uzay araçlarının tasarım faaliyetlerini geliştirici katkıda bulunmaktadır. Uzay yapılarının hassas şekil kontrollerinde ve mevcut deformasyonların giderilmesinde, akıllı yapılar ile geniş olanaklar sağlanmaktadır. Genellikle esnek, hafif, uyarlanabilir ve uzaktan işletilebilir özellikteki uzay sistemleri, aynı zamanda oldukça pahalı ve zor tamir edilebilir olmaları bakımından hassasiyet gerektirmektedirler. Uzay ortamının sert koşullarıyla karşılaşan uzay yapıları; yer çekimi, vakumlama, ısı çevrim, büyük sıcaklık değişimleri, radyasyon ve çeşitli uzay parçalarının darbelerine maruz kalmaktadırlar. Tüm bu etkiler sonucunda yapıda meydana gelen şekil deformasyonları ve titreşimler, uzay araçlarında akıllı malzemelerin kullanılması ile kontrol edilebilmekte ve ortadan kaldırılabilmektedir.

Uzay ve hava araçlarında akıllı malzemelerin kullanımı sadece titreşim ve şekil kontrolleriyle sınırlı değildir. Akıllı yapı teknolojisi özellikle yapısal durum izlemede etkin olarak kullanılmaktadır. Halen daha geliştirilen akıllı malzeme ve yapılar konusunda yapılan çalışmalarla birlikte keşfedilen kabiliyetleri, kullanımlarını daha da arttıracak ve akıllı malzemeler geleceğin yapıları olacaklardır.

Bu bölümde, öncelikle konu ile ilgili geçmiş çalışmalar hakkında bilgi verilmiş, ardından çalışmanın kapsamı ve amacından bahsedilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Yunanca basınç anlamına gelen ‘piezo’ kelimesinden türetilen piezoelektrik kavramı 100 yılı aşkın bir süre önce tanımlanmıştır. 1800’lü yılların sonuna doğru yapılan deneylerle mekanik basınçtan dolayı ortaya çıkan elektrik alan tespit edilmiş olsa da çalışmalar sonucunda kesin olarak açıklanamayan piezoelektrik etki 1880 yılında Jacques ve Pierre Curie kardeşler tarafından tanımlanmıştır. Curie kardeşler, kuvarz ve rochelle tuzu gibi piezoelektrik yapıda çok sayıda kristaller bulmuşlardır. Bir yıl sonra Lippman ters piezoelektrik etkiyi termodinamik prensiplere dayanarak açıklamıştır [2]. Ters piezoelektrik etki daha sonra farklı araştırmacılar tarafından teorik olarak açıklanmış olsa da deneysel olarak bay ve bayan Curie tarafından kanıtlanmıştır. O günlerden bu zamana değin bilim adamları tarafından ilgiyle araştırılan piezoelektrik malzemeler hakkında pek çok karmaşık teoriler önerilmiş ve

geliştirilmiştir. Araştırmalarla birlikte çok sayıda piezoelektrik alet geliştirilmiş ve çok çeşitli alanlarda uygulanmıştır.

Piezoelektrik konusunda ilk zamanlarda yapılan çalışmalar; ince çubuklar, plaklar, diskler, dairesel silindirik kabuklar gibi sonlu ve sonsuz boyutlu değişik geometrideki yapılarla ilgili olmuştur. Tek başlarına piezoelektrik malzemelerin dikkate alındığı çalışmaların yanında, tamamı piezoelektrik malzemeden oluşan ya da piezoelektrik katmanlar içeren kirişlerin ve plakların statik ya da dinamik analizleri ile ilgili olarak da çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Cady ve Tiersten [3,4], piezoelektrik üzerine yapmış oldukları kesin çalışmaları yazmış oldukları kitaplar ile aktarmışlardır. Cady, kristallerde bulunan piezoelektrik etkiyi açıklamak üzere bir takım tarihi bilgilerin yanında, kristallerdeki etkilerin nedenlerini, piezoelektriğin ilkelerini ve çeşitli uygulamaları da içeren bir çalışma ortaya koymuştur. Tiersten ise lineer piezoelektrik teorisi ve plak titreşimleri konularına ağırlık vererek, mevcut dalga problemleri ile ilgili yaklaşım ve çözümleri uygulamalarıyla ele almıştır.

Daha sonraki yıllarda, aralarında Ray [5–7] ve Heyliger'in [8–10] de bulunduğu çok sayıda bilim adamı basit piezoelektrik ile ilgili kesin çözümler içeren çalışmalar sunmuşlardır. Benveniste ve Dvorak [11] ise katmanlı kompozit yapı ile piezoelektrik olguyu bir arada inceleyen bir çalışma yapmışlardır.

Bailey ve Hubbard [12], aktif sönümleyici tasarlamak amacıyla yaptıkları çalışmalarında piezoelektrik katmanın kiriş yapılarda titreşim kontrolüne uygulanabilirliğini incelemiş ve piezoelektrik malzemelerin eyleyici olarak kullanıldığı çalışmalara öncülük etmişlerdir. Yapısal titreşimlerin genliklerini veya yayılma verimini kontrol ederek gürültüyü azaltan piezoelektrik eyleyiciler hafiflikleri ve gerek yüzeye yapıştırma gerekse yapıya gömülü olarak uygulanabilirlikleri bakımından tercih edilmektedirler.

Sözü geçen çalışmalarda geliştirilen yöntemlerin yanı sıra, deneysel ağırlıklı ve dolayısıyla daha gerçekçi yaklaşımların yapıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Özellikle Crawley ve Luis [13] tarafından yapılmış olan çalışma, piezoelektrik eyleyiciler içeren kirişlerin hem analitik hem de deneysel olarak incelenmesi bakımından diğer pratik çalışmalara öncü olmuştur. Yüzeye ayrıklaştırılmış biçimde yapıştırılmış veya gömülmüş piezoelektrik eyleyiciler ile tahrik edilen kiriş yapının

titreşim kontrolünün yapılabilmesi amacıyla akıllı yapı modelinin oluşturulmasında bir başlangıç noktası olarak literatürde yerini alan bu çalışma, yalnızca izotropik kirişlerin incelenmeyip; onun yanı sıra çeşitli kompozit yapıdaki kirişlerin de incelenmiş olmasından dolayı önem taşımaktadır. Daha sonra Im ve Atluri [14] tarafından piezoelektrik eyleyicinin kiriş yapıya eksenel yük etkisinin de incelendiği bir çalışma yapılmış olsa da, Crawley ve Luis'in sözü geçen çalışması baş referans olmaktan geri kalmamıştır. Crawley ve Anderson [15] ise kiriş ve piezoelektrik eyleyici arasındaki etkileşimi gerinimler bakımından modellemiş ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Crawley [16], yapmış olduğu çalışmaların yanı sıra mevcut çalışmaları da değerlendirmek suretiyle akıllı yapılar ile ilgili bir inceleme çalışması yayınlamıştır.

Havacılık ile ilgili olarak, kirişlerde piezoelektrik malzeme kullanımı konusunda birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar izotropik kirişlerin modellenmesinin yanında piezoelektrik katmanlı kompozit kirişlerin modellenmesini de içermektedir. Özellikle, piezoelektrik kirişlerin titreşim davranışının incelenmesi, titreşim kontrolü ve sönümlemesi havacılık yapılarıyla ilgili çalışmalar arasında önemli yer tutmaktadır ve söz konusu çalışmanın içeriği gereği ağırlıklı olarak kiriş titreşim davranışı, titreşim kontrolü ve sönümlemesi ile ilgili çalışmalar taranmıştır.

Abramovich ve Livshits [17], simetrik ve asimetrik katmanlanmış ankastre kirişin piezoelektrik katmanların etkisi altındaki dinamik davranışını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Abramovich [18], genelleştirilmiş katmanlı kompozit bir kirişin piezoelektrik sürekli katmanlar veya yamalar ile birlikte modellenmesini amaçlayan ve kapalı formda çözümler öneren bir çalışma yapmıştır.

Donthireddy ve Chandrashekhara [19], yüzeye gömülü iki piezoelektrik eyleyici katman ile birlikte kompozit bir kirişin sonlu elemanlar modelini oluşturmuş ve değişik parametrelere bağlı şekil kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Literatürde mevcut çözümlerle uyum içinde olduğu görülen kiriş modeli, uzun ve kısa kirişler ile birlikte yüzeye yapıştırılmış eyleyiciler için de geçerli olması bakımından oldukça önemlidir.

Çalışmalarında piezoelektrik katmanların yapının katılığına etkisini göz önünde bulunduran Abramovich ve arkadaşları, daha sonraki yıllarda daha çok piezoelektrik eyleyicilerin incelendiği çalışmalar yürütmüşlerdir. Waisman ve Abramovich

[20,21], sürekli katman veya yama biçiminde piezoelektrik eyleyiciler içeren kompozit kiriş modellerini inceledikleri çalışmalarında doğal frekansların değişimini katılık bakımından incelemişlerdir. Yocum ve Abramovich [22], piezoelektrik yama ile tahrik edilen kirişin statik davranışını sonlu elemanlar yönteminin yanı sıra deneysel olarak da inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Azulay ve Abramovich [23], alüminyum bir kirişin piezoelektrik katmanlar ile aktif sönümlenmesini irdeledikleri çalışmalarında farklı sınır koşullarında kirişin doğal ve sönümlenmiş titreşimlerini ele almışlardır. Yakın zamanda Fridman ve Abramovich [24] tarafından yapılan çalışmada ise, katmanlı kompozit kirişlerin eksenel basma yükü altındaki davranışı piezoelektrik katmanların da etkisiyle incelenmiştir. Shen [25] tarafından piezoelektrik algılayıcılar içeren kirişlerin incelendiği çalışma ise piezoelektrik algılayıcıların kiriş yapılarla birlikte ele alınması bakımından öncü olmuştur.

Piezoelektrik algılayıcı ve eyleyici yamaların uygulamalarında ise, yamaların yerleşimi ve boyutları ile ilgili optimizasyon çalışmaları önemlidir. Yerleşim optimizasyonu ile ilgili Qiu ve arkadaşları [26] tarafından yakın zamanda yapılmış bir çalışma mevcuttur.

Tzou ve Fu [27,28], iki bölüm halinde yayınladıkları çalışmalarında tek parçalı ve çok parçalı algılayıcı-eyleyici takımı bulunduran katmanlı bir plağın algılama ve kontrolünü incelemişlerdir. Çalışmanın birinci bölümünde, tek parçadan oluşan ve dört parçaya ayrılmış algılayıcı-eyleyici takımının plak üzerinde matematiksel modellenmesi yapılmıştır. İkinci bölümde ise, değişik boyutlardaki algılayıcı-eyleyici takımları ile plağın aktif titreşim kontrolü yapılmıştır. Wang [29] ise piezoelektrik eyleyici yapılandırılmış kiriş yapıların kontrol edilebilirlik yönlerini ele aldığı çalışmasında, tanımladığı gösterge ile eyleyicilerin optimum konumlarının belirlenebileceğini savunmaktadır. Wang [30] diğer bir çalışmasında, kiriş yapıların burulma kapasitelerinin piezoelektrik katmanların optimum konumlandırılmalarıyla ve katmanlara uygulanacak elektrik alan ile etkin biçimde değiştirilebileceğini göstermiştir. Sloss ve arkadaşları [31], her boyutta ve konumdaki piezoelektrik algılayıcı-eyleyici takımı için ankastre kirişin özellikle eksenel yükleme altında geri besleme kontrolünü tanımlamışlardır. Lin ve Nien [32] ise piezoelektrik algılayıcı-eyleyici takımı kullanarak akıllı bir kirişin modellenmesi ve aktif titreşim kontrolünü yaptıkları çalışmalarında, esas olarak elyaf yönlenmesi ve eyleyici konumunun kontrol sistemine etkisini vurgulamışlardır.

Kiriş yapının piezoelektrik eyleyici-algılayıcı takımlarıyla titreşim kontrolünün yapıldığı çok sayıda çalışma literatürde mevcut olmakla birlikte, özellikle deneysel içerikli olanlar detaylı olarak incelenmiştir. Kwak ve Sciulli [33] piezoelektrik algılayıcı ve eyleyici içeren aktif yapılarda bulanık mantığa dayanan bir titreşim sönümleme kontrolü geliştirmişlerdir. Gaudenzi ve arkadaşları [34] tarafından yapılan deneysel çalışmada katmanlı kompozit kirişin titreşim kontrolünün algılayıcı ve eyleyici kabiliyetindeki aktif katmanlar ile yapılabileceği görülmüştür. Gaudenzi ve arkadaşları [35] yaptıkları bir diğer çalışmada ise iki kontrol yöntemi geliştirmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlar ile doğrulayarak kontrol yöntemlerinin geçerliliğini sağlamışlardır. Wagner ve Hagedorn [36], yüzeyinde piezoelektrik eyleyici yamalar bulunan kiriş yapının zayıf elektrik alana maruz kalması durumunda, kirişin lineer olmayan davranışını modellemiş ve yaptıkları deneyler ile modellemelerini doğrulamışlardır. Lin ve Nyang [37] tarafından yapılmış olan analitik ve deneysel inceleme içerikli çalışmada ise esnek aktif yapıların titreşim kontrolleri irdelenmiştir. Lin ve Liu [38], basitleştirilmiş bulanık mantık kontrolüyle piezoelektrik algılayıcı-eyleyici takımı ile birlikte ankastre bir kirişin titreşim sönümlemesini deneysel olarak değerlendirmişlerdir.

Literatürde konu ile ilgili yayınlanmış olan çeşitli kitap ve makalelerin yanında, ülkemizde İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) gibi geniş kapsamlı araştırma imkanlarının bulunduğu üniversiteler bünyesinde yapılmış olan lisansüstü tezleri mevcuttur. Çalışkan [1] tarafından yapılmış olan doktora tezi, piezoelektrik malzemelerin özellikle havacılık alanında kullanılan akıllı yapılardaki uygulamalarını teorik ve deneysel olarak inceleyen bir çalışmadır. Gözen [39], yüzeye yapıştırılmış piezoelektrik eyleyicilerin kiriş yapılara etkisini teorik ve sayısal olarak incelemiş ve bir robot eli modeli oluşturmuştur. Uyanık [40], daha çok anlık yük etkisini incelediği çalışmasında piezoelektrik eyleyiciler ile kompozit plağın aktif kontrolünü sağlamıştır. Bayar [41] ise sıcaklık etkisi altında piezoelektrik bir plağın statik analizini gerçekleştirmiştir. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (FBE) bünyesinde yapılmış olan bu tez çalışmalarında pratik eksikliğin giderilmesinin ve gerçeğe en uygun modellemelerle deneylerinin yapılmasının gerekliliği açıkça görülmektedir.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada piezoelektrik yamalı, katmanlı kompozit bir kirişin farklı sınır koşulları altında titreşiminin teorik ve deneysel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Kök kısmında piezoelektrik yamaların simetrik olarak yerleştirileceği katmanlı kompozit kiriş, öncelikle teorik olarak modellenecek ve titreşim analizi yapılacaktır. Teorik çalışma ile kıyaslanmak üzere piezoelektrik yamalı kiriş, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çalışan ANSYS 11.0 yazılımı kullanılarak gerçeğe en uygun biçimde modellenecek; doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilecektir. Teorik çalışmanın sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmasının ardından deneysel çalışma gerçekleştirilecek ve teorinin pratikle uyumu irdelenecektir.

Bu çalışma, başta havacılık ve uzay olmak üzere pek çok bilim ve mühendislik uygulamalarında gün geçtikçe yaygınlaşan kullanım alanları ile kompozit malzemeler ve akıllı malzemeleri kapsamaktadır. Geniş kapsamlı konusu ile teorik çalışma ve sonlu elemanlar analizinin yanı sıra deneysel çalışmanın da yapılacağı bu tez kapsamında teori gerçek anlamda pratiğe dökülecek ve çalışmaların birbirleriyle tutarlılıkları irdelenecektir. Teorik çalışmada Mathematica 6.0 ile geliştirilen bilgisayar kodlarından, sonlu elemanlar analizinde ise ANSYS 11.0 yazılımından yararlanılacaktır. Kompozit ve piezoelektrik malzemeler, katmanlı kompozit kirişler, piezoelektrik yamalar, genelleştirilmiş kiriş teorileri, kiriş hareket denklemleri, sonlu elemanlar analizi, farklı sınır koşullarında kiriş titreşimi ve titreşim kontrolü çalışma kapsamında yer almaktadır.

Bu çalışma ile son yıllarda kullanımı hızla yaygınlaşan akıllı malzemeler ile özellikle havacılık ve uzay sanayinin vazgeçilmez unsurları olan katmanlı kompozit yapılar konularında dünya çapında ülkemizin de söz hakkı bulunması sağlanacaktır. Hali hazırda tamamlanmış olan literatür çalışması neticesinde mevcut çalışmaların teoriyle sınırlı kaldığı, özellikle deneysel çalışmalar konusunda bir eksiklik olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmanın neticelenmesiyle sözü geçen eksikliğin giderilmesi ve teorinin pratikle karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Yapılacak deneysel çalışma, akıllı malzemelerin etkin kullanımına ışık tutarak ülke çapında yaygın kullanımını sağlayacaktır. Bu sayede dışa bağımlılık unsuru ortadan kaldırılacak ve piezoelektrik malzemelerin yapılarda etkin kullanımına katkı sağlanacaktır.

2. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER

Son yıllarda sürekli gelişime açık bir konu olarak karşımıza çıkan akıllı yapılar; havacılık ve uzay mühendisliği, makine mühendisliği, yapısal mühendislik, elektrik mühendisliği, uygulamalı mekanik, mühendislik matematiği, malzeme bilimi, bilişim gibi pek çok alanı kapsayan disiplinler arası bir araştırma alanıdır. Akıllı yapılar konusunda gün geçtikçe hızlanan gelişmeler akıllı malzemeler olarak tanımlanan yeni bir malzeme sınıfının doğmasına neden olmuştur. Çevresel değişikliklere cevap verecek biçimde kendiliğinden adapte olan akıllı malzemeler; piezoelektrik malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar, elektrostriktif malzemeler, magnetostriktif malzemeler, magnetoreolojik/elektroreolojik akışkanlar ve fiber optikler olmak üzere altı grupta toplanmaktadır. Bu çalışmada incelenecek olan piezoelektrik malzemeler, halen daha geliştirilmekte olan akıllı malzemeler olup bu konuda yapılan araştırmalar geçmişten günümüze aralıksız sürdürülmektedir. Bu bölümde öncelikle akıllı yapılar hakkında genel bilgi verilmiş, ardından piezoelektrik malzemeler ve piezoelektrik olgu detaylarıyla ele alınmıştır. Piezoelektrik bünye denklemlerinin de incelenmesinin ardında piezoelektrik malzemelerin kullanım alanları örneklerle açıklanmıştır. Son olarak kompozit malzemeler ile ilgili kapsamlı bilgi verilmiş, akıllı yapılar ile kompozit malzemelerin bir arada kullanıldığı modern kompozit yapı teknolojilerine değinilmiştir.

2.1 Akıllı Yapılar

Akıllı yapı kavramı ‘kendiliğinden algılayıcı, eyleyici ve kontrol mekanizmalarına sahip; gerilme, yer değiştirme, ışık, sıcaklık, elektrik alan gibi bir uyarıyı algılama, uyarıya görsel yer değiştirme ya da hareket, yüzey gerilmesi gibi bir tepki verme ve uyarı ortadan kaldırıldığında tekrar eski haline döndürme yetisinde bir sistem’ olarak açıklanabilir.

Çevresel değişimin algılanması ve bu değişime tepki verilmesi en basit halde elektronik işlemlere dayandığından akıllı yapının bünyesinde mutlak suretle algılayıcı-eyleyici-kontrol sistemi bulunmalıdır. Algılayıcı, eyleyici ve kontrol

mekanizmaları genellikle bir donanım ve/veya yazılım kontrol mekanizması kullanmak suretiyle birleştirilerek uyarana karşı amaca yönelik bir tepki oluşmaktadır. Pasif yapı ile birlikte entegre olmak suretiyle akıllı yapıyı oluşturan algılayıcı, eyleyici ve kontrol mekanizmaları basitçe aşağıdaki biçimde açıklanabilir.

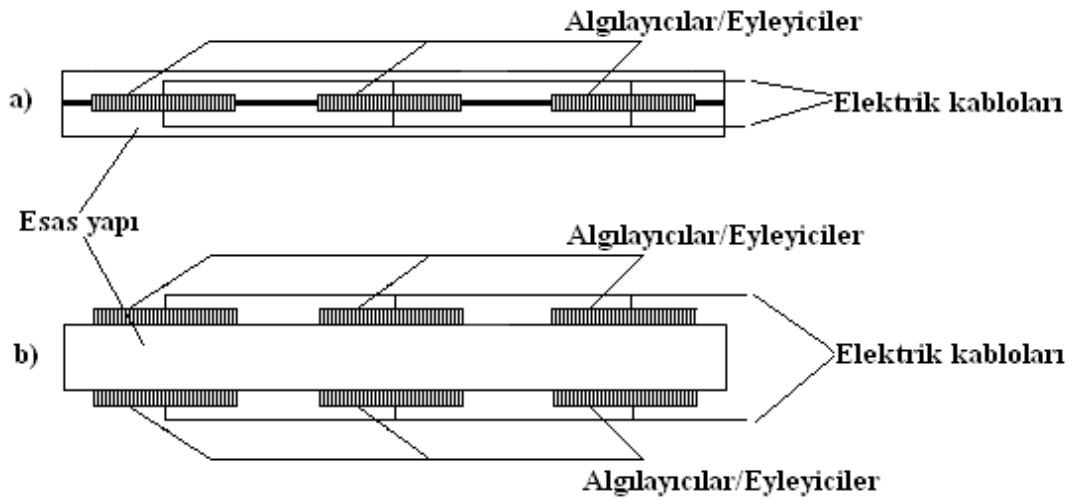
- **Algılayıcı:** Çevresel değişiklikleri algılayarak değişim ölçümüne uygun sinyaller üretmektedir. Algılayıcı, yapılacak ölçüme, veri çıkışına ve çevre şartlarına göre belirlenmektedir.
- **Eyleyici:** Akıllı yapının istenen tepkiyi verebilecek şekilde değişimini sağlamaktadır. Eyleyici, oluşturulacak tepkiye göre belirlenmektedir.
- **Kontrol sistemi:** Algılayıcının sinyalini görüntülemekte, bilgiyi işlemekte ve müdahale gerektiren durumda eyleyiciye uygun sinyali göndermektedir. Ara yüz işlemlerini içeren elektrik kontrol sistemi algılayıcı ve eyleyiciler için geri besleme sağlamaktadır. A/D-D/A dönüştürücü, yükseltici-filtreleme, kontrol algoritması, sayısal veri işleme ve güç ünitesinden oluşmaktadır.

Daha önceden de bahsedildiği gibi, akıllı yapı; üzerine yapıştırılmış ya da içine gömülmüş ve bir kontrol sistemi tarafından ortamdaki değişiklikleri dengelemeye yönelik cevap üretmesi sağlanan, algılayıcı ve eyleyici bulunduran bir yapı olarak tanımlanabilir. Örneğin, elastik narin bir kirişin titreşim sönümlemesi için pek çok araştırmacı kiriş yüzeyine yapıştırılmış akıllı malzemelerin algılama ve eyleme kabiliyetlerinden faydalanmak suretiyle genlik azaltımı üzerinde çalışmışlardır [39]. Uygulanan dış kuvvet etkisiyle deforme olan kiriş ile birlikte eş zamanlı deforme olan algılayıcı, kuvvetin büyüklüğüyle orantılı bir sinyal meydana getirir. Algılayıcıdan gelen sinyal kontrol sistemi tarafından işlenerek eyleyiciye uygun bir elektriksel potansiyel fark olarak aktarılır. Eyleyicinin karşı koyucu bir deformasyon oluşturması ve kirişi sönümlemesinin ardından titreşim zamanla azalacaktır.

Genel olarak ifade etmek gerekirse, algılayıcılar yapıda meydana gelen değişimleri belirlerken, eyleyiciler ise yapıda istenen değişiklikleri sağlamaktadırlar. Söz konusu değişimler ve değişiklikler statik veya dinamik olabilmektedir. Örneğin, yapıda meydana gelen birim değişikliğin algılayıcı tarafından belirlenmesinin ardından değişikliğe neden olan yüzey eğimi veya yer değiştirme eyleyici tarafından giderilebilmektedir. Diğer bir örnek olarak; kanatta taşıma kuvvetinin değişimi algılayıcılar tarafından saptandığında, uygun kontrol sinyalleri ile eyleyiciler kanat

taşıma kuvvetini uygun seviyeye getirebilmektedirler [42]. Dolayısıyla, çok çeşitli amaçlar için etkin ve kolay uygulanabilir algılayıcı-eyleyici takımının tasarlanması, üretilmesi, uygulanması ve test edilmesi günümüz bilim adamlarının yoğun ilgi gösterdiği bir araştırma konusudur.

Algılayıcı ve eyleyici için uygun akıllı malzemenin seçilmesinin ardından, kontrol sistemi ile iletişimini sağlayacak elektriksel bağlantılar ile beraber algılayıcı ve eyleyicinin esas yapıyla bütünleştirilmesi Şekil 2.1’de gösterildiği üzere iki biçimde yapılabilir. Birinci yöntem algılayıcının ve eyleyicinin tümüyle esas yapıya gömülü olarak yerleştirilmesidir. Bu yöntem ile elde edilen katmanlar halindeki yapı, işletim ya da üretim esnasında meydana gelebilecek herhangi bir aksaklık durumunda tüm yapıda değişiklik yapılmasını gerektirdiğinden risk taşımaktadır. İkinci yöntem olan algılayıcı ve eyleyicinin esas yapının yüzeyine yapıştırılması durumunda ise aksaklıklara dışarıdan müdahale edilebilmesi büyük avantaj sağlamaktadır. Öte yandan dış ortamdaki değişikliklerden kaynaklanabilecek hasarlara ve elektriksel bozukluklara karşı oldukça hassas olan yüzeye yapıştırmalı eyleyiciler, esas yapının tarafsız eksenine olan mesafelerinden dolayı daha yüksek mertebede tahrik oluşturabilmektedirler.



Şekil 2.1 : a) Yüzeye gömülü algılayıcı/eyleyici, b) Yüzeye yapıştırmalı algılayıcı/eyleyici.

2.1.1 Akıllı yapıların sınıflandırılması

Akıllı yapılar esas olarak daha geniş kapsamlı bir araştırma alanının konusudur. Dağıtılmış eyleyiciler bulunduran uyarılmış yapılar, akıllı yapıları kapsayan ve özellikle havacılıkla son derece ilgili bir alandır. Mafsallı hücum ve firar kenarına

sahip uçak kanatları ile mafsallı kumanda ve manevra unsurlarına sahip robotik sistemler, uyarılmış yapıların günümüzde kullanılan örnekleridir. Akıllı yapıları kapsayan diğer bir alan ise dağıtılmış algılayıcılar bulunduran yapıları içeren algısal yapılardır. Yer değiştirme, gerinim gibi mekanik değişimleri, sıcaklık ya da ısı akışını ve hasar yığılmasını tespit eden algılayıcılar ile kolayca yapılabilen hata tespiti sayesinde uzun ömürlü yapıların geliştirilmesi sağlanabilmektedir. Eyleyici ve algılayıcıyı bir arada bulunduran kontrollü yapılar ise uyarılmış yapılar ile algısal yapıların her ikisinin birden kapsamı altındadır. Bir kontrol sistemi ile ilişkilendirilen algılayıcı ve eyleyici bulunduran kontrollü yapıların kapsamında ise daha çok sayıda algılayıcıları ile aktif yapılar bulunmaktadır. Aktif yapılar, yapısal fonksiyonellik ve yük taşıma sistemlerinin bir parçası olabilme özellikleri bakımından kontrollü yapılardan ayrılmaktadırlar. Son olarak akıllı yapılar, yukarıda sözü geçen tüm yapıların kapsamında yer alırken, onlara ek olarak kontrol fonksiyonları ve hesaplama kabiliyetleriyle bir adım öne çıkmaktadırlar.

Hafiflikleri, bakım elverişlilikleri ve üstün performansları ile öne çıkan akıllı yapılar en genel halde aşağıdaki gibi üç sınıfta incelenebilirler:

- **Pasif akıllı yapılar:** Herhangi bir geri besleme sisteminden destek almamaktadırlar.
- **Aktif akıllı yapılar:** Tanıma ve tepki hızını arttıran geri besleme sistemi ile çalışmaktadırlar.
- **Çok akıllı yapılar:** Algılayıcı/Eyleyici ya da geri besleme sisteminin doğrusal olmayan özellikleri yardımıyla tepki şiddetini dahi belirlemektedirler.

Akıllı yapı teknolojisinde en yaygın biçimde; piezoelektrik malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar, elektrostriktif malzemeler, magnetostriktif malzemeler, magnetoreolojik / elektoreolojik akışkanlar ve fiber optikler olmak üzere altı grupta toplanabilir. Kendine has özellikleri ile sınıflandırılan akıllı malzemeler, şüphesiz birbirleriyle uyum içinde işleyebilecekleri hibrit yapıların tasarlanmasıyla çok daha verimli hale gelebileceklerdir. Akıllı yapılarda kullanılan başlıca akıllı malzeme sınıfları alt bölümler halinde açıklanmıştır.

2.1.1.1 Piezoelektrik malzemeler

İlerleyen bölümlerde oldukça detaylı bir biçimde ele alınacak olan piezoelektrik malzemeler akıllı yapılarda algılayıcı ve eyleyici olarak sıklıkla tercih edilen akıllı malzemelerdir. Elektroelastik malzemeler olarak da bilinen piezoelektrik malzemeler için doğrusal teoriler geliştirilmiş olmasına rağmen henüz kutupsuzlanma, doğrusal olmama, gecikme, sünme ve gerinim etkileri gibi hususlarda tam olarak açıklanamamış olaylar mevcuttur. Özellikle, elektromekanik etkilerden kaynaklanan doğrusal olmama davranışı tam anlaşılamamış bir olgudur. Bunun yanı sıra, piezoelektrik malzemelere uygulanabilecek elektrik alanın aşılması durumunda malzeme yapısında meydana gelen bozuntular konusunda da henüz gerçekçi bir modelleme yapılamamıştır. Yüksek kabiliyetleriyle piezoseramikler ve piezopolimerler, son yıllarda yaygın olarak kullanılan piezoelektrik malzemelerdir. Kurşun Zirkonat Titanat (PZT) günümüzün en bilinen piezoseramiği iken, Poliviniliden Florid (PVDF) en bilinen piezopolimeridir.

2.1.1.2 Şekil hafızalı alaşımlar

Gerinime maruz kaldıktan sonra belli bir sıcaklık etkisinde eski şekillerine geri dönme kabiliyetine sahip metaller olarak tanımlanan şekil hafızalı alaşımlar, hafızadaki şekillerine geri dönüş esnasında tahrik amaçlı kullanıma uygun miktarda kuvvet üretmektedirler. Düşük sıcaklıkta deforme olan şekil hafızalı alaşım (SMA) üzerindeki gerilmeler kaldırıldığında, sıcaklık artışı ile birlikte alaşım eski şekline geri dönmektedir. Şekil hafızalı alaşımın eski şekline geri dönebilmesi, bir miktar kütle ve güç mekanizması gerektirmektedir. Gerekli gücün ortaya çıkan kuvvete kıyasla oldukça düşük olması ise büyük avantaj sağlamaktadır. Kontrol edilebilirliklerinin yanında korozyon, yorulma ve çevresel kirliliğe dayanımları da son derece yüksek olan şekil hafızalı alaşımlar, bu özellikleri ile uzay yapılarının şekil kontrolünde tercih edilmektedirler. Fakat eski şekillerine geri dönüşlerinin oldukça yavaş olması bakımından dezavantajlıdır. InTi, CuZn, AgZn, AgCd, CuAl, NiAl gibi alaşımlar çok kullanılan şekil hafızalı alaşımlar olmakla birlikte nikel-titanyum ve bakır alaşımlar en çok bilinen şekil hafızalı alaşımlardır.

2.1.1.3 Elektrostrikatif malzemeler

Piezoelektrik malzemeler gibi elektrik alan etkisinde tepki oluşturan elektrostrikatif malzemeler, oluşturdıkları tepkinin elektrik alanın karesi ile orantılı olması

bakımından farklıdırlar. Kutupsallıktan bağımsız olarak her zaman pozitif yönlü yer değiştirme meydana getiren elektrostriktif malzeme (ES), aynı zamanda elektrik alan etkisiyle daima basma meydana getirmektedir. Piezoelektrik malzemelere kıyasla daha hızlı tepki gösteren elektrostriktif malzemeler, sıcaklık değişimlerine karşı yüksek hassasiyette olmalarından dolayı ise dezavantajlı konumdadırlar. Kurşun-magnezyum niyobat en çok bilinen elektrostriktif malzemelerdendir.

2.1.1.4 Magnetostriktif malzemeler

Manyetik alan etkisinde magnetostriktif malzemelerin içyapısındaki elektronlar yeniden düzenlenmektedir. Manyetik alana maruz kaldığında yer değiştirme oluşturan magnetostriktif malzeme (MS) için tersinirlik söz konusu olup, bir başka deyişle, kuvvete maruz kalan magnetostriktif malzemelerin de manyetik indüklemesi değişmektedir. Bu bakımdan piezoelektrik malzemeler ile benzerlik gösteren magnetostriktif malzemelerin demir, nikel, kobalt gibi bilinen tipleri oldukça düşük mertebede tepki oluşturmaktadırlar. Bu sebeple daha çok düşük frekanslı ve yüksek güçlü dönüştürücüler, motorlar ve hidrolik eyleyicilerde tercih edilmektedirler. Henüz yakın zamanda keşfedilen örnekleri ise daha fazla gerinim oluşturma kabiliyetleri ile öne çıksalar da gerekli manyetik alanı oluşturabilmekteki zorluklardan dolayı özellikle yüzeye gömülü eyleyici olarak kullanılamamaktadırlar. Yüksek kuvvet kapasitelerine karşın kırılgen yapıları, ağır olmaları ve tepki vermedeki gecikmeleri ile dezavantajlıdırlar. Piezoelektrik ve elektrostriktif malzemelere kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilen magnetostriktif malzemelerin günümüzde en yaygın kullanılanı Terfenol-D'dir.

2.1.1.5 Magnetoreolojik/Elektroreolojik akışkanlar

Manyetik alan ya da elektrik alan etkisiyle akışkan özelliklerini değiştirebilen akışkanlar olarak tanımlanan magnetoreolojik akışkan (MR) ve elektroreolojik akışkan (ER) malzemeler, yalıtkan bir ortamda asılı kalmış 1 ile 100 mikron mertebesinde değişen boyutta parçacıklar bulunduran yapıdadırlar. Akışkanın elektrik alana maruz kalması, parçacıkların kutuplaşmasını kolaylaştırmakta ve elektrotlar arasında kayma deformasyonuna dayanıklı uzun zincirlerin oluşmasını sağlamaktadır. Fiziksel olarak bir milisaniyeden bile kısa sürede, serbest haldeki viskoz akışkan hallerinden kontrol edilebilir yarı katı hale geçebilme ve tersinir hal değişimi kabiliyetine sahiptirler. Hızlı hal değişimleri, elektrik sinyallerine çok hızlı

tepki üretebilen sistemlerle donatılmış aletler ile birlikte kullanılmalarını gerektirmektedir. İki algılayıcı arasına yerleştirilmeleri durumunda, ani hareketlere karşı sönümleyici olarak davranan akışkan, yapının dayanımını arttırmaktadır. Dış etki ile viskozluğunu arttıran akışkan, etkinin çok büyük şiddette olması durumunda tepkisiz kalabilmektedir. Ayrıca aşınma ve kimyasal dengesizlik gibi sorunlar halen çözülememiştir. Daha çok düşük frekanslı uygulamalarda tercih edilen magnetoreolojik/elektroreolojik akışkanlar, düşük sıcaklıktaki uygulamalarda verimli olmamaktadırlar. Doğrusal olmayan davranışları ile göze çarpan bu akıllı malzemelerden magnetoreolojik akışkanlar elektroreolojik akışkanlara göre daha yoğun olmaları bakımından yapıya ek ağırlık katkısında bulunmaktadır. Alumino-silikat bilinen en yaygın elektroreolojik akışkandır.

2.1.1.6 Fiber optikler

Yalnızca algısal özellikteki yapılarıyla fiber optikler, yüksek hassasiyetleri, sıcaklık kararlılıkları ve oldukça kısa tepki süreleri ile avantajlıdırlar. Öte yandan bakım zayıflıkları, hantal kontrol sistemleri ve yüksek maliyetleri ile diğer akıllı malzemelere kıyasla daha az tercih edilmektedirler. Fabry-Perot ve lifli Bragg ızgara yaygın kullanılan fiber optiklerdir.

Akıllı yapılar, yukarıda açıklanan farklı gruplardaki malzemelerin birbirlerinden farklı özellikleri dolayısıyla, kendilerine özgü kabiliyetleri ile ihtiyaca göre tasarlanmaktadır. Piezoelektrik malzemelere dahil olan PZT gibi piezoseramikler, diğer akıllı malzemelere göre daha yüksek olan katılıkları, elastiklik, elektriksel geçirgenlik ve piezoelektrik özellikleri ile başta eyleyici tasarımında olmak üzere çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Maruz kalınan elektrik alana kıyasla oldukça küçük gerinim değerlerinin meydana gelmesi ise PZT'lerin kullanımlarında karşılaşılan en önemli husustur. Yine piezoelektrik malzemelerden PVDF gibi piezopolimerler hasara karşı dayanıklı olmalarına rağmen, katılık bakımından zayıftırlar. PZT'lere kıyasla aynı elektrik alan etkisinde daha fazla gerinim oluşturan PVDF'ler eyleyici tasarımında tercih edilen diğer bir akıllı malzeme sınıfıdır. Kurşun magnezyum niyobat (PMN) gibi elektrostrikatif malzemeler ise yüksek katılıkları ile avantajlı olsalar da sıcaklık dengesindeki zayıflıkları ve yüksek elektriksel geçirgenlikleri için yüksek elektrik akımı gereksinimleri ile kullanım alanlarını sınırlamaktadırlar. Aktif gerinim değerleri ise piezopolimerlerden daha düşüktür. Bir

magnetostriktif malzeme olan Terfenol-D ise piezoseramiklerle eşdeğer uyarıcı enerjisi, katılığı ve geniş frekans uygulamalarına yatkınlığı ile öne çıksa da beraberinde bulunması gereken manyetik bobinden kaynaklanan ağır yapısı ile daha az tercih edilmektedir. Nitinol gibi şekil hafızalı alaşımların, piezoelektrik ve magnetostriktif malzemelere göre daha yüksek olan gerinim kapasitelerine rağmen kullanımları oldukça düşük frekanstaki uygulamalarla sınırlı kalmaktadır. Çizelge 2.1’de yaygın kullanıma sahip akıllı malzemelerin belirgin özellikleri ifade edilmiş ve böylece farklı akıllı malzemelerin birbirleri ile daha somut olarak kıyaslanması sağlanmıştır. Çizelgeden de görüleceği üzere özellikle havacılıkta vazgeçilmez bir unsur olan hafiflik bakımından PVDF en kullanışlı akıllı malzemedir. PMN ise yüksek elastisite modülü ile diğer malzemelerin arasında öne çıkmaktadır. Yüksek gerinim kabiliyetleri ile şekil hafızalı alaşımlar kullanışlı gözüktükçe de yüksek enerji yoğunlukları ile dikkat çekmektedirler.

Çizelge 2.1 : Akıllı malzemelerin kıyaslanması [43].

	PZT-5	PVDF	PMN	Terfenol-D	Nitinol
Sınıf	Piezoseramik	Piezopolimer	ES	MS	SMA
Maksimum Gerinim	% 0,13	% 0,07	% 0,1	% 0,2	% 2 – 8
Elastisite Modülü	60,6 GPa	2 GPa	64,5 GPa	29,7 GPa	28 – 75 GPa
Yoğunluk	7500 kg/m ³	1780 kg/m ³	7800 kg/m ³	9250 kg/m ³	7100 kg/m ³
Sıcaklık Aralığı (°C)	-20 ile 200	düşük	0 ile 40	yüksek	-
Frekans Aralığı	0 ile 100 MHz	0 ile 10 MHz	100 kHz	<10 kHz	<5 kHz
Uyarıcı Enerji Yoğunluğu	6,83 J/kg	0,28 J/kg	4,13 J/kg	6,42 J/kg	252 J/kg

2.1.2 Akıllı yapıların kullanım alanları

Akıllı yapı kavramı, temelinde değişen ortam koşulları ya da bir uyarıcı etkisinde belirli bir amaca uygun olarak tepki oluşturma kabiliyeti öngörölmüş olsa da çözölməsi gereken bir optimizasyon problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Akıllı yapıların tasarlanması oldukça karmaşık bir problem olmakla birlikte, modelleme ve simölasyon optimum tasarımın en önemli unsurlarıdır. Sonlu elemanlar yöntemi gibi yüksek performanslı hesaplama yöntemleri deneysel uygulamalara elverişli olmayan ya da analitik olarak modellenemeyen olgular için anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu gibi hesaplama yöntemlerinde göz önünde canlandırma ve rakip konfigürasyonları karşılıklı olarak inceleme kabiliyetleri tüm optimizasyon süreci boyunca geçerli olmaktadır. Hesaplamalı ve yapay zeka tabanlı yöntemler de akıllı yapıların güvenilirlik ve korunabilirlik bakımından hatırı sayılır tespit olgularının geliştirilmesine imkan sağlamaktadır.

Araştırmacılar, akıllı yapılar ve malzemeler ile ilgili hali hazırda geliştirilmeyi bekleyen hususlar üzerine çalışmalar yapmaktadırlar. Mevcut piezoelektrik ve elektrostriktif malzemelerin aktif gerinim değerlerinin 3 ila 10 katına kadar çıkarılması ile yapısal uygulamalar için daha makul kontrol seviyelerine ulaşılmış olacaktır. Ayrıca şekil hafızalı alaşımlara benzer fakat daha geniş frekans aralığında kullanılabilen yeni akıllı malzemelerin geliştirilmesi ile de daha üstün eyleyiciler tasarlanmış olacaktır. Algılayıcılar için de benzer durum söz konusu olup geliştirilecek yeni akıllı malzemeler ile kontrol kabiliyeti daha yüksek algılayıcılar tasarlanmış olacaktır. Teorik olarak ortaya konulan yapısal kontrol algoritmalarının gerçeğe daha yakın biçimde geliştirilmesi ve daha yüksek mertebeli kontrol sistemlerinin kullanılması ile akıllı yapıların kontrol uygulamalarında daha verimli kullanılması sağlanacaktır. Araştırmacılar tarafından geliştirilmeye çalışılan diğer bir konu esas yapıya daha az etkisi bulunan akıllı yapıların tasarlanmasıdır. Daha ucuz ve kolay üretilebilirlik, güvenilirlik ve tamir edilebilirlik de akıllı yapılar ile ilgili geliştirilmesi beklenen hususlar olarak günümüz araştırmacılarının ilgisini çekmektedirler.

Akıllı malzemelerin tek başlarına ihtiyaç duyulan tepkiyi oluşturmadağı durumlar ortaya çıkabilmektedir. Daha önceki bölümde gruplandırılan akıllı malzemelerden, farklı özellikteki birkaç grubun bir arada kullanıldığı hibrit eyleyicilerin tasarlanması günümüz araştırmacılarının ilgisini çeken bir başka konudur. Akılcı tasarımlarla iki

ya da daha fazla akıllı malzemenin uyum içinde çalışabileceği eyleyicilerin geliştirilmesi bazı sistemlerde gereklilik duyulan bir husustur. Örneğin, piezoelektrik seramik ile elektroeolojik akışkanın birlikte kullanılması çok daha verimli bir çözüm sunabilir. Daha çok malzeme bilimi ile ilgilenen araştırmacılar tarafından incelenen bu konuda sağlanacak gelişmeler ile daha güçlü ve daha küçük boyutta akıllı yapılar tasarlanabilecektir. Mevcut akıllı malzemelerin sağladığından daha fazla gerininin meydana getirilebilmesi ile uçak kanadı ve helikopter palası gibi yapılarda aeroelastik kararlılığı geliştirecek burulma açıları oluşturulabilmesi mümkün olacaktır. Böylelikle aerodinamik taşıması artmış, sürüklemesi azalmış, dinamik tutunma karakteristiği gelişmiş uçaklar ile daha yüksek manevra kabiliyeti ve güvenilirlik sağlanabilecektir.

Modern hava, kara, deniz ve uzay araçları, silah sistemleri, endüstri makineleri gibi uygulamalarda yeni nesil sistemlerin geliştirilmesinde akıllı yapıların oynayacakları önemli rolü kavrayan araştırmacılar, sayısız yenilik için vakit kaybetmeden harekete geçmişlerdir [39]. Özellikle, akıllı yapılar ile kompozit malzemeler birlikte kullanıldığında istenen üstün kabiliyetlere sahip hafif ve dayanıklı yapılar oluşturulabilir. Mevcut malzemeler ile istenen özelliklerin elde edilememesi durumunda devreye giren kompozit malzemeler, ihtiyacı karşılama yetisine sahip olduklarından önemleri günden güne gelişen teknolojiyle birlikte hızla artmaktadır. Dolayısıyla, kompozit malzemeler ile akıllı yapıların ihtiyacı karşılayabilecek şekilde birlikte kullanılması ile bu iki malzeme teknolojisinden en verimli haliyle yararlanılmasını sağlayacaktır.

Hata tespiti, titreşim ve şekil kontrolü, denizaltılarda titreşim ve gürültü kontrolü, uçak ve füzeler için uyarlanabilir kanatların üretimi, silah ateşleme kontrolü, yolcu konforu için araç içi gürültü kontrolü, aktif motor bağlantıları ile titreşim kontrolü, akıllı algılayıcılar ile araç sıhhat gözetimi, üretimde makine ve alet kontrolü, havalandırma ve klima sistemlerinde gürültü kontrolü, madencilik makine tertibatında gürültü kontrolü, uzay araçlarında anten ve uydu yapımının yanı sıra inşaat sektöründe köprü yapımı ve depremde korunma, sağlık sektöründe mikro-robotik, tele-ilâç ve cerrahi teçhizat yapımı akıllı yapıların havacılıktan inşaata hatta sağlığa kadar uzanan geniş kullanım alanlarına verilebilecek örneklerdir.

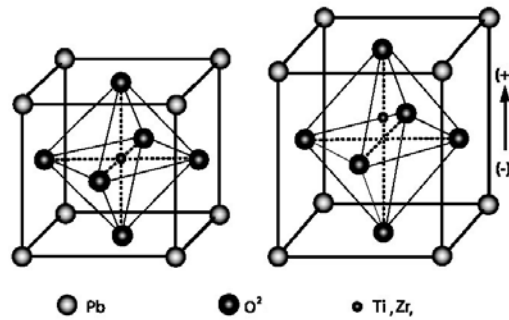
Havacılık alanında akıllı yapıların kullanılması ile özellikle titreşim, şekil ve gürültü kontrolü ile yapıların dinamik ve aeroelastik özelliklerinin iyileştirilmesi

amaçlanmaktadır. Uçak kanatları ve kontrol yüzeyleri, helikopter rotor elemanları, uçak hava alıkları ve egzost çıkışlarında kullanılan akıllı yapılar konusunda özellikle ülkemiz havacılığı gelişen teknolojiyi yakalamalı ve bir adım önüne geçmelidir.

2.2 Piezoelektrik Malzemeler

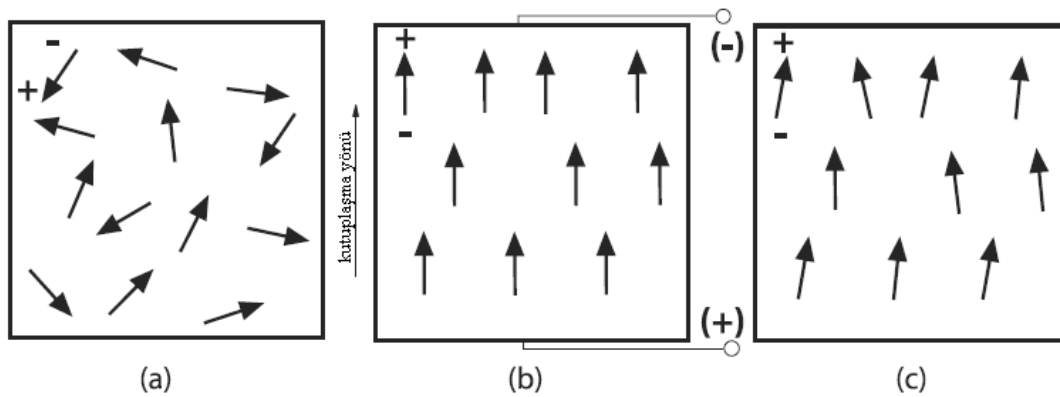
Yüzyıldan uzun bir zaman öncesinde turmalin kristali olarak tanımlanan çeşitli renklerdeki şeffaf taşlarda ilk olarak fark edilen piezoelektrik etki daha sonra pek çok bilim adamı tarafından incelenmiş olsa da Curie kardeşler tarafından yapılmış olan deneysel çalışmalarla tam olarak keşfedilmiştir. Daha önceden de bahsedilmiş olan isim kökeninden de anlaşılacağı üzere basınç etkisiyle elektrik yükü meydana getirme olarak tanımlanan piezoelektrik etki, ilk bakışta benzer görülebilen sürtünmenin oluşturduğu temas elektrik etkisi ya da kristallerin ısıtılmasının elektrik yükü oluşturduğu piroelektrik etkiden de kolayca ayrılabilir. Piezoelektrik etkinin tersinirlik özelliği yani piezoelektrik malzemelerin tersi yöndeki kabiliyetleri de kullanım alanlarını genişleten bir faktör olmuştur.

En basit haliyle piezoseramikler, büyük metal iyonları ve oksijenden oluşan kafes yapının içinde konumlanmış dört saçaklı metal iyonunun oluşturduğu kristal yapılardan meydana gelmektedirler. Şekil 2.2’de bu kristal yapının kutuplaşma öncesi ve sonrası halleri görülmektedir. Şekilden de teyit edilebileceği üzere, Curie sıcaklığı olarak tanımlanan kritik sıcaklık değerinin üzerine kadar ısıtılan kristal yapılı piezoseramik simetrik kübik yapıda ve kutup çifti momentinden yoksun haldedir. Öte yandan, Curie sıcaklığının altındaki piezoseramikler dörtgen simetride ve dolayısıyla kutup çifti momentine sahip kristallerden oluşmaktadır. Kümelenmiş kutup çiftlerinin oluşturduğu yönelimin meydana getirdiği kutup çifti momenti ise net bir kutuplaşmaya neden olmaktadır.



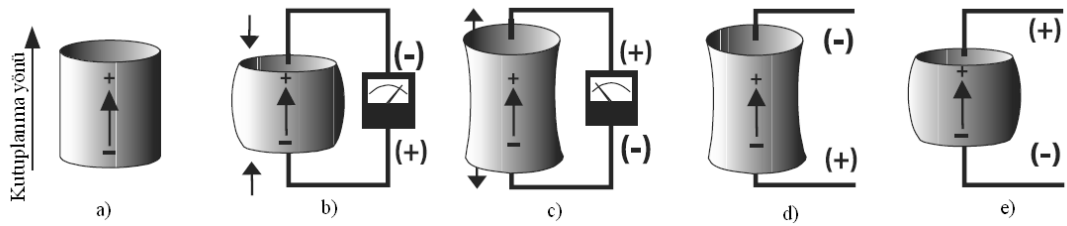
Şekil 2.2 : Piezoseramik kristalinin kutuplaşma öncesinde ve sonrasında yapısı [44].

Çoğunlukla kristalli katı yapıda bulunan piezoelektrik malzemeler, tek kristalli ve çok kristalli olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Tek kristalli katılar doğada bulunmasının yanında yapay olarak da elde edilebilmekte iken, çok kristalli yapılar piezoelektrik özelliği sonradan kazandırılan malzemelerdir [41]. Genellikle ticari amaçlarla elde edilmek istenen piezoelektrik malzemelerin üretimi, yüksek şiddette elektrik alana maruz bırakılan malzemeye yüksek sıcaklık uygulanması ile mümkündür. Kutuplanma adı verilen bu işlem ile istenen yönde piezoelektrik özelliğe sahip malzemeler elde edilebilmektedir. Kutuplanma işleminin ardından ise malzemedeki kutup çiftlerinin gelişi güzel dağılmalarından dolayı piezoelektrik olgu etkinliğini kaybetmektedir. Kutuplanma eksenî yönünde potansiyel fark uygulanması ile kutup çiftleri yeniden yönlendirilirken, malzemenin piezoelektrik etkisinden dolayı bir şekil değişikliği meydana gelmektedir. Piezoelektrik etkinin malzemede istenildiği biçimde elde edilmesini sağlayan kutuplanma işlemi sırasında malzeme içindeki kutupların davranışı Şekil 2.3'te aşamalar halinde gösterilmiştir. Başlangıçta düzensiz yönelmiş kutuplar birbirlerinin yönelimlerinden bağımsız olarak sıralanmışlardır. Curie sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta, büyük bir elektrik alana maruz kalan kutup çiftleri elektrik alanın etki yönünde dizilmektedirler. Kutuplaşma adı verilen bu işlemin ardından elektrik alanın da etkisinde yapıda bir genişleme gözlenmektedir. Elektrik alanın kaldırılmasıyla ise kutupların yöneliminde küçük sapmalar gözlenmekteyse de malzemenin halen daha kutuplaşma etkisinde olduğu söylenebilir. Son durumdaki kutuplaşma etkisinden dolayı uzayan yapıda meydana gelen uzama miktarı oldukça küçük ve genellikle mikrometre mertebelerinde olmaktadır.



Şekil 2.3 : Kutuplanma süreci: a) Serbest durum, b) Elektrik alan etkisi altında, c) Elektrik alan kaldırıldıktan sonra [44].

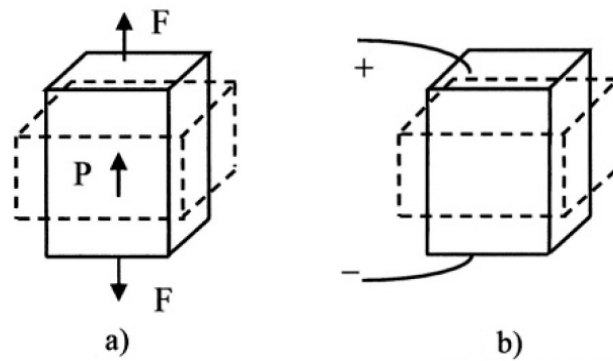
Kutuplanmış piezoelektrik malzemenin farklı etkilere karşı değişen davranışı soldan sağa doğru Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Daha önceden de belirtildiği üzere, mekanik olarak çekme ya da basmaya maruz kalan piezoelektrik malzemede kutup çifti momentinin oluşmasından dolayı elektriksel potansiyel fark meydana gelmektedir. Şekil 2.4a'da gösterilen piezoelektrik malzeme başlangıç olarak bir kutuplanmaya maruz bırakılmıştır. Kutuplaşma yönünde basma ya da kutuplaşma yönüne dik çekme etkisi altında, kutuplanma potansiyel farkı ile aynı kutupsallıkta bir potansiyel fark meydana gelmektedir. Kutuplaşma yönünde çekme ya da bu yöne dik basma etkisinde ise kutuplanma potansiyel farkıyla zıt yönde bir potansiyel fark meydana gelmektedir. Şekil 2.4b ve 2.4c'de gösterilmiş olan bu durumlarda piezoelektrik malzeme algılayıcı olarak kullanılabilir. Piezoelektrik malzemenin özelliklerine bağlı gerilme değerine kadar, uygulanan gerilme değeri ile gerilme etkisinde oluşan elektriksel potansiyel farkı doğrusal olarak orantılıdır. Aynı orantı piezoelektrik malzemeye uygulanan elektriksel potansiyel farkı ve oluşan gerilim arasında da mevcuttur. Kutuplanma potansiyel farkı ile aynı yönde kutupsallığa sahip bir potansiyel fark etkisinde ise Şekil 2.4d'de görüleceği üzere piezoelektrik malzeme uzar ve çapı küçülür. Şekil 2.4e'de kutuplanma potansiyel farkı ile zıt yönde kutupsallığa sahip bir potansiyel fark etkisinde piezoelektrik malzemenin kısalıp kalınlaştığı görülmüştür. Alternatif yani değişken bir elektriksel potansiyel fark uygulanması durumunda ise piezoelektrik malzeme Şekil 2.4d ve 2.4e'de tasvir edilen genişleme ve daralma hareketlerini uygulanan potansiyel farkın frekansında tekrarlayacaktır. Bu durumda, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren piezoelektrik malzeme eyleyici olarak kullanılabilir [44].



Şekil 2.4 : Kutuplanmış piezoelektrik malzemenin farklı uyarılara karşı davranışı [44].

Yüklü parçacıklardan oluşan katı maddelerin yapılarındaki artı ve eksi yüklü parçacıklar serbest halde dengede bulunmaktadır. Fakat mekanik olarak malzemeye bir kuvvet uygulanması durumunda, yüzey yükleri oluşabilmektedir. Kristal yapıda piezoelektrik etkinin oluşması da bu yüzey yüklerinin meydana

gelmesine bağlıdır. Bununla birlikte kristal yapının simetrik özellikleri de sözü geçen yüklerin oluşmasını etkilemektedir. Malzemelerin kristal kafes yapısında merkezi simetrik özellik bulundurmaması yani kafesi oluşturan bir atomik yapının diğerlerinden farklı bir ekseninde bulunması durumunda piezoelektrik etki meydana gelmektedir. Dolayısıyla, simetri merkezi olmayan kristaller piezoelektrik etkinin meydana gelebileceği en uygun malzeme grubu olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Elektriksel olarak yüklenmemiş ve yapısal simetri merkezi bulunmayan bir kristale uygulanan basınç, artı yüklerin merkezi ile eksi yüklerin merkezinin birbirlerinden hafifçe ayrılmasına ve kristalin karşılıklı yüzeylerinde zıt yüklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yüklerin bu şekilde ayrılması bir elektrik alanı yaratmakta ve kristalin karşılıklı yüzeyleri arasında ölçülebilir bir potansiyel farkı oluşturmaktadır. Başka bir deyişle, kristal kafes yapıda bulunan iyonların yer değiştirmeleri sonucunda ortaya çıkan piezoelektrik etki, malzemenin mekanik ve elektrik özellikleri arasındaki etkileşimin göstergesidir. Daha önceden belirtildiği üzere, piezoelektrik etkiyi ifade eden bu sürecin tersi de geçerlidir. Bu bilgiler ışığında piezoelektrik etkinin doğrudan ve ters piezoelektrik etki olmak üzere iki grupta incelendiği söylenebilir. Piezoelektrik özellikteki malzemeye uygulanan kuvvetle orantılı olarak ölçülebilecek küçüklükte bir elektrik farkı oluşturması doğrudan piezoelektrik etki olarak tanımlanır. Ters yönde ise, elektrik yükü ya da potansiyel farka maruz kalan piezoelektrik malzemenin mekanik gerilme ya da gerinim meydana getirmesi ters piezoelektrik etki olarak tanımlanmaktadır. Yapısal saptamada kullanılan doğrudan piezoelektrik etki altındaki piezoelektrik malzemeler algılayıcı tasarımında kullanılmaktadırlar. Akıllı yapıların titreşim kontrolünde kullanılan ters piezoelektrik etki altındaki piezoelektrik malzemeler ise eyleyici tasarımında tercih edilmektedirler. Şekil 2.5'te doğrudan ve ters piezoelektrik etki altında yapının davranışı gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : a) Doğrudan piezoelektrik etki, b) Ters piezoelektrik etki [45].

2.2.1 Piezoelektrik malzemelerin sınıflandırılması

En genel haliyle, basınca maruz kaldığında elektrik yükü, elektrik alan içinde bırakıldığında ise gerinim oluşturan piezoelektrik malzemelere doğada turmalin, kuvars, topaz ve Rochelle tuzu gibi tek kristalli malzemeler örnek verilebilir. Bununla birlikte özellikle titreşim kontrolünde eyleyici olarak kullanılabilecek biçimde piezoelektrik özellikte üretilen çok kristalli yapıdaki Kurşun Zirkonat Titanat (PZT) en yaygın kullanılan piezoseramik ve yarı kristalli yapıdaki Polivinilidin Florid (PVDF) ise en yaygın kullanılan piezopolimerdir. Bunların yanı sıra, insan kemiğinde de piezoelektrik olgu bulunduğu belirlenmiştir [39].

Geniş kapsamlı özelliklerinden dolayı piezoseramikler ve piezopolimerler en yaygın kullanılan piezoelektrik malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Her iki grubun farklı özellikleri ise birbirlerinden farklı alanlarda tercih edilmelerine neden olmaktadır. Yaygın kullanım alanına sahip bu iki piezoelektrik malzeme grubu alt başlıklar halinde ele alınmıştır.

2.2.1.1 Piezopolimerler

Piezopolimer malzemelerde, moleküler kutup çiftlerinin aynı doğrultuda yönlendirilmesi ile piezoelektrik etki elde edilmektedir. En bilinen piezopolimer olan PVDF, florid atomlarının karbon atomlarını çekmesiyle oluşan CF_2 moleküllerinin kutuplaşmaları neticesinde elektrik alan etkisinde yönlenmeleriyle piezoelektrik etki sağlamaktadır. Şekil değiştirme durumunda oldukça yüksek mertebeli kutup çiftleri oluşturan piezopolimerler esnek plastik yapıda bulunmaktadır. Esneklikleri, yumuşak yapıları ve hafiflikleri bakımından avantajlı olan PVDF'ler film gibi ince plaklar halinde oldukça ucuz maliyetle üretilmelerinden dolayı farklı şekillerde ve boyutlarda kolayca elde edilebilirler. Özellikle algılayıcı tasarımında tercih edilen PVDF'ler kolay şekil alabilmeleri ve yüzeye yapışabilme özellikleri ile akıllı yapı uygulamalarında tercih edilmektedirler. Sıcaklık ve nem gibi çevre şartlarından çabuk etkilenmeleri ise PVDF'lerin düşük katılıklarının yanında kullanımlarını sınırlayan bir özelliktir.

2.2.1.2 Piezoseramikler

Ferroelektrik seramikler olarak da bilinen piezoseramikler Curie sıcaklığı olarak tanımlanmış kritik sıcaklık değerinin altındaki sıcaklıklarda kutuplaşmamış halde

bulunmaktadırlar. Curie sıcaklığının üstünde kristal yapısı karmaşılaşan piezoseramikler eksenel simetrik olmayan faz değişimine uğramaktadırlar. Faz değişimi ise kristal yapıda doğal elektrik kutuplaşmasına sahiptir. Aynı şekilde kutuplaşmış kısımlar ferroelektrik alanlar olarak tanımlanır ve aynı alan içindeki kutup çiftleri aynı doğrultuda yönlendirilmişlerdir. Gevrek yapılarından dolayı küçük yüzey alanıyla orantılı boyutlarda ve basit şekillerde üretilen piezoseramiklerin en bilineni PZT'dir. Geniş frekans alanına sahip PZT'ler eyleyici tasarımında sıklıkla kullanılmaktadırlar. PZT'lerin yanı sıra kurşun metaniobat (LMN) ve kurşun titanat (LT) da kullanılan diğer piezoseramik çeşitleridir. Piezoseramikler en genel halde yumuşak ve sert olmak üzere iki grupta incelenebilmektedir. Yüksek katılıkları ve elektrik enerjisi ile mekanik enerji dönüşümündeki verimlilikleri piezoseramik malzemelere daha kapsamlı uygulama alanı sağlamaktadır. Başka deyişle, uygulanan düşük elektriksel potansiyel farklara kıyasla oldukça büyük kuvvetler meydana getiren piezoseramikler, mekanik ve elektrik davranışı daha güçlü bağdaştırmalarının yanı sıra çok daha kolay üretilibilmeleri bakımından avantajlıdırlar.

2.2.2 Piezoelektrik malzemelerin özellikleri

Bilim ve mühendisliğin çeşitli alanlarında piezoelektrik malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte piezoelektrik malzemelerin daha kapsamlı incelenmesine gerek duyulmuştur. Özellikle piezoelektrik malzemelerin ana yapıyla ilişkisini modelleyen sistemlerin çözümlenmesi ve bu sayede piezoelektrik malzemelerin ana yapıya etkisinin incelenmesi ile ilgili çalışmalar büyük önem kazanmıştır. Piezoelektrik malzeme kullanımıyla, yapıların kalınlık boyunca homojen olmayan özelliklerinin ve değişken geometrilerinin teoride oluşturulan modellere en gerçek haliyle yansıtılması büyük hassasiyet gerektiren konulardır.

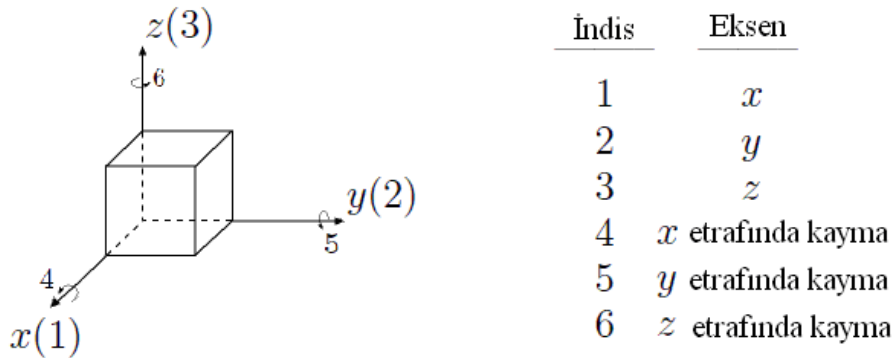
Piezoelektrik malzemelerin anizotropik yapılarından dolayı mekanik ve elektriksel davranışları ve elektriksel yanıtları, çevreden uygulanan elektrik alanının uygulama eksenine bağlıdır. Dolayısıyla, piezoelektrik malzemenin konumunun tasarım esnasında hassasiyetle belirlenmesi gerekmektedir.

Doğrusal davranış sergileyen piezoelektrik malzemeler dinamik uygulamalarda avantajlıdırlar. Başta eyleyici ve algılayıcı üretiminde kullanılan piezoelektrik malzemeler, titreşim ve şekil kontrolü, makine parçalarının üretimi gibi mühendislik uygulamalarında da sergiledikleri avantajları ile tercih edilmektedirler. Düşük

sıcaklık hassasiyetleri ile kontrol sistem tasarımında tercih edilmektedirler. Doğrudan ve ters piezoelektrik etkiye sahip PZT malzemeler tek başlarına algılayıcı ve eyleyici olarak kullanılabilirler.

Oldukça küçük boyutları ve çok hafif yapıları ile esas yapıda önemli bir kütle artışına neden olmayan piezoelektrik malzemeler, bu özellikleri ile esas yapının özelliklerini değiştirmeksizin algılayıcı ve eyleyici olarak yapısal kontrolde kullanılabilirler. Elverişsiz çalışma ortamına karşı da oldukça dayanıklı olan piezoelektrik malzemeler, söz gelimi uzay ortamındaki güneş ışınımına çok uzun yıllar boyunca dayanabilirler.

Mekanik ve elektriksel davranışı ilişkilendiren piezoelektrik malzemelerin kabiliyetleri çeşitli katsayılar ve sabitlerle tanımlanmıştır. Bu çalışmada, piezoelektrik malzemenin doğrusal davranışı kabulüyle IEEE tarafından belirlenen malzeme özellikleri ele alınmıştır. Yüksek elektrik alan ve yüksek mekanik gerilme değerlerine maruz kalan piezoelektrik malzemelerin doğrusal olmayan davranış sergiledikleri bilinmektedir. Fakat çalışma kapsamında düşük elektrik alan ve düşük mekanik gerilme etkisi altında doğrusal davranış sergileyen piezoelektrik malzemeler incelenmiştir. Piezoelektrik malzemelerin kabiliyetlerini ifade eden çeşitli malzeme sabitleri ve katsayıları gibi özellikler maddeler halinde açıklanmıştır. Malzeme özelliklerinin tanımlanmasında esas alınan eksen takımı ise Şekil 2.6'da görülmektedir. Tanımlanan bu eksen takımında, 3 kutuplanma yönüne daima paralel olan eksendir. Daha önceden açıklandığı üzere, kutuplanma yönü üretim esnasında, piezoelektrik malzemenin elektrot çiftleri arasında maruz bırakıldığı oldukça yüksek doğru akım yönü olarak belirlenmektedir. Aşağıdaki şekilde gösterilen eksen takımında 1, 2 ve 3 eksenleri birbirleriyle ortogonal olup; 4, 5 ve 6 ise sırayla 1, 2 ve 3 eksenleri etrafında kaymayı ifade etmektedir.



Şekil 2.6 : Malzeme özellikleri için belirlenen eksen takımı [44].

2.2.2.1 Curie sıcaklığı

Simetrik olmayan piezoelektrik yapıdaki kristal, T_C ile ifade edilen Curie sıcaklığında simetrik yapıya dönüşmektedir. Oluşan simetrik kristal yapıda ise daha önceden bahsedildiği üzere piezoelektrik olgu özelliği bulunmamaktadır. Santigrat derece birimiyle ifade edilen Curie sıcaklığında meydana gelen bu faz değişimi ise malzemenin elektriksel geçirgenlik kabiliyetinde ani bir artışa neden olmaktadır.

2.2.2.2 Etkileşim katsayısı

Elektromekanik etkileşim katsayısı olarak da ifade edilen etkileşim katsayısı (k), meydana gelen mekanik enerjinin uygulanan elektrik enerjisine oranı ya da meydana gelen elektrik enerjisinin uygulanan mekanik enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. Farklı titreşim modları için hesaplanabilen etkileşim katsayısı en genel haliyle yapının enerji dönüşüm verimliliğini ifade etmektedir. Kritik frekanslarda elde edilmesi karmaşık hal alan etkileşim katsayısı, grafikler aracılığıyla belirlenmektedir. Denklem 2.1a ve 2.1b’de sırasıyla doğrudan ve ters piezoelektrik etki için etkileşim katsayısı ifade edilmiştir.

$$k = \sqrt{\frac{\text{Meydana gelen elektrik enerjisi}}{\text{Uygulanan mekanik enerji}}} \Rightarrow (DPE) \quad (2.1a)$$

$$k = \sqrt{\frac{\text{Meydana gelen mekanik enerji}}{\text{Uygulanan elektrik enerjisi}}} \Rightarrow (TPE) \quad (2.1b)$$

Etkileşim katsayısı için özel durumlar söz konusu olup, etkin etkileşim katsayısı olarak tanımlanan k_{eff} yapının şekline, titreşim modlarına, malzemeye ve ilgili tasarıma da bağlı olmak üzere yaklaşık bir değeri belirtmektedir. Kalın diskler için etkileşim katsayısı k_D ile, düzlemsel etkileşim katsayısı k_p ile kalınlık etkileşim katsayısı ise k_t ile ifade edilmektedir. Genellikle matrisler halinde tanımlanan malzemenin etkileşim katsayısı, k_{ij} biçiminde gösterilmektedir. Bu durumda j uygulanan kuvvetin ya da oluşan gerinin yönünü belirtirken, i elektrotların dik olduğu eksen olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle, uygulanan ya da meydana gelen elektrik alanın yönü i ile kuvvet ya da gerinin yönü ise j ile gösterilmektedir. Örneğin, Şekil 2.6’da verilen eksen takımına göre, 3 eksen

yönünde elektrik alana maruz kalan piezoelektrik malzemede 1 yönünde gerinim meydana gelmesi durumunda bu etkileşim k_{31} katsayısı ile ifade edilmektedir. Literatürde k_{31} yanlamasına etkileşim katsayısı, k_{33} boylamasına etkileşim katsayısı, k_{15} ise kayma etkileşim katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

2.2.2.3 Elektriksel geçirgenlik katsayısı

Birim alan başına düşen elektrik yükü olarak tanımlanan elektriksel geçirgenlik katsayısı, genel olarak bir matrisle ifade edildiğinden ξ_{ij} ile gösterilmektedir. Uygulanan elektrik alan yönü i eksen, oluşan elektrik yükü j eksen olmak üzere piezoelektrik malzemelerin büyük çoğunluğunda yalnızca elektrik alanın uygulandığı yönde bir elektriksel değişim meydana gelmektedir. Bu sebeple elektriksel geçirgenlik matrisi, ξ_{jj} elemanlarından oluşan köşegen matris olarak karşımıza çıkmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin iletkenliğini ifade eden elektriksel geçirgenlik katsayısı yerine pratikte daha çok κ ile gösterilen bağıl elektriksel geçirgenlik sabiti kullanılmaktadır. Bağıl geçirgenlik sabiti olarak da tanımlanan bu özellik malzemenin elektriksel geçirgenliğinin uzay ortamı geçirgenliğine oranı olarak ifade edilmektedir. Bazı kaynaklarda serbest olarak ölçülen bağıl geçirgenlik sabiti κ^T olarak, mesnetli olarak ölçülen ise κ^S olarak gösterilmektedir. Mekanik rezonansa ulaşılmadan 0,001 saniyede standart öz direnç köprüsü ile yapılan statik sığa ölçümleriyle belirlenen bağıl geçirgenlik sabiti birimsiz bir büyüklük olup Denklem 2.2’de verildiği gibi ifade edilmektedir. ξ_0 ile gösterilen serbest ortam geçirgenlik sabiti $8,854 \times 10^{-12} \text{ Farad/metre}$ değerindedir. C_0 1 kHz’de ölçülen sığa olup birimi *Farad* (F), h_e elektrotlar arası mesafe olup birimi *metre* (m) ve A_e elektrotların alanı olup birimi *metrekare* (m^2)’dir.

$$\kappa^T = \frac{C_0 \times h_e}{\xi_0 \times A_e} \quad (2.2)$$

2.2.2.4 Geçirgenlik kayıp katsayısı

Piezoelektrik malzemenin verimliliğini belirleyen önemli parametrelerden olan geçirgenlik kayıp faktörü, etkin direncin bu direnci oluşturan etkin tepkiye oranı olarak ifade edilmektedir. Kayıp eğimi olarak da bilinen geçirgenlik kayıp katsayısı,

kayıp açısının eğimi ($\tan \delta$) ile tanımlanmış olup Denklem 2.3'te verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\tan \delta = \frac{\text{Etkin direnç}}{\text{Etkin tepki}} \quad (2.3)$$

2.2.2.5 Mekanik kalite katsayısı

Rezonans frekansının keskinliğiyle ilgili olan mekanik kalite katsayısı, çevrim başına sağlanan enerjinin çevrim başına harcanan enerjiye oranı olarak tanımlanmıştır. Q_m ile gösterilen mekanik kalite katsayısı, frekans tepki eğrisinden kolayca belirlenebilmektedir.

2.2.2.6 Frekans sabiti

Rezonans frekansı ile rezonansın olduğu doğrusal mesafenin çarpımı ile hesaplanan frekans sabiti, farklı titreşim modları için ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Örneğin, N_1 ince bir çubuğun frekans sabiti, N_{33} ise kalınlık modunda rezonanstaki bir plağın frekans sabitini ifade etmektedir. Birimi *metre·Hertz* olan frekans sabiti, F_r rezonans frekansı ve l_r rezonansın olduğu boyut olmak üzere genel olarak Denklem 2.4'te verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$N = F_r \times l_r \quad (2.4)$$

2.2.2.7 Elastik uygunluk katsayısı

Elastisite modülünün tersi olarak tanımlanan elastik uygunluk katsayısı, mekanik katılık özelliklerinin yanında gerinim ve gerilmenin yönü ile elektriksel özelliklere de bağlıdır. Diğer piezoelektrik katsayılar gibi genel olarak matris halinde ifade edilen elastik uygunluk katsayısı, S_{ij} ile gösterilir ve i yönünde oluşan gerinimin j yönünde uygulanan mekanik gerilmeye oranı olarak ifade edilmektedir. Elastik uygunluk katsayısı Denklem 2.5'te verildiği gibi hesaplanmakta olup birimi *metre²/Newton* 'dur.

$$S = \frac{\text{Gerinim}}{\text{Gerilme}} \quad (2.5)$$

Daha önceden Şekil 2.6’da verilen eksen takımından da görüleceği üzere, doğrusal gerinim ve doğrusal gerilme yönleri 1 ile 3 eksenleri arasında, kayma gerinimi ve kayma gerilmesi yönleri ise 4 ile 6 eksenleri arasında tanımlanmıştır. Örneğin, 2 yönünde doğrusal gerilmeye maruz kalan malzemenin 1 yönünde meydana gelen doğrusal gerinimi S_{12} ile ifade edilirken; 2 yönünde kayma gerilmesine maruz kalan malzemenin yine 1 yönünde kayma gerinimi S_{44} ile ifade edilmektedir. Ayrıca S_{ij}^E ile sabit elektrik alan etkisinde elastik uygunluk katsayısı, S_{ij}^D ile sabit elektrik yükü etkisinde elastik uygunluk katsayısı tanımlanmaktadır. Bu durumda, S_{55}^D ile sabit elektrik alan etkisinde 2 yönünde kayma gerilmesine maruz kalan aynı yönlü kayma gerinimini ifade etmektedir. Genel olarak S_{ij}^D değerleri S_{ij}^E değerlerinden büyüktür.

Piezoelektrik malzemelerin özelliklerinin belirtilmesinde elastik uygunluk katsayısının yerine katılık sabitinin de kullanılması mümkündür. Basitçe, gerilmenin gerinime oranı olarak tanımlanabilen katılık sabiti, c_{ij} ’nin birimi ise *Newton/metre*² olup Denklem 2.6 ile ifade edilebilir.

$$c_{ij} = \frac{1}{S_{ij}} \quad (2.6)$$

2.2.2.8 Piezoelektrik gerinim katsayısı

En genel haliyle, meydana gelen gerinimin uygulanan elektrik alana oranı olarak tanımlanmaktadır. Birim alan başına oluşturulan elektrik yükünün uygulanan kuvvete oranı olarak tanımlanan piezoelektrik gerinim katsayısı, genel olarak bir matrisle ifade edildiğinden d_{ij} ile gösterilmektedir. Piezoelektrik gerinim katsayısı, malzemenin elektrik ve mekanik özellikleri ile bu özelliklerin birbirleriyle etkileşimlerini ele almaktadır. i ile uygulanan potansiyel farktan meydana gelen elektrik alanın ya da ortaya çıkan potansiyel fark ile elektrik yükünün yönü ifade edilirken, j ile uygulanan mekanik gerilme ya da ortaya çıkan gerinimin yönü ifade edilmektedir. Doğrudan piezoelektrik etki durumunda d_{ij} , Denklem 2.7a’da verildiği gibi sabit elektrik alan etkisinde i yönünde meydana gelen elektrik yükünün, j yönünde uygulanan mekanik gerilmeye oranıdır ve *Coulomb/Newton* biriminde ifade edilmektedir. Ters piezoelektrik etki durumunda ise d_{ij} , Denklem 2.7b’de

verildiği gibi sabit mekanik gerilme etkisinde j yönünde meydana gelen gerinimin i yönünde uygulanan elektrik alana oranıdır ve *metre/Volt* biriminde ifade edilmektedir.

$$d = \frac{\text{Meydana gelen elektrik yükü}}{\text{Uygulanan mekanik gerilme}} \Rightarrow (DPE) \quad (2.7a)$$

$$d = \frac{\text{Meydana gelen gerinim}}{\text{Uygulanan elektrik alan}} \Rightarrow (TPE) \quad (2.7b)$$

Ters piezoelektrik etki durumunda, kutuplanma yönüne ters yani başka deyişle 3 eksen yönünde uygulanan elektrik alan, piezoelektrik malzemede 1 eksen yönünde pozitif gerinim meydana getireceğinden dolayı d_{31} katsayısı genellikle negatif bir sayıdır.

Piezoelektrik gerinim katsayısı yerine, aynı malzeme özelliklerinin ifade edilmesini sağlayan piezoelektrik gerilme katsayısı, e_{ij} , elektrik alan ile gerilme arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. i yönünde uygulanan elektrik alanın, j yönünde meydana getirdiği mekanik gerilmeye oranını ifade eden piezoelektrik gerilme katsayısının birimi *Coulomb/metre²* 'dir.

2.2.2.9 Piezoelektrik gerilim katsayısı

Piezoelektrik potansiyel fark katsayısı olarak da ifade edilen piezoelektrik gerilim katsayısı (g), meydana gelen elektrik alanın uygulanan mekanik gerilmeye oranı ile tanımlanmaktadır. i eksen yönünde uygulanan mekanik gerilmenin ya da meydana gelen gerinimin yönünü, j eksen yönünde uygulanan elektrik yükünün ya da ortaya çıkan elektrik alanın yönünü ifade etmek üzere genel olarak bir matrisle ifade edildiğinden g_{ij} ile gösterilir. Doğrudan piezoelektrik etki durumunda Denklem 2.8a ile tanımlanan piezoelektrik yük katsayısının birimi *Volt·metre/Newton* 'dur. Ters piezoelektrik etki durumunda ise Denklem 2.8b'de verildiği gibi tanımlanan yük katsayısının birimi *metre²/Coulomb* 'tur. Elektrik yükünün bağıl elektriksel geçirgenlik sabitine oranı ile hesaplanabilir.

$$g = \frac{\text{Meydana gelen elektrik alan}}{\text{Uygulanan mekanik gerilme}} \Rightarrow (DPE) \quad (2.8a)$$

$$g = \frac{\text{Meydana gelen gerinim}}{\text{Uygulanan elektrik yükü}} \Rightarrow (TPE) \quad (2.8b)$$

2.2.3 Piezoelektrik bünye denklemleri

Piezoelektrik özellikleri tanımlayan temel denklemlerde; piezoelektrik malzemede meydana gelen toplam gerinimin, mekanik gerilme etkisinde oluşan gerinim ile elektriksel potansiyel fark etkisinde oluşan gerinimin toplamına eşit olduğu kabulü yapılmaktadır. Bu kabul ile doğrusal davranıştaki piezoelektrik bir malzemenin elektromekanik bünye denklemleri aşağıda verilmiştir. Piezoelektrik malzemenin herhangi bir sıcaklık etkisinde olmadığı kabulü ile verilmiş olan denklemler genel olarak ifade edilirse, uygulanan kuvvet ile oluşan tepki piezoelektrik malzemenin özelliklerine, yapının boyutuna ve şekline, mekanik ve elektriksel etkinin yönüne bağlı olduğu söylenebilir. Denklem 2.9 piezoelektrik eyleyiciler için geçerli olan ters piezoelektrik etki durumunu, Denklem 2.10 ise piezoelektrik algılayıcılar için geçerli olan doğrudan piezoelektrik etki durumunu ifade etmektedir.

$$\varepsilon_i = S_{ij}^E \sigma_j + d_{mi}^T V_m \quad (2.9)$$

$$D_m = d_{mi} \sigma_i + \xi_{ik}^\sigma V_k \quad (2.10)$$

Yukarıdaki denklemlerde yer alan i ve j alt simgeleri 1'den 6'ya kadar, m ve k alt simgeleri ise 1'den 3'e kadar değişmekte ve daha önceden Şekil 2.6'da tanımlanmış olan eksen takımındaki yönleri belirtmektedirler. Dolayısıyla denklemlerdeki ifadeler ayrı ayrı birer matris ya da vektör olarak tanımlanmaktadırlar. E üst simgesi sabit elektrik alan etkisinde ölçülen değeri ifade etmektedir. σ üst simgesi ise sabit gerilme etkisinde ölçülen değeri ifade etmektedir. T üst simgesinden de anlaşılacağı üzere 3×6 boyutundaki piezoelektrik gerinim matrisi yerine denklemde 6×3 boyutundaki transpozunu kullanılmaktadır. Özellikle algılama durumunun söz konusu olduğu uygulamalarda ise yeniden düzenlenen bu iki denklem sırasıyla Denklem 2.11 ve 2.12'de verildiği biçimde kullanılmaktadırlar.

$$\varepsilon_i = S_{ij}^D \sigma_j + g_{mi} D_m \quad (2.11)$$

$$E_i = g_{mi} \sigma_i + \beta_{ik}^\sigma D_k \quad (2.12)$$

Yukarıda iki farklı durum için doğrudan ve ters piezoelektrik etki altında ayrı ayrı ifade edilmiş olan piezoelektrik temel denklemlerinde yer alan terimler detaylı olarak Çizelge 2.2’de açıklanmıştır.

Çizelge 2.2 : Piezoelektrik bünye denklemlerinde yer alan terimler.

Simge	Tanım	Eleman	Boyut	Birim
ε	Gerinim vektörü	Gerinim bileşenleri (ε_i)	6×1	—
S	Elastik uygunluk matrisi	Elastik uygunluk katsayıları (S_{ij})	6×6	$\text{metre}^2/\text{Newton}$
c	Katılık matrisi	Katılık sabitleri (c_{ij})	6×6	$\text{Newton}/\text{metre}^2$
σ	Gerilme vektörü	Normal ve kayma gerilmeleri (σ_j, σ_i)	6×1	$\text{Newton}/\text{metre}^2$
d	Piezoelektrik gerinim matrisi	Piezoelektrik gerinim katsayıları (d_{mi})	3×6	metre/Volt
e	Piezoelektrik gerilme matrisi	Piezoelektrik gerilme katsayıları (e_{mi})	3×6	$\text{Coulomb}/\text{metre}^2$
V	Elektrik alan vektörü	Elektrik alan bileşenleri (V_m, V_k, V_i)	3×1	Volt/metre
D	Elektriksel yer değiştirme vektörü	Elektriksel yer değiştirme bileşenleri (D_m, D_k)	3×1	$\text{Coulomb}/\text{metre}^2$
ξ	Elektriksel geçirgenlik matrisi	Elektriksel geçirgenlik katsayıları (ξ_{ij})	3×3	$\text{Farad}/\text{metre}$
g	Etkileşim matrisi	Piezoelektrik gerilim katsayıları (g_{mi})	3×6	$\text{metre}^2/\text{Coulomb}$
β	Elektriksel geçirmezlik matrisi	Elektriksel geçirmezlik bileşenleri (β_{ik})	3×3	$\text{metre}/\text{Farad}$

Daha önceden de belirtildiği üzere piezoelektrik malzemenin elektrik ve mekanik özellikleri ile bu özelliklerin birbirleriyle etkileşimlerini ifade eden piezoelektrik gerinim katsayısının verilmediği durumlarda, Denklem 2.13’te verilen eşitlik

kullanılmak suretiyle piezoelektrik gerilme katsayısı ile de temel denklemlerden yararlanılabilmektedir.

$$[e] = [d][c] \quad (2.13)$$

Yukarıda verilen denklemleri oluşturan matris ya da vektörlerin bileşenleri, boyutları ve birimlerinin belirtilmiş olduğu bu çizelgeden yararlanılarak, Denklem 2.8 ve 2.9 açık bir biçimde yeniden ifade edilmiştir. Özetlemek gerekirse, yapının elektromekanik bünye denklemi ters piezoelektrik etki durumunda Denklem 2.14'te, doğrudan piezoelektrik etki durumunda ise Denklem 2.15'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{11}^\sigma & \xi_{12}^\sigma & \xi_{13}^\sigma \\ \xi_{21}^\sigma & \xi_{22}^\sigma & \xi_{23}^\sigma \\ \xi_{31}^\sigma & \xi_{32}^\sigma & \xi_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Yukarıdaki denklemlerden yola çıkılarak, ilk bakışta piezoelektrik malzemeye ait çok sayıda özelliğin bilinmesi gerektiği söylenebilir. Fakat kutuplanma yönü piezoelektrik malzeme özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Söz gelimi, piezoelektrik malzemenin Şekil 2.6'da gösterilmiş olan 3 eksenî yönünde kutuplanması durumunda birçok piezoelektrik katsayı sıfır değerini almakta ya da diğer katsayılarla eşdeğer olmaktadır. Bu sebeple malzeme özellikleri belirlenirken kutuplanma yönü öncelikli olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Piezoelektrik malzemenin polimer ya da seramik yapıda olması da malzeme özelliklerini doğrudan etkileyen bir faktördür.

Piezoseramik malzemeler için tek yönlü katmanlanmış kompozitler gibi ortotropik yapıda olup sıcaklık etkisinde herhangi bir deformasyona uğramadıkları varsayımı yapılmıştır. Yanlamasına izotropik özellikteki piezoseramikler için kutuplanma yönünün 3 eksenli olması durumunda elastik uygunluk katsayılarından sıfır değerini almayanlar ve aralarındaki ilişki Denklem 2.16'te belirtilmiştir. Aşağıdaki katsayılara ilaveten S_{33} katsayısı da yapılan varsayımlara ile sıfır değerini almamaktadır.

$$S_{11} = S_{22} \quad (2.16a)$$

$$S_{13} = S_{31} = S_{23} = S_{32} \quad (2.16b)$$

$$S_{12} = S_{21} \quad (2.16c)$$

$$S_{44} = S_{55} \quad (2.16d)$$

$$S_{66} = 2(S_{11} - S_{12}) \quad (2.16e)$$

Mevcut kabullerle piezoelektrik gerinim matrisi bileşenleri için de benzer durum söz konusudur. Piezoelektrik gerinim katsayılarından sıfır değerini almayanlar ve aralarındaki ilişki Denklem 2.17'de belirtilmiştir. Aşağıda belirtilen katsayılara ek olarak d_{33} katsayısının da sıfır değerini almadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

$$d_{31} = d_{32} \quad (2.17a)$$

$$d_{15} = d_{24} \quad (2.17b)$$

Aynı durum elektriksel geçirgenlik katsayıları için de mevcut olup; elektriksel geçirgenlik matrisinin köşegen elemanları dışındaki elemanlar sıfır değerini alırken, köşegen elemanlar arasındaki ilişki Denklem 2.18'de verilmiştir.

$$\xi_{11} = \xi_{22} \quad (2.18)$$

Sözü geçen kabuller ile yukarıda verilen eşitlikler göz önünde bulundurulduğunda piezoseramik malzemeler için Denklem 2.14 ve 2.15'te verilmiş olan elektromekanik bünge denklemleri aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{11}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Şekil 2.6'da gösterilmiş olan 3 eksenli yönünde kutuplanmış olan piezopolimerler için izotropik olmayan yüzeyler mevcut olacağından Denklem 2.17'de verilmiş olan eşitlik durumları geçerli olmamaktadır. Piezopolimerin maruz kaldığı elektrik alan yönünün kutuplaşma yönüyle aynı olması sonucunda 1 ve 2 eksenlerinde meydana gelen gerinim değerleri birbirinden farklı olacaktır. Bu durumda ise elektromekanik bünge denklemleri aşağıda verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{25} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{11}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

2.2.4 Piezoelektrik malzemelerin kullanım alanları

Araştırmalarla birlikte geliştirilen piezoelektrik teknolojisi, bu malzemelerin kullanımını daha da yaygınlaştırmaktadır. Hızlı cevap verme ve düşük enerji tüketme avantajları, piezoelektrik malzemelerin eyleyici ve algılayıcı olarak sıklıkla tercih edilmelerine neden olmuştur. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirme yeteneğine sahip olan piezoelektrik malzemelere uygulanan bir elektriksel potansiyel fark, gerinim meydana getirir. Yine aynı şekilde bir deformasyona maruz kalan bir piezoelektrik malzeme üzerinde de elektriksel potansiyel fark ortaya çıkar ve bir algılayıcı elde edilmiş olur. Bu şekilde elde edilen piezoelektrik eyleyici ve algılayıcılar havacılık ve uzay sistemleri, titreşim indirgeyici sistemler, yapısal sağlığı izleme sistemleri ve akustik sönümleme sistemleri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Algılayıcı olsun ya da eyleyici olsun nihayetinde dönüştürücü olarak kullanılan piezoelektrik malzemeler titreşim kontrolü, hassas konumlandırma, uzay sistemleri ve son günlerde nanoteknoloji araştırmalarında kullanılmaktadırlar.

Çeşitli alanlarda dönüştürücü olarak kullanılan piezoelektrik malzemeler değişik yapı ve şekillerde bulunabilmektedirler. İnce şeritler halinde esas yapının yüzeyine gömülmüş ya da yapıştırılmış biçimdeki piezoelektrik dönüştürücüler esnek yapılarda moment oluşturan eyleyiciler ve gerinim ölçen algılayıcılar olarak daha yaygın tercih edilmektedirler. Çok sayıda piezoelektrik katman ve elektrodun birleştiği kümelerden oluşmuş piezoelektrik dönüştürücüler ise büyük kuvvetler meydana getirmelerine karşılık yüzey normaline dik yönde çok düşük mertebede yer değiştirmeler meydana getirmektedirler [44]. Doğrudan piezoelektrik etki özellikleri ile piezoelektrik dönüştürücüler algılayıcı olarak gerinim ölçerlerin yerine kullanılabilirler. Gerinim ölçerlere kıyasla, daha üstün sinyal-gürültü oranı ve yüksek frekanstaki gürültüleri daha iyi filtreleme kabiliyetleri ile düşük mertebedeki gerinim ölçümleri için oldukça uygundurlar. Simetrik olarak giriş yapının alt ve üst

yüzeylerine yapıştırılmış piezoelektrik dönüştürücüler ise eyleyici olarak kirişe bir moment uygulamak suretiyle eğilme etkisi oluşturmaktadırlar. Hem algılayıcı hem de eyleyici olarak kullanılan piezoelektrik dönüştürücüler günümüz akıllı yapılarında en çok tercih edilen sistemlerdir.

FA-18 savaş uçağının kanat, gövde ve stabilizör kontrolü ile F-15 uçağının panel kontrolünde kullanılan piezoelektrik dönüştürücüler ise havacılıkta piezoelektrik malzeme kullanımının yaygınlığına dair somut örneklerdir. Denizaltılarda, uydu yapılarında ve helikopter rotorlarında da çeşitli amaçlarla piezoelektrik dönüştürücüler kullanılmaktadır.

Akıllı yapılardaki ilerlemelerle birlikte aktif piezoelektrik ve elastik/piezoelektrik yapıların statik ve dinamik uygulamalarda kullanımı günden güne arttırılarak devam etmektedir. Özellikle havacılık ve uzay uygulamalarında; uzay sistemleri, uçak kanatları, helikopter palaları ve otomotivde kullanılan piezoelektrik malzemelerin titreşim, gürültü, aeroelastik kararlılık, sönümleme ve gerilme dağılımı aktif kontrolünde etkili olduğu görülmektedir.

Piezoelektrik malzemeler günümüzde, katmanlı kompozit yapılarda titreşim ve şekil kontrolü, çatlak tespiti gibi uygulamaların yanında; otomotiv sanayinde otomobil hava yastığı, sensör, mikrofon ve Mikro Elektro Mekanik Sistem (MEMS) uygulamalarında akıllı malzeme olarak kullanılmaktadırlar.

Günlük hayatta ise piezoelektrik malzemeler; çeşitli elektronik donanımlarda, çakmaklarda, masa ve kol saatlerinde, akustik ve hassas ölçüm yapan mikroskoplarda, yüksek frekansta ses üretimi sağlayan ultrasonik aygıtlarda, yarı-iletken ve entegre devre teknolojilerinde, hassas termometrelerin yapımında olduğu kadar, çeşitli tüketim ürünlerinden uydu ve savaş uçaklarına varan çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Kol saatlerinin içinde bulunan kuvars kristaline kol hareketlerimiz vasıtasıyla basınç uygulanması durumunda saatin belli bir miktar enerji gereksinimi karşılanmış olur. Çakmaklarda da benzer durum söz konusudur; ateşleme butonuna basıldığında çakmak düzeneğinde bulunan kuvars kristaline basınç uygulanmış olur ve ortaya çıkan elektrik akımı bir akı halinde geçiş yaparken gazı tutuşturur. Günümüzde her ne kadar antika olarak kullanılıyor olsalar da pikaplarda da piezoelektrik malzemeler kullanılmaktadır. Pikap üzerine titreşimler yoluyla açılan çukurlara kaydedilen ses, pikap çalıcıların iğnelerine yerleştirilen

piezoelektrik malzemenin yardımıyla, iğne ses çukurlarından geçerken titreşimlerin tekrar elektrik akımına dönüşüp cihaz tarafından işlenebilmesini sağlar. Spor malzemelerinde ise özellikle raket ve kayak gibi araçlarda kompozit piezoelektrik dönüştürücüler kullanılmakta ve bu sayede mevcut titreşimin azaltılması amaçlanmaktadır [44]. Bilgisayar sistemlerinde hard-disk sürücülerde de piezoelektrik malzemelerin kullanımı ile titreşim ve gürültü etkilerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin ilginç bir kullanımı da yürüme esnasında oluşan ağırlık transferinden kaynaklanan enerjiyi toplama kabiliyetine sahip ayakkabılardır [41].

Kullanım alanlarının bu denli çeşitlilik göstermesine karşın piezoelektrik malzemeler ile ilgili keşfedilmeyi ve geliştirilmeyi bekleyen pek çok unsur olduğu da unutulmaması gereken bir noktadır. Yüksek sıcaklıklarda da performansını koruyabilen ve mümkün mertebe küçültülmüş akıllı yapıların tasarlanması piezoelektrik teknolojisinin geliştirilmeye açık hedefleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.3 Modern Kompozit Yapılar

Akıllı esnek yapılar genellikle piezoseramik, ince film şeklinde piezopolimer ve şekil hafızalı tellerden oluşan ara katmanlar ya da elektoreolojik akışkanla doldurulmuş delikler bulunduran kompozit malzemelerden oluşan ince kiriş, plak ya da kabuklardır. Modern kompozit yapılar olarak tanımlanan bu yapıların tam olarak anlaşılabilmesi için sözü geçen kiriş, plak ve kabuk yapılarla birlikte akıllı malzemelerin özel durumlarının da ele alındığı dinamik davranışlarının tam olarak tanımlandığı bir boyutlu ya da iki boyutlu teorilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Söz gelimi, modern kompozit yapının geometrik doğrusal olmayan davranışlarının yanında algılayıcı ve eyleyicilerin doğrusal olmayan karmaşık malzeme davranışları da incelenmelidir.

Kompozit malzemelerin yapıdaki aeroelastik uyarlamalara elverişliliği akıllı yapılarda kullanımlarını oldukça cazip kılmaktadır. Kompozit malzemenin yöne bağlı katılık davranışı sayesinde yapısal deformasyon ve yapıya etkiyen bileşke aerodinamik yükler kontrol edilebilir. Kompozit yapılar tek başlarına yapısal ve aerodinamik yük etkileşimini geliştirme yetisinde olsalar da, özellikleri anlık olarak değişen uçuş koşullarına uyartanamaz. Algılayıcı ve eyleyicilerin de kullanılmasıyla

hali hazırda kompozit malzemelerden üretilmiş yapıların kabiliyetleri geliştirilebilir. Aeroelastik olarak uyarlanmış akıllı kompozit yapılar ile makul bir şekilde istenen özellikleri meydana getirerek üstün uçak kanatları ya da helikopter rotor palleri üretilir. Bu amaç doğrultusunda, geleceğin akıllı yapılarının mutlak suretle üstün eyleyici malzemelerle donatılmış olması gerekmektedir. Doğrusal davranışları ile ilgili teorilerin hali hazırda geliştirilmiş olduğu piezoelektrik eyleyicilerin doğrusal olmayan davranışları halen daha tam olarak kavranamamıştır. Yüzeye yapıştırılmış ya da gömülmüş algılayıcı ve eyleyici bulunduran ileri kompozit yapılar matematiksel olarak modellenmeli ve ilgili denklemler kurulmalıdır. Bu gelişmeler ile birlikte kontrol teorisi ve kontrol sistemi tasarımı konularında da yapılacak araştırmalar ile ilerleme sağlanmalıdır. Kazancın tespit edilmesi, durum ve kontrol değişkenlerinin tanımlanması, algılayıcı ve eyleyicilerin sayı, boyut ve konumlarının belirlenmesi gibi konularda yapılacak araştırmalar ile ileri kompozit yapıların, uygun algılayıcı, eyleyici ve kontrol sistemi ile üstün bir akıllı yapı haline getirilmesi mümkün olacaktır.

İhtiyaca göre malzemelerin sağlamlık, esneklik, hafiflik, nem ve güneş ışınları gibi çevre şartlarına dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yaşamda kullanılan terimlerle ifade edilebilen özellikleri yanında; daha bilimsel bir dille ısısal genleşme katsayıları, yorulma, çatlama ve kırılma, çekme, eğilme dayanımları ve benzeri değerlerin uygunluğu aranmaktadır. İstenen özellikleri tek bir metal, seramik veya polimer malzemede bulmak son derece ender rastlanan bir olay olduğundan ihtiyaç duyulan özelliklere sahip malzemeleri üretmeye imkan sağlayan kompozit malzemeler gereksinimleri karşılamak üzere devreye girmektedirler. Üstün özellikli yapıların tasarlanmasına imkan sağlayan kompozit malzemeler alt başlıklar halinde genel olarak incelenmiştir.

2.3.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

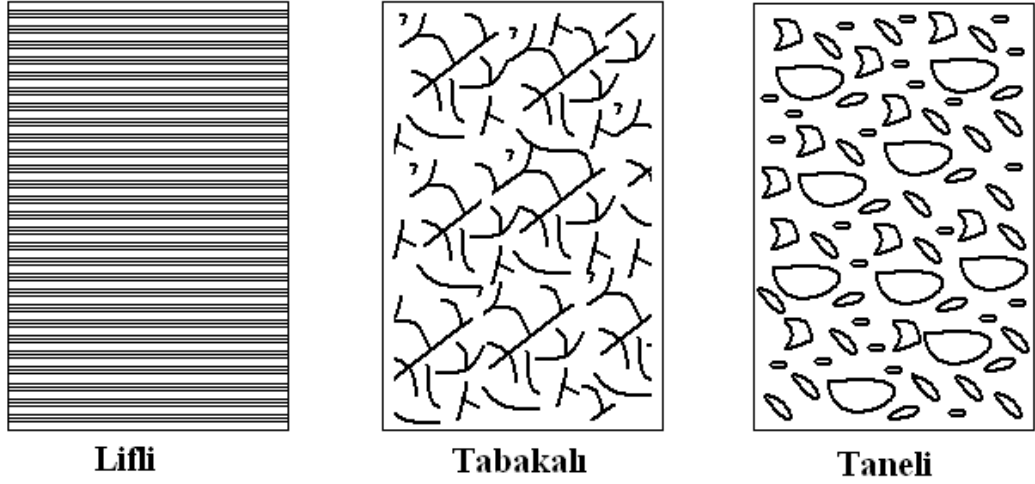
Kompozit malzemeler gerek yapılarındaki malzemeler gerekse imalat yöntemleri bakımından çok farklılıklar gösterdiklerinden dolayı sınıflandırılırken farklı kıstaslar esas alınabilmekte ve sonuç olarak ortaya farklı malzeme grupları çıkabilmektedir. En genel haliyle bir matris malzeme ve takviye malzemesinden oluşan kompozit malzemeler farklı kıstaslara göre sınıflandırılabilirler. Günümüzde, kompozit

malzemeler genel olarak yapılarındaki matris malzemelerin türlerine göre üç gruba ayrılmaktadırlar [48].

- **Polimer matrisli kompozitler:** Günümüzde en çok kullanılan kompozit malzeme çeşididirler. Fiber Takviyeli Polimerler (FRP) olarak da bilinen bu malzemeler polimer esaslı bir reçineyi matris olarak kullanırken; cam, karbon ve aramid gibi çeşitli elyafları takviye elemanı olarak kullanırlar.
- **Metal matrisli kompozitler:** Daha çok otomotiv sektöründe tercih edilen bu malzemeler, alüminyum matrisle silikon karbid gibi bir takviye elemanının bir araya gelerek oluşturdukları kompozitlerdir.
- **Seramik matrisli kompozitler:** Çok yüksek ısıl dayanımları sebebiyle yüksek sıcaklıklara maruz bölgelerde kullanılan bu malzemeler, seramik matrisin yanında silikon karbid ve boron nitrit gibi kısa elyafların bir araya gelmesi ile oluşan kompozitlerdir.

Yukarıda kısaca değinilen kompozit malzeme sınıflarından polimer matrisli kompozitler diğerlerine oranla oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Polimer matrisli kompozitler ile en az çelik kadar sağlam, mümkün mertebe hafif, yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklı ve düşük maliyetli malzemeler imal edilebilir. Çeşitli mühendislik alanlarında metallerin yerine tercih edilen polimer matrisli kompozitler, hafiflikleri ve üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra, insan dokuları ile uyum sağlayabilen ve sertlik derecesi ayarlanabilen yapay doku ve organlar gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Ayrıca, fiber optik ve piezoelektrik özelliğe sahip, istenildiği gibi işlenebilen özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerine tercih edilmektedirler.

Bunların yanı sıra kompozitleri takviye malzemelerinin türüne ve düzenlenme şekline göre de sınıflandırmak mümkündür [49]. Yapısında daha belirgin rol oynayan takviye malzemenin sistem içindeki dağılımına göre kompozit malzemeler üç farklı gruba ayrılmaktadırlar. Bu gruplar Şekil 2.7’de da gösterildiği üzere; lifli kompozitler, tabakalı kompozitler ve taneli kompozitler olarak adlandırılmaktadırlar.



Şekil 2.7 : Takviye malzemesinin düzenlenişine göre kompozit malzeme çeşitleri.

Lifli ve tabakalı kompozitler, taneli kompozitlerden daha üstün malzeme özellikleri sağlamaktadırlar. Silikat esaslı hidrolik çimento ve asfalt yol kaplamalarında kullanılan asfalt beton taneli kompozitlerin en bilinen örnekleridir. Viskoz ve düşük dayanımlı asfalt ile sert ve gevrek taşın meydana getirdiği kompozit yol kaplama malzemesi sünek ve yüksek dayanımlı olacaktır. Uygulamada en çok tercih edilen kompozit türü ise lifli kompozitlerdir [49].

2.3.2 Kompozit malzemelerin özellikleri

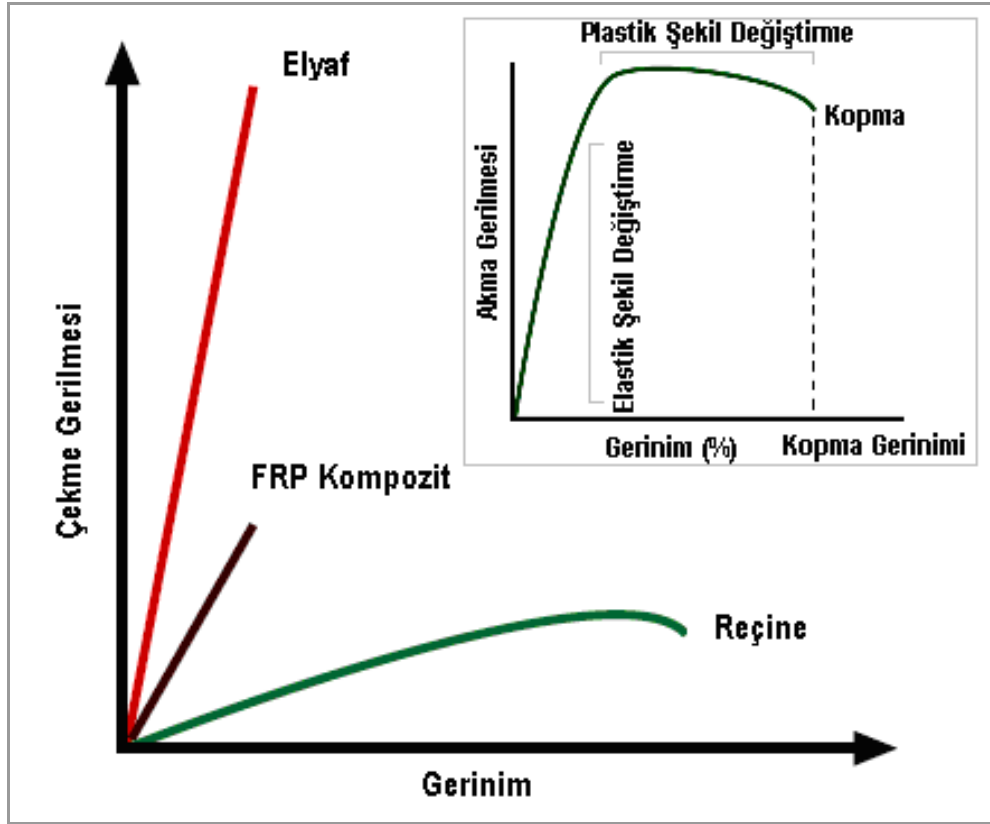
Yapısal malzemeler; metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler olmak üzere başlıca dört grupta incelenebilirler. İstenen özelliklerin tamamını tek bir metal, seramik veya polimer malzemede bulmak son derece ender rastlanan bir olay olduğundan istenen özelliklere sahip malzemelerin üretilmesine imkan sağlayan kompozit malzemeler oldukça büyük önem taşımaktadırlar. Tek başlarına istenen amaç için uygun olmayan farklı iki ya da daha fazla malzemeyi belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak makroskopik yapıda bir araya getirmek suretiyle elde edilen, istenen amacı karşılayacak yeni anizotropik yapıdaki malzemeler kompozit malzeme olarak tanımlanmaktadırlar. Mevcut malzemeler ile istenen özelliklerin elde edilememesi durumunda, kompozit malzemeler devreye girerek ihtiyacı karşılama yetisine sahip olduklarından önemleri her geçen gün gelişen teknolojiyle birlikte hızla artmaktadır.

Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan ve genellikle elyaf malzeme olarak da adlandırılan bir takviye malzeme bulunmakta, bu malzemenin çevresinde

ise hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan ve genellikle reçine olarak adlandırılan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, takviye malzeme kompozit malzemenin dayanımını, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önlemek suretiyle kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir [46]. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da takviye malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece takviye malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkması muhtemel bir çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur. Kompozit malzemelerde kullanılan takviye malzemelerin başında elyaf lar yer alırken, başlıca matris malzemeler polimerler, metaller ve seramiklerdir. Birden çok malzemenin bir araya gelmesiyle oluşan kompozit malzemelerin özellikleri; yapısını oluşturan malzemelerin özelliklerine ve dağılımına bağlı olarak değişmektedir. Takviye malzemesinin düzensiz dağılımı, homojen olmayan bir malzeme sistemini beraberinde getirecektir ki; bu durumda ortaya çıkacak zayıf bölgeler ile hasar olasılığı yükselecektir. Tüm bunların yanında, takviye malzemesinin geometrisinin ve yönünün sistemin anizotropisini etkilemesi de takviye elemanının kompozit sistemlerde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Kompozit malzemelerin kullanımında ise genel olarak en önemli parametre, takviye malzemesinin hacim ya da başka bir deyişle ağırlık oranıdır [47].

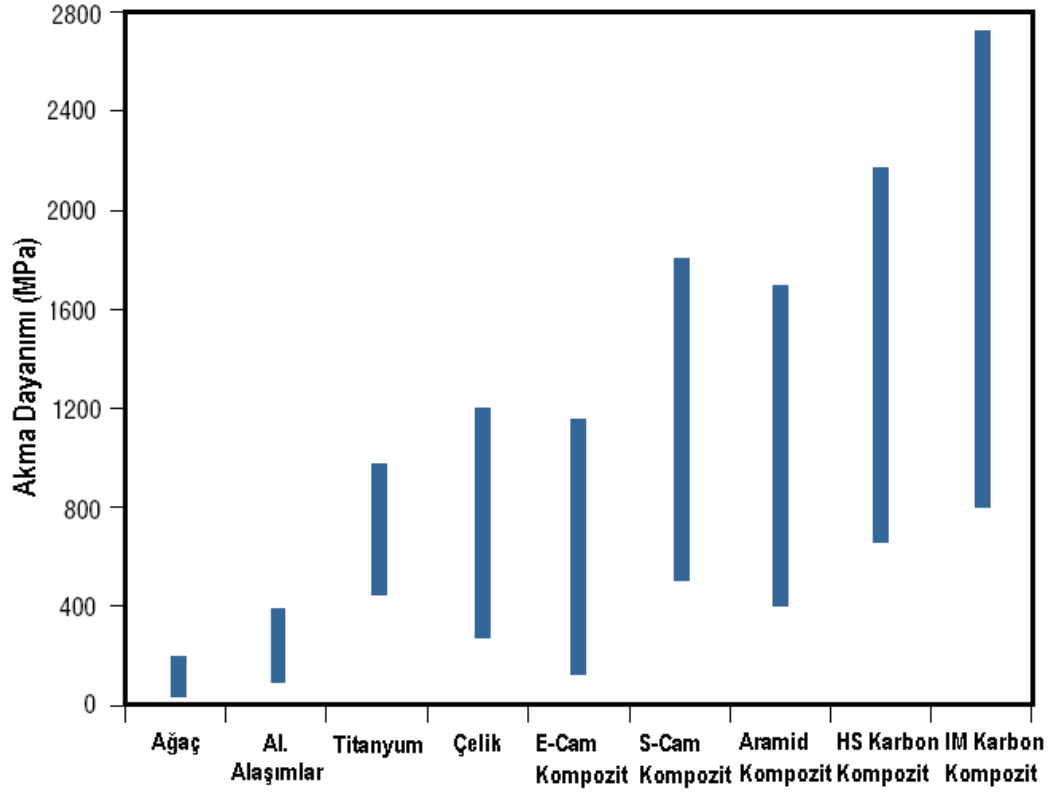
Teorik ve deneysel çalışmalarda, kompozit malzemelerin yapıları gereği gerilmeleri yerine gerinimlerini inceleyerek, mekanik davranışlarını gerinim durumuna göre yorumlamak daha doğru sonuçlar getirmektedir. Çünkü yapılarındaki farklı malzemelerin gerilme dayanımları kompozit malzemelerin gerilmelerini etkileyen bir unsurdur. Kompozit malzemelerin sözü geçen bu özelliği Şekil 2.8’de yer alan grafikte bir örnekle açıklanmaya çalışılmıştır [46]. Grafiğin sağ üst köşesinde malzemelerin elastik ve plastik davranışları belirtilmiştir. Son yıllarda çok kullanılan kompozitlerden elyaf takviyeli polimer (FRP) kompozit, yapısını oluşturan elyaf ve reçinenin çekme gerilmesi-gerinim değişimleri ayrı ayrı grafikte yer almaktadır. Bu üç malzemenin gerilme-gerinim değişimleri incelendiğinde görülmektedir ki, çekme gerilmesi gereğinden fazla dayanıklı olan elyaf ile oldukça düşük olan reçinenin bir araya gelmesi ile yeteri kadar dayanıma sahip FRP kompoziti elde edilmiş ve gereksinim karşılanmıştır. Bu örnekteki gibi farklı özellikteki malzemeler bir araya getirilmek suretiyle meydana getirilen yeni özellikteki malzemeler istenen mekanik

özelliklerle ihtiyacı karşılama yetisine sahip olacaktır. Kompozit malzemelerin bu özelliklerinden dolayı kompozit sektörü daima gelişmelere ve iyileştirmelere açık kalmaktadır.



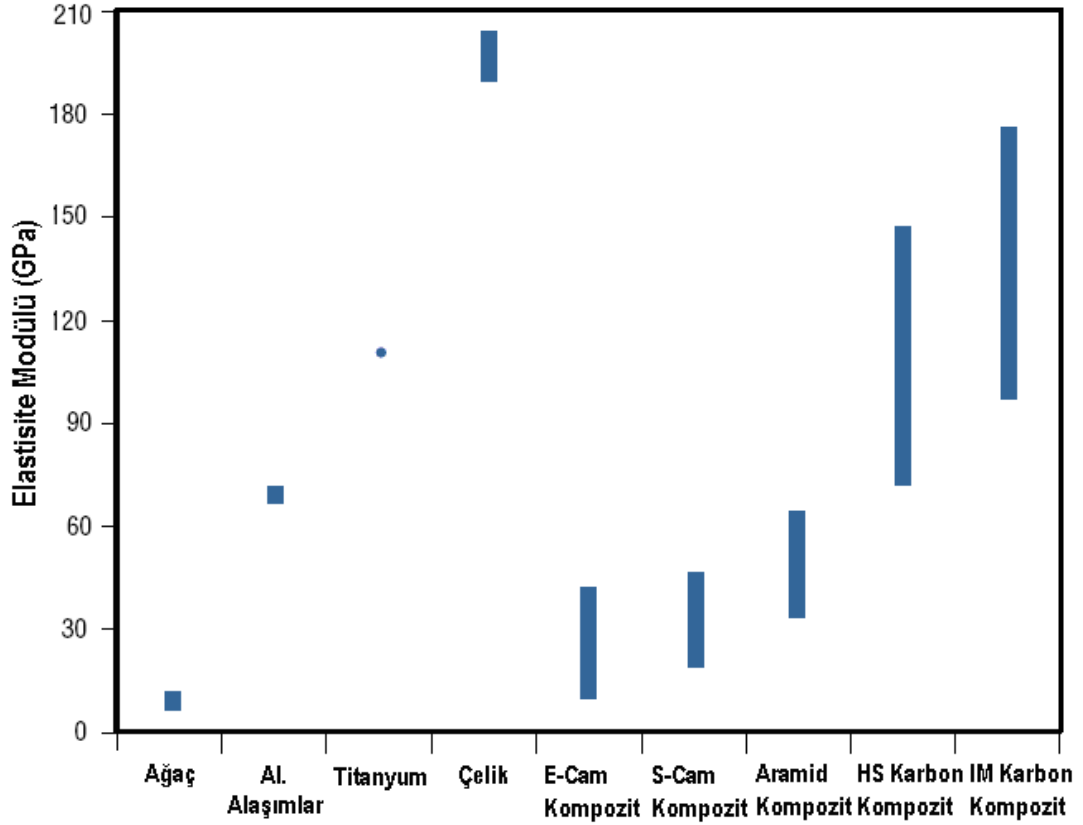
Şekil 2.8 : Kompozit malzeme ve bileşenlerinin çekme gerilmesi-gerinim değişimi [46].

Kompozit malzemeler birçok özellikleri ile diğer yapısal malzemelerin önüne geçmektedirler. Şekil 2.9’da yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinin akma dayanımları sayısal olarak bir grafik üzerinde belirtilmiştir [46].



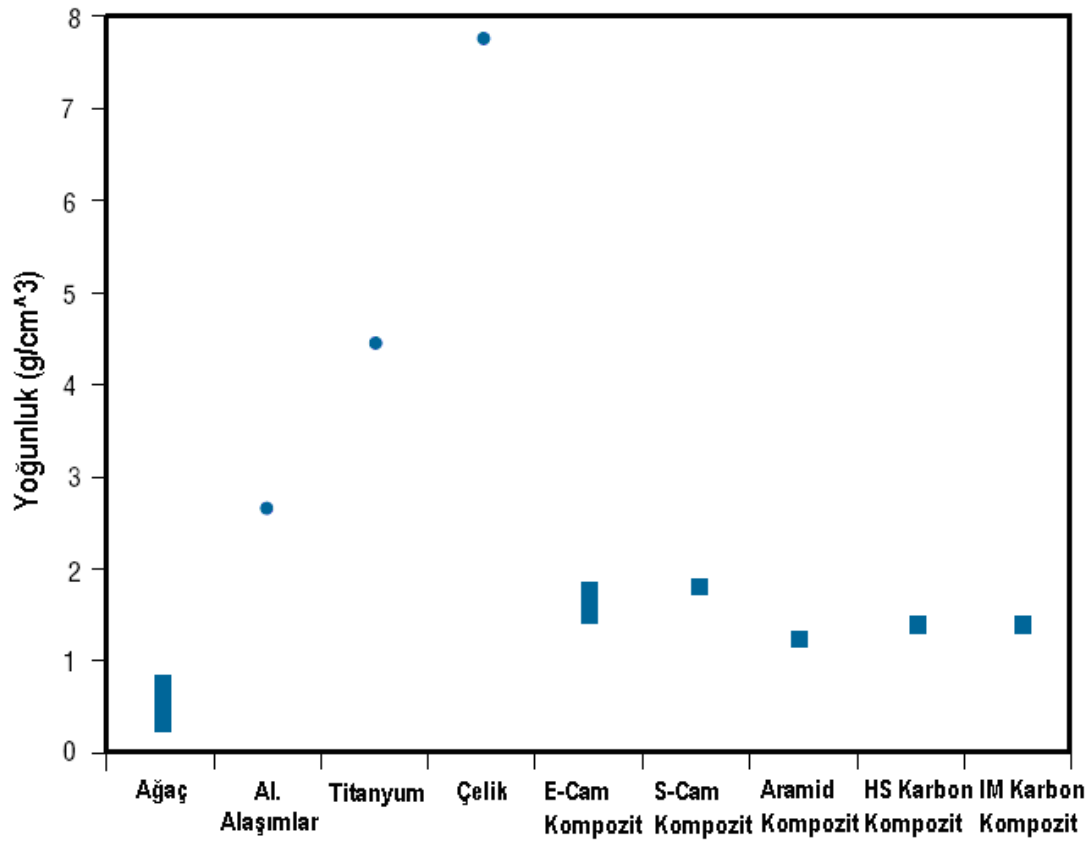
Şekil 2.9 : Yaygın yapı malzemelerinin akma dayanımı değerleri [46].

Yukarıdaki grafikten de görüleceği üzere, kompozit malzemeler genel olarak, diğer malzemelere göre daha yüksek akma dayanımı sağlamaktadırlar. Akma dayanımına benzer olarak, yaygın yapı malzemelerinin elastisite modülü değerleri de bir grafik yardımıyla incelenmiştir. Şekil 2.10'da malzemelerin elastisite modüllerinin sayısal olarak yer aldığı grafikte kompozitlerin birbirlerinden farklı elastisite modülü değerlerine sahip oldukları görülmektedir [46]. Fakat yine de genel olarak, kompozit malzemelerin yüksek elastisite modülü değerleri ile daha çok tercih edildikleri söylenebilir. Oldukça yüksek elastisite modülüne sahip çelik, diğer yapısal malzemelerin arasından sıyrılmakta ve ilk bakışta avantajlı görülmektedir. Lakin kullanılan yapısal malzemelerin esneklikten yoksun olmalarının da daha farklı olumsuz sonuçlar doğurabileceği unutulmamalıdır. Elastisite modülü yüksek çelik, akma dayanımı çok yüksek olmadığından ani çatlak ve kırılmalara karşı dayanıksızdır.



Şekil 2.10 : Yaygın yapı malzemelerinin Elastisite modülü değerleri [46].

Yapısal malzemelerin mekanik özelliklerinin yanında, ağırlıkları da tercih edilmelerinde belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle havacılık sektöründe yapısal dayanıklılığın yanı sıra hafifliğin önemi de oldukça büyüktür. Son yıllarda yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinin özgül ağırlıkları Şekil 2.11’de yer alan grafikte belirtilmiştir [46]. Grafik incelendiğinde kompozit malzemelerin hafiflik konusunda çok avantajlı oldukları söylenebilir. Kompozitlere yakın özgül ağırlığa sahip ağaç ilk bakışta tercih edilebilir görünse de yukarıda incelenen Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da belirtilen mekanik özellikleri sebebiyle dezavantajlı konuma düşecektir. Ağaç örneğinde olduğu gibi, malzemelerin tek bir özelliğini inceleyerek yapılan kıyaslamalar hatalı sonuçlar doğuracağından, malzemelerin çeşitli özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin birbirleriyle kıyaslanması gerekmektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik yalıtımını sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır.



Şekil 2.11 : Yaygın yapı malzemelerinin özgül ağırlık değerleri [46].

Kompozit malzemelerin yukarıda sözü geçen özelliklerinin yanında, yapılarda kullanımlarını etkileyen olumlu ve olumsuz özellikleri maddeler halinde aşağıda verildiği gibi sıralanabilir [46].

- **Yüksek mukavemet:** Metallere göre genellikle daha yüksek çekme ve eğilme dayanımına sahip olan kompozit malzemeler, kalıplanabilme özellikleri sayesinde ihtiyaca göre istenen bölgede ve yönde güçlendirilebilirler. Bu sayede, daha az miktarda malzeme kullanılarak, daha hafif ve ucuz yapılar üretilebilir.
- **Korozyona ve kimyasal etkilere karşı dayanım:** Hava etkilerinden, korozyondan ve birçok kimyasal etkiden zarar görmeyen kompozit malzemelerin bu özellikleri endüstride tercih sebebi olmaktadır.
- **Isıya ve ateşe dayanım:** Düşük ısı iletim katsayılı malzemelerden oluşan kompozitler, çok yüksek sıcaklıklara dayanabilme özellikleri ile sıcaklıkla ilgili alanlarda tercih edilmektedirler.

- **Titreşim sönümleme:** Sünnek yapıdaki kompozit malzemeler, doğal olarak titreşim sönümleyebilir ve şok yutabilirler. Bu sayede çatlak ilerlemesi en düşük seviyeye çekilmektedir.
- **Elektriksel özellikler:** Üstün elektriksel özellikteki kompozitler; özellikle enerji nakil hatlarında iletkenlikleri, diğer alanlarda ise yalıtkanlıkları ile tercih edilmektedirler.
- **Kolay şekillendirilme:** Büyük ebatlardaki karmaşık yapılar, kompozitlerin kalıplanabilme kabiliyetleri ile tek parça olarak üretilebilir. Bu sayede, malzeme tasarrufunun yanı sıra iş gücünden de kazanç sağlanmaktadır.
- **Düşük yorulma dayanımı:** Yapılarında doğal olarak bulundurdıkları hava zerrecikleri nedeniyle yorulmaya karşı dayanımları düşüktür.
- **Değişken mekanik özellikler:** Farklı doğrultularda değişim gösteren mekanik özellikleri sebebiyle dezavantajlıdır. Hatta aynı kompozit malzeme içerisinde dahi değişen çekme, basma, kesme ve eğilme dayanımı değerleri kompozit malzemelerin güvenilirliğini oldukça azaltmaktadır.
- **Hassas lifli yapı:** Delik delme, kesme gibi hassas imalatlara maruz kalan kompozit malzemelerde liflerden açılma gözlemlendiğinden imalatla kısıtlama durumu söz konusudur.

Kompozit malzemelerin, yukarıda da bahsedilen olumsuz özelliklerini ortadan kaldırmaya yönelik çeşitli teorik çalışmalar son yıllarda sıklıkla yapılmaktadır. Yapılacak iyileştirmeler sayesinde, kompozit malzemelerin her alanda kullanıma uygun malzemeler haline gelmesi kaçınılmaz olacaktır.

2.3.3 Kompozit malzemelerin kullanım alanları

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Antik Mısır'da saman ile takviye edilmiş kil duvarlar ilk kompozit malzeme örnekleri olarak kabul edilmektedir [47]. 19. yüzyılda ise, demir çubuklar ile güçlendirilen taşlar çelik konstrüksiyonun ilk adımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Kolay şekillendirilmeleri, metallere göre düşük özgül ağırlıkları, üstün yüzey kalitesi ve korozyona dayanımı plastiklerin kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Buna karşılık, düşük sertlik ve dayanımlarından dolayı plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Mevcut eksikliklerin giderilmesi

amacıyla 1950’li yıllarda polimer esaslı kompozitler geliştirilerek; yüksek dayanım, termal kararlılık, sertlik ve aşınmaya karşı dayanım gibi özellikleriyle geliştirilmiş malzemeler elde edilmiştir.

Günümüzde ise taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan kompozit malzemeler ile evlerimiz inşa edilmektedir. En güncel kompozit malzeme örneklerinden biri de selüloz ve reçineden oluşan, gün boyu kullandığımız kağıtlardır. Tekerlekli sandalye yapımında kullanılan cam ve karbon elyaf takviyeli polyesterler, tıbbi tetkik cihazları ve diş muhafazalarında kullanılan cam elyaf takviyeli polimerler sağlık sektöründe kolaylık sağlayan kompozit malzeme örnekleridir. Sandalye, masa, televizyon sehpaları, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makineleri gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif eşyalarda kompozit malzemeler kullanılarak; karmaşık parçaların üretimi, kolay montaj, elektriksel yalıtım ve hafiflik gibi avantajlar sağlanmaktadır. Çello ve keman yapımında kullanılan karbon-epoksi, gitar yapımında kullanılan elyaf karbon arası polimer köpük ve akustik gitar yapımında kullanılan grafit-epoksinin yanı sıra ileri kompozit malzemelerin müzik aletleri yapımında yaygın olarak kullanılması için araştırmalar yapılmaktadır. Yaylı sazların ileri kompozit malzemelerden yapılması durumunda, boyun kısmında tellerin gerilmesinden dolayı oluşan deforme yapılan iyileştirmelerle çözülmeye çalışılmaktadır. Son yıllarda spor araç ve gereçlerinin üretiminde de çok tercih edilen kompozit malzemeler korozyona dayanım, hafiflik, şok emme ve sağlamlık gibi üstün özellikler sağlamaktadırlar. Özellikle ağırlığın azalması dolayısıyla hareket kabiliyetinin ve dayanıklılığın artmasına neden olan cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitler spor araç ve gereçlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kompozitler kano, sörf ve yatlar için çok önemli olan malzeme yorgunluğu ve darbe dayanımı konusunda da üstün özelliklere sahiptirler. Dağ bisikletleri en iyi dayanım/ağırlık oranı ve en düşük ağırlık özelliklerini sağlamak için karbon elyafı ile üretilmektedirler. Ayrıca golf sopası, tenis raketi gibi spor ürünleri de ağırlığı düşürmek için karbon elyafı takviyeli kompozit malzemelerden üretilmektedirler. Bunların dışında, su ve kar kayakları, kano kürekleri, su kaydırakları, sörf tahtaları, bisikletler, spor ayakkabılar, golf sopaları ve zıpkın gövdesi de çeşitli kompozit malzemeler ile üretilmektedirler. Yat ve teknelerin çeşitli kısımlarında ve yelken direklerinde kullanılan aramid ile epoksiden oluşan kompozitler denizcilik sanayinde yaygın olarak

kullanılmaktadırlar. Traktörlerin kaporta, kabin ve koltukları ile toplu taşıma araçlarının koltuklarında kullanılan seramik matrisli kompozitler; konteynerlerin tabanlarını oluşturan cam takviyeli termoplastikler; toplu taşıma araçlarının havalandırma kanalları, port bagajlar, gösterge panelleri ve golf arabalarının kaporta ve tavanları ile teleferiklerde kullanılan cam takviyeli polimerler ulaşım ve otomotiv sektöründe kullanılan çok çeşitli kompozit malzemelerin bilinen örnekleridir. Özellikle otomotiv sektöründe, müşterilerin daha çabuk hızlanabilen ve durabilen otomobil ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla daha küçük motorlu, daha az yakıtle çalışan ve daha hafif otomobiller üretmeye çalışan üreticiler; otomobil kaportası, iç donanım, motor bileşenleri, tamponlar, lastikler, cam silecekleri, filtre kutuları pedallar, dikiz aynası, farlar, hava giriş manifoldu, spoiler ve hatta yan gövde kaportasına kadar pek çok otomobil parçasını kompozit malzemelerden üretmektedirler. Yine trenlerin konstrüksiyonunda kullanılan prepreg kompozitler düşük maliyetleri ve ağırlıkları, kolay montajları ve yüksek dayanımları ile daha hızlı trenlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadırlar. Toplu konut yapımında, cephe korumalarında, tatil evlerinde, çevre güzelleştirme çalışmaları sırasında heykeller, banklar ve hatta elektrik direklerinin yapımında kullanılan kompozit malzemeler şehircilik sektöründe çok sayıda ve aynı tipteki ürünlerin kısa sürede imal edilebilmesini, kolay montaj ile iş gücünden ve maliyetten tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, imal edilen ürünlerde hafiflik, yüksek dayanım ve izolasyon sağlayarak bakım giderlerini düşüren kompozit malzemeler yaygın olarak tercih edilmektedirler. Bunların yanı sıra, köprü tabanları, tırabzanları, yürüme yolları ve taşıyıcı konstrüksiyonda tercih edilen kompozit malzemeler binaların balkon korkulukları, kapılar, yer kaplamaları ve hatta banyolarda küvet ve lavaboların yapımında kullanılmaktadırlar. Yüzme havuzları, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları ve inşaat kalıpları da tasarımı kolaylaştırıp esnekleştiren, nakliye ve montajda zamandan ve işgücünden tasarruf sağlayan kompozit malzeme uygulamalarına örneklerdir. Kompozit malzemeler kullanılarak üretilen tahıl depolama ambarları, seralar, su boruları ve sulama kanalları ihtiyaca göre ışık geçirgenliği, doğa şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük maliyet ve kolay montaj gibi pek çok konuda avantajlıdırlar.

Havacılık sektöründe en önemli husus, doğru malzemenin belirlenip yapının tamamında değerlendirilmesidir. Hava araçları; genellikle gövde ağırlık kontrolü,

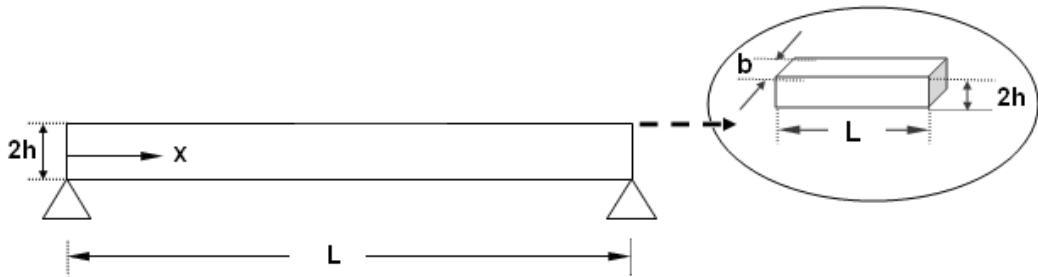
uzun hizmet ömrü, sistem tasarımının ana hatları ve maliyet karakterlerinin yanı sıra belirli mesafe, seyir sürati, irtifa gibi performans gereksinimlerini karşılayacak biçimde tasarlanmaktadırlar. Diğer tüm koşulların eşit olduğu durumda ağırlığı en düşük seviyede tutan tasarım kıstasını sağlayan en uygun tasarım olacaktır. Buna göre uygun özelliklere sahip hafif malzemeler en iyi özellikleri sağlayacaktır. Son 30 yılda reçine ve elyaf teknolojisindeki büyük gelişmeler ile iyileştirilen kompozit malzemelerde, hedeflenen elastisite modülü değerlerine ulaşılmıştır. Hafifliklerine oranla üstün mekanik özellikteki kompozit malzemeler hava araçlarının iç mekanlarının yanı sıra yapısal parçalarında da kullanılmaktadırlar. Günümüzde, askeri ve sivil uçak endüstrisindeki pek çok üretici, başta uçak gövde ve motorlarında olmak üzere hava araçlarının çok çeşitli kısımlarında kompozit malzemeleri kullanmaktadır. Uçak sanayinde kullanılan kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilen polimer esaslı reçineler epoksi, polyester ve naylonlar olarak gruplandırılabilirler. Özellikle epoksi reçineler düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilmeleri, yüksek aşınma dirençleri, hemen hemen her türlü yüzeye iyi yapışabilmeleri ve üstün kimyasal dirençleri ile uzay ve havacılık endüstrisinde karbon, cam ve bor gibi çeşitli takviye malzemeleri ile bir araya getirilerek kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Kompozit malzemelerin tasarımında iki önemli faktör vardır. Bunlardan ilki matristeki fiberin yönelme doğrultusudur. İkincisi ise malzeme tasarımında aerodinamik koşulların da göz önünde bulundurulması zorunluluğudur. Bu iki husus en uygun biçimde değerlendirildiğinde ortaya çıkan kompozit malzemelerin imalata uygunluğu, bakım maliyetlerinin düşük ve mekanik özelliklerinin iyi olması uçak tasarımında yeni ufuklar açmaktadır.

3. KİRİŞ YAPININ DİNAMİK DAVRANIŞI

Bu bölümde piezoelektrik yamalı kiriş yapının dinamik davranışı incelenmiştir. Her biri piezoelektrik dönüştürücü olarak kabul edilen yamaların algılayıcı ya da eyleyici olarak kullanıldığı farklı durumlar için piezoelektrik yamalı kiriş teorik olarak modellenmiş ve hareket denklemleri çıkarılmıştır. İzotropik ve anizotropik kiriş için ayrı ayrı türetilen denklemlerde, piezoelektrik dönüştürücülerin kirişin tek ve iki yüzeyine yapıştırılmış olduğu durumlar esas alınmıştır. Çok sayıda ve farklı konumlarda yerleştirilmiş dönüştürücüler için yapılan modellemeler ile kiriş hareket denklemleri çıkarılmış, bu sayede değişken konumda ve sayıda yamalar bulunduran kirişler için genel bir teorik çalışmanın yapılması amaçlanmıştır.

3.1 Serbest Titreşim Durumu

Basit kiriş modeli için serbest titreşim hareket denkleminde yola çıkılmak suretiyle Şekil 3.1’de görülen kirişin doğal frekansları belirlenebilmektedir. Hareket denklemlerindeki farklılıktan dolayı izotropik ve katmanlı kiriş için doğal frekans hesabı ayrı ayrı yapılmıştır. Öncelikle izotropik kiriş için çıkarılan denklemlerden farklı mod şekilleri için doğal frekans denklemi elde edilmiş, daha sonra aynı işlemler katmanlı yapı için yinelenmiştir.



Şekil 3.1 : İncelenen basit kiriş.

İlk olarak incelenen izotropik kiriş için serbest titreşim hareket denklemi aşağıdaki gibi verilmiştir. Kiriş yapının izotropik olduğu kabulü ile ifade edilen Denklem 3.1’de, E izotropik kirişin elastisite modülü, I kirişin atalet momenti, ρ kiriş

yoğunluğu, A kiriş kesit alanı, t zaman ve $W(x,t)$ ise yanlamasına yer değiştirme olup konum ve zamana bağlı bir fonksiyondur.

$$EI \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.1)$$

İzotropik kiriş yapı için harmonik hareket kabulü yapılması durumunda kirişin doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenebilir. Dolayısıyla, $\phi_n(x)$ mod şekli ve $q_n(t)$ modal koordinatlar olmak üzere, yanlamasına yer değiştirme için Denklem 3.2’de verilen dönüşüm esas alınmıştır. Denklemden n tane mod kullanılmıştır.

$$W(x,t) = \sum_{n=1} \phi_n(x) q_n(t) \quad (3.2a)$$

$$\frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} = \sum_{n=1} \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} q_n(t) \quad (3.2b)$$

$$\frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial t^2} = \sum_{n=1} \phi_n(x) \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} \quad (3.2c)$$

Yukarıda ifade edilen dönüşümün, Denklem 3.1’de verilen serbest titreşim hareket denkleminde uygulanması sonucunda aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$EI \sum_n \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} q_n(t) + \rho A \sum_n \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} \phi_n(x) = 0 \quad (3.3)$$

Ortogonalite koşullarının kullanılabilmesi amacıyla yukarıdaki denklem $\phi_m(x)$ ile çarpılmış ve $\int_0^L (\cdot) dx$ ile integrali alınmıştır. Bu sayede ortogonalite kullanılarak Denklem 3.4 elde edilmiştir.

$$EI \left[\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx \right] q_n(t) + \rho A \left[\int_0^L \phi_n^2(x) dx \right] \ddot{q}_n(t) = 0 \quad (3.4)$$

Serbest titreşim durumu incelenen kiriş için hareket denklemi Denklem 3.5’te verildiği üzere literatürdeki gibi yazıldığında Denklem 3.6 elde edilmiştir.

$$\ddot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = 0 \quad (3.5)$$

$$\ddot{q}_n(t) + \frac{EI}{\rho A} \left[\frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_n(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] q_n(t) = 0 \quad (3.6)$$

Böylece izotropik kirişin serbest titreşim hareket denkleminde yola çıkılarak elde edilen doğal frekans ifadesi Denklem 3.7’de verilmiştir. Doğal frekansın elde edilmesinin ardından kirişin sönümlenme katsayısı da Denklem 3.8 ve 3.9 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{EI \int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_n(x) dx}{\rho A \int_0^L \phi_n^2(x) dx}} \quad (3.7)$$

$$\zeta_n = \frac{C}{C_c} \quad (3.8)$$

$$C_c = 2\rho A \omega_n \quad (3.9)$$

İzotropik kirişteki benzer işlemler ile katmanlı kiriş için Denklem 3.10’da verilen serbest titreşim hareket denkleminde yola çıkılmak suretiyle doğal frekans, Denklem 3.11’de verildiği gibi elde edilmiştir. Aşağıda verilen serbest titreşim hareket denkleminde D_{11} katmanlı kirişin eğilme katılığını ifade etmektedir. Katmanlı kirişin sönümlenme oranı ise yukarıda verilen Denklem 3.8 ve 3.9 kullanılarak hesaplanabilir.

$$D_{11}b \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.10)$$

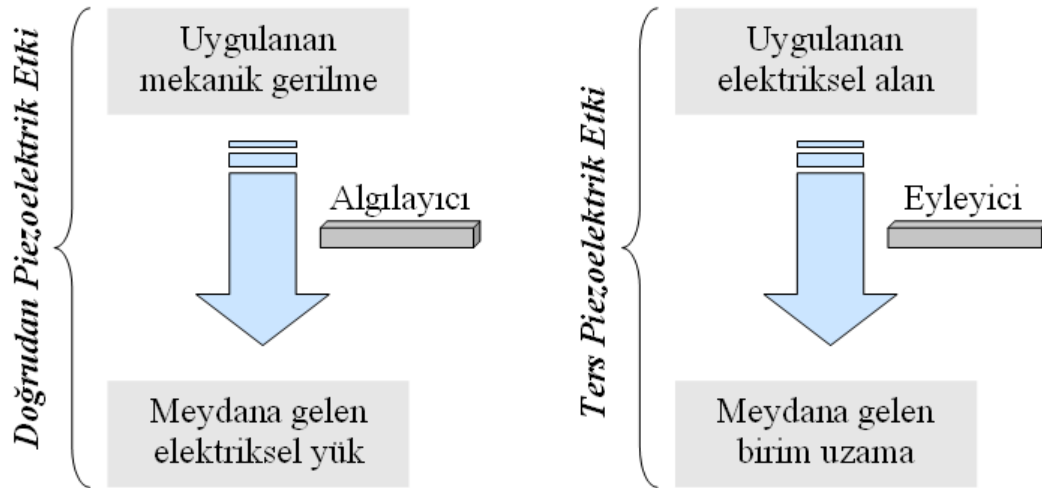
$$\omega_n = \sqrt{\frac{D_{11}b \int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_n(x) dx}{\rho A \int_0^L \phi_n^2(x) dx}} \quad (3.11)$$

İzotropik ve katmanlı kiriş için sınır koşullarından bağımsız olarak türetilen doğal frekans ifadeleri ile her türlü sınır koşulu için kiriş doğal frekansı hesaplanabilir. Denklem 3.7 ve 3.11’de mod şekli, $\phi_n(x)$, yerine ilgili sınır koşullarına ait ifadelerin

konulması sonucunda farklı modlarda ve farklı sınır koşulları altında kiriş yapının doğal frekansı ve sönümlleme oranı elde edilebilir. Farklı sınır koşulları altında kirişin mod şekilleri ve ilgili diğer ifadeler literatürde mevcut olup sayısal sonuçlara ulaşılmasında sözü geçen kaynaktan yararlanılmıştır [50].

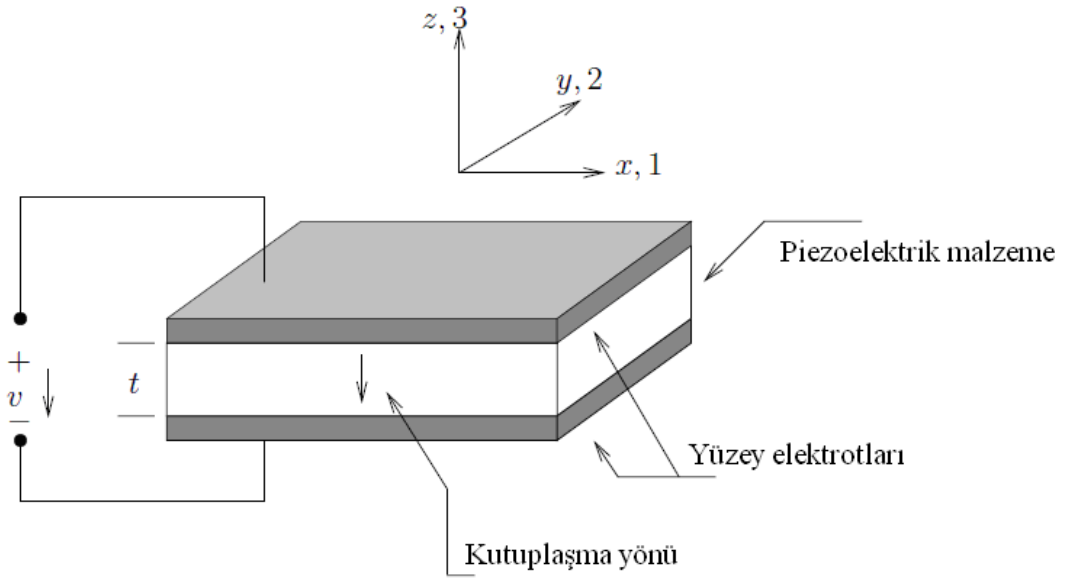
3.2 Piezoelektrik Yamalar

Çalışma kapsamında incelenen kiriş yüzeyine yapıştırılmış piezoelektrik yamalar birer piezoelektrik dönüştürücüdürler. Daha önceki bölümlerde değinildiği üzere, piezoelektrik dönüştürücüler çeşitli yapı ve şekillerde bulunabilirler. Hem algılayıcı hem de eyleyici olarak kullanılabilen piezoelektrik dönüştürücüler, bu özelliklerinden dolayı akıllı yapı uygulamalarında en yaygın olarak tercih edilen sistemler olup çalışma prensipleri Şekil 3.2 ile özetlenmiştir.



Şekil 3.2 : Piezoelektrik dönüştürücülerin çalışma prensibi.

Esas yapının yüzeyine gömülmüş ya da yapıştırılmış biçimde kullanılabilen piezoelektrik dönüştürücülerin genel yapısı basit olarak Şekil 3.3'te görülmektedir. Eksen takımlarının, kutuplanma yönünün ve uygulanan elektrik alanın yönlerinin de genel olarak belirtildiği şekil, çalışmanın tamamında algılayıcı ve eyleyici olarak kullanılan yamalar için geçerlidir. Teorik olarak farklı boyutlardaki algılayıcı ve eyleyicilerin yüzeye yapıştırıldığı kiriş yapı için denklemler türetilmiş olsa da çalışma kapsamında yama olarak tek tip piezoelektrik dönüştürücü kullanılmıştır. Bu sayede farklı boyutlardaki yamalar için yeniden model geliştirilip denklemlerin çıkarılması gereksinimi ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3.3 : Basit bir piezoelektrik dönüştürücü [44].

3.3 Kiriş Yapının Modellenmesi

Piezoelektrik yamalı kirişler için geliştirilen modeller, kinematik kabullerin ve kiriş ile piezoelektrik dönüştürücü arasındaki etkileşiminin farklılığından dolayı çeşitlilik göstermektedirler. Piezoelektrik yamalı kiriş modellerinin geliştirilmesi esnasında aşağıda sıralanan kabuller yapılmış ve çalışmanın tamamında geçerli kılınmıştır.

- Kiriş yapıda sıfır değerini almayan tek eksenel gerilme, kirişin kalınlığı boyunca doğrusal olarak değişen gerilmedir.
- Piezoelektrik yamada sıfır değerini almayan tek eksenel gerilme, yamanın kalınlığı boyunca sabit kalan ve yama uzunluğu boyunca değişen gerilmedir.
- Piezoelektrik yamalar kiriş yüzeyine mükemmel olarak yapıştırılmış olup yama hareketleri kirişin katılığı ile sınırlıdır. Başka bir deyişle, mükemmel olmayan yapıştırma durumlarından kaynaklanan kayma etkileri yok sayılmıştır.
- Piezoelektrik yamaların kutuplaşma yönü kirişin eğilme doğrultusundadır.
- Piezoelektrik yamalar aynı boyutta ve özellikte olup tek tiptirler.
- Kiriş uzunluğu L , genişliği b , kalınlığı h ile; yama uzunluğu L_p , genişliği b_p , kalınlığı h_p ile tanımlanmıştır.

3.3.1 Asimetrik yamalı kiriş

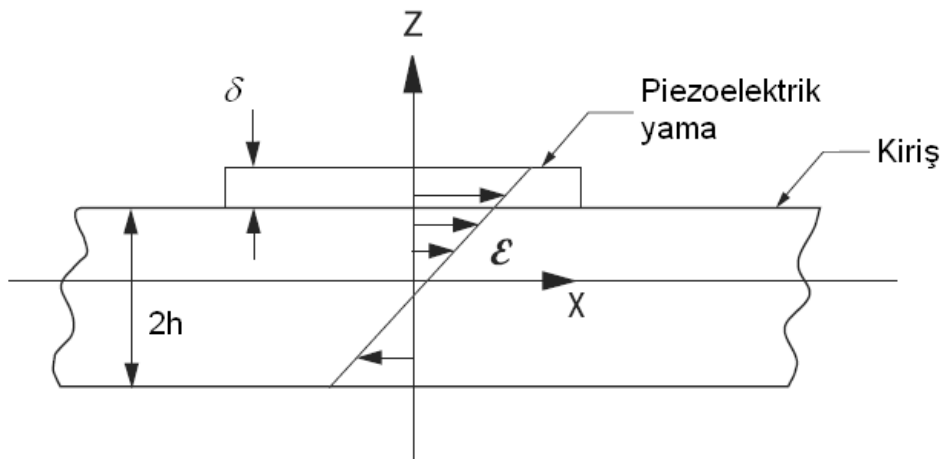
İlk olarak, yalnızca bir yüzeyine sonlu sayıda piezoelektrik dönüştürücü yapıştırılmış kiriş yapının teorik modellemesi yapılmış ve hareket denklemleri çıkarılmıştır. Asimetrik olarak konumlandırılmak suretiyle yüzeye yapıştırılmış yamalar ile kiriş yapı Şekil 3.4'te görülmektedir. Kirişin tamamında aynı boyut ve özellikteki dönüştürücülerin algılayıcı olarak kullanıldığı durumlar ilerleyen bölümlerde ayrıca ele alınmıştır.



Şekil 3.4 : Asimetrik yamalı kiriş yapı.

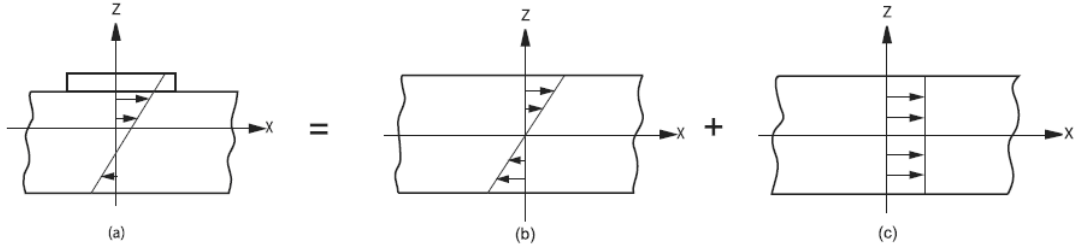
Basitleştirme amacıyla kiriş yapı üzerinde yalnızca bir yamanın yapıştırılmış olduğu durum esas alınmıştır. Tek bir yama için yapılan modellemenin yapıdaki tüm yamalar için geçerli olduğu kabul edilmiş ve yapının genel modelinin her bir yama için geliştirilen modellerin toplamına eşit olduğu öngörülmüştür.

Yamaların yalnızca bir yüzeye yapıştırıldığı asimetrik kiriş yapının gerinimi de asimetrik olarak elde edilmektedir. Tek piezoelektrik yamanın varlığından dolayı ilaveten bir uzama bileşeninin dahil olmasıyla elde edilen gerinim dağılımı Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5 : Asimetrik yamalı kiriş yapıda gerinim dağılımı [44].

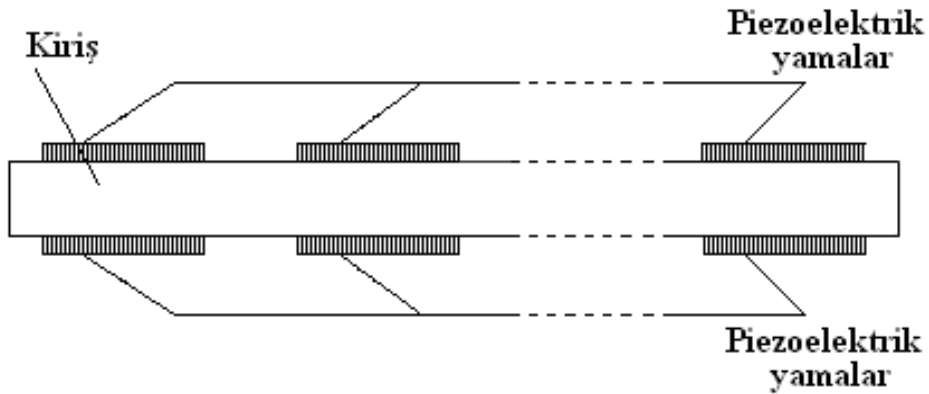
Tek yamalı durum için kiriş yapının gerinim dağılımı iki parça halinde incelenebilir. Aynı anda hem eğilmeye hem de uzamaya maruz kalan kiriş yapı için gerinim, eğilme ve uzama bileşenleri olmak üzere Şekil 3.6'da gösterilen iki gerinim dağılımının toplamı ile ifade edilmektedir.



Şekil 3.6 : Asimetrik yamalı kirişte gerinim dağılımı: a) toplam gerinim, b) eğilme bileşeni, c) uzama bileşeni.

3.3.2 Simetrik yamalı kiriş

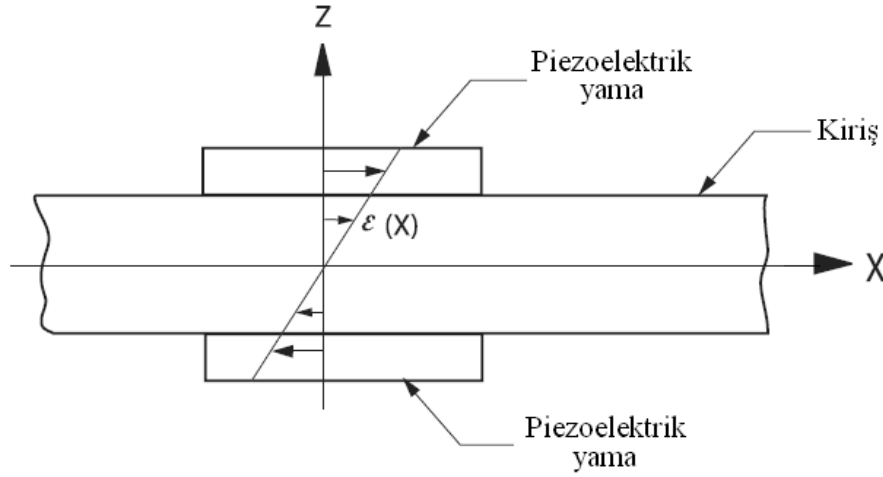
Çalışmanın bu bölümünde ise alt ve üst yüzeylerine simetrik olarak sonlu sayıda piezoelektrik dönüştürücü yapıştırılmış kiriş yapının modellenmesi yapılmıştır. Şekil 3.7'de görülen simetrik yamalı kiriş yapının tamamında aynı boyut ve özellikte dönüştürücüler kullanılmış olup, simetrik olarak konumlandırılmış dönüştürücülerin algılayıcı ya da eyleyici olarak kullanıldığı farklı durumlar ilerleyen bölümlerde ayrıca incelenmiştir.



Şekil 3.7 : Simetrik yamalı kiriş yapı.

Asimetrik yamalı kiriş yapıda olduğu gibi, basitleştirme amacıyla kiriş yapı üzerinde yalnızca bir çift yamanın yapıştırılmış olduğu durum esas alınmış ve yapının genel modelinin her bir yama çifti için geliştirilen modellerin toplamına eşit olduğu öngörülmüştür.

Kiriş yapının alt ve üst yüzeylerine simetrik olarak yapıştırılmış piezoelektrik yamalar kirişte bir moment etkisi ile eğilme meydana getirmektedirler. Şekil 3.8’de gösterilen gerinim dağılımı yamalara 180°’lik faz farkı ile eşit büyüklükte uygulanan elektriksel potansiyel fark neticesinde ortaya çıkmaktadır. Faz farkından dolayı yalnızca eğilmenin meydana geldiği kiriş yapıda, yamalardan biri uzarken diğeri kısalmaktadır [44].



Şekil 3.8 : Simetrik yamalı kiriş yapıda gerinim dağılımı [44].

Piezoelektrik yamalardan birine Şekil 3.3’te gösterilmiş olan kutuplaşma yönü doğrultusunda V elektriksel potansiyel farkı uygulandığında eyleyici olarak çalışan piezoelektrik yamada 1 yönünde uzama meydana gelmektedir. Yamanın mükemmel yapıştırıldığı kabulü ile birlikte kiriş kalınlığı boyunca gerinimin doğrusal dağılım gösterdiği kabul edilmiştir. Sonuç olarak, kirişin tarafsız eksen üzerindeki kısmı ve üst yüzeydeki yama çekmeye maruz kalırken, kirişin geri kalan kısmı ve alt yüzeydeki yama basmaya maruz kalmaktadır. Kiriş ve yama yüzeyinde sürekli gerinim dağılımına karşılık, gerilme dağılımı süreksiz olup yamalardaki toplam gerinim dağılımından yola çıkılarak hesaplanabilir.

Simetrik ve asimetrik yamalı kiriş yapı için verilen gerinim dağılımlarından da görüleceği üzere eyleyici olarak kullanılan tek yamanın kirişte meydana getirdiği moment etkisi her ikisi de eyleyici olarak kullanılan çift yamanın meydana getirdiğinin yarısı kadar olmamaktadır. Bu farklılık asimetrik yamalı kirişin gerinim ve moment dağılımında ikinci eyleyici yamanın etkisinin bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Çift piezoelektrik yamalı kirişte ikinci yamaya elektriksel bir potansiyel fark uygulanmadığı durumda ise, ikinci yamanın katılık etkisi hesaplamalara dahil edilmektedir. Bu ikinci modelde bileşke moment, her iki

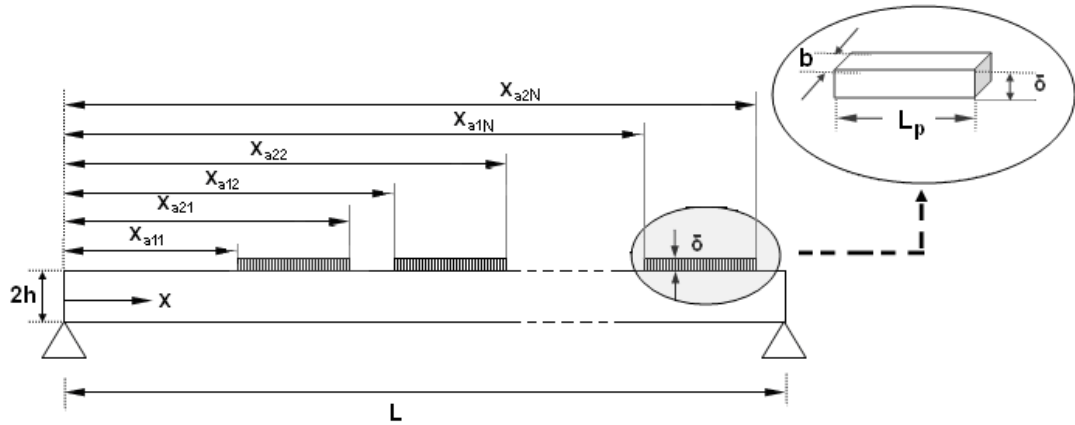
yamanın da elektriksel potansiyel farka maruz kaldığı simetrik yamalı kirişin tam olarak yarısına eşittir. Bir yamanın eyleyici, diğerinin ise algılayıcı olarak kullanıldığı uygulamalarda, özellikle titreşim kontrolünde, simetrik yamalı kiriş için önerilen bu ikinci model tercih edilmektedir.

3.4 Kiriş Yapının Hareket Denklemleri

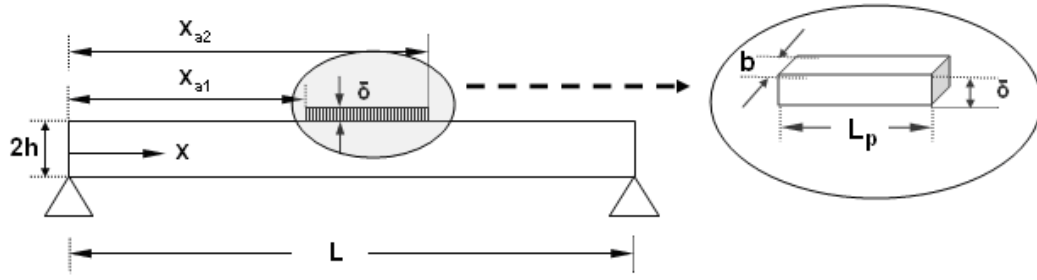
Piezoelektrik yamalı kiriş yapı için asimetrik ve simetrik olmak üzere geliştirilen iki model kullanılarak kiriş yapının hareket denklemleri elde edilmiştir. Kirişin izotropik ve katmanlı yapısı hareket denklemlerini değiştirdiğinden dolayı, izotropik ve katmanlı kiriş yapı için denklemler ayrıca çıkarılmıştır. Hareket denklemlerinin türetilmesinde öncelikli olarak sonlu (N) sayıda yamanın var olduğu modeller incelenmiştir. Böylece genelleştirilmiş hareket denklemlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Farklı yama sayıları için geçerli olan hareket denklemlerinden yola çıkılarak ise tek ya da çift yamalı basitleştirilmiş kiriş modeller değerlendirilmiştir.

3.4.1 Asimetrik yamalı kiriş

Yalnızca bir yüzeyine yapıştırılmış piezoelektrik yamalar ile birlikte modellenen kiriş yapı Şekil 3.9'da sonlu (N) sayıda piezoelektrik yamalı durum için Şekil 3.10'da ise tek yamalı durum için verilmiştir. Başlangıçta çok yamalı kiriş model için çıkarılan hareket denklemleri daha sonra tek yama modeli için türetilmiştir.



Şekil 3.9 : Sonlu (N) sayıda ve asimetrik konumlandırılmış piezoelektrik yamalı kiriş yapı.



Şekil 3.10 : Tek piezoelektrik yamalı kiriş yapı.

3.4.1.1 Asimetrik yamalı izotropik kiriş

Euler – Bernoulli kiriş teorisine göre, Şekil 3.9’deki gibi modellenmiş piezoelektrik yamalı kiriş yapı için hareket denklemi Denklem 3.12’de verilmiştir.

$$EI \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = f(t) + \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \quad (3.12)$$

Kiriş yapının izotropik olduğu kabulü ile ifade edilen yukarıdaki denklemde, E izotropik kirişin elastisite modülü, I kirişin atalet momenti, ρ kiriş yoğunluğu, A kiriş kesit alanı, c sönümleme katsayısı, $f(t)$ dış kuvvet, $M(x)$ indüklenmiş moment ya da başka deyişle piezoelektrik yama tarafından kirişe etkiyen moment ve t zamanı ifade etmektedir. $W(x,t)$ ise daha önceden belirtildiği üzere, yanlamasına yer değiştirme olup konum ve zamana bağlı bir fonksiyondur.

Bir yüzeyine sonlu (N) sayıda piezoelektrik yama yapıştırılmış izotropik kiriş yapı için; $i = 1, 2, \dots, N-1, N$ olmak üzere, i ’inci yamaya ait eksenel gerilme ve moment ifadeleri Denklem 3.13 ve 3.14’te sırasıyla verilmiştir. Her yama için ayrıca hesaplanan eksenel gerilme değeri (σ_{11}^i), moment (M^i) ifadesinde yerine konularak yamaların tek başlarına oluşturdukları moment değeri elde edilir.

$$\sigma_{11}^i = -c_{11}^i y \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} - \frac{e_{31}^i}{\delta} V^i \quad (3.13)$$

$$M^i = \int_h^{h+\delta} \sigma_{11}^i b_p y dy \quad (3.14)$$

C_{11}^i sabit elektrik alan etkisinde i ’inci yamaya ait dönüştürülmüş elastisite modülü, h kiriş kalınlığının yarısı, e_{31}^i i ’inci yamaya ait dönüştürülmüş piezoelektrik sabiti,

δ yama kalınlığı, V^i i 'inci yamanın maruz kaldığı elektriksel potansiyel fark ve b_p yama genişliği olarak tanımlanmıştır. Başlangıçta da belirtildiği üzere, çalışmanın tamamında kiriş genişliği ile yama genişliği aynı kabul edilmiş ve b olarak tanımlanmıştır. Fakat denklemlerin fiziksel yorumu açısından yama genişliğinin ayrıca belirtilmesi gerektiği düşünülmüştür. Dolayısıyla denklemde b_p ile verilen yama genişliği esasında b olup kiriş genişliğine eşittir.

Eksenel gerilme değerinin Denklem 3.14'te verilen ifadede yerine konulması ile elde edilen i 'inci yamaya ait moment değerinin $i = 1, 2, \dots, N-1, N$ için toplanması ile yamalar tarafından oluşturulan toplam $M(x)$ momenti Denklem 3.15'te verildiği gibi bir seri yardımıyla hesaplanabilir.

$$M(x) = - \sum_i^N \left\{ \left[c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} + e_{31}^i b V^i (h + \frac{\delta}{2}) \right] \times [H(x - x_{ali}) - H(x - x_{a2i})] \right\} \quad (3.15)$$

Yukarıdaki ifadede $H(x)$ 'Heaviside' fonksiyonu olup kirişin süreksiz yapısından dolayı moment ifadesindeki yerini almış olup bu özel fonksiyon ile i 'inci yamanın etkisi hesaba katılmış olmaktadır. Daha önceden Şekil 3.9'da tanımlandığı üzere; x_{ali} , i 'inci yamanın kiriş üzerindeki başlangıç konumu ve x_{a2i} aynı yamanın kiriş üzerindeki bitiş konumudur. Elde edilen moment ifadesi Denklem 3.12'de yerine konulmak suretiyle, kirişin hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} EI \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial W(x,t)}{\partial t} + \sum_i \left\{ \left[c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} \right] \times [H(x - x_{ali}) - H(x - x_{a2i})] \right\} \\ = f(t) - 2 \sum_i \left\{ \left[c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \frac{\partial^3 W(x,t)}{\partial x^3} \right] \times \frac{\partial}{\partial x} [H(x - x_{ali}) - H(x - x_{a2i})] \right\} \\ - \sum_i \left\{ \left[c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} \right] \times \frac{\partial^2}{\partial x^2} [H(x - x_{ali}) - H(x - x_{a2i})] \right\} \\ - \sum_i \left\{ e_{31}^i b V^i (h + \frac{\delta}{2}) \times \frac{\partial^2}{\partial x^2} [H(x - x_{ali}) - H(x - x_{a2i})] \right\} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Daha önceden Denklem 3.2'de verilen dönüşümlerin Denklem 3.16'da yerine yazılması ile kirişin hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
& EI \sum_n q_n(t) \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} + \rho A \sum_n \phi_n(x) \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} + c \sum_n \phi_n(x) \frac{dq_n(t)}{dt} \\
& + \sum_i \left\{ c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \sum_n q_n(t) \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \times [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \right\} \\
& = f(t) - 2 \sum_i \left\{ \left[c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \sum_n q_n(t) \frac{d^3 \phi_n(x)}{dx^3} \right] \times \frac{\partial}{\partial x} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \right\} \quad (3.17) \\
& - \sum_i \left\{ \left[c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \sum_n q_n(t) \frac{d^2 \phi_n(x)}{dx^2} \right] \times \frac{\partial^2}{\partial x^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \right\} \\
& - \sum_i \left\{ e_{31}^i b V^i (h + \frac{\delta}{2}) \times \frac{\partial^2}{\partial x^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \right\}
\end{aligned}$$

Yukarıdaki eşitliğin her iki tarafı $\phi_m(x)$ ile çarpıldıktan sonra, $\int_0^L (\cdot) dx$ ile integre edilerek ortogonalite şartlarından yararlanılması amaçlanmaktadır. Bu şekilde elde edilen yeni hareket denklemi aşağıda Denklem 3.18’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
& EI \sum_n \left[q_n(t) \int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx \right] + \rho A \left[\sum_n \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} \int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx \right] \\
& + c \sum_n \frac{dq_n(t)}{dt} \int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx + \sum_i \left\{ c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \sum_n q_n(t) \int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) \right. \\
& \quad \left. \times [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx \right\} \\
& = \int_0^L f(t) \phi_m(x) dx - \sum_i \left\{ e_{31}^i b V^i (h + \frac{\delta}{2}) \int_0^L \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \phi_m(x) dx \right\} \\
& - \sum_i \left\{ c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \sum_n q_n(t) \int_0^L \frac{d^2 \phi_n(x)}{dx^2} \phi_m(x) \right. \\
& \quad \left. \times \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx \right\} \quad (3.18) \\
& - 2 \sum_i \left\{ c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3}) \sum_n q_n(t) \int_0^L \frac{d^3 \phi_n(x)}{dx^3} \phi_m(x) \right. \\
& \quad \left. \times \frac{d}{dx} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx \right\}
\end{aligned}$$

Yukarıdaki denklemde her iki tarafın $\rho A \int_0^L \phi_n^2(x) dx$ ’e bölünmesi sonucunda, modellenen kiriş yapı için hareket denklemi Denklem 3.19’da verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \sum_n \left[\frac{EI}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] q_n(t) + \sum_n \left[\frac{\int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} \\
& + \sum_n \left[\frac{c}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \frac{dq_n(t)}{dt} + \sum_i \sum_n \left[\frac{c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \right. \\
& \left. \times \frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] q_n(t) \\
& = \int_0^L \left[\frac{1}{\rho A \int_0^L \phi_n^2(x) dx} \phi_m(x) f(t) \right] dx \\
& - \sum_i \left\{ \frac{e_{31}^i b V^i (h + \frac{\delta}{2})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \\
& - \sum_i \sum_n \left\{ \frac{c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^2 \phi_n(x)}{dx^2} \phi_m(x) \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} q_n(t) \\
& - 2 \sum_i \sum_n \left\{ \frac{c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^3 \phi_n(x)}{dx^3} \phi_m(x) \frac{d}{dx} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} q_n(t)
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Nihai olarak elde edilen kiriş hareket denkleminin basit olarak ifade edilebilmesi için uzun ve karmaşık ifadeler yerine çeşitli katsayılar tanımlanmıştır. Modellenen kiriş yapının hareket denklemi bu sayede daha anlaşılabilir bir ifadeye kavuşmuş, dolayısıyla kirişin dinamik davranışı daha yorumlanabilir hale gelmiştir. Denklem 3.20’de basitleştirilmiş olarak ifade edilen kiriş hareket denklemi için tanımlanan katsayılar ise Denklem 3.21’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \sum_n A_{mn} q_n(t) + \sum_{n=1} B_{mn} \ddot{q}_n(t) + \frac{c}{\rho A} \sum_{n=1} B_{mn} \dot{q}_n(t) + \sum_i \sum_{n=1} C_{mn}^i = \int_0^L F_{mn} f(t) dx \\
& - \sum_i \sum_{n=1} G_{mn}^i q_n(t) - \sum_i H_{mn}^i
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$A_{mn} = \left[\frac{EI}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \quad (3.21a)$$

$$B_{mn} = \left[\frac{\int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \quad (3.21b)$$

$$C_{mn}^i = \left\{ \frac{c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \quad (3.21c)$$

$$F_{mn} = \frac{1}{\rho A \int_0^L \phi_n^2(x) dx} \phi_m(x) \quad (3.21d)$$

$$H_{mn}^i = \left\{ \frac{e_{31}^i b V^i (h + \frac{\delta}{2})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \quad (3.21e)$$

$$K_{mn}^i = \left\{ \frac{c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^2 \phi_n(x)}{dx^2} \phi_m(x) \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \quad (3.21f)$$

$$L_{mn}^i = 2 \left\{ \frac{c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^3 \phi_n(x)}{dx^3} \phi_m(x) \frac{d}{dx} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \quad (3.21g)$$

$$G_{mn}^i = K_{mn}^i + L_{mn}^i \quad (3.21h)$$

Yalnızca bir yüzeyine sonlu (N) sayıda piezoelektrik yamanın yapıştırıldığı kiriş yapı için hareket denklemi en genel haliyle Denklem 3.20’de verildiği gibi elde edilmiştir. Bu denklemden yola çıkılarak yüzeyine tek bir piezoelektrik yama yapıştırılmış kiriş için hareket denklemleri türetilir. Şekil 3.10’da görülen tek

yamalı kiriş modelinin hareket denklemleri, Denklem 3.20'nin $i = 1$ durumu için çözümü ile elde edilebilir. Denklem 3.22, tek yamalı kiriş için türetilen hareket denklemi olarak verilmiştir.

$$\sum_n A_{mn} q_n(t) + \sum_n B_{mn} \ddot{q}_n(t) + \frac{c}{\rho A} \sum_n B_{mn} \dot{q}_n(t) + \sum_n C_{mn}^{-1} = \int_0^L F_{mn} f(t) dx - \sum_n G_{mn}^{-1} q_n(t) - H_{mn}^{-1} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki hareket denklemindeki katsayılar ise Denklem 3.21'de $i = 1$ için yapılan hesaplamalarla elde edilmektedir.

3.4.1.2 Asimetrik yamalı katmanlı kiriş

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi modellenen katmanlı kiriş yapı için, hareket denklemi aşağıda verilmiştir. Denklem 3.23'te verilen hareket denkleminde D_{11} katmanlı kirişin eğilme katılığını ifade etmektedir.

$$D_{11} b \frac{\partial^4 W(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 W(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial W(x, t)}{\partial t} = f(t) + \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \quad (3.23)$$

Asimetrik olarak bir yüzeyine sonlu (N) sayıda piezoelektrik yama yapıştırılmış katmanlı kiriş yapı için, i 'inci yamaya ait eksenel gerilme ve moment ifadelerinden yola çıkılmak suretiyle bir önceki bölümde izotropik kirişin hareket denkleminde uygulanan adımlar Denklem 3.23'e aynı sıra ile uygulanmış ve sonuç olarak aşağıda verilen hareket denklemi türetilmiştir. Hareket denklemini daha anlaşılır hale getirmek amacıyla benzer katsayılar tanımlanabilir ve Denklem 3.24 daha basit bir şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
& \sum_n \left[\frac{D_{11}b}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] q_n(t) + \sum_n \left[\frac{\int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} \\
& + \sum_n \left[\frac{c}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \frac{dq_n(t)}{dt} \\
& + \sum_i \sum_n \left\{ \frac{c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} q_n(t) \\
& = \int_0^L \left[\frac{1}{\rho A \int_0^L \phi_n^2(x) dx} \phi_m(x) f(t) \right] dx \tag{3.24} \\
& - \sum_i \left\{ \frac{e_{31}^i b V^i (h + \frac{\delta}{2})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \\
& - \sum_i \sum_n \left\{ \frac{c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^2 \phi_n(x)}{dx^2} \phi_m(x) \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} q_n(t) \\
& - 2 \sum_i \sum_n \left\{ \frac{c_{11}^i b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^3 \phi_n(x)}{dx^3} \phi_m(x) \frac{d}{dx} [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} q_n(t)
\end{aligned}$$

Asimetrik yamalı izotropik kiriş yapı için çıkarılan hareket denklemi ile Denklem 3.24'te verilen hareket denklemi kıyaslandığında, ilk terim dışında bir farklılığın olmadığı görülmektedir. İzotropik kirişin eğilme katılığı EI ile ifade edilirken, katmanlı yapının eğilme katılığı $D_{11}b$ ile ifade edilmektedir. Hareket denklemine doğrudan yansıyan bu fark, katmanlı yapının özelliklerinin elyaf yönelimine bağlı olarak değişiminden kaynaklanmaktadır.

Sonlu (N) sayıda piezoelektrik yamanın yalnızca bir yüzeyine yapıştırılmış olduğu katmanlı yapı için türetilen hareket denkleminde $i=1$ durumunda elde edilen denklem Şekil 3.10'da görüldüğü gibi modellenen katmanlı kiriş yapının hareket

denklemdir. Tek yamalı katmanlı kiriş yapı için bu şekilde türetilen hareket denklemi aşağıda Denklem 3.25'te verilmiştir. İncelenen tek yamalı katmanlı model için çıkarılan hareket denkleminde kullanılan katsayılar Denklem 3.26'da tanımlanmıştır.

$$\sum_n A_{mn} \ddot{q}_n(t) + \sum_n B_{mn} \ddot{\ddot{q}}_n(t) + \frac{c}{\rho A} \sum_n B_{mn} \dot{q}_n(t) + \sum_n C_{mn}^{-1} = \int_0^L F_{mn} f(t) dx - \sum_n G_{mn}^{-1} q_n(t) - H_{mn}^{-1} \quad (3.25)$$

$$A_{mn} = \left[\frac{D_{11} b}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \quad (3.26a)$$

$$B_{mn} = \left[\frac{\int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \quad (3.26b)$$

$$C_{mn}^{-1} = \left\{ \frac{c_{11}^{-1} b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) [H(x - x_{a11}) - H(x - x_{a21})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \quad (3.26c)$$

$$F_{mn} = \frac{1}{\rho A \int_0^L \phi_n^2(x) dx} \phi_m(x) \quad (3.26d)$$

$$H_{mn}^{-1} = \left\{ \frac{e_{31}^{-1} b V^1 (h + \frac{\delta}{2})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a11}) - H(x - x_{a21})] \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \quad (3.26e)$$

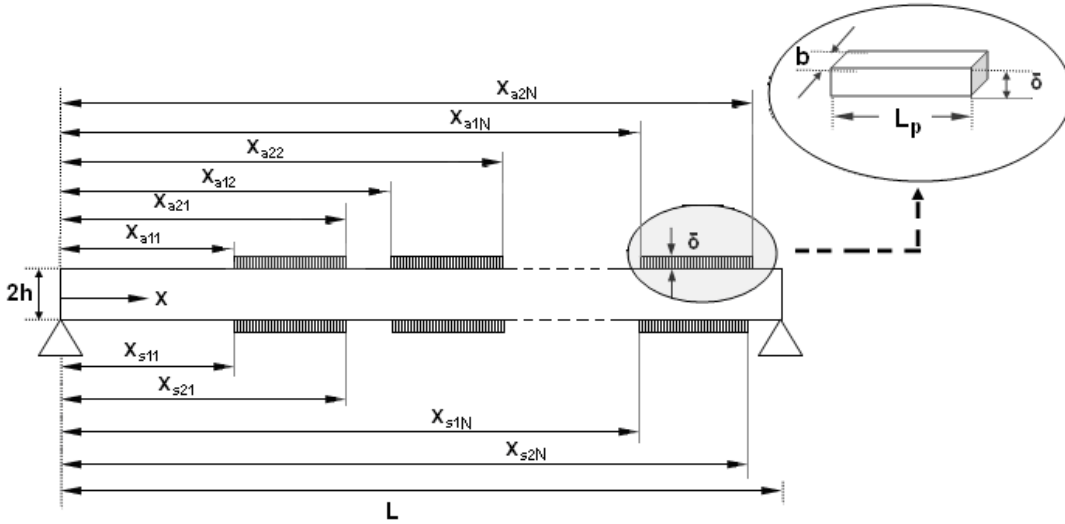
$$K_{mn}^{-1} = \left\{ \frac{c_{11}^{-1} b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^2 \phi_n(x)}{dx^2} \phi_m(x) \frac{d^2}{dx^2} [H(x - x_{a11}) - H(x - x_{a21})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \quad (3.26f)$$

$$L_{mn}^{-1} = 2 \left\{ \frac{c_{11}^{-1} b \delta (h^2 + h\delta + \frac{\delta^2}{3})}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^3 \phi_n(x)}{dx^3} \phi_m(x) \frac{d}{dx} [H(x - x_{a11}) - H(x - x_{a21})] dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right\} \quad (3.26g)$$

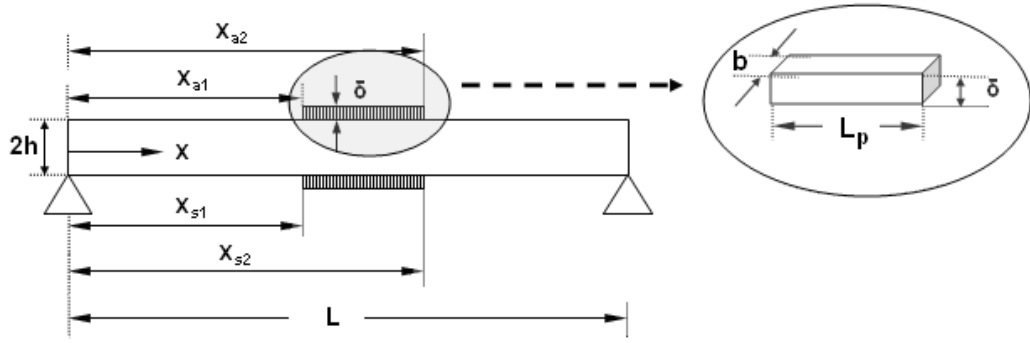
$$G_{mn}^{-1} = K_{mn}^{-1} + L_{mn}^{-1} \quad (3.26h)$$

3.4.2 Simetrik yamalı kiriş

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere, kiriş yapının alt ve üst yüzeylerine yapıştırılan piezoelektrik yamalar algılayıcı/eyleyici ya da eyleyici/eyleyici mekanizmalar olarak modellenebilirler. Şekil 3.10'dan da görüleceği üzere, yamalar algılayıcı/eyleyici çiftleri halinde ikili ikili ele alınmış ve yama numaralandırmaları algılayıcı/eyleyici çiftlerine verilmiştir. Başka bir deyişle, $i = 1, 2, \dots, N-1, N$ her bir yama çiftini ifade etmek üzere kiriş yapının her iki yüzeyinde sonlu $(2N)$ sayıda piezoelektrik yama yapıştırılmış olduğu kabul edilmiştir. Her iki yüzeyine yapıştırılmış piezoelektrik yamalar ile birlikte modellenen kiriş yapı Şekil 3.11'de sonlu (N) sayıda piezoelektrik yama çifti ile, Şekil 3.12'de ise bir çift yama ile görülmektedir.



Şekil 3.11 : Sonlu $(2N)$ sayıda ve simetrik konumlandırılmış piezoelektrik yamalı kiriş yapı.



Şekil 3.12 : Çift piezoelektrik yamalı kiriş yapısı.

Asimetrik yamalı kiriş modelinde olduğu gibi, öncelikli olarak çok yamalı kiriş modeli için çıkarılan hareket denklemleri daha sonra tek bir çift yama modeli için türetilmiştir. Simetrik yamalı kiriş yapısı için daha önceden bahsedildiği üzere her iki yüzeydeki yamaların eyleyici olduğu eyleyici/eyleyici model ve bir yüzeydeki yamanın eyleyici, diğer yüzeydeki yamanın algılayıcı olduğu eyleyici/algılayıcı model olmak üzere iki durum söz konusudur. Çalışma kapsamında simetrik yamalı kiriş modelinde yalnızca eyleyici/algılayıcı konfigürasyonu için hareket denklemleri çıkarılmıştır. Asimetrik yamalı kiriş yapısında olduğu gibi, kirişin izotropik ve katmanlı yapısı için de hareket denklemleri ayrı ayrı türetilmiştir.

3.4.2.1 Simetrik yamalı izotropik kiriş

Çalışmanın bu kısmında, simetrik konumlandırılmış piezoelektrik yamalardan üst yüzeydekilerin eyleyici, alt yüzeydekilerin ise algılayıcı olduğu durum incelenmiştir. Simetrik yamalı izotropik kirişin eyleyici/algılayıcı konfigürasyonu için geçerli hareket denklemi, önceki bölümde asimetrik yamalı izotropik kiriş için verilen hareket denklemi olup Denklem 3.27’de görülmektedir.

$$EI \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = f(t) + \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \quad (3.27)$$

Kiriş kalınlığına kıyasla oldukça küçük kalınlıkta olduğu kabul edilen yamaların meydana getirdiği moment etkisi değişmiş, yamaların kalınlığının ihmal edildiği yeni model incelenmiştir. Yama kalınlığının ihmal edildiği yeni durumda, bir yama tarafından kirişte meydana getirilen moment etkisi Denklem 3.28’de verilmiştir.

$$M(x)^i = - \left[e_{31}^i b V^i \left(h + \frac{\delta}{2} \right) \right] \times [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \quad (3.28)$$

Eyleyici/algılayıcı yama çiftleri için yukarıda verilen moment ifadesinden de anlaşılacağı üzere, yamalar yalnızca maruz kaldıkları elektriksel potansiyel farktan dolayı kirişte moment etkisi oluşturmaktadırlar. Bu durumda algılayıcı olarak kullanılan yamanın herhangi bir moment etkisi oluşturmadığı söylenebilir. i yama çiftlerini belirtmek üzere, algılayıcı/eyleyici çiftlerinin kirişte meydana getirdiği toplam moment Denklem 3.29'da belirtilmiştir.

$$M(x) = -\sum_i^N \left\{ \left[e_{31}^i b V^i \left(h + \frac{\delta}{2} \right) \right] \times [H(x - x_{a1i}) - H(x - x_{a2i})] \right\} \quad (3.29)$$

Elde edilen moment ifadesi kiriş hareket denkleminde daha sonra yerine konulmak üzere bırakılmış, kiriş yapının harmonik hareket yaptığı kabulü ile yanlamasına yer değiştirme için Denklem 3.2'de verilen dönüşüm esas alınmıştır. Bu durumda Denklem 3.27'de verilen hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$EI \sum_n q_n(t) \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} + \rho A \sum_n \phi_n(x) \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} + c \sum_n \phi_n(x) \frac{dq_n(t)}{dt} = f(t) + \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \quad (3.30)$$

Ortogonalite koşullarından yararlanılabilmesi amacıyla, yukarıdaki eşitliğin her iki tarafı $\phi_m(x)$ ile çarpılıp, $\int_0^L (\cdot) dx$ ile integre edilmiş ve elde edilen yeni hareket denklemi Denklem 3.31'de verilmiştir.

$$EI \sum_n \left[q_n(t) \int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx \right] + \rho A \left[\sum_n \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} \int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx \right] + c \sum_n \frac{dq_n(t)}{dt} \int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx = \int_0^L f(t) \phi_m(x) dx - \int_0^L \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \phi_m(x) dx \quad (3.31)$$

Yukarıdaki denklemde her iki tarafın $\rho A \int_0^L \phi_n^2(x) dx$ 'e bölünmesi sonucunda, eyleyici/algılayıcı yama çiftleri ile modellenen izotropik kiriş yapı için hareket denklemi Denklem 3.32'de verildiği gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \sum_n \left[\frac{EI}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] q_n(t) + \sum_n \left[\frac{\int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} \\
& + \sum_n \left[\frac{c}{\rho A} \times \frac{\int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} \right] \frac{dq_n(t)}{dt} = \frac{1}{\rho A \int_0^L \phi_n^2(x) dx} \times \int_0^L [f(t) + M(x)] \phi_m(x) dx
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Denklemin basit olarak ifade edilebilmesi için uzun ve karmaşık ifadeler yerine çeşitli katsayılar tanımlanması uygun görülmüştür. Bu şekilde daha anlaşılabilir hale gelen hareket denklemi ile kirişin dinamik davranışı daha yorumlanabilir hale gelmiştir. Denklem 3.33'te basitleştirilmiş olarak ifade edilen kiriş hareket denklemi için tanımlanan katsayılar ise Denklem 3.34'te verilmiştir.

$$\sum_n A_{mn} q_n(t) + \sum_n B_{mn} \ddot{q}_n(t) + \sum_n C_{mn} \dot{q}_n(t) = F_{km} + M_{km} \tag{3.33}$$

$$N_k = \int_0^L \phi_n^2(x) dx \tag{3.34a}$$

$$A_{mn} = \frac{EI}{\rho A N_k} \int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx \tag{3.34b}$$

$$B_{mn} = \frac{1}{N_k} \int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx \tag{3.34c}$$

$$C_{mn} = c \times B_{mn} \tag{3.34d}$$

$$F_{km} = \frac{1}{\rho A N_k} \int_0^L f(t) \phi_m(x) dx \tag{3.34e}$$

$$M_{km} = \frac{1}{\rho A N_k} \int_0^L \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \phi_m(x) dx \tag{3.34f}$$

Elde edilen kiriş hareket denkleminde n seri açılımındaki terimler yalnızca $m = n$ durumunda sıfırdan farklı değer almaktadırlar. Bu eşitlik koşulu ile hareket denklemi yeniden incelenmiş ve kiriş yapının titreşim davranışını da ifade edecek şekilde

Denklem 3.35'te yeniden yazılmıştır. Denklemde yer alan doğal frekans (ω_n) ve sönümleme oranı (ζ_n) denklemleri daha önceki bölümde ifade edilmiştir.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = F_{km} + M_{km} \quad (3.35)$$

Simetrik olarak her iki yüzeyine N adet piezoelektrik yama çiftinin yapıştırıldığı katmanlı kiriş yapı için yamaların eyleyici/algılayıcı oldukları durumda hareket denklemi yukarıdaki gibi elde edilmiştir. Hareket denkleminde Denklem 3.29'da verilen moment ifadesinin yalnızca bir yama çifti için yerine konulması durumunda Denklem 3.35, tek bir eyleyici/algılayıcı yama çiftinin alt ve üst yüzeylerine simetrik olarak yapıştırıldığı izotropik kirişin hareket denklemi haline gelecektir.

3.4.2.2 Simetrik yamalı katmanlı kiriş

Simetrik yamalı izotropik kirişin eyleyici/algılayıcı konfigürasyonu için geçerli hareket denklemi, önceki bölümde asimetrik yamalı katmanlı kiriş için verilen hareket denklemi ile aynı olup Denklem 3.36'da görülmektedir.

$$D_{11}b \frac{\partial^4 W(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = f(t) + \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \quad (3.36)$$

İzotropik kirişte olduğu gibi kiriş kalınlığına kıyasla oldukça küçük kalınlıkta olduğu kabul edilen yamaların meydana getirdiği moment etkisi Denklem 3.29'da verilmiş olup kiriş yapının harmonik hareket yaptığı kabulü ile yanlamasına yer değiştirme için Denklem 3.2'de verilen dönüşüm esas alınmıştır. Bu durumda simetrik katmanlı kiriş için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$D_{11}b \sum_n q_n(t) \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} + \rho A \sum_n \phi_n(x) \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} + c \sum_n \phi_n(x) \frac{dq_n(t)}{dt} = f(t) + \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \quad (3.37)$$

İzotropik simetrik kiriş yapıda olduğu gibi, başta ortogonallik koşullarından yararlanılabilmesi ve daha anlaşılabilir bir hareket denklemi elde edilebilmesi amacıyla yapılan birtakım matematiksel işlemin ardından katmanlı kiriş için hareket denklemi Denklem 3.38'da verildiği gibi elde edilmiştir. Denklem 3.39'da izotropik kirişteki benzer yapılan katsayı tanımlamaları ile kiriş hareket denklemi aşağıda görülmektedir.

$$\sum_n A_{mn} \dot{q}_n(t) + \sum_n B_{mn} \ddot{q}_n(t) + \sum_n C_{mn} \dot{q}_n(t) = F_{km} + M_{km} \quad (3.38)$$

$$N_k = \int_0^L \phi_n^2(x) dx \quad (3.39a)$$

$$A_{mn} = \frac{D_{11} b}{\rho A N_k} \int_0^L \frac{d^4 \phi_n(x)}{dx^4} \phi_m(x) dx \quad (3.39b)$$

$$B_{mn} = \frac{1}{N_k} \int_0^L \phi_n(x) \phi_m(x) dx \quad (3.39c)$$

$$C_{mn} = c \times B_{mn} \quad (3.39d)$$

$$F_{km} = \frac{1}{\rho A N_k} \int_0^L f(t) \phi_m(x) dx \quad (3.39e)$$

$$M_{km} = \frac{1}{\rho A N_k} \int_0^L \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \phi_m(x) dx \quad (3.39f)$$

Yukarıda verilen ifadelerin $m = n$ durumunda yeniden değerlendirilmesi sonucunda hareket denklemi, kiriş titreşim davranışını da içerecek biçimde Denklem 3.40'ta yeniden yazılmıştır.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = F_{kn} + M_{kn} \quad (3.40)$$

Yukarıda verilen hareket denkleminde moment ifadesinin yalnızca bir yama çifti için hesaplanıp yerine konulması durumunda Denklem 3.40, tek bir eyleyici/algılayıcı yama çiftinin alt ve üst yüzeylerine simetrik olarak yapıştırıldığı katmanlı kirişin hareket denklemi haline gelecektir.

3.5 Titreşim Kontrolü

Simetrik olarak yerleştirilmiş piezoelektrik eyleyici ve algılayıcılar, yapıların simetrik olmayan modlarında özellikle simetrik sınır koşulları altında sönümleyici algılama-kontrol etkileri oluşturmaktadırlar [27]. Her iki yüzeyine sonlu (N) sayıda piezoelektrik yama çifti yapıştırılmış kiriş yapıda, bir yüzeydeki yamaların eyleyici diğerlerinin algılayıcı olarak kullanıldığı model için çıkarılan hareket denklemleri

kullanılarak Modal Genişleme Yöntemi ile kirişin modal algılama ve kontrol denklemleri türetilmiş, elde edilen eşdeğer kontrol momentleri ile kirişin titreşim kontrolü yapılmıştır. Titreşim kontrolünde denklemlerin basitleştirilmesi amacıyla yalnızca bir çift yamanın bulunduğu kiriş yapı incelenmiştir. Kiriş kalınlığına kıyasla oldukça küçük olduğu kabul edilen yama kalınlıkları ise ihmal edilmiştir.

Yamanın kiriş yapıya moment etkisini ifade eden Denklem 3.29'un, bir yama çifti yani $i = 1$ olması durumunda, simetrik yamalı izotropik kiriş yapı için türetilen hareket denkleminde yerine konulması ile Denklem 3.35'te verilen hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir. Denklem 3.41'de ifade edilen hareket denkleminde, ζ_n modal sönümlleme oranı, ω_n doğal frekans olmakla birlikte N_k ve F_{kn} terimleri Denklem 3.41'de hatırlatma amacıyla verilmiştir.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n\omega_n\dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = F_{kn} + \frac{1}{\rho A N_k} \left[\int_0^L \frac{\partial^2 M(x)}{\partial x^2} \phi_n(x) dx \right] \quad (3.40)$$

$$N_k = \int_0^L \phi_n(x)^2 dx \quad (3.41a)$$

$$F_{kn} = \frac{1}{\rho A N_k} \left[\int_0^L f(t) \phi_n(x) dx \right] \quad (3.41b)$$

Bu çalışmada simetrik yamalı kirişin hız geri beslemeli kontrol durumu incelenmiştir. Türetilmiş kontrol olarak da tanımlanan hız geri beslemeli kontrol durumu kapalı devre geri beslemeli kontrol olarak ifade edilebilir. Kiriş yüzeyine yapıştırılmış algılayıcı ve eyleyicilerin kalınlık etkilerinin ihmal edildiği göz önünde bulundurularak, yamaların oluşturduğu kontrol momentini Denklem 3.42a'da verilmiş olup, M_n kirişin n 'inci modu için kontrol momentini belirtmektedir. Kirişin yarı kalınlığı h , yama kalınlığı δ , piezoelektrik gerinim katsayısı d_{31} , yamanın Elastisite modülü E_p , kazanç G olmak üzere; Θ_n^s geri besleme elektriksel potansiyel farkı olup anlık bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır [27]. Açık devre için referans elektriksel potansiyel farkı, kapalı devre için ise algılayıcı elektriksel potansiyel farkı olarak tanımlanan geri besleme elektriksel potansiyel farkı Denklem 3.42b'de belirtilmiştir. Kiriş için önerilen kapalı devre geri beslemede, Θ_n^s , n 'inci birim

modal algılama sinyali olarak verilir ve mod şekil fonksiyonunu içerecek şekilde tanımlanır.

$$M_n = \left(h + \frac{\delta}{2} \right) d_{31} E_p G \Theta_n^s \quad (3.42a)$$

$$\Theta_n^s = -\frac{\delta}{L_s} \int_{x_{s1}}^{x_{s2}} h_{31} \left(h + \frac{\delta_s}{2} \right) \frac{d^2 \phi_n(x)}{dx^2} dx \quad (3.42b)$$

Kapalı devre elektriksel potansiyel farkı denkleminde L_s algılayıcı uzunluğu olup algılayıcının giriş üzerindeki başlangıç konumu x_{s1} ve bitiş konumu x_{s2} arasındaki farktır. Algılayıcı kalınlığı, δ_s , ise eyleyici kalınlığına eşit olup δ değerindedir. Yamanın piezoelektrik özelliği ile ilgili bir katsayı olan h_{31} ise 3 eksen yönünde uygulanan potansiyel farkın 1 eksen yönünde oluşan boylamasına uzamaya oranı olarak tanımlanmıştır.

Hız geri beslemeli kontrol için geri beslemeli zaman fonksiyonu modal koordinatın birinci türevi olarak tanımlanmış, bu durumda yama etkisiyle oluşan moment, $M(x)$, Denklem 3.43'teki gibi verilmiştir.

$$M(x) = \sum_{p=1}^{\infty} \dot{q}_p(t) M_p \quad (3.43)$$

Yukarıda tanımlanan moment ifadesinin ve daha önceden tanımlanan kontrol momentinin Denklem 3.40'ta yerine yazılması ile elde edilen yeni denklem için $n = p$ ve $n \neq p$ durumları ayrı ayrı göz önünde bulundurulmuştur. İki durum için yapılan değerlendirmenin ardından Denklem 3.44'te verilen ifade elde edilmiştir.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = F_{kn} - \frac{1}{\rho A N_k} M_n \left[\phi_n'(x_{s1}) - \phi_n'(x_{s2}) \right] \dot{q}_n(t) - \frac{1}{\rho A N_k} \left[\sum_{\substack{p=1 \\ p \neq n}}^{\infty} \dot{q}_p M_p \right] \left[\phi_n'(x_{s1}) - \phi_n'(x_{s2}) \right] \quad (3.44)$$

Son olarak hareket denklemi aşağıda görüldüğü gibi kirişin titreşim davranışını vurgulayacak biçimde yazılmış, denklemin daha yorumlanabilir olması amacıyla kullanılan katsayılar ise Denklem 3.46'da belirtilmiştir.

$$\ddot{q}_n(t) + (2\zeta_n\omega_n - \hat{M}_n)\dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = F_{kn} + T_{kn} \quad (3.45)$$

$$\hat{M}_n = -\frac{1}{\rho A N_k} M_n \left[\phi_n'(x_{s1}) - \phi_n'(x_{s2}) \right] \quad (3.46a)$$

$$T_{kn} = -\frac{1}{\rho A N_k} \left[\sum_{\substack{p=1 \\ p \neq n}}^{\infty} \dot{q}_p(t) M_p \right] \left[\phi_n'(x_{s1}) - \phi_n'(x_{s2}) \right] \quad (3.46b)$$

Denklem 3.46a’da tanımlanan $\hat{M}_n$, modal geri besleme katsayısı olarak tanımlanır ve hız geri beslemeli titreşim kontrolünde belirleyici bir rol oynamaktadır.

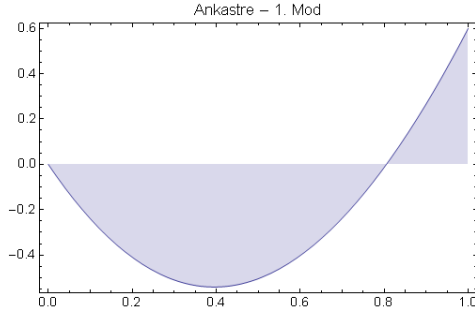
Daha önceden de bahsedildiği üzere, izotropik kiriş için çıkarılan denklemler katmanlı kiriş yapı için de geçerli olup, katlıktan kaynaklanan fark doğal frekans aracılığı ile kontrol denklemlerine yansımaktadır.

3.6 Sayısal Sonuçlar

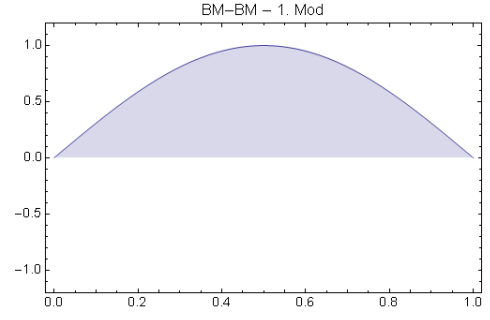
Piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş için yapılan teorik çalışmanın neticesinde ankastre ve iki ucundan basit mesnetlenmiş kiriş yapı için doğal frekans ve mod şekilleri sayısal olarak belirlenmiştir. Daha sonra biri algılayıcı biri eyleyici olmak üzere simetrik olarak iki yüzeyine piezoelektrik yama yapıştırılmış katmanlı kompozit kirişin titreşim kontrolü sayısal olarak incelenmiştir. Bu sayede yapılan teorik çalışmanın sonuçları daha yorumlanabilir hale getirilmiştir.

3.6.1 Kiriş doğal frekansı

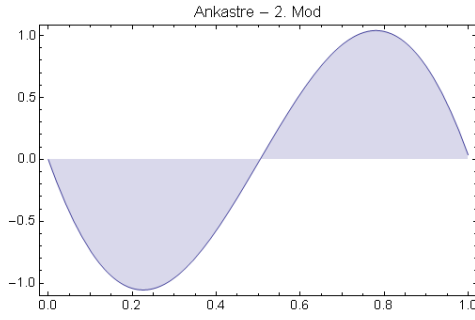
Teorik çalışmanın sayısal olarak sonuçlarının yer aldığı bu bölümde, öncelikle ankastre ve iki ucundan basit mesnetlenmiş kiriş yapının ilk 5 modu için doğal frekansları hesaplanmıştır. Bir sonraki bölümde detaylı olarak anlatılacak olan sonlu elemanlar analizi sonuçlarından da yola çıkılmak suretiyle ankastre kiriş için düzlem içi hareketinin gözlemlendiği 3. mod için doğal frekans değeri elde edilememiştir. Şekil 3.13’te iki farklı sınır koşulu için katmanlı kompozit kirişin doğal frekansları ve mod şekilleri görülmektedir.



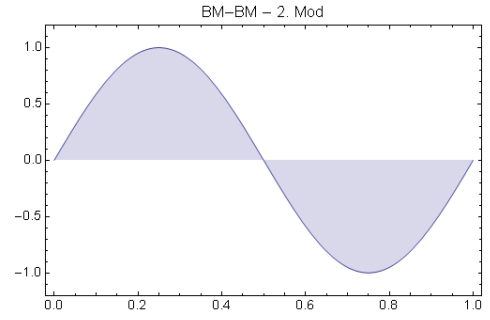
$$\omega_{n1} = 5,96Hz$$



$$\omega_{n1} = 16,73Hz$$

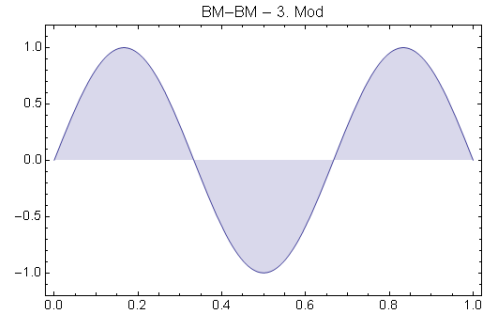


$$\omega_{n2} = 37,35Hz$$

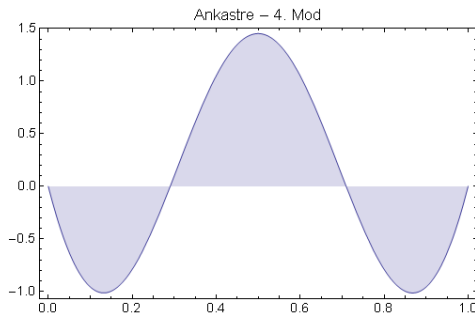


$$\omega_{n2} = 66,93Hz$$

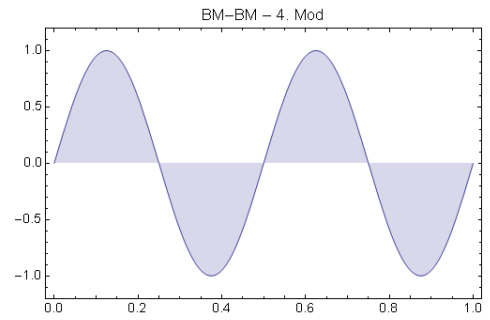
$$\omega_{n3} = -$$



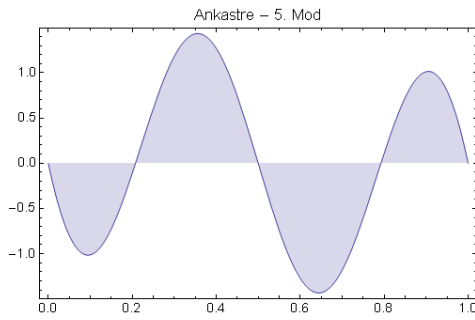
$$\omega_{n3} = 150,60$$



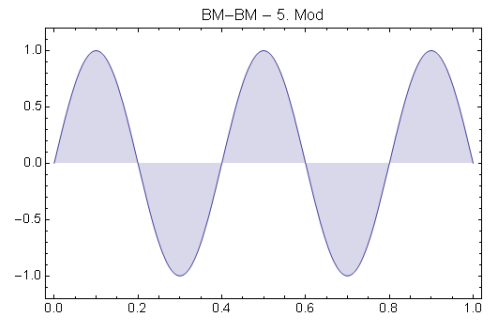
$$\omega_{n4} = 104,60Hz$$



$$\omega_{n4} = 267,74Hz$$



$$\omega_{n5} = 204,99Hz$$



$$\omega_{n5} = 418,35Hz$$

Şekil 3.13 : Ankastré ve iki ucundan basit mesnetlenmiş kiriş için mod şekilleri.

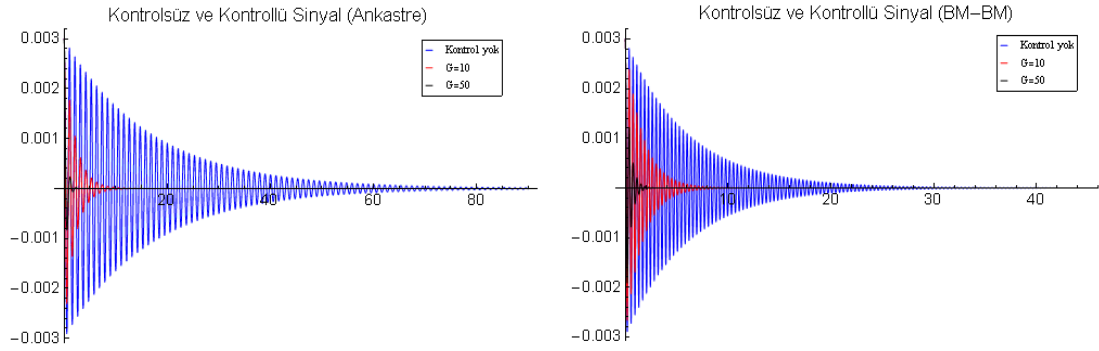
3.6.2 Kiriş titreşim cevabı

Teorik olarak modellenen piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş için önceki bölümlerde çıkarılmış olan denklemler kullanılarak titreşim kontrolünün yapılması mümkün kılınmıştır. Bu bölümde, biri eyleyici diğeri algılayıcı olmak üzere iki yüzeyine piezoelektrik yama yapıştırılmış katmanlı kompozit kiriş için Mathematica programı ile geliştirilen kodlar ile hız geri beslemeli titreşim kontrolü yapılmıştır. Sayısal sonuçların elde edilmesinde kullanılan katmanlı kompozit kiriş yapı ve piezoelektrik yamalar ile ilgili özellikler Çizelge 3.1’de verilmiş olup D_{11} , cam elyafı ve epoksiden imal edilen $0^\circ / 90^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ yönelimli 4 katmanlı kompozit kiriş için ayrıca hesaplanmıştır.

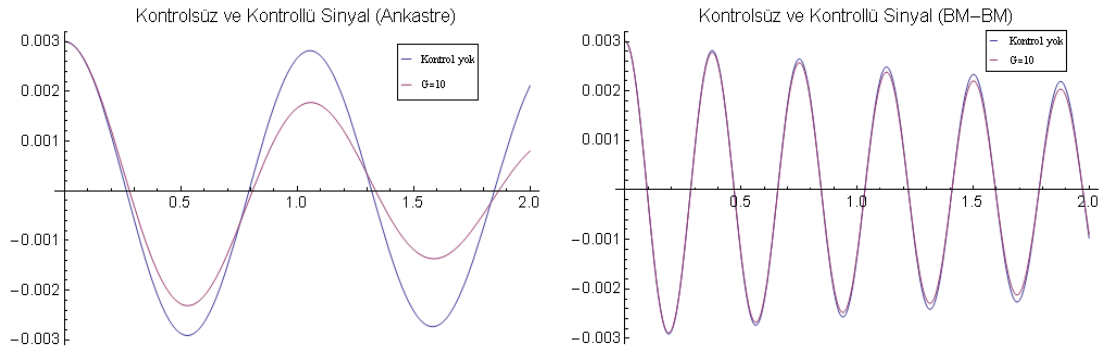
Çizelge 3.1 : Katmanlı kompozit kiriş ve piezoelektrik yama özellikleri [51,52].

	<i>Katmanlı Kompozit Kiriş</i>		<i>Piezoelektrik Yama</i>
L	0,30 m	L	0,036 m
$2h$	0,001 m	δ	0,0006 m
b	0,011 m	b_a	0,011 m
D_{11}	$1,5372 \times 10^9 \text{ Nm}$	E_p	65 GPa
ρ	$1,672 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	ρ_p	$7,74 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
		d_{31}	$-190 \times 10^{-12} \text{ C/N}$
		h_{31}	$-4,116 \times 10^2 \text{ V/m}$

İlk olarak piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kirişin zamana bağlı titreşim cevabı incelenmiştir. Ankastre ve her iki ucundan basit mesnetlenmiş kiriş için % 1 sönümleme oranı ile serbest ve kontrollü titreşim cevapları Şekil 3.14’te sırasıyla verilmiştir. Birinci mod için verilen şekillerde, kirişin kontrol olmaksızın titreşim cevabının sınır koşullarıyla değiştiği görülmektedir. Serbest titreşim ele alındığında iki ucundan basit mesnetlenmiş kiriş, ankastre kirişe kıyasla daha kısa sürede sönümlendiği gözlenmiştir. Bunun yanında kontrollü titreşim cevabı için ankastre kirişin daha düşük kazançlar ile kontrol edilebildiği söylenebilir. Şekil 3.15 ile daha açık biçimde görülen bu etki ankastre kirişin daha kontrol edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmasını sağlamaktadır.

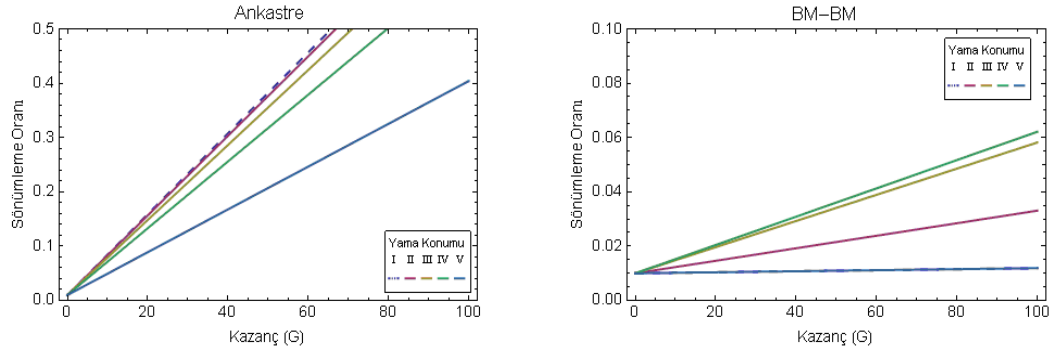


Şekil 3.14 : Serbest, $G=10$ ve $G=50$ için titreşim cevabı (birinci mod)



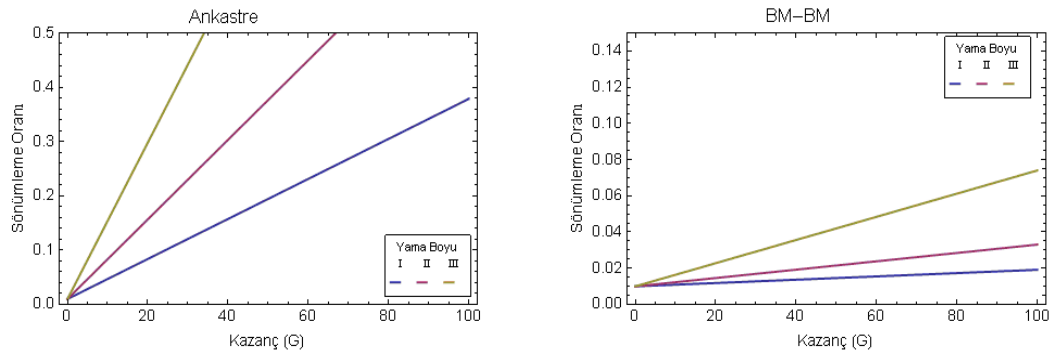
Şekil 3.15 : Serbest ve kontrollü titreşim cevabı (birinci mod)

Piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kirişin titreşim kontrolünde yama konumunun etkisi Şekil 3.16’da görülen grafikler yardımıyla incelenmiştir. Ankastre ve her iki ucundan basit mesnetlenmiş kiriş yapı için aynı boyuttaki yamanın kiriş yüzeyindeki farklı konumları için modal sönümleme oranı ile kazanç değişiminin verildiği grafiklerde piezoelektrik yama çifti kiriş alt ve üst yüzeylerinde simetrik olmak üzere $I = 0,00 \text{ m} - 0,036 \text{ m}$, $II = 0,05 \text{ m} - 0,086 \text{ m}$, $III = 0,10 \text{ m} - 0,136 \text{ m}$, $IV = 0,15 \text{ m} - 0,186 \text{ m}$, $V = 0,264 \text{ m} - 0,30 \text{ m}$ biçimde simetrik olarak konumlandırılmıştır. Ankastre kiriş için piezoelektrik yama kökten uzaklaştıkça kontrol etkinliğinin azaldığı gözlenmektedir. Grafiklerden de görüleceği üzere simetrik sınır koşuluna sahip BM-BM kiriş için ise I ve V konumları aynı etkiyi göstermekte ve kök ile uca yerleştirilen yamaların kontrol etkisi son derece düşük olmaktadır.



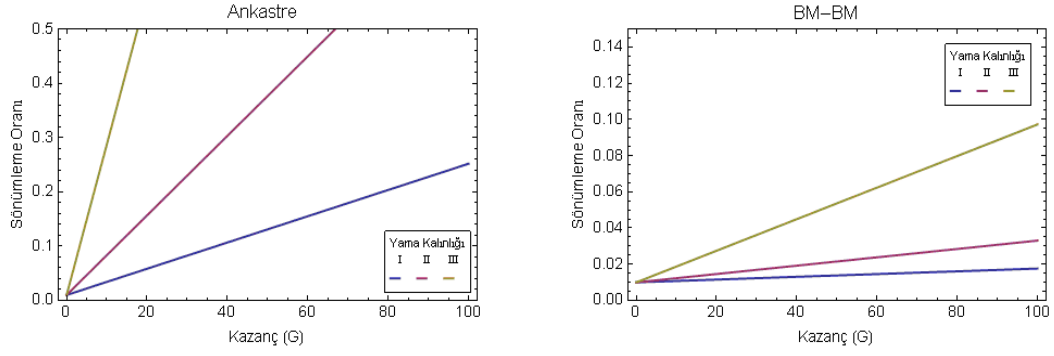
Şekil 3.16 : Farklı yama konumları için modal sönümleme oranı ile kazanç değişimi (birinci mod)

Kiriş üzerindeki konumu, kalınlığı ve genişliği başlangıçtaki ile aynı kalmak üzere, yama boyunun kiriş yapının titreşim kontrolüne etkisi Şekil 3.17’de verilen grafikler yardımıyla incelenmiştir. *I* başlangıç yama boyunun yarısı, *II* kendisi ve *III* iki katı olmak üzere farklı yama boyları için modal sönümleme oranının kazanç ile değişimini gösteren grafiklerde ankastre kirişin titreşim kontrolünde yama boyunun etkinliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki sınır şartı için de yama boyunun artmasının kontrol etkisini arttırdığı görülmektedir.



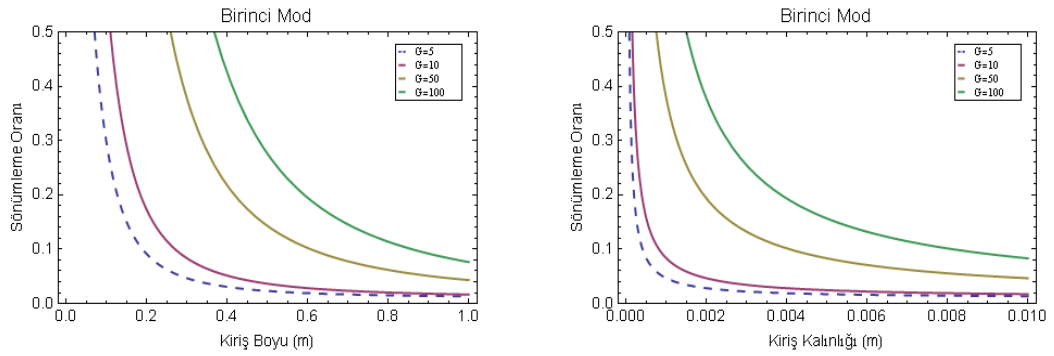
Şekil 3.17 : Farklı yama boyları için modal sönümleme oranı ile kazanç değişimi (birinci mod)

Benzer biçimde başlangıç konum, boy ve genişliğinin aynı kaldığı piezoelektrik yama için kalınlığın titreşim kontrolüne etkisi Şekil 3.18’de görülmektedir. *I* başlangıç yama kalınlığının yarısı, *II* kendisi ve *III* iki katı olmak üzere farklı yama kalınlıkları için modal sönümleme oranının kazanç ile değişimini gösteren grafiklerde ankastre ve her iki ucundan basit mesnetlenmiş katmanlı kiriş yapı incelenmiştir. Yama boyunun değişiminde olduğu gibi ankastre kiriş için yama kalınlığının değişiminin etkisi her iki ucundan basit mesnetlenmiş kirişe kıyasla oldukça fazladır. Her iki sınır koşulu için yama kalınlığının artması ile kontrol etkinliğinin de artmasına neden olmaktadır.



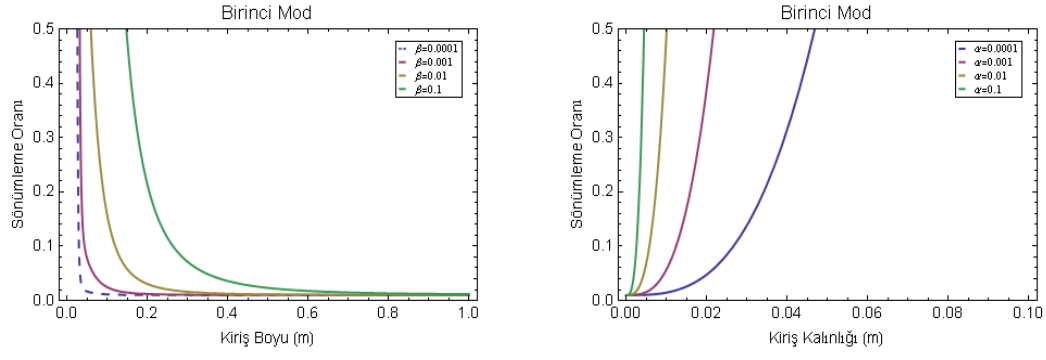
Şekil 3.18 : Farklı yama kalınlıkları için modal sönümleme oranı ile kazanç değişimi (birinci mod)

Kiriş yapının kontrol etkinliğinin kiriş boyu ve kiriş kalınlığı ile değişiminin incelenmesi amacıyla Şekil 3.19’da verilen grafikler farklı kazançlar için oluşturulmuştur. Farklı kazançlar için verilen grafiklerden, modal sönümleme oranının kiriş boyu ve kiriş kalınlığı arttıkça azaldığı bir başka deyişle kiriş boyu ve kalınlığının artmasıyla kiriş titreşiminde kontrol etkinliğinin azalttığı görülmektedir. Ankastre kiriş için verilen grafiklerde sırasıyla $G = 5$, $G = 10$, $G = 50$, $G = 100$ durumları incelenmiştir.



Şekil 3.19 : Farklı kazançlar için modal sönümleme oranı ile kiriş boyu ve kiriş kalınlığı değişimi (ankastre kiriş)

Son olarak, katmanlı kompozit kiriş ile piezoelektrik yama boyutları oransal olarak incelenmiş ve kontrol etkinliği değerlendirilmiştir. Ankastre kiriş için Şekil 3.20’de verilen grafiklerde β yama boyunun kiriş boyuna oranını, α ise yama kalınlığının kiriş kalınlığına oranını ifade etmektedir. Modal sönümleme oranının kiriş boyu ve kalınlığı ile değişimini veren grafiklerdende görüleceği üzere β ve α değerlerinin artışı belirli boy ve kalınlık değerlerine kadar kontrol etkinliğini arttırmaktadır.



Şekil 3.20 : Farklı β ve α değerleri için modal sönümleme oranı ile kiriş boyu ve kiriş kalınlığı değişimi (ankastre kiriş, $G=10$)

4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

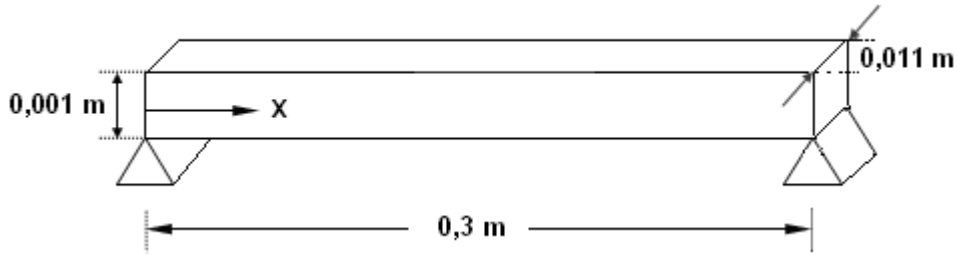
Çalışmanın bu bölümünde piezoelektrik yamalı, katmanlı kompozit bir kirişin farklı elektriksel yükleme durumları için ANSYS 11.0 sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla modellenmesi ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Teorik ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmak üzere gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinde, deneysel çalışmada kullanılan piezoelektrik yamalı katmanlı kiriş yapı incelenmiştir. Öncelikli olarak kiriş yapının yamalı ve yamasız durumları için modal analizleri gerçekleştirilmiş, farklı modlardaki doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Teorik ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslarla karşılaştırılan modal analiz sonuçlarının ardından katmanlı kiriş yapının piezoelektrik analizi gerçekleştirilmiştir. Tek yamalı durum için farklı yükleme durumları altında kirişin davranışının irdelenmesi amacıyla piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş yapı gerçeğe en yakın biçimde modellenmiş, farklı yükleme durumlarındaki ankastre kiriş için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak elde edilen sonuçların tutarlılığı irdelenmiştir. Analizlerin tümünde SI birimi esas alınmış; uzunluklar [m], kuvvetler [N] ve gerilmeler ise [GPa] olarak kullanılmıştır.

4.1 Katmanlı Kiriş Yapının Modellenmesi

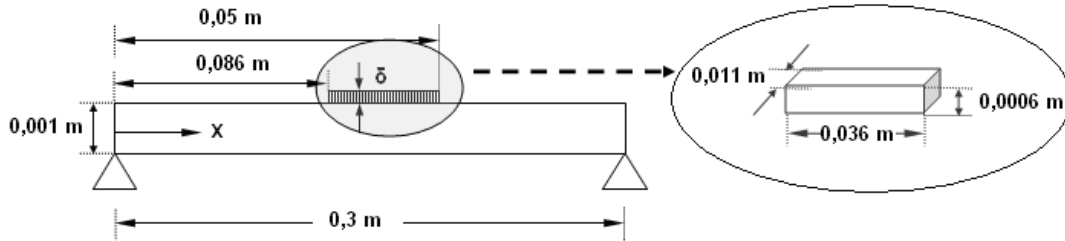
Önceki bölümde geliştirilen tek yamalı katmanlı kiriş yapının yanı sıra modal analizi gerçekleştirilecek yamasız katmanlı kiriş yapı da sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Deneysel olarak incelenen kiriş ve yamaların birebir modellendiği bu bölümde kiriş ve yama için katı elemanlar kullanılmıştır. ANSYS kütüphanesinde yer alan sonlu elemanlardan, piezoelektrik yamaların modellenmesinde SOLID 5 elemanı, katmanlı kompozit kirişin modellenmesinde ise SOLID 46 elemanı tercih edilmiştir. Uygun elemanların belirlenmesinin ardından yamaların kiriş yüzeyine mükemmel olarak yapıştırılma durumu göz önünde bulundurularak, çözüm ağı oluşturulmuş ve katmanlı kiriş yapı analizlere hazır halde modellenmiştir.

4.1.1 Geometri

Katmanlı kompozit kirişin yamasız ve tek yamalı olmak üzere iki modeli için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirileceğinden aşağıda verilen iki kiriş geometrisi modellenmiştir. Şekil 4.1’de yamasız, Şekil 4.2’de tek yamalı kiriş yapı geometrisinin verildiği modellerde esas kiriş geometrisi aynı kalmıştır.

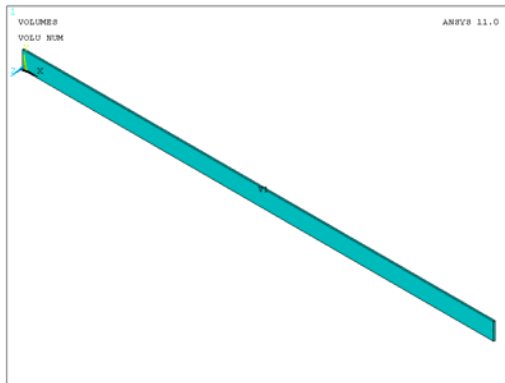


Şekil 4.1 : Modellenen yamasız kiriş geometrisi.

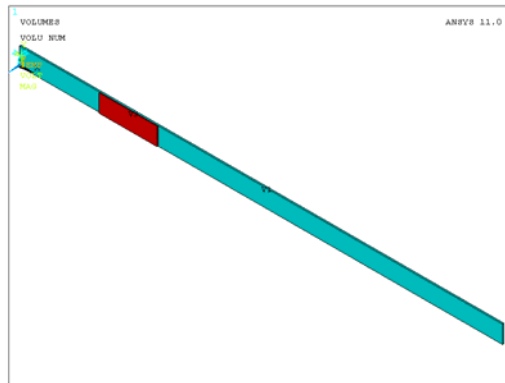


Şekil 4.2 : Modellenen tek yamalı kiriş geometrisi.

Analizlerin daha gerçeğe yakın gerçekleştirilebilmesi amacıyla, yamalı kiriş yapıdaki tüm geometri katı elemanlar ile modellenmiştir. Kiriş ve yama kalınlıkları ile birlikte yukarıda verilen geometrilerle modellenmiş, esas kirişin katmanlı yapısı seçilen sonlu eleman ile belirtilmiştir. Oluşturulan yamasız ve tek yamalı kiriş yapı modelleri Şekil 4.3a ve 4.3b’de sırasıyla görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.3 : Oluşturulan modelleme: a)yamasız kiriş, b)tek yamalı kiriş.

4.1.2 Malzeme özellikleri

Gerçeğe uygun geometri ile modellenen yamasız ve yamalı katmanlı kiriş yapı için ANSYS programında iki malzeme tipi tanımlanmıştır. İlk malzeme modeli katmanlı kiriş yapı için kullanılmış olup kompozit özelliklerini de içermektedir. Deneysel çalışmada kullanılan kompozit kirişe ait özellikler Çizelge 4.1’de belirtilmiştir. $0^\circ / 90^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ elyaf yönelimine sahip 4 katmanlı cam elyafı-epoksi için verilen malzeme özellikleri ile birlikte katman kalınlığı ve yönelimi de ANSYS’te anizotropik malzeme özellikleri olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.1 : Kiriş yapının katmanlı kompozit malzeme özellikleri [51].

E_x	18,10GPa
E_y	18,10GPa
E_z	3,65GPa
G_{xy}	2,60GPa
G_{xz}	1,35GPa
G_{yz}	1,35GPa
γ_{xy}	0,137
γ_{xz}	0,353
γ_{yz}	0,353
ρ	$1,672 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

Piezoelektrik malzeme özelliklerinin ANSYS’te atanması için en az 3 adet matrisin tanıtılması gerekmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan BM 120/36/350 tipi piezoelektrik yamalara ait özellikler Çizelge 4.2’de belirtilmiş olup, sonlu elemanlar programında tanımlanan elektriksel geçirgenlik $[\xi]$, piezoelektrik $[d]$ ve uygunluk $[S]$ matrislerinin oluşturulmasında kullanılmışlardır.

Çizelge 4.2 : Piezoelektrik yama malzeme özellikleri [52].

ξ_{11}	$1,63 \times 10^{-8} F/m$
ξ_{22}	$1,63 \times 10^{-8} F/m$
ξ_{33}	$1,6379 \times 10^{-8} F/m$
d_{31}	$-190 \times 10^{-12} C/N$
d_{33}	$440 \times 10^{-12} C/N$
d_{15}	$645 \times 10^{-12} C/N$
S_{11}	$18,5 \times 10^{-12} m^2/N$
S_{12}	$-6,28 \times 10^{-12} m^2/N$
S_{13}	$-8,07 \times 10^{-12} m^2/N$
S_{33}	$20,7 \times 10^{-12} m^2/N$
S_{44}	$56,12 \times 10^{-12} m^2/N$
S_{66}	$49,56 \times 10^{-12} m^2/N$
ρ	$7,74 \times 10^3 kg/m^3$

Yukarıda tanımlanan malzeme özellikleri ANSYS programında oluşturulan ikinci malzeme modeli için aşağıda verilen matrisler kullanılarak tanıtılmıştır. Daha önceki bölümde piezoelektrik malzeme özellikleri ile birlikte açıklanan matrisler ANSYS'te eksen takımının farklılığından dolayı Denklem 4.1, 4.2 ve 4.3'te verildiği gibi değişmektedir.

$$[\xi]_{ANSYS} = \begin{bmatrix} \xi_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{33} \end{bmatrix} \Rightarrow [\xi]_{ANSYS} = \begin{bmatrix} 1,63 & 0 & 0 \\ 0 & 1,63 & 0 \\ 0 & 0 & 1,6379 \end{bmatrix} \times 10^{-8} F/m \quad (4.1)$$

$$[d]_{ANSYS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow [d]_{ANSYS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -190 \\ 0 & 0 & -190 \\ 0 & 0 & 440 \\ 0 & 645 & 0 \\ 645 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12} C/N \quad (4.2)$$

$$[S]_{ANSYS} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix}$$

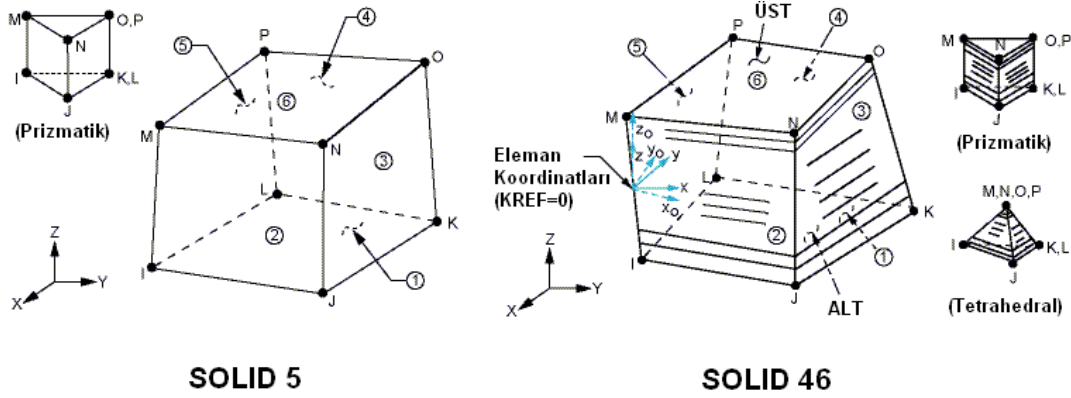
↓

(4.3)

$$[S]_{ANSYS} = \begin{bmatrix} -8,07 & -6,28 & -8,07 & 0 & 0 & 0 \\ -6,28 & -8,07 & -8,07 & 0 & 0 & 0 \\ -8,07 & -8,07 & 20,7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 49,56 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 56,12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 56,12 \end{bmatrix} \times 10^{-12} m^2/N$$

4.1.3 Kullanılan sonlu elemanlar

Katmanlı kiriş yapı ve piezoelektrik yamaların sonlu elemanlar modeli için yalnızca köşelerinde düğüm noktaları bulunan elemanlara öncelik verilmiştir. Farklı elemanlarla modellenecek kiriş ile yamaların mükemmel yapıştırılmış olmaları kabulü doğrultusunda kiriş yüzeyi ile yama yüzeyinin birbirleri ile tam örtüşmesi gerekmektedir. Her iki yüzeydeki elemanlar aynı kenar uzunluğuna sahip olmakla birlikte kesişim yüzeyindeki düğüm noktaları da birbirleri ile kesiştirilmiştir. Piezoelektrik malzeme özelliklerini taşıyan SOLID 5 yamalar için, katmanlı katı yapıların modellenmesine uygun SOLID 46 ise kiriş yapı için belirlenen elemanlar olup Şekil 4.4'te görülmektedirler.



Şekil 4.4 : Kullanılan sonlu elemanlar [53].

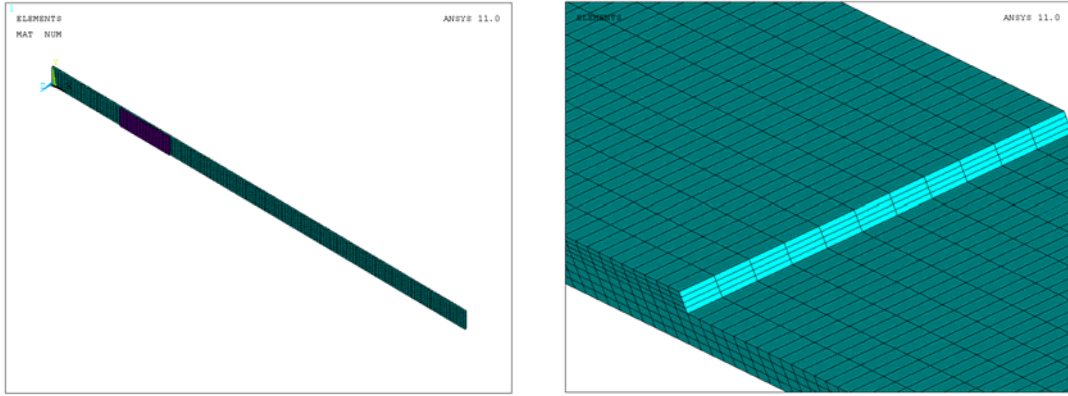
Kompozit kirişin modellenmesinde kullanılan SOLID 46 elemanı, ANSYS kütüphanesinde bulunan ve 3 boyutlu izotropik malzemeleri modellemekte kullanılan SOLID 45 elemanının katmanlı kompozitler için tasarlanmış olanıdır. SOLID 46 elemanı ile katmanlı kabuk ve katılar modellenebilmektedir. Kirişin modellenmesinde kullanılan SOLID 46, 8 düğüm noktası ve her bir düğüm noktasında x, y, z eksenlerinde dönme ve ötelenme olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesine sahip bir elemandır.

ANSYS kütüphanesinde bulunan SOLID 5 elemanı, 3 boyutlu manyetik, ısı, elektrik, piezoelektrik ve yapı modellerini birlikte modelleyebilen bir elemandır. SOLID 5 elemanı katmanlı kompozit kirişin modellenmesinde kullanılan SOLID 46 elemanı gibi 8 düğüm noktasına ve her bir düğüm noktasında da 6 serbestlik derecesine sahiptir. Yapı ve piezoelektrik analizlerinde kullanıldığında, büyük yer değiştirme ve pekleşme özelliklerine de sahip bir elemandır.

4.1.4 Çözüm ağı

Geometri, malzeme özellikleri ve eleman tipinin belirlenmesinin ardından sonlu elemanlar modellemesi için son aşama olan çözüm ağı atanması kısmına geçilmiştir. Yama ile kirişin çözüm ağı bir tutulmuş, kullanılan elemanların kare elemanlar olmasına dikkat edilmiştir. İki katı modelin çakışan yüzeylerinin mükemmel yapıştırılma durumu için eleman boyutu belirlenirken, yamanın başlangıç noktasında bulunan düğüm noktasının, kiriş yapının bir sonlu elemanına ait düğüm noktası ile çakışması sağlanmıştır. Aynı şekilde yamanın bitiş düğüm noktası için de kirişin düğüm noktasına çakışık olması amaçlanmıştır. Bu şekilde uygun eleman boyutu $0,001\text{ m}$ olarak belirlenmiş, SOLID 5 ve SOLID 46 elemanları ile çözüm ağı

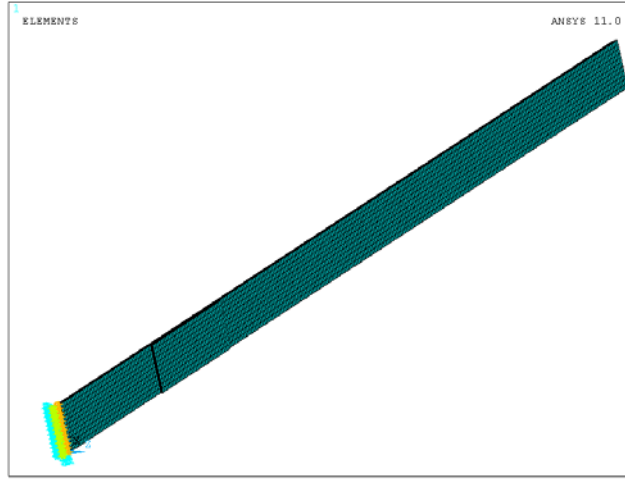
oluşturulmuştur. Piezoelektrik yamanın bulunmadığı katmanlı kiriş yapı için oluşturulan çözüm ağı 13200 eleman ve 18060 düğüm noktasından oluşmaktadır. Yüzeyine bir piezoelektrik yamanın mükemmel olarak yapıştırıldığı katmanlı kiriş modeli için aynı boyutlu $0,001\text{ m}$ 'lik elemanlar tüm yapıda çözüm ağı oluşturacak şekilde atanmış ve Şekil 4.5'te görülen çözüm ağı elde edilmiştir. Tek yamalı katmanlı kiriş yapı için oluşturulan bu çözüm ağında toplam 20280 düğüm noktası ve 14784 eleman olup; elemanların 13200 tanesi kompozit kirişi, geriye kalan 1584 tanesi ise piezoelektrik yamayı oluşturmaktadırlar. Şekilden de görüleceği üzere, oluşturulan çözüm ağı kiriş ve yama kalınlıkları boyunca en az 3 elemandan meydana gelecek biçimde oluşturulmuştur.



Şekil 4.5 : Oluşturulan çözüm ağı.

4.2 Katmanlı Kiriş Yapının Analizleri

Modellemesi tamamlanan her kiriş yapı için sınır şartları aşağıda görüldüğü gibi uygulanmıştır. Şekil 4.6'da da görüldüğü üzere ankastre sınır koşulu uygulanan kiriş yapının bir ucu 6 serbestlik derecesi için tutturulmuştur. Öncelikle, teorik ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar ile karşılaştırılmak üzere, modellenen iki kirişin modal analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş modeli için farklı yükleme durumlarında piezoelektrik analizler gerçekleştirilmiştir. Elektriksel potansiyel fark etkisinde piezoelektrik yamalı kiriş modelinin davranışının incelendiği piezoelektrik analizlerde kirişe uygulanan elektriksel potansiyel fark haricinde herhangi bir kuvvetin etkilediği varsayılmıştır.



Şekil 4.6 : Uygulanan sınır şartları.

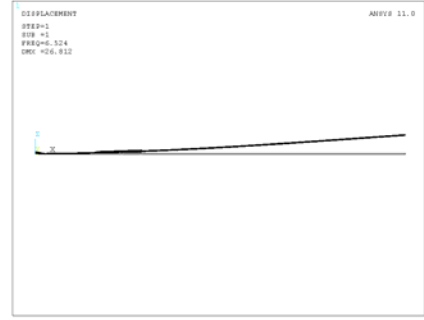
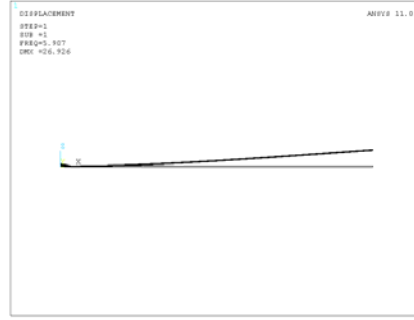
4.2.1 Modal analiz

Modellenen katmanlı kompozit kiriş yapıların ankastre sınır koşulları altında modal analizi gerçekleştirilmiş ve farklı modlar için doğal frekansları hesaplanmıştır. PNG Lanczos yöntemi ile yapılan modal analizde kiriş modellerinin ilk on modu için hesaplamalar yapılmıştır. Yamasız ve tek yamalı kiriş için gerçekleştirilen modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında piezoelektrik yamanın kiriş yapıya etkisi açıkça görülmektedir. Çizelge 4.3'ten de görüleceği üzere tekil modlarda yama etkisi ile doğal frekans yükselirken, çift modlarda doğal frekans azalmaktadır. Modal analiz sonucunda elde edilen titreşim mod şekilleri ilk 5 mod için Şekil 4.7'de verilmiştir.

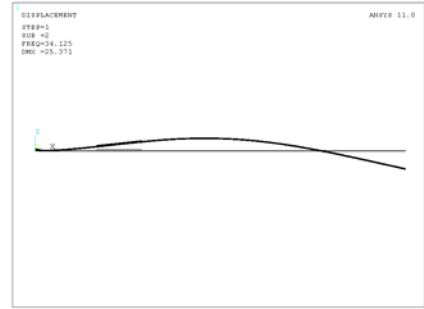
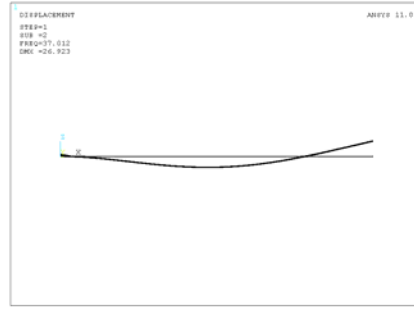
Çizelge 4.3 : Modal analiz sonuçları.

Mod Sayısı	Yamasız kirişin doğal frekansı	Tek yamalı kirişin doğal frekansı
1	5,907	6,523
2	37,012	34,125
3	64,810	68,939
4	103,60	93,572
5	182,96	196,77
6	202,92	199,62
7	335,25	327,43
8	400,47	366,07
9	500,45	453,90
10	549,90	481,98

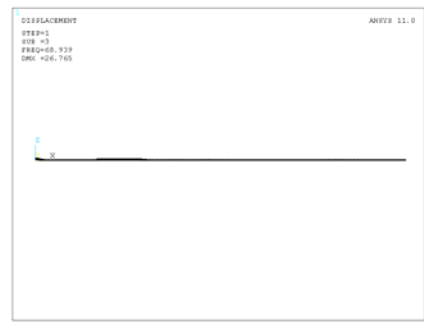
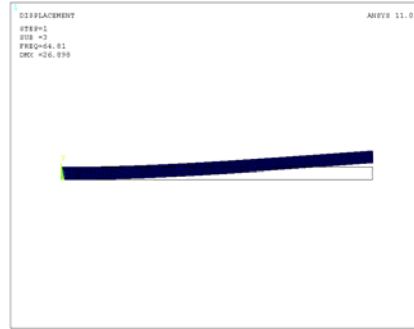
$n=1$



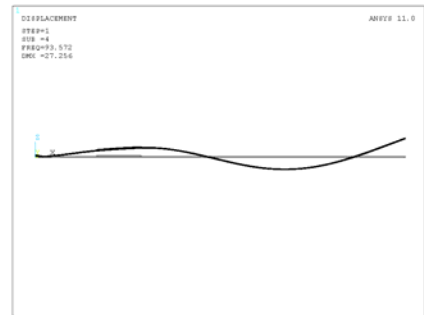
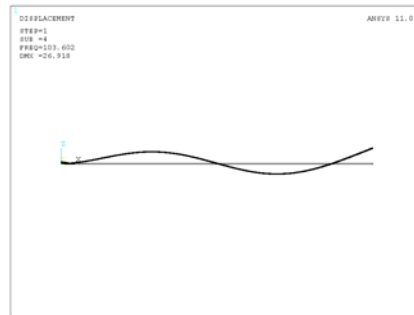
$n=2$



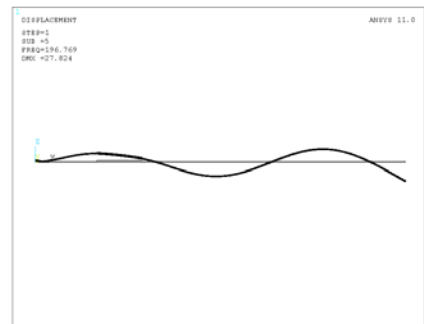
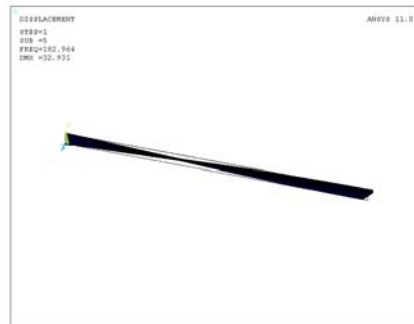
$n=3$



$n=4$



$n=5$



Şekil 4.7 : Yamasız ve yamalı katmanlı kompozit kiriş için mod şekilleri.

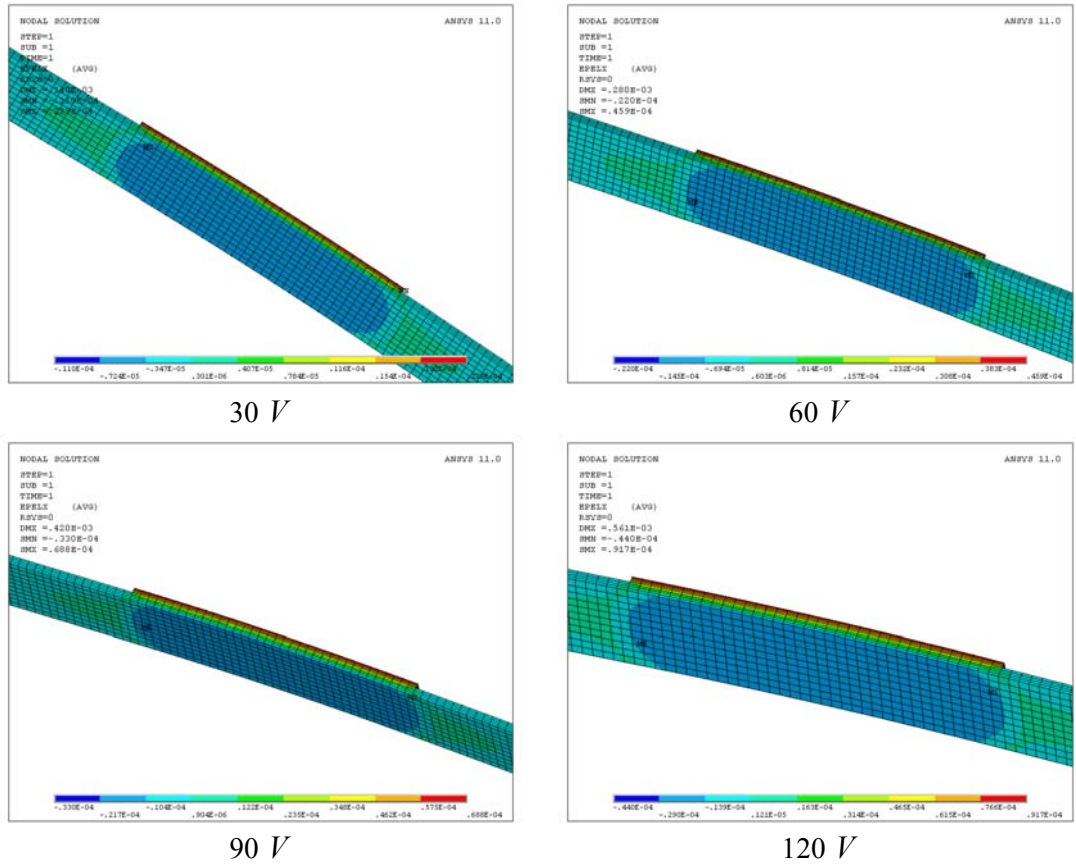
Modal analiz sonucunda, yamanın kirişin doğal frekansına etkisi ile birlikte mod şekillerine etkisi de açıkça görülmüştür. Teorik olarak elde edilemeyen 3. mod için verilen mod şeklinden de görüleceği üzere kiriş bu mod için düzlem içi hareketi sergilemekte kalınlık boyunca herhangi bir değişme meydana gelmemektedir. Bu sebeple teorik olarak elde edilememiş, bunun yanında deneysel olarak yapılan incelemelerde de kullanılan ölçüm sistemlerinin söz konusu hareket ekseninde bir ölçüm yapmamalarından dolayı 3. mod gözlenmemiştir.

4.2.2 Piezoelektrik analiz

Modal analizin ardından, piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kirişin farklı frekans ve genliklerde elektriksel sinyaller etkisinde sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Alt ve üst yüzeylerinde katmanlar halinde elektrotlar bulunan piezoelektrik yamanın farklı elektriksel yükleme durumlarında davranışı incelenmiş ve bir sonraki bölümde verilecek deneysel sonuçlarla kıyaslanması amaçlanmıştır.

Sonraki bölümde yer verilecek deneysel çalışma kapsamında kirişin yama yapıştırılmamış yüzeyinde, yamaya simetrik olarak bulunan kısma yapıştırılan gerinim ölçer ile dinamik gerinim ölçümleri yapılacağından dolayı, analiz sonuçlarında kirişin bu kısmı incelenmiştir. Aşağıda genel yer değiştirme davranışının gözlemlendiği şekillerin yanı sıra, bu bölüm içinde yapılan tüm analizlerde sözü geçen alanın tam ortasında bulunan düğüm noktası esas alınmış ve bu düğüm noktasından alınan değerler kullanılmıştır. Bu sayede tüm analizlerin sonuçlarında aynı noktanın davranışı irdelenebilmiş ve analiz yorumları daha sağlıklı biçimde yapılabilmektedir.

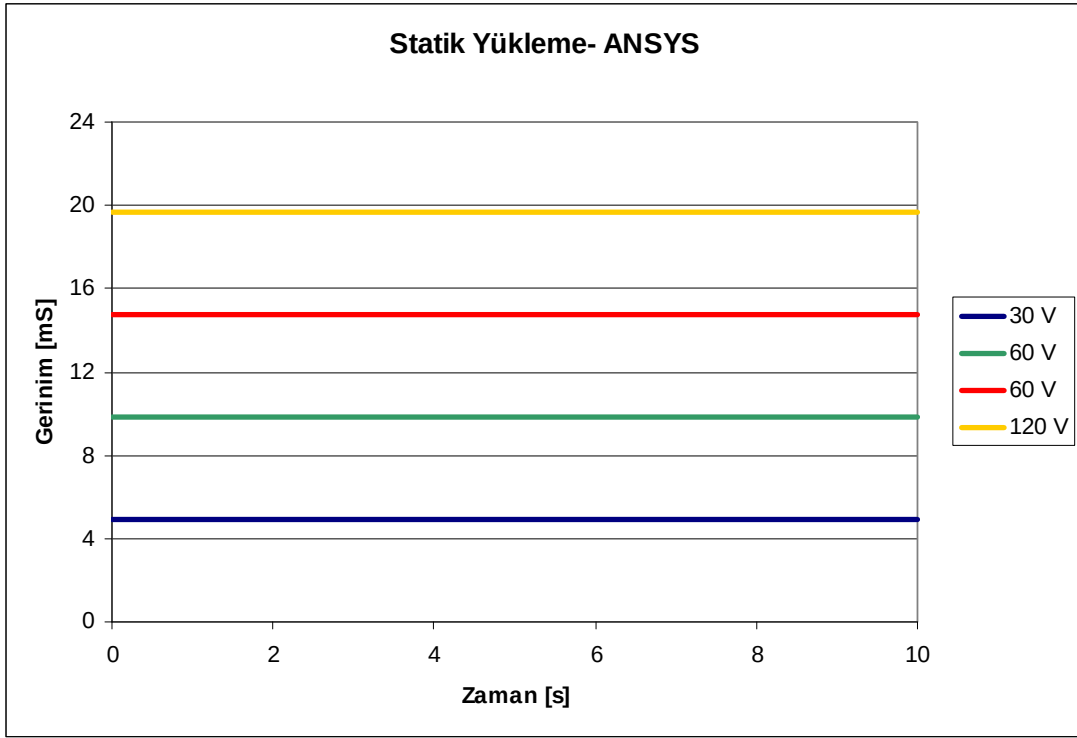
Öncelikle zamandan bağımsız yükleme durumu için analizler gerçekleştirilmiştir. 30 V , 60 V , 90 V ve 120 V olarak üzere farklı genliklerde ve zamandan bağımsız elektriksel potansiyel fark etkisinde piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş için yapılan analizlerde elde edilen toplam yer değiştirme sonuçları Şekil 4.8’de sırasıyla verilmiştir. Genel bir fikir oluşturması amacıyla verilen şekiller ile kirişin yama etkisinde sergilediği yer değiştirme davranışı farklı genliklerdeki elektriksel sinyaller için sergilenmiştir. Zamandan bağımsız yükleme durumuna ek olarak, sinüzoidal sinyaller etkisinde kiriş davranışının incelendiği analizlerle birlikte gerçekleştirilen piezoelektrik analiz sonuçları hemen sonraki bölümde incelenmiştir.



Şekil 4.8 : Piezoelektrik yamalı katmanlı kirişin zamandan bağımsız elektriksel potansiyel fark etkisinde toplam yer değiştirmesi (m).

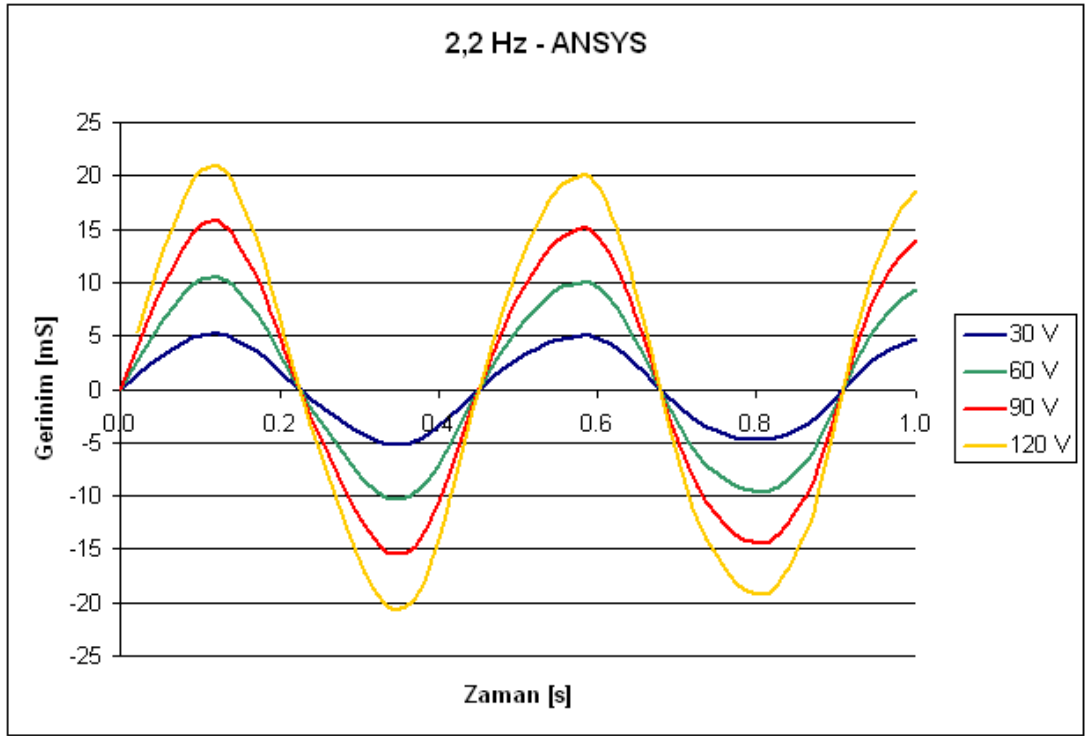
4.3 Analiz Sonuçları

Gerçeğe en yakın biçimde modellenen piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş için ilk önce zamandan bağımsız elektriksel yükleme durumunda farklı genlikler etkisinde analiz edilmiştir. Piezoelektrik yamanın yapıştırılmadığı yüzeyde yamayla simetrik olacak şekilde belirlenen düğüm noktası için analiz sonucunda elde edilen aksenal gerilme değerleri Şekil 4.9’da farklı genliklerde sinyaller için verilmiştir. Zamandan bağımsız elektriksel sinyal etkisinde incelenen düğüm noktası için tek bir gerinim değeri veren sonlu elemanlar analizine karşılık gerçek yükleme durumunun grafikte görüldüğü gibi olmadığı bilinmektedir. Bununla birlikte genlik artımının gerinimleri de arttırdığı oldukça açıktır.



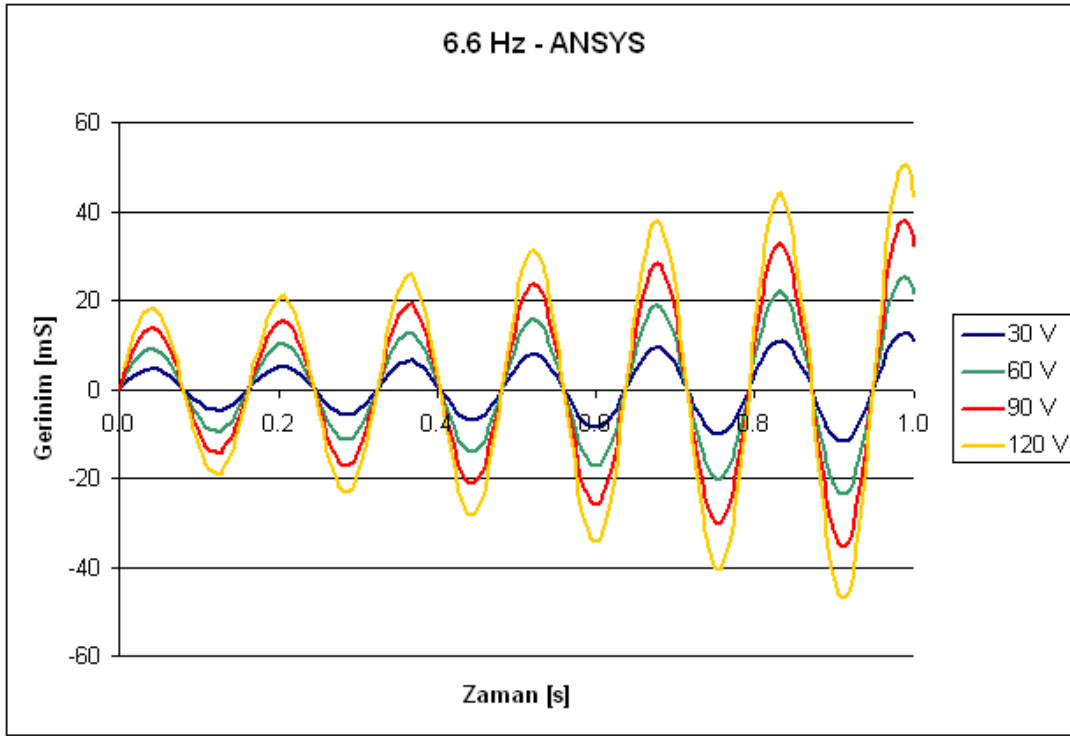
Şekil 4.9 : Farklı genliklerdeki zamandan bağımsız sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri.

Zamandan bağımsız yüklemenin ardından sinüzoidal elektriksel sinyaller etkisinde piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş yapı için analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle frekans sabit tutulmuş farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller etkisinde elde edilen dinamik gerinim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.10'da verilen grafikte 2,2 Hz frekansında sinüzoidal sinyalin farklı genliklerde yamaya uygulanması durumunda kiriş geriniminin değişimi verilmiştir. Grafikten açıkça görüleceği üzere, zamandan bağımsız yükleme durumunda olduğu gibi, elektriksel sinyalin genliğinin arttırılması gerinim değerlerini de arttırmaktadır.



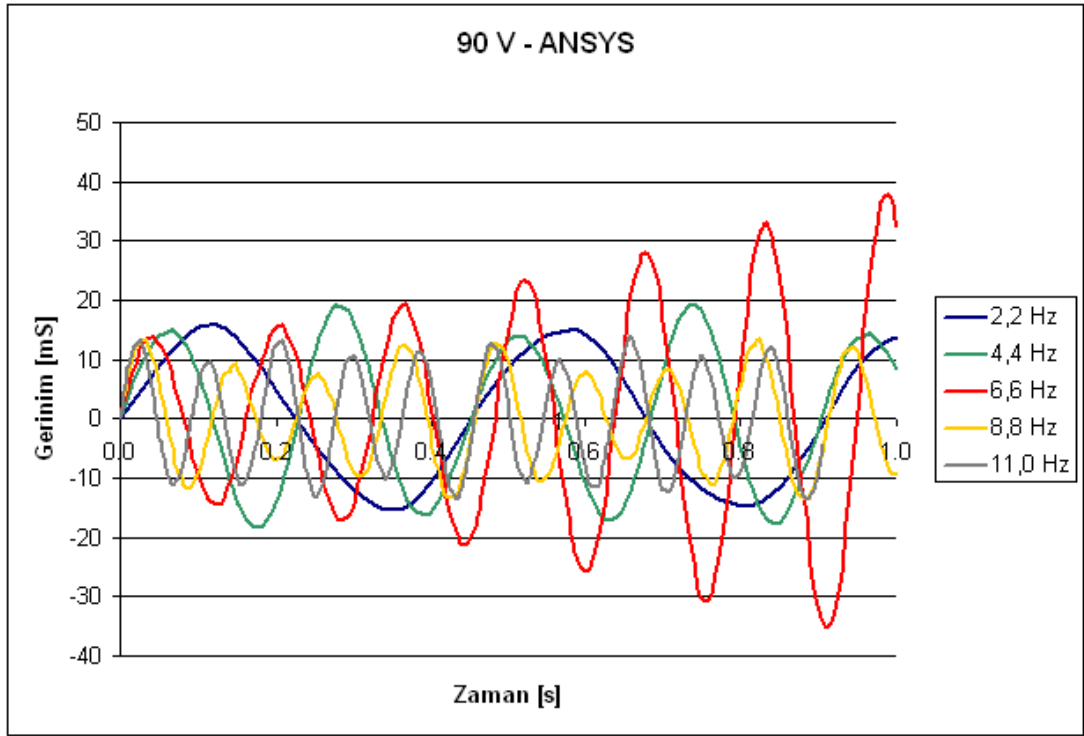
Şekil 4.10 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinin değerleri (2,2 Hz).

Kirişin doğal frekansında bir elektriksel sinyalin yamaya uygulanması durumunda giriş yapının davranışının irdelenmesi amacıyla, daha önceden yamalı girişin doğal frekansı olarak belirlenen 6,6 Hz ile farklı genliklerde oluşturulan sinüzoidal sinyal etkisinde analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11’de verilen grafikten de görüleceği üzere, gerinin değerleri zamanla birlikte artma eğiliminde olmakla beraber, diğer yükleme durumlarına benzer biçimde uygulanan elektriksel sinyalinin genlikleri arttırdığı söylenebilir. Kirişin doğal frekansı için geçerli olan bu özel durum girişin rezonansa girme eğiliminden kaynaklanmaktadır.

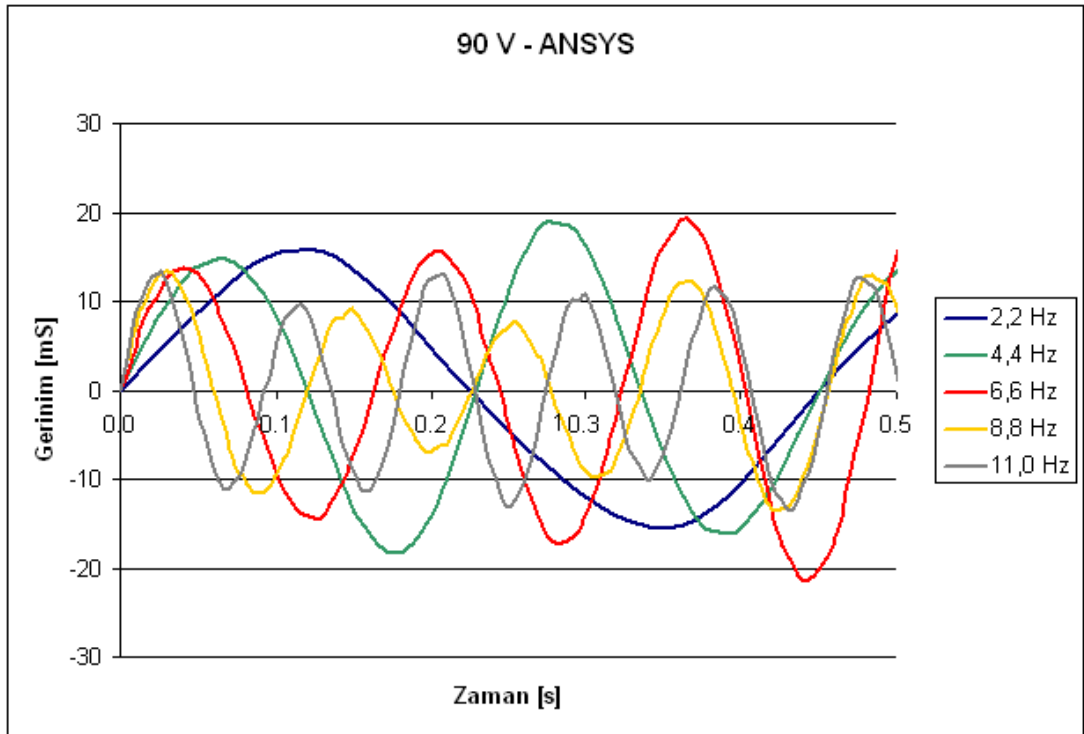


Şekil 4.11 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri (6,6 Hz).

Son olarak sabit genlikte sinüzoidal sinyalin farklı frekanslarda yamaya uygulanması durumu incelenmiştir. Şekil 4.12’de verildiği üzere frekansların değişimi sinyal genliğinin aynı kalmasına rağmen kiriş titreşiminde oldukça etkili olmaktadır. Bir önceki analizde bahsedildiği üzere kiriş yapının doğal frekansı ile aynı frekanstaki elektriksel sinyal, yapıyı rezonans eğilimine sokmaktadır. Farklı frekanslardaki gerinim değişimini veren grafiğin daha anlaşılabilir biçimde görüldüğü Şekil 4.13’ten yola çıkılmak suretiyle frekans değişiminin etkisinde gerinim değerlerinin gerek büyüklük gerekse davranış bakımından oldukça farklılık gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.12 : Farklı frekanslardaki sinüzoidal sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri (90 V).



Şekil 4.13 : Farklı frekanslardaki sinüzoidal sinyaller için analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri (90 V – 0,5 s).

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde, piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş deneysel olarak incelenmiştir. Katmanlı kompozit kirişin imalatından itibaren deney düzeneğinin hazırlanma aşamaları detaylı olarak ele alınmış, böylelikle bundan sonra yürütülecek çalışmalara yardımcı olunması amaçlanmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan aletlere özellikleriyle birlikte değinilmiş ve deney süreci detaylarıyla anlatılmıştır. Öncelikle piezoelektrik yamalı ve yamasız durumlar için katmanlı kompozit kirişin doğal frekansları önceki bölümlerde hesaplanan değerlerle kıyaslanmak üzere belirlenmiştir. Daha sonra ise, bir önceki bölümde, ANSYS kullanılarak yapılmış olan sonlu elemanlar analizleriyle de kıyaslanması amacıyla farklı sınır şartları ve yükleme durumları piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kirişe aynen uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların tutarlılıkları değerlendirilmek suretiyle çalışmanın pratik olarak gerçekçi bir şekilde incelenmesi sağlanmıştır.

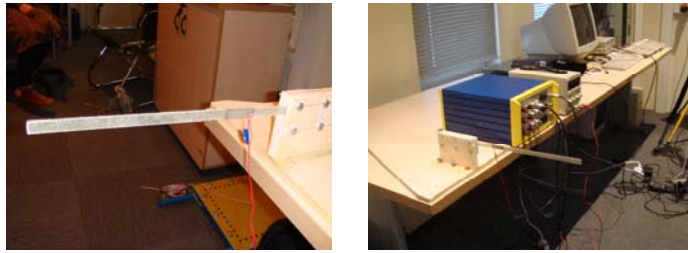
5.1 Katmanlı Kompozit Kirişin İmalatı

Çalışmanın deneysel kısmı için öncelikle malzeme özellikleri bilinen *Texindustria* marka EE280 model cam elyafı ile $0^\circ / 90^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ yönelimli 4 katmanlı kompozit bir plak, İTÜ Kompozit ve Yapı Laboratuvarı'nda bulunan *Heatcon Composite Systems* marka, HCS7500-06-321212 model vakumlu kompozit üretim masası kullanılarak imal edilmiştir. Üretici firma tarafından her bir katmanının kuru halde $0,243\text{ mm}$ kalınlığında olduğu belirtilen cam elyafının yoğunluğu ise 1707 kg/m^3 olarak verilmiştir. Matris elemanı olarak da *MGS* marka L285 yapıştırıcı ve L287 sertleştiriciden oluşan epoksi reçine kullanılmıştır. Şekil 5.1'de aşamaları verildiği üzere imal edilen kompozit plak, İTÜ Trisonik Araştırma Merkezi'nde bulunan CNC makinesi yardımıyla piezoelektrik yamaların genişliğine eşit olacak biçimde $0,011\text{ m}$ genişliğinde ve $0,45\text{ m}$ uzunluğunda hassas bir şekilde kesilmiştir. Deneyler esnasında ankastre sınır koşullarının gerçeğe en yakın biçimde uygulanabilmesi amacıyla analizlerde esas alınan $0,30\text{ m}$ 'lik kiriş boyuna, kesim işlemi sırasında ek pay bırakılmıştır.



Şekil 5.1 : Katmanlı kompozit kirişin imalat aşamaları.

Katmanlı kompozit kirişlerin imalatının ardından, gerek çekiç seti deneylerinde kullanılacak ivme sensörünün ağırlığının, gerekse piezoelektrik deneylerindeki yama ağırlığının sonuçlara etkisinin mümkün mertebe azaltılması amacıyla kiriş genişliğinin dikey eksene paralel olmasını sağlayacak bir ankastre bağlama mekanizması imal edilmiştir. Kontrplak malzemeden imal edilen ankastre bağlama mekanizmasının hazırlanmasının ardından katmanlı kompozit kiriş 6 adet cıvata kullanılarak ankastre tutturulmuş olup kirişe uygulanan ankastre sınır şartı Şekil 5.2’de görülmektedir.



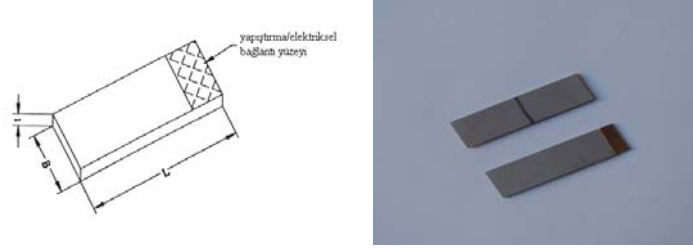
Şekil 5.2 : Katmanlı kompozit kirişin ankastre bağlantısı.

5.2 Deney Düzeneği

Bir önceki bölümde imalat aşamaları açıklanan, katmanlı kompozit kirişin deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için Şekil 5.3’te görülen deney düzeneği hazırlanmıştır. İşleyişinin de aktarıldığı şekilde görülen deney düzeneği, piezoelektrik yamaya istenen elektriksel sinyali ileten ve kirişin üzerinde oluşan gerinimleri ölçen iki ayrı sistemden oluşmaktadır.

Piezoelektrik yamaya farklı genlikler ve frekanslarda olmak üzere sabit ve sinüzoidal olarak iletilecek elektriksel potansiyel farkı sinyalinin genliğini ve frekansını ayarlamak üzere *LabVIEW-SignalExpress* programı tercih edilmiştir. İstenen sinyalin oluşturulabilmesi içinse bilgisayarın *PCMCIA* yuvasından takılan *National Instruments* marka 6062 E veri toplama kartı kullanılmıştır. 6062 E kartından çıkış alabilmek için yine *National Instruments* marka BNC-2110 voltaj çıkış terminali kullanılmıştır. Voltaj çıkış terminalinden alınabilen en yüksek voltaj değeri olan 10 V'un piezoelektrik yamalar için düşük olması sebebiyle, *Piezomechanik* firması tarafından üretilmiş SVR 150-3 model yükseltici kullanılarak çıkış voltajı 120 V'a kadar yükseltilebilmiştir. Yükseltelen voltaj sinyali piezoelektrik yamaya aktararak katmanlı kompozit kirişin hareket etmesi sağlanmıştır. Ayrıca BNC-2110 terminalinden 4 kanallı ve 100 MHz ölçüm yapabilen *HP Osiloskop*'a bir sinyal çıkışı verilmek suretiyle üretilen sinyalin doğruluğu da kontrol edilmiştir.

Piezoelektrik yamaya iletilen elektriksel potansiyel fark etkisinde, katmanlı kompozit kirişin üzerinde meydana gelen gerinim değerlerinin ölçülmesi için *Tokyo Sokki Kenkyujo* marka BFLA 5-5 model gerinim ölçer kullanılmıştır. Gerinim ölçer, çeyrek köprü olarak kullanılmış ve RJ-45 soketleri yardımıyla *VXI* marka EX 1629 model gerinim ölçüm cihazına bağlanmıştır. EX 1629 cihazı ise bilgisayara ethernet portu üzerinden bağlanmış ve ölçülen veriler *VXI Systems* tarafından geliştirilen DAC Express 3.3 kullanılarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.4 : BM 120/36/350 piezoelektrik yama.

5.2.2 Voltaj yükseltici

Piezomechanik firması tarafından üretilmiş SVR 150-3 model yükseltici, 3 farklı kanaldan gelen elektriksel potansiyel farkını 30 kata kadar yükseltebilmekte ve ayrıca $\pm 10 V$ öteleme yapabilmektedir. Yükselticinin üzerinde çıkış voltajının değerini gösteren 3 adet de ufak monitor bulunmaktadır. Şekil 5.5'te görülen SVR 150-3 voltaj yükselticide yükseltme ve öteleme miktarının ayarlandığı tuşlar saat yönünün tersine doğru açılmaktadır.



Şekil 5.5 : SVR 150-3 voltaj yükseltici.

5.2.3 Veri toplama kartı ve voltaj çıkış terminali

Deney düzeneğinde kullanılan 6062E veri toplama kartı *National Instruments* tarafından geliştirilmiş olup 2 adet analog çıkışa ve 16 adet analog girişe sahiptir. $\pm 50 mV$ ile $\pm 10 V$ arasında 12 bit çözünürlükle, $500 kS/s$ örnekleme hızıyla ölçüm yapabilen 6062E kartı, aynı zamanda $\pm 50 mV$ ile $\pm 10 V$ arasında 12 bit çözünürlükle, $850 kS/s$ örnekleme hızıyla da sinyal üretebilmektedir.

Voltaj çıkış terminali olarak kullanılan BNC-2110 ise yine *National Instruments* tarafından geliştirilmiş olup 20,3 cm boyunda 11,2 cm genişliğinde ve 5,5 cm kalınlığındadır. BNC 2110, isminden de anlaşılacağı üzere BNC soketleri için tasarlanmış bir terminaldir. Terminalin üzerinde 10 adet hem giriş hem de çıkış için kullanılabilen soket, 2 adet 'trigger' için kullanılabilen soket, 2 adet kullanıcıya bağlı

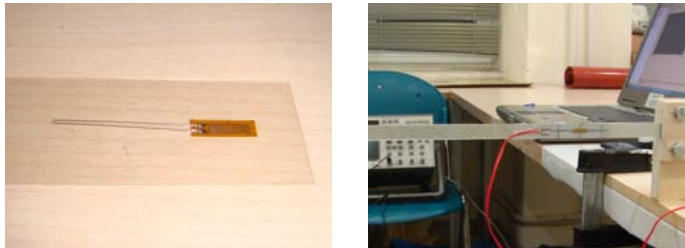
olarak değiştirilebilen soket ve 1 adet de referans için kullanılabilen soket bulunmaktadır. Ayrıca terminalin üzerinde dijital ve zamanlama giriş-çıkışı için bir bölüm bulunmaktadır. Şekil 5.6’da soldan sağa 6062E veri toplama kartı ve BNC-2110 terminali görülmektedir.



Şekil 5.6 : 6062E veri toplama kartı ve BNC-2110 terminali.

5.2.4 Gerinim ölçer

Farklı tipte malzemelere uygulanmak üzere farklı amaçlarla üretilen gerinim ölçerlerin kullanıma uygun biçimde seçilmesi oldukça önemlidir. İncelenen katmanlı kompozit kiriş üzerinde oluşan gerinim değerlerinin ölçülmesi için kompozit yapılar ile kullanıma uygun olarak tasarlanan *TML Tokyo Sokki Kenkyujo* marka BFLA 5-5 model gerinim ölçer tercih edilmiştir. Şekil 5.7’de görülen BFLA 5-5 gerinim ölçerin 5 mm uzunluğundaki ölçüm kısmı $\pm 120 \Omega$ ’luk ölçüm direncine sahip olup yanlamasına duyarlılığı ise 0’dır. Esas yapıyı sıkıştırma gibi etkilerinin azaltılması amacıyla direnç kısmı özel olarak tasarlanan BF tipi gerinim ölçerler seramik, karbon ve kompozit malzemelere en uygun tek eksenli gerinim ölçerlerdir. Cam, karbon ya da aramid gibi elyaflarla takviyelenmiş kompozit malzemeler elyaf yönlenmesine bağlı olarak değişen elastisite modülü ve doğrusal sıcaklık genleşme katsayılarına sahiptirler. Bu sebeple, gerinim ölçümlerinde malzeme özelliklerinin yanında elyaf yönlenmesi de değerlendirilmelidir. BFLA 5-5 ile birlikte *TML Tokyo Sokki Kenkyujo* marka TF-2MS bağlantı terminalleri kullanılarak gerinim ölçerin kablo bağlantısı daha sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7 : BFLA 5-5 gerinim ölçer.

5.2.5 Gerinim ölçüm cihazı

VXI Systems tarafından geliştirilen EX 1629 gerinim ölçüm cihazı 48 kanaldan aynı anda 10 kS/s örnekleme hızı ile 24 *bit* çözünürlükle gerinim ölçümü gerçekleştirebilmektedir. Şekil 5.8’de gösterilen EX 1629, 120 Ω ve 350 Ω için çeyrek, yarım ve tam köprü bağlantıları ile gerinim ölçmesinin yanında $\pm 150\text{ mV}$ ile $\pm 15\text{ V}$ arasında voltaj ölçümü de gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca EX 1629, toplanan veriye frekansı belirlenebilen alçak geçirgen filitreleme ve 1, 10 ve 100 şeklinde ayarlanabilen kazanç oranlarında uygulayabilmektedir. Bilgisayar ile EX 1629 bağlantısı her bilgisayarda kolayca bulunan ethernet portu üzerinden gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.8 : EX 1629 gerinim ölçüm cihazı.

5.2.6 Çekiç seti

Çekiç testi deneyleri esnasında katmanlı kompozit kirişin tahrik edilmesi için *PCB Piezotronics* marka, 086C03 model hassas çekiç kullanılmıştır. Deneylerin tümünde çelik sert uç ile kullanılan hassas çekicinin özellikleri ise Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : PCB 086C03 hassas çekicinin özellikleri.

Hassasiyet	$2,25\text{ mV}/N$
Ölçüm Aralığı	$\pm 2200\text{ N}$
Frekans Aralığı	$0 - 8\text{ kHz}$
Çekiç Ağırlığı	160 gr

Tahrik edilen kirişin ivme verilerinin elde edilmesinde ise katmanlı kompozit yapının ince ve narin olması sebebiyle İTÜ Kompozit ve Yapı Laboratuvarı’nda bulunan en küçük ivme sensörü olan *PCB Piezotronics* marka ICP tipi 352B10 model ivme sensörü tercih edilmiş olup ivme sensörünün özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : PCB 352B10 ivme sensörünün özellikleri.

Hassasiyet	$1,02 \text{ mV}/(m/s^2)$
Ölçüm Aralığı	$\pm 4900 \text{ m}/s^2$
Frekans Aralığı	1 - 17 kHz
Sensör Ağırlığı	0,7 gr

Çekiç testi deney verilerin toplanması için *National Instruments* tarafından geliştirilmiş olan NI 9234 veri toplama kartı kullanılmıştır. NI 9234 veri toplama kartı $\pm 5 \text{ V}$ aralığında 4 kanaldan aynı anda 51.2 kHz ile, 24 bit hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Şekil 5.9’da görülen NI 9234 ayrıca frekansı ayarlanabilen alçak ve yüksek geçirgen filtreleme işlemi de gerçekleştirebilmektedir. Bilgisayar ile veri toplama kartı, USB portu üzerinden birbirlerine bağlanmaktadır. Veri toplama programı olarak ise *M+P International* firması tarafından geliştirilen SO Analyzer R3.3 yazılımı tercih edilmiştir.



Şekil 5.9 : NI 9234 Veri toplama kartı.

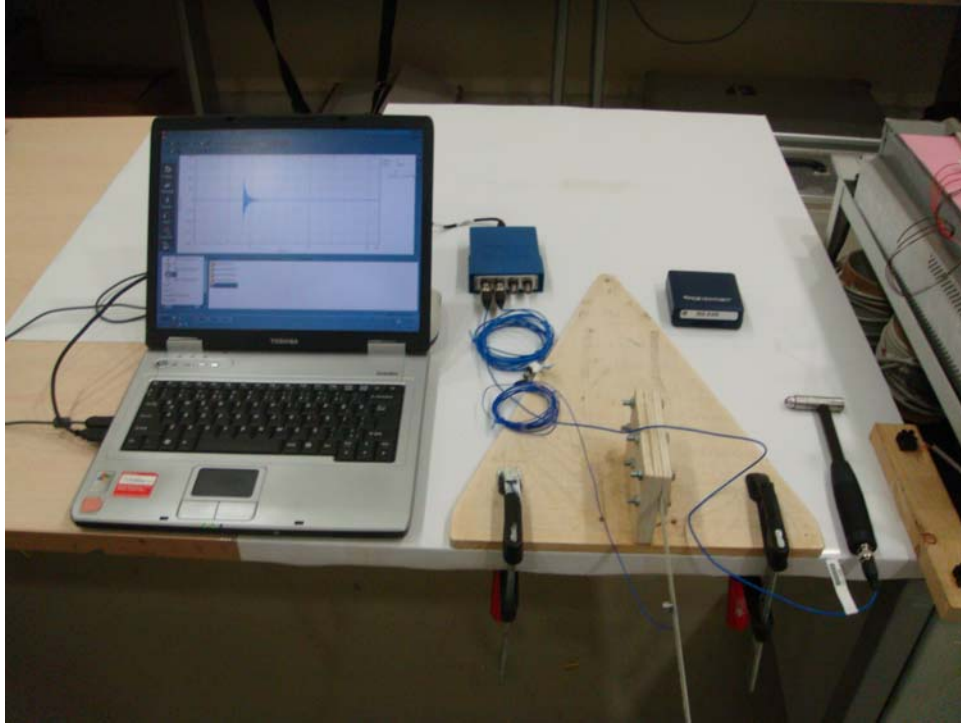
5.3 Çekiç Seti Deneyleri

Yapıların doğal frekanslarının deneysel olarak belirlenmesi için kullanılan yöntemlerin başında, yapıya ivme sensörünün yapıştırılması ve yapının hassas çekiç kullanılarak tahrik edilmesi gelmektedir. Bu şekilde elde edilen ivme verisine *Fast Fourier Transform* (FFT) yöntemi uygulanmak suretiyle yapının doğal frekansları hassas bir şekilde elde edilebilmektedir. Bu aşamada, ivme verisi toplanırken seçilen örnekleme frekansı, ivme sensörünün konumu ve büyüklüğü sonuçları etkileyen parametrelerdir.

Çekiç seti deneyleri için öncelikle ANSYS programı ile yapılan analizler sonucunda yapının doğal frekansları incelenmiş ve ilk 5 moddaki doğal frekansın elde edilmesi

için örnekleme frekansı olarak 512 Hz 'in yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. İvme verisinin sağlıklı bir şekilde ölçülebilmesi için yine sonlu elemanlar analiz sonuçlarından yararlanılarak, farklı mod şekillerinde hareket genliği fazla olan bir noktanın bulunması ivme sensörünün bütün modlarda hareket eden bir nokta olarak belirlenen kökten $0,0119\text{ m}$ uzaklığa yerleştirilmesine karar verilmiştir.

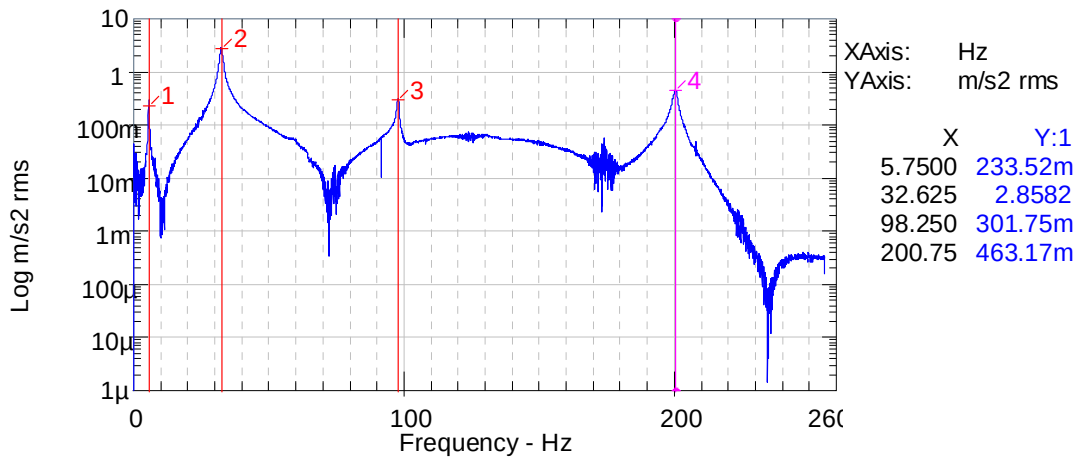
Çekiç seti kullanılarak katmanlı kompozit kirişin doğal frekanslarının elde edilmesi amacıyla *National Instruments* marka NI 9234 model veri toplama kartı, *PCB Piezotronics* marka 086C03 model çekiç ve 352B10 model ivme sensörü ile veri toplama yazılımı olarak *M+P* firması tarafından geliştirilen *SO Analyzer V3.3* kullanılmıştır. Sözü geçen sistemler ile oluşturulan çekiç testi deney düzeneği Şekil 5.9'da görülmektedir.



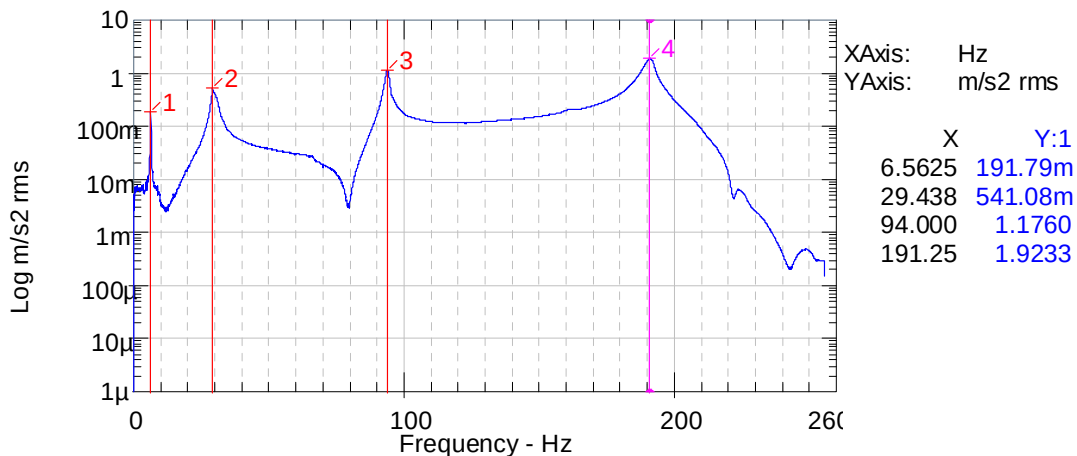
Şekil 5.10 : Çekiç testi deney düzeneği.

Çekiç seti deneylerine başlamadan önce, ANSYS 11.0 sonlu elemanlar programında yapılan modal analizler sonucunda ivme sensörünün yerleştirileceği konum belirlenmiştir. İvme sensörünün konumu belirlenirken, farklı mod şekillerinde hareket genliği fazla olan bir noktanın bulunması amaçlanmıştır. Analizler neticesinde ivme sensörünün kirişin kök kısmından $0,0119\text{ m}$ uzaklığa yerleştirilmesi uygun görülmüştür.

Deneyler sonucunda piezoelektrik yamalı ve yamasız katmanlı kirişlerin üzerinde yer alan ivme sensöründen ve hassas çekiçten elde edilen, ivme-zaman ve kuvvet-zaman grafikleri EK B’de verilmiştir. Elde edilen ivme verileri kullanılmak suretiyle SO Analyzer R3.3 yazılımı ile gerçekleştirilen FFT analizleri sonucunda ise yamasız ve yamalı katmanlı kompozit kirişlerin frekans tepki fonksiyonu grafikleri sırasıyla Şekil 5.11 ve 5.12’de verilmiştir. Grafiklerden de görüleceği üzere, elde edilen frekans tepki fonksiyonunda her bir tepe noktası kirişin bir modu için doğal frekansına karşılık gelmektedir. Bir önceki bölümde yer verilen sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri göz önünde bulundurulmak suretiyle, teorik çalışmadakine benzer bir biçimde deneysel çalışma neticesinde de 3. mod doğal frekansı elde edilememiştir.



Şekil 5.11 : Yamasız kiriş için çekiç testi sonucunda elde edilen frekans tepki fonksiyonu.



Şekil 5.12 : Tek yamalı kiriş için çekiç testi sonucunda elde edilen frekans tepki fonksiyonu.

5.4 Dinamik Gerinim Ölçümü

Yamalı ve yamasız kirişlerin doğal frekanslarını elde etmek için kullanılan ikinci yöntem, kirişe dışarıdan bir kuvvet uygulayarak kirişi titreştirmek ve üzerinde bulunan gerinim ölçer aracılığıyla gerinimin değişimini ölçmektir. Bu şekilde piezoelektrik yamasız ve yamalı katmanlı kompozit kiriş için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen gerinim değerlerinin daha sonra MATLAB programında yazılan bir kod yardımıyla FFT analizi yapılmış ve elde edilen genlik spektrumu vasıtasıyla kirişlerin farklı modlardaki doğal frekansları belirlenmiştir.

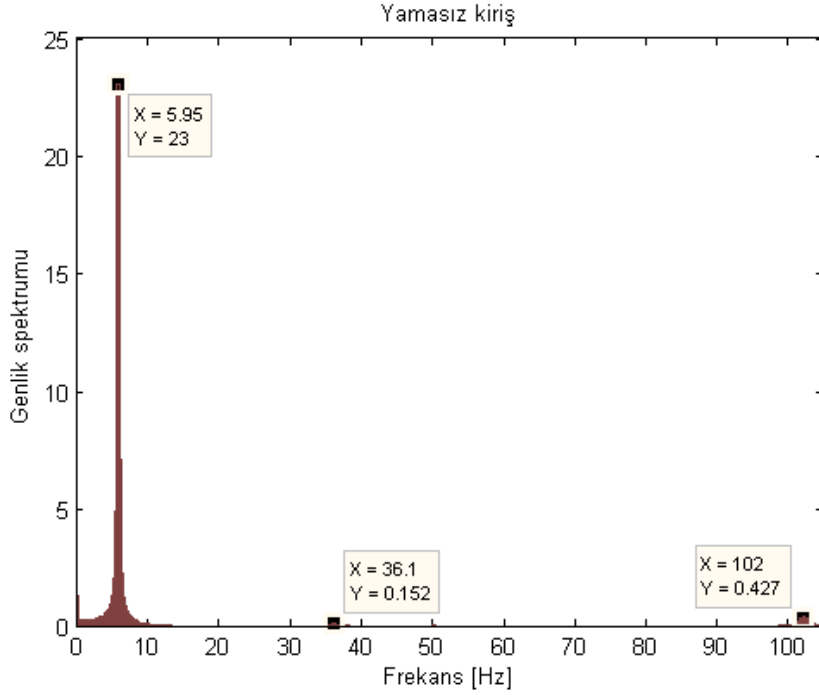
Piezoelektrik yamanın yapıştırılmadığı yüzeyde, merkezi yamanın merkezi ile çıkışacak şekilde yerleştirilen gerinim ölçer ile yapılan dinamik gerinim ölçümlerinde, daha önceden bahsedildiği üzere, EX 1629 model dinamik gerinim ölçer ile birlikte DAC Express 3.3.10 yazılımı kullanılmıştır. Tek eksenli BFLA 5-5 gerinim ölçer ile birlikte TF-2MS bağlayıcı terminaller kullanılmıştır. Sonuçta Şekil 5.13'te görüldüğü üzere dinamik gerinim ölçme sistemi oluşturulmuştur.



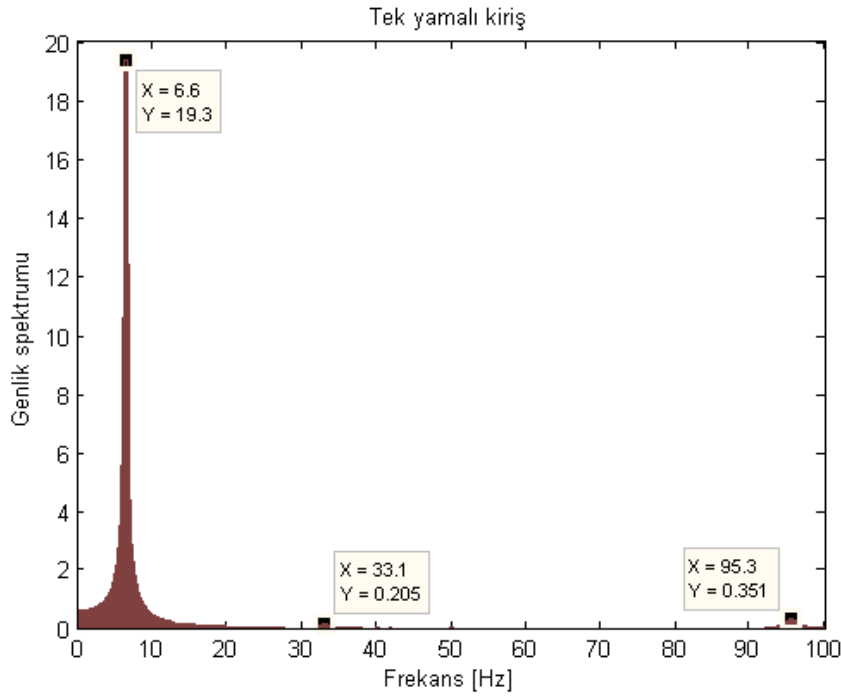
Şekil 5.13 : Dinamik gerinim ölçümü deney düzeneği.

Piezoelektrik yamasız ve yamalı katmanlı kompozit kirişler için 20 saniye süre ile 0,0005 saniye aralıklarla, yani başka bir deyişle 2000 Hz ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilen ivme-zaman grafikleri Ek-B’de verilmiştir. Deney verilerinin FFT analizi sonucunda elde edilen genlik spektrumu ise Şekil 5.14’te piezoelektrik

yamasız katmanlı kompozit kiriş için, Şekil 5.15'te piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş için verilmiştir. Elde edilen genlik spektrumlarında tepe noktaları kirişin farklı modlardaki doğal frekanslarına karşılık gelmektedir. Çekiç testinde karşılaşılan durum dinamik gerinimin ölçüldüğü bu deney sonuçlarında da gözlenmiş ve 3. mod için doğal frekans değeri elde edilememiştir.



Şekil 5.14 : Yamasız kiriş için elde edilen genlik spektrumu.



Şekil 5.15 : Tek yamalı kiriş için elde edilen genlik spektrumu.

5.5 Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmanın sonuçlarının irdelendiği bu bölümde, öncelikle deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar ele alınmıştır. Daha sonra ise, farklı elektriksel yükleme durumları için deneysel olarak incelenen piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş için elde edilen sonuçlar çeşitli grafikler yardımıyla irdelenmiştir.

5.5.1 Doğal frekans sonuçları

Teorik çalışma, sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmanın bir arada yürütüldüğü çalışma kapsamında farklı yöntemlerle hesaplanan doğal frekans değerleri aşağıda verilen çizelgeler yardımıyla incelenmiştir. Çizelge 5.3'te yamasız katmanlı kompozit kiriş için, Çizelge 5.4'te ise bir yüzeyine piezoelektrik yama yapıştırılmış katmanlı kompozit kiriş için elde edilmiş olan doğal frekans değerleri incelendiğinde, yapılmış olan farklı çalışmalar sonucunda birbirlerine oldukça yakın değerlerin sağlandığı görülmektedir. Kompozit malzemenin belirsizlikleri, deneysel çalışmanın çevresel koşullara karşı hassasiyeti ve teorik çalışmanın basitleştirmeleri ile yapılmış olan varsayımlar göz önünde bulundurulduğunda, elde edilen sonuçlar makul bulunmuştur.

Çizelge 5.3 : Katmanlı kompozit kiriş için elde edilen doğal frekanslar.

<i>Mod Sayısı</i>	Doğal Frekanslar (Hz)				Hata Oranı (%)		
	<i>Çekiç Seti FFT</i>	<i>Gerinim FFT</i>	<i>ANSYS</i>	<i>Teorik</i>	<i>Gerinim FFT</i>	<i>ANSYS</i>	<i>Teorik</i>
1	5,75	5,95	5,90	5,96	3,48	2,78	3,65
2	32,63	36,10	37,01	37,35	10,65	13,72	14,48
3	-	-	64,81	-	-	-	-
4	98,25	102,00	103,60	104,61	3,82	5,45	6,47
5	200,75	-	182,96	204,99	-	-9,29	2,11

Çizelge 5.4 : Piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş için elde edilen doğal frekanslar.

<i>Mod Sayısı</i>	Doğal Frekanslar (Hz)			Hata Oranı (%)	
	<i>Çekiş Seti FFT</i>	<i>Gerinim FFT</i>	<i>ANSYS</i>	<i>Gerinim FFT</i>	<i>ANSYS</i>
1	6,56	6,60	6,52	0,61	-0,46
2	29,44	33,10	34,12	12,44	15,94
3	-	-	68,93	-	-
4	94,00	95,30	93,57	1,70	-0,33
5	191,25	-	196,77	-	3,04

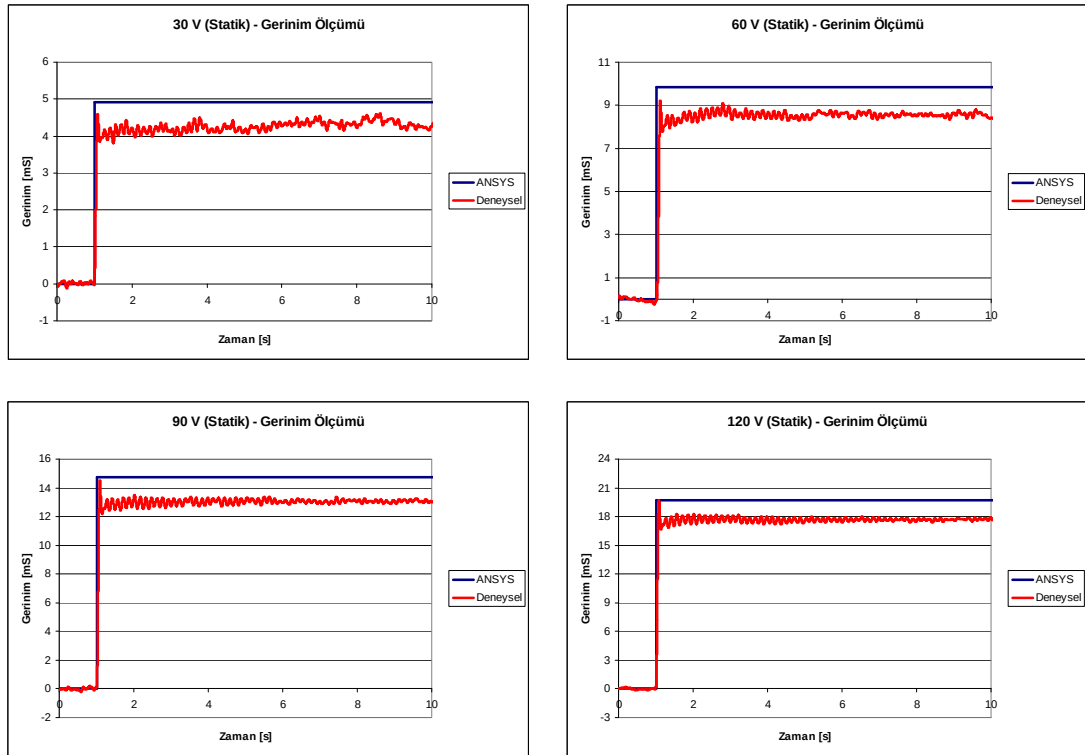
Yamasız ve bir yüzeyine yama yapıştırılmış katmanlı kompozit kiriş için çeşitli yöntemlerle elde edilen doğal frekansların derlendiği yukarıdaki çizelgelerde, 3. mod için doğal frekansın yalnızca sonlu elemanlar analizi neticesinde hesaplandığı görülmektedir. Kirişin düzlem içi hareketine karşılık gelen 3. mod için kullanılan yöntemler yetersiz kalmış olup, daha farklı yöntemlerin kullanılması ile 3. mod için doğal frekansın elde edilmesi mümkün kılınabilir. Bununla birlikte, kirişin titreşim analizi ve kontrolünün amaçlandığı bu çalışma için esas olarak kullanılan yöntemlerin yeterli seviyede olmasından dolayı daha detaylı ölçüm yöntemlerine gerek duyulmamıştır.

5.5.2 Dinamik gerinim sonuçları

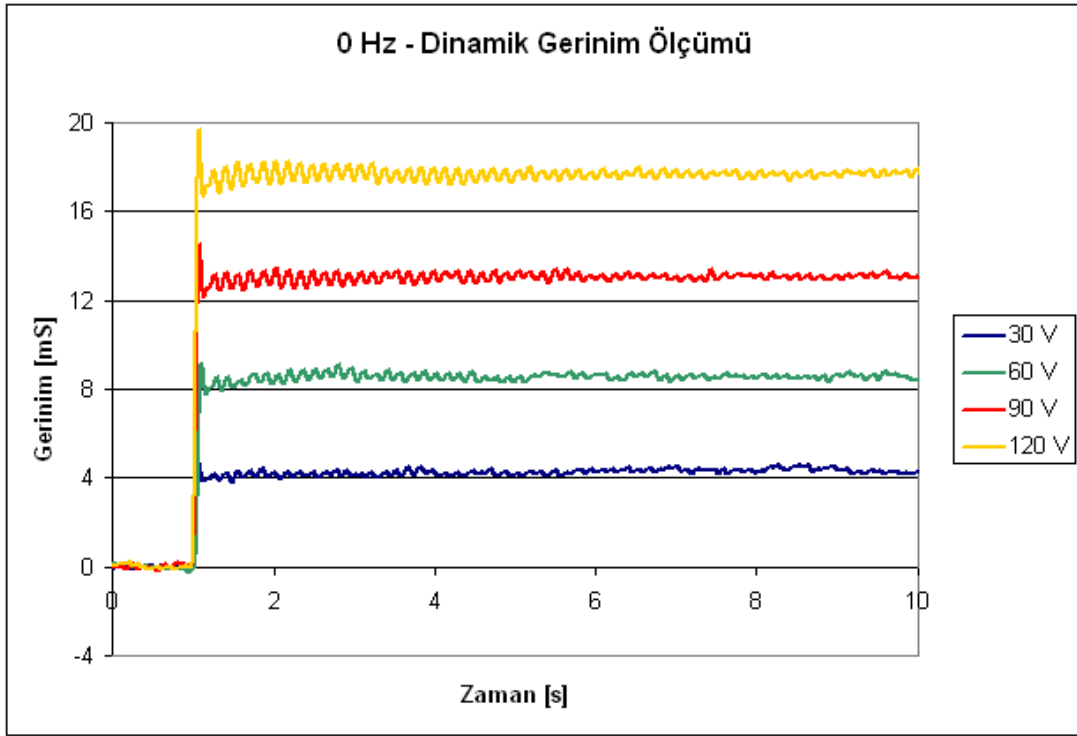
Önceki bölümlerde detaylı olarak anlatıldığı üzere dinamik gerinim ölçüm yapılması amacıyla hazırlanan deney düzeneği kullanılarak piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kiriş yapı deneysel olarak incelenmiştir. Şekil 5.13'te verilen deney düzeneği ile piezoelektrik yamanın eyleyici olarak kullanıldığı deneylerde, yamaya uygulanan farklı elektriksel sinyallerde ankastre kirişin dinamik davranışı gözlenmiştir.

İlk olarak farklı genliklerde zamandan bağımsız elektriksel sinyaller piezoelektrik yapıya uygulanmak suretiyle katmanlı kompozit kirişin dinamik gerinim ölçümü yapılmıştır. Şekil 5.16'da sırasıyla 30 V , 60 V , 90 V ve 120 V için yapılan deney sonuçları, aynı yükleme durumları için ANSYS ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile birlikte grafikler halinde verilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları ile tam olarak

çakışmayan sonlu elemanlar analizi sonuçları arasındaki fark ise analiz sırasında modelleme esnasında karşılaşılan zorlukların tam olarak aşılamamış olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte analizlerde verilen yükleme durumunun başlangıçtan itibaren geçerliliğini sürdürmesine karşılık deneysel çalışmada yüklemenin her türlü etkiden uzak bir şekilde tam olarak uygulanamamış olması da sonuçların farklılığına katkıda bulunmuştur. Şekil 5.17’de verilen grafikten daha net bir şekilde görüleceği üzere, genlik artışı deneysel çalışmada da gerinim değerlerini arttırmıştır.

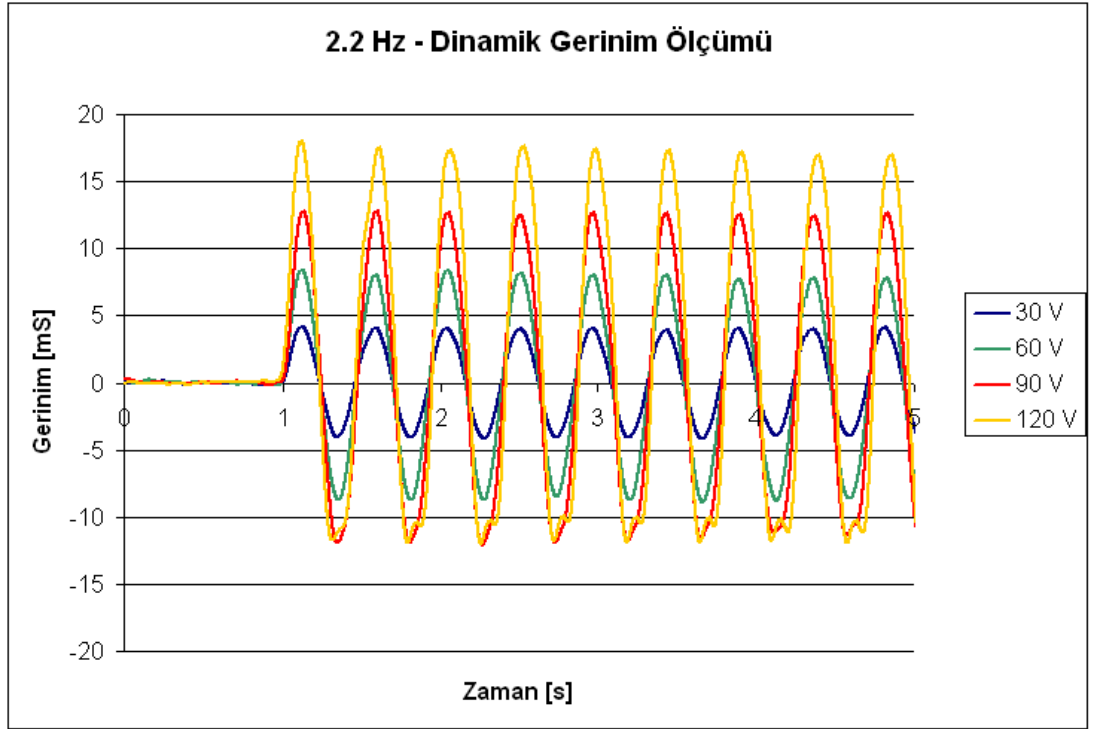


Şekil 5.16 : Farklı genliklerdeki zamandan bağımsız sinyaller için deneysel olarak ve analiz sonucunda elde edilen gerinim değerleri.

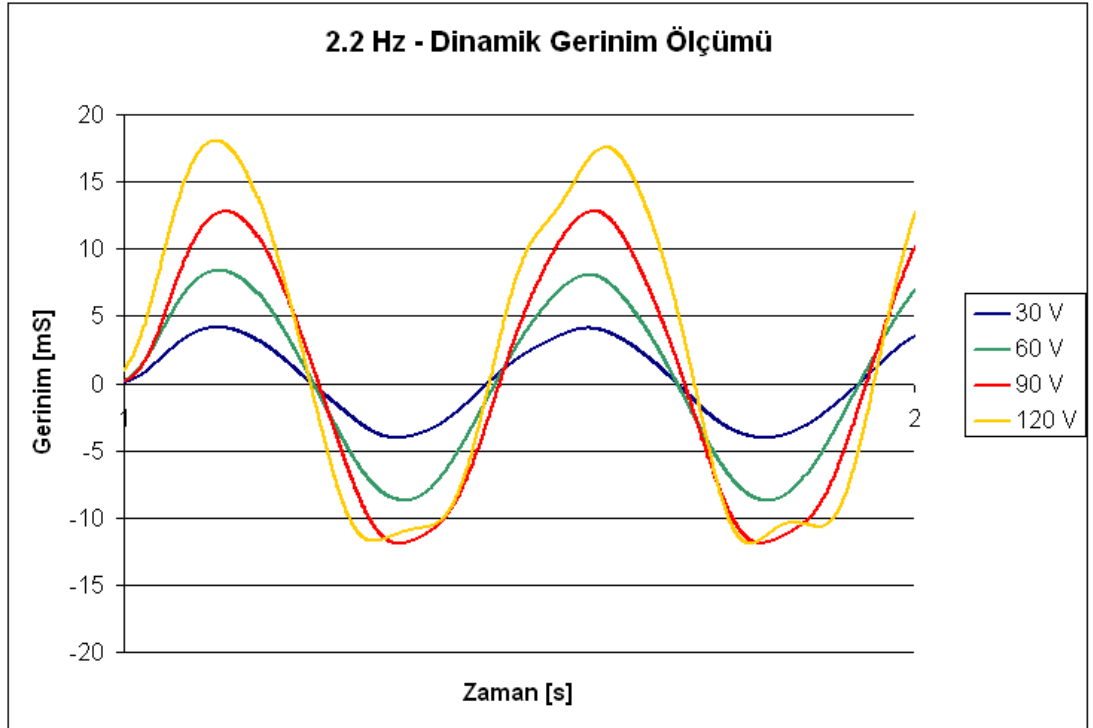


Şekil 5.17 : Farklı genliklerdeki zamandan bağımsız sinyaller için dinamik gerinim ölçümü.

Zamandan bağımsız elektriksel sinyallerin ardından, sabit frekansta farklı genliklerde sinüzoidal sinyalin uygulandığı piezoelektrik yama için katmanlı kiriş yapıda meydana gelen gerinim değişimi incelenmiştir. İlk olarak 2,2 *Hz* frekansına sahip sinüzoidal sinyal sırasıyla 30 *V* , 60 *V* , 90 *V* ve 120 *V* genlikleri ile piezoelektrik yamaya uygulanmış ve kiriş üzerinde elde edilen gerinim değerleri Şekil 5.18’de verilen grafikte görüldüğü üzere elde edilmiştir. Frekansın sabit olmasından dolayı aynı periyotta salınımın gözlemlendiği grafikte elektriksel sinyalin genliğinin artışı ile artan gerinim değerleri görülmektedir. Şekil 5.19’da daha kısa bir zaman diliminde verilen dinamik gerinim değerleri incelendiğinde, 120 *V* genlikli sinüzoidal sinyalin oluşturduğu gerinim değerlerinde bozuntuların olduğu görülmektedir. Piezoelektrik yamanın limit değerine karşılık gelen 120 *V* ’un deneyler sırasında bir miktar daha fazla uygulanmış olmasından dolayı bu tip bozuntular gözlenebilmektedir. Daha sağlıklı yüklemelerin yapıldığı deneysel çalışmalarda bu tip bozuntular beklenmemektedir.



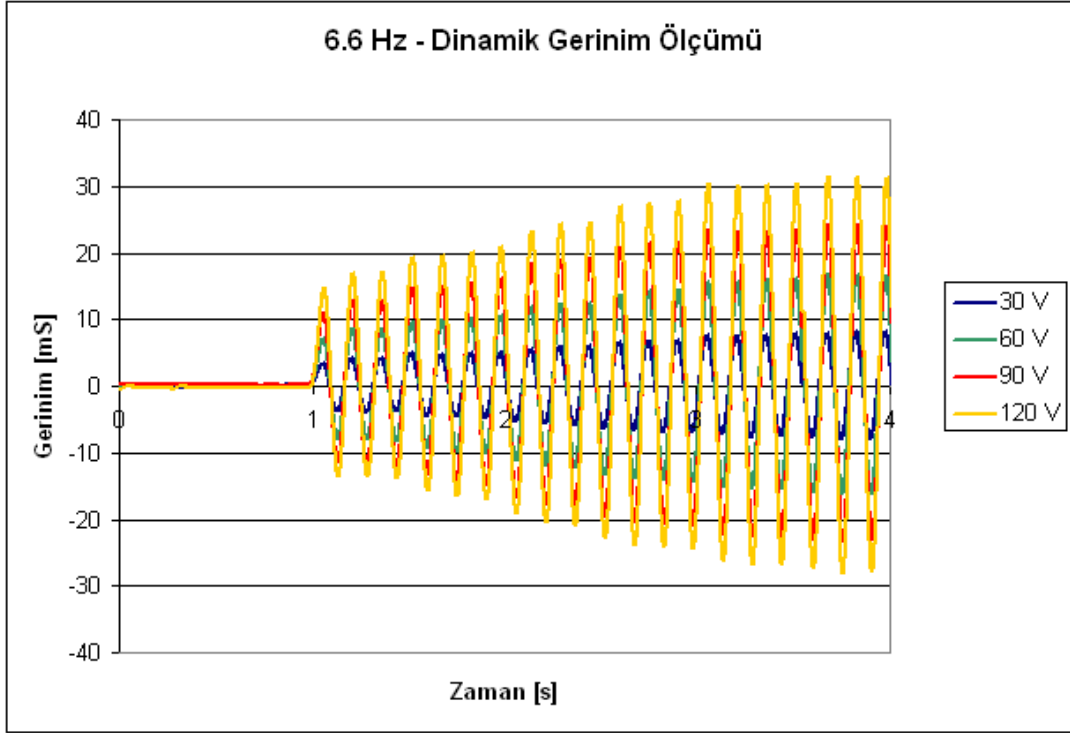
Şekil 5.18 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü (2,2 Hz).



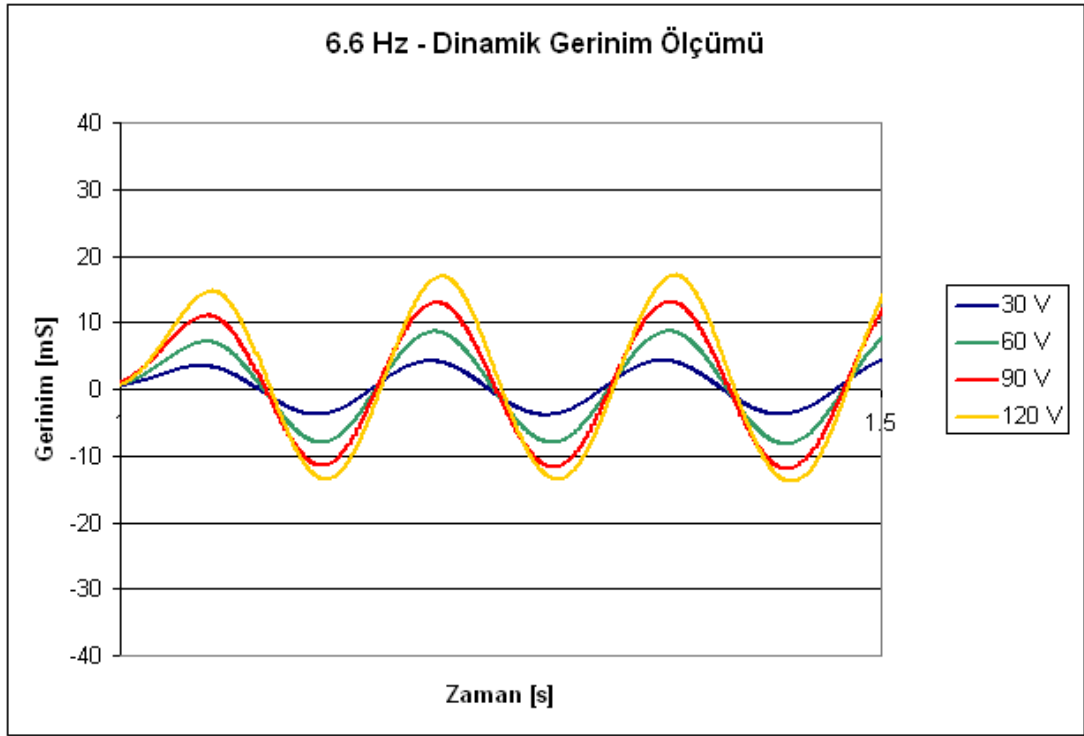
Şekil 5.19 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü (2,2 Hz – 1 s).

Kiriş yapının hali hazırda belirlenmiş olan doğal frekansına karşılık yine 6,6 Hz frekansına sahip farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyallerin uygulandığı piezoelektrik

yama etkisinde kiriş yapının dinamik gerinim değerleri Şekil 5.20’de verildiği üzere elde edilmiştir. Frekansın sabit kaldığı yükleme durumları için dinamik gerinim periyodu da sabit kalmış, artan genliklerden dolayı ise dinamik gerinim değerleri artma eğilimi sergilemişlerdir. Rezonans etkisinden dolayı ise bir yükleme durumu için genlikler zamanla birlikte artmaktadırlar. Şekil 5.21’de daha anlaşılır biçimde verilen dinamik gerinim ölçümü sonuçları önceki bölümde sonlu elemanlar analizi ile elde edilen dinamik gerinim davranışına paralel bir davranış sergilemektedir.

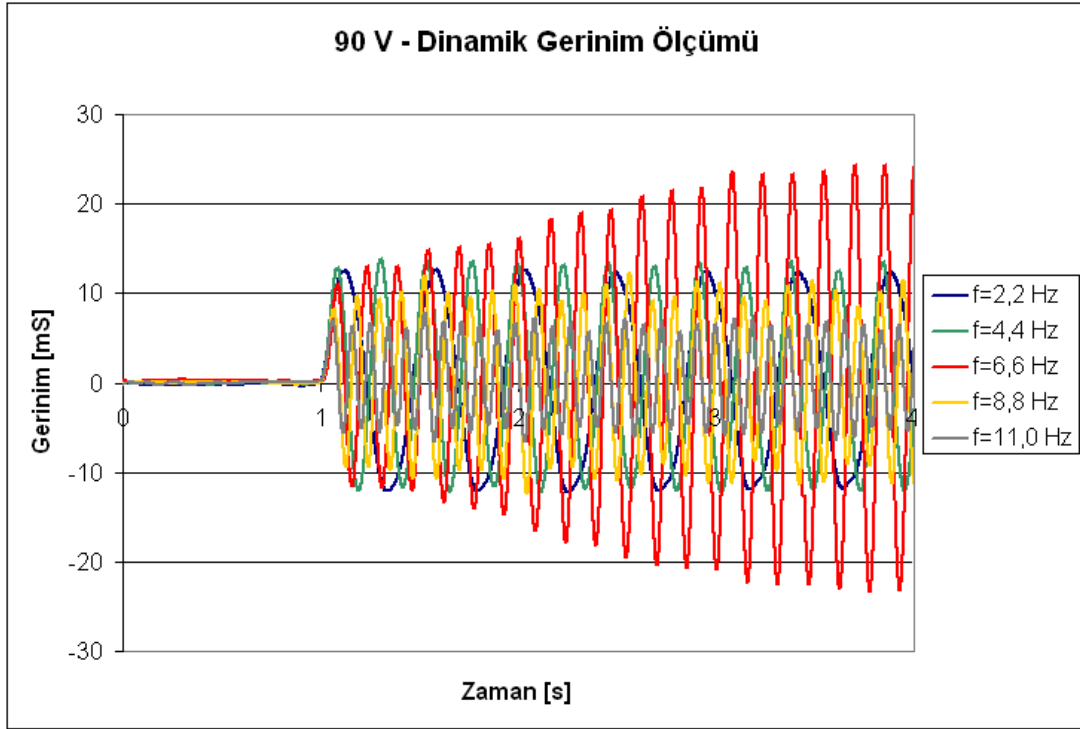


Şekil 5.20 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü (6,6 Hz).

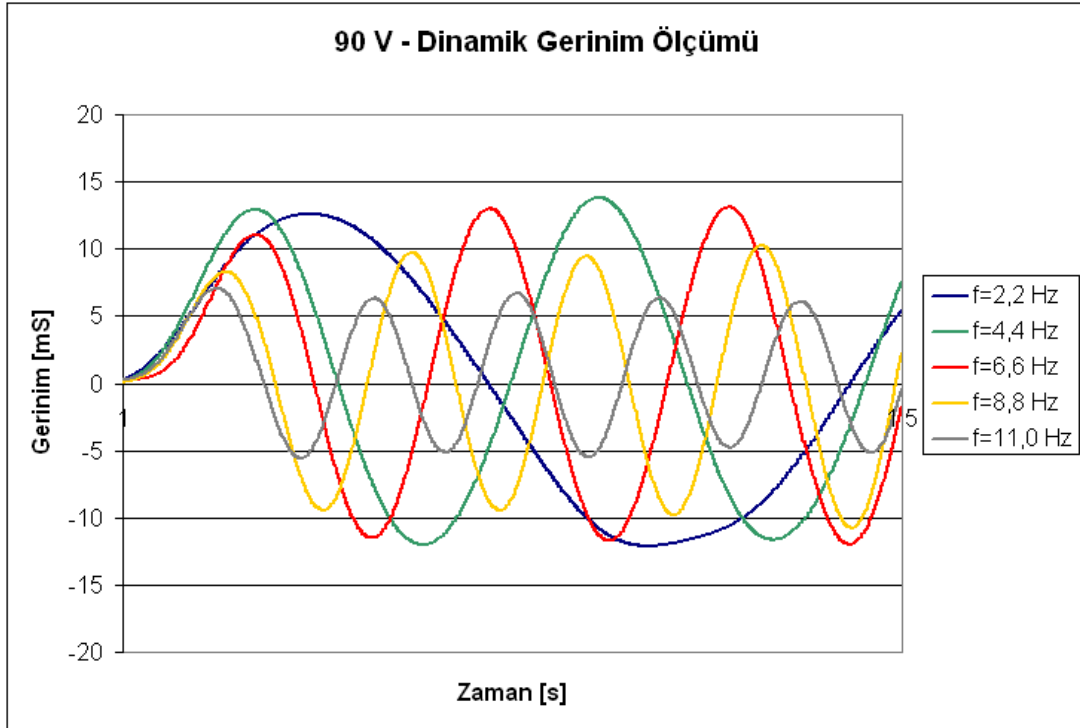


Şekil 5.21 : Farklı genliklerdeki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü (6,6 Hz – 0,5 s).

Son olarak ise uygulanan sinyalin genliği sabit tutulmak suretiyle piezoelektrik yamaya farklı genliklerde sinüzoidal sinyallerin etkidiği deneyler gerçekleştirilmiştir. 90 V genliğinde bir sinüzoidal sinyal sırasıyla 2,2 Hz , 4,4 Hz , 6,6 Hz , 8,8 Hz ve 11,0 Hz frekansları ile yamaya uygulanmış ve giriş üzerinde meydana gelen gerinim değerleri dinamik olarak giriş yüzeyinde bulunan gerinim ölçer aracılığıyla elde edilmiştir. Şekil 5.22’de verilen dinamik gerinim ölçümü değerlerinden 6,6 Hz ’lik sinyalin rezonans etkisi açıkça görülmektedir. Doğal frekanstan daha düşük frekans değerlerinde dinamik gerinim değerleri aynı genlikle sinüzoidal davranış sergilemekteyken, doğal frekanstan daha yüksek frekanslarda genlikler azalmakta ve sinüzoidal eğilim azalmaktadır. Artan frekans ile yama ile giriş yapı arasındaki tepki-cevap ilişkisi bir önceki hareketin etkisinde kalmakta dolayısı ile sinüzoidalite davranışı bozulmaktadır. Şekil 5.23’te daha anlaşılır biçimde verilen grafik sözü geçen etkiyi daha net bir şekilde sergilemektedir.



Şekil 5.22 : Farklı frekanslardaki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü (90 V).



Şekil 5.23 : Farklı frekanslardaki sinüzoidal sinyaller için dinamik gerinim ölçümü (90 V – 0,5 s).

6. DEĞERLENDİRME

Yapılmış olan bu yüksek lisans tezinde öncelikli olarak akıllı yapılar ve özellikle piezoelektrik malzemeler hakkında geniş bir tarama çalışması yapılmış, ardından kompozit malzemelerle birlikte kullanımları irdelenmiştir. Katmanlı kompozit bir kiriş üzerine yapıştırılmış piezoelektrik yamalar ilk olarak teorik olarak incelenmiştir. Yamaların farklı konfigürasyonları için geliştirilen teorik modeller kullanılarak hareket denklemleri çıkarılmış ve yapının titreşim davranışı irdelenmiştir. Algılayıcı/eyleyici konfigürasyonu için geliştirilen kodlar ile kiriş yapının piezoelektrik yamalar aracılığıyla titreşim sönümlemesi ve aktif kontrolü yapılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS'te analiz edilmek üzere gerçeğe en yakın biçimde modellenen yamasız ve yamalı kiriş yapı için gerçekleştirilen modal analizler sonucunda, kiriş yapıların titreşim davranışı belirlenmiş, farklı modlar için doğal frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir. Zamandan bağımsız ve zamana bağımlı elektriksel yükleme durumlarında piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit kirişin dinamik gerinimi incelenmiştir.

Deneysel çalışmada ise öncelikle doğal frekanslar elde edilmiş ve daha önceden teorik olarak ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Esas olarak piezoelektrik yamaya verilecek bir elektriksel potansiyel fark durumunda kirişte meydana gelen gerinim değerlerinin dinamik olarak elde edilmesinin amaçlandığı deneysel çalışma oldukça verimli sonuçlanmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen üç farklı çalışmanın birbiri ile örtüşmesi beklense de teorik çalışmadaki varsayımlar, sonlu elemanlar analizinde modellemekten ve güvenilir olmayan malzeme özelliklerinden kaynaklanan hatalar ve deneysel çalışmada insan faktörü ile çevre koşulları gibi sebeplerden dolayı çalışmalar arasında her bakımdan mükemmel uyum sağlanamamıştır. Bununla birlikte elde edilen sonuçların her birinin kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Çalışkan, T.**, 2002. Piezoelectric ceramics and their applications in smart aerospace structures, *PhD Thesis*, METU, Ankara, Türkiye.
- [2] **Mason, W. P.**, 1981: Piezoelectricity, its history and applications. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. **70**, pp. 1561-1566.
- [3] **Cady, W. G.**, 1946. Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals, McGraw-Hill, New York.
- [4] **Tiersten, H. F.**, 1969. Linear piezoelectric plate vibrations: Elements of the linear theory of piezoelectricity and the vibrations of piezoelectric plates, Plenum Press, New York.
- [5] **Ray, M. C., Bhattacharya, R. and Samanta, B.**, 1993: Exact solutions for static analysis of intelligent structures, *AIAA Journal*, Vol. **31**, pp. 1684-1689.
- [6] **Ray, M.C., Rao, K. M. and Samanta, B.**, 1992: Exact analysis of coupled electroelastic behavior of a piezoelectric plate under cylindrical bending, *Computers and Structures*, Vol. **45**, pp. 667-677.
- [7] **Ray, M.C., Rao, K. M. and Samanta, B.**, 1993: Exact solution for static analysis of intelligent structures under cylindrical bending, *Computers and Structures*, Vol. **47**, pp. 1031-1042.
- [8] **Heyliger, P.**, 1997: Exact solutions for simply supported laminated piezoelectric plates, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. **64**, pp. 299-306.
- [9] **Heyliger, P. and Brooks, S.**, 1996: Exact solutions for laminated piezoelectric plates in cylindrical bending, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. **63**, pp. 903-910.
- [10] **Heyliger, P. and Brooks, S.**, 1995: Free vibration of piezoelectric laminates in cylindrical bending, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. **32**, no. 195, pp. 2945-2959.
- [11] **Benveniste, Y. and Dvorak, G. J.**, 1992: Uniform fields and universal relations in piezoelectric composites, *Journal of the Mechanics of Physics and Solids*, Vol. **40**, pp. 1295-1312.
- [12] **Bailey, T. and Hubbard, J. E.**, 1985: Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. **8**, no. 5, pp. 605-611.
- [13] **Crawley, E. F. and Luis, J.**, 1987: Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures, *AIAA Journal*, Vol. **25**, pp. 1373-1385.

- [14] **Im, S. and Atluri, S. N.**, 1989: Effects of piezoactuator on a finitely deformed beam subjected to general loading, *AIAA Journal*, Vol. **27**, pp. 1801-1807.
- [15] **Crawley, E. F. and Anderson, E. H.**, 1990: Detailed models of piezoceramic actuation beams, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. **1**, pp. 4-25.
- [16] **Crawley, E. F.**, 1994: Intelligent structures for aerospace - A technology overview and assessment, *AIAA Journal*, Vol. **32**, no. 8, pp. 1689-1699.
- [17] **Abramovich, H. and Livshits, A.**, 1993: Dynamic behavior of cross-ply laminated beams with piezoelectric layers, *Composite Structures*, Vol. **25**, pp. 371-379.
- [18] **Abramovich, H.**, 1998: Deflection control of laminated composite beams with piezoceramic layers – closed form solution, *Composite Structures*, Vol. **43**, pp. 217-231.
- [19] **Donthireddy, P. and Chandrashekhara, K.**, 1996: Modeling and shape control of composite beams with embedded piezoelectric actuators, *Composite Structures*, Vol. **35**, pp. 237-244.
- [20] **Waissman, H. and Abramovich, H.**, 2002: Variation of natural frequencies of beams using the active stiffening effect, *Composites: Part B*, Vol. **33**, pp. 415-424.
- [21] **Waissman, H. and Abramovich, H.**, 2002: Active stiffening of laminated composite beams using piezoelectric actuators, *Composite Structures*, Vol. **58**, pp. 109-120.
- [22] **Yocum, M. and Abramovich, H.**, 2002: Static behavior of piezoelectric actuated beams, *Computers and Structures*, Vol. **80**, pp. 1797-1808.
- [23] **Azulay, L. E. and Abramovich, H.**, 2006: Active damping of piezo-composite beams, *Composite Structures*, Vol. **74**, pp. 458-466.
- [24] **Fridman, Y. and Abramovich, H.**, 2008: Enhanced structural behavior of flexible laminated composite beams, *Composite Structures*, Vol. **82**, pp. 140-154.
- [25] **Shen, M. H.**, 1994: Analysis of beams containing piezoelectric sensor and structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. **3**, pp. 439-447.
- [26] **Qiu, Z. C., Zhang, X., Wu, H. and Zhang, H.**, 2007: Optimal placement and active vibration control for piezoelectric smart flexible cantilever plate, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **301**, pp. 521-543.
- [27] **Tzou, H. S., and Fu, H. Q.**, 1994: A study of segmentation of distributed piezoelectric sensors and actuators, Part I: theoretical analysis, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **172**, no. 2, pp. 247-259.
- [28] **Tzou, H. S., and Fu, H. Q.**, 1994: A study of segmentation of distributed piezoelectric sensors and actuators, Part II: parametric study and active vibration controls, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **172**, no. 2, pp. 261-275.

- [29] **Wang, Q., and Wang, C. M.**, 2001: A controllability index for optimal design, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **242**, no. 3, pp. 507-518.
- [30] **Wang, Q.**, 2002: On buckling of column structures with a pair of piezoelectric layers, *Engineering Structures*, Vol. **24**, pp. 199-205.
- [31] **Sloss, J. M, Bruch, J. C., Sadek, I. S. and Adali, S.**, 2003: Piezo patch sensor/actuator control of the vibrations of a cantilever under axial load, *Composite Structures*, Vol. **62**, pp. 423-428.
- [32] **Lin, J. C. and Nien, M. H.**, 2005: Adaptive control of a composite cantilever beam with piezoelectric damping-modal actuators/sensors, *Composite Structures*, Vol. **70**, pp. 170-176.
- [33] **Kwak, M. K. and Sciulli, D.**, 1996: Fuzzy-Logic based vibration suppression control experiments on active structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **191**, no. 1, pp. 15-28.
- [34] **Gaudenzi, P., Carbonaro, R. and Barboni, R.**, 1997: Vibration control of an active laminated beam, *Composite Structures*, Vol. **38**, pp. 413-420.
- [35] **Gaudenzi, P., Carbonaro, R. and Benzi, E.**, 2000. Control of beam vibrations by means of piezoelectric devices: theory and experiments, *Composite Structures*, Vol. **50**, pp. 373-379.
- [36] **Wagner, U. and Hagedorn, P.**, 2002: Piezo-beam systems subjected to weak electric field: experiments and modeling of non-linearities, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **256**, no. 5, pp. 861-872.
- [37] **Lin, R. M. and Nyang, K. M.**, 2003: Analytical and experimental investigations on vibrational control mechanisms for flexible active structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. **12**, pp. 500-506.
- [38] **Lin, J. and Liu, W. Z.**, 2006: Experimental evaluation of a piezoelectric vibration absorber using simplified fuzzy controller in a cantilever beam, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **296**, pp. 567-582.
- [39] **Gözen, Ş.**, 2002. Effects of surface-bonded piezoelectric on beam structures, *M.Sc. Thesis*, İTÜ, İstanbul, Türkiye.
- [40] **Uyanık, H.**, 2006. Anlık basınç yükü etkisindeki katmanlı kompozit bir plağın titreşimlerinin aktif kontrolü, *Doktora Tezi*, İTÜ, İstanbul, Türkiye.
- [41] **Bayar, S.**, 2007. Malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı olan bir piezoelektrik plağın statik analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, İstanbul, Türkiye.
- [42] **Yaman, Y., Çalışkan, T., Nalbantoğlu, V., Ülker, F. D. ve Prasad, E.**, 2002. Akıllı yapıların havacılık ve uzay mühendisliğindeki uygulamaları, *SAVTEK 2002: Savunma Teknolojileri Kongresi*, ODTÜ, Ankara, Türkiye, Ekim 24-25.
- [43] **Gopinathan, S. V.**, 2001. Modeling of piezoelectric smart structures for active vibration and noise control applications, *PhD Thesis*, PSU, Pennsylvania, USA.
- [44] **Moheimani, S. O. R. and Fleming, A. J.**, 2006. Piezoelectric transducers for vibration control and damping, Springer, Germany.

- [45] **Yang, J.**, 2005. An introduction to the theory of piezoelectricity, Springer, Boston.
- [46] **Sevgi, H. E.**, 2007. Kompozit bir plağın deneysel ve ANSYS programı yardımıyla incelenmesi, *Lisans Bitirme Çalışması*, İTÜ, İstanbul, Türkiye.
- [47] **Türkmen, H. S.**, 2007. Kompozit Malzemeler Ders Notları, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- [48] **Url-1** <http://www.antonio.licciulli.unile.it/Corso_Ceramici/relazioni/materiali%20compositi.pdf>, alındığı tarih 10.02.2009.
- [49] **Onaran, K.**, 2000. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- [50] **Blevins, R. D.**, 1993. Formulas for natural frequency and mode shape, Krieger Publishing Company, Malabar, USA.
- [51] **Ömercikoğlu, A.**, 2009. Metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik cevabının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, İstanbul, Türkiye.
- [52] **Url-2** <<http://www.piezomechanik.com/en/home/allcatalogs/index,Piezobenders bimorphs, piezo-electric tubes>>, alındığı tarih 14.09.2008.
- [53] **ANSYS Inc.**, ANSYS 11.0 Kullanıcı Yardım Notları.

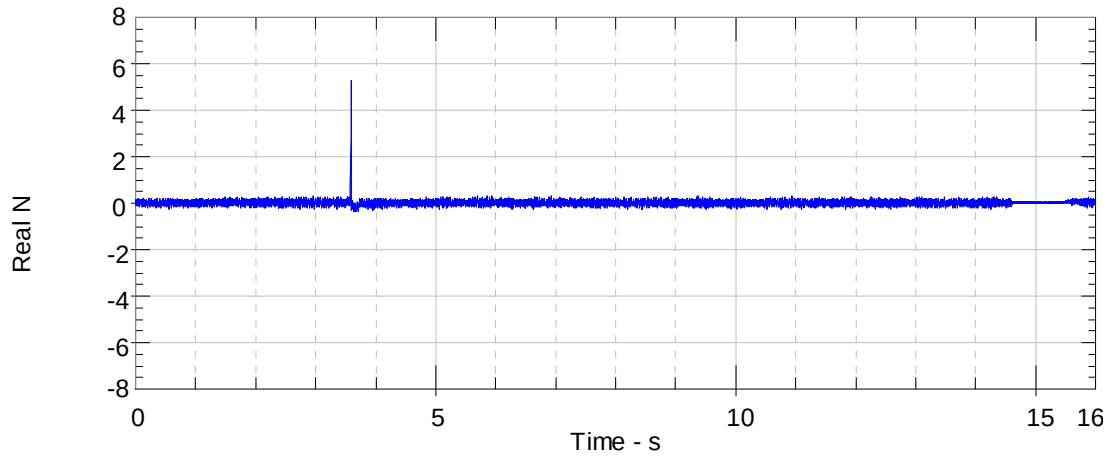
EKLER

EK A.1 : BM 120/36/350 PİEZOELEKTRİK YAMA ÖZELLİKLERİ

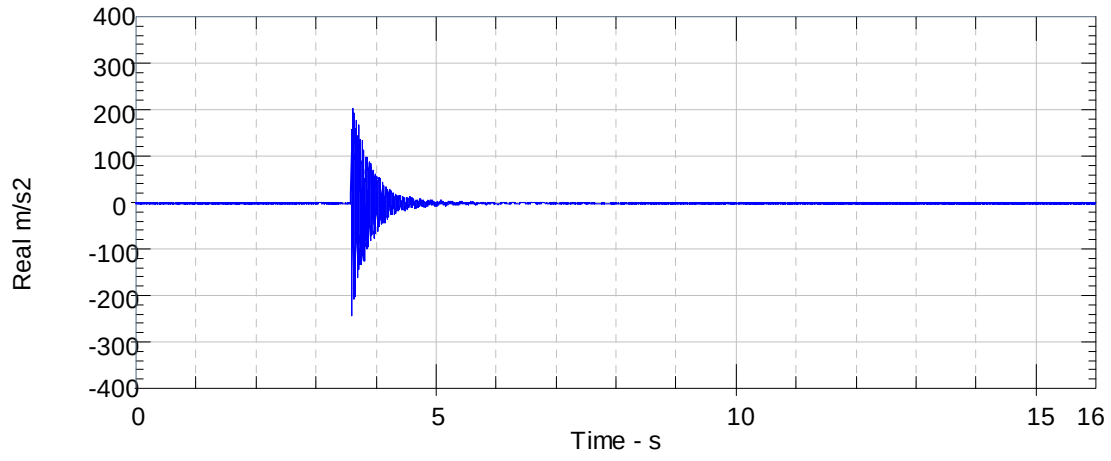
PROPERTIES OF PIEZOCERAMIC MATERIAL HS/HT

Property	Symbol & Unit	Value
<i>DIELECTRICAL DATA</i>		
Permittivity	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1850
Dielectric Loss Factors	$\text{tg}\delta$ [10^{-4}]	130
<i>ELECTROMECHANICAL DATA</i>		
Coupling Factor	K_p	0.62
Coupling Factor	K_{31}	0.34
Coupling Factor	K_{33}	0.72
Piezoelectric Charge Constant	$-d_{31}$ [10^{-12} C/N]	190
Piezoelectric Charge Constant	d_{33} [10^{-12} C/N]	440
Piezoelectric Voltage Constant	$-g_{31}$ [10^3 Vm/N]	11.3
Piezoelectric Voltage Constant	g_{33} [10^3 Vm/N]	25.5
<i>MECHANICAL DATA</i>		
Elastic Compliance	s_{11}^E [10^{-12} m ² /N]	18.5
Elastic Compliance	s_{33}^E [10^{-12} m ² /N]	20.7
Young modulus	Y_{33}^E [10^{10} N/m ²]	6.5
Young modulus	Y_{11}^E [10^{10} N/m ²]	7.8
Radial Frequency Constant	N_p^E [m/s]	2020
Thickness frequency Constant	N_t^D [m/s]	2030
Transverse Frequency Constant	N_1^E [m/s]	1325
Longitudal frequency Constant	N_3^D [m/s]	1250
Mechanical Quality Factor	Q_m	80
Density	ρ [10^3 kg/m ³]	7.74
<i>THERMAL DATA</i>		
Curie Temperature	T_c [°C]	340

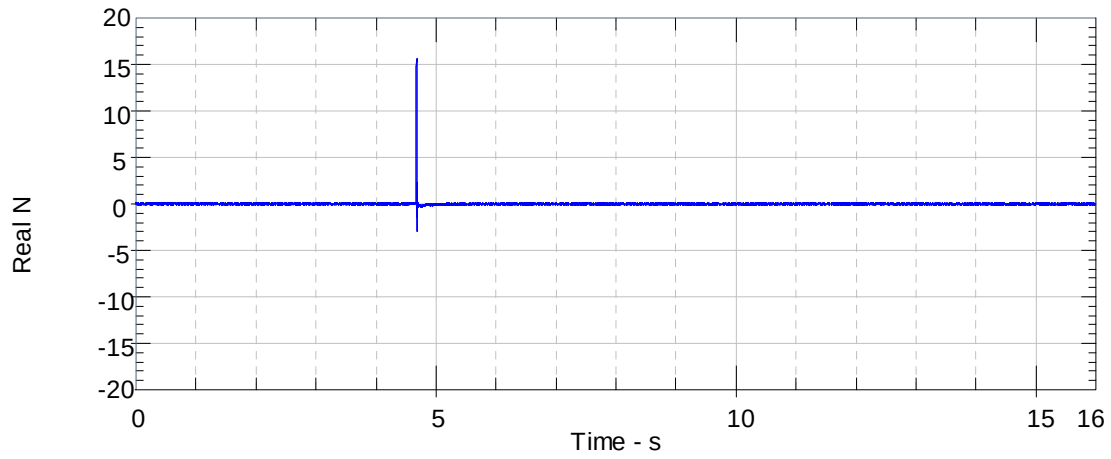
EK B.1 : ÇEKİÇ SETİ DENEY VERİLERİ



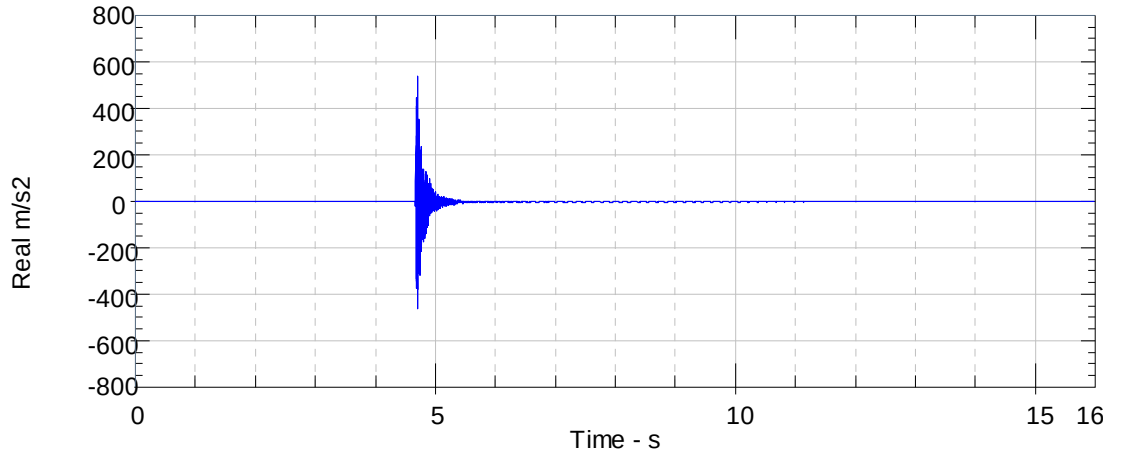
Şekil B.1 : Yamasız kiriş için çekiç testi ile elde edilen kuvvet-zaman grafiği.



Şekil B.2 : Yamasız kiriş için çekiç testi ile elde edilen ivme-zaman grafiği.

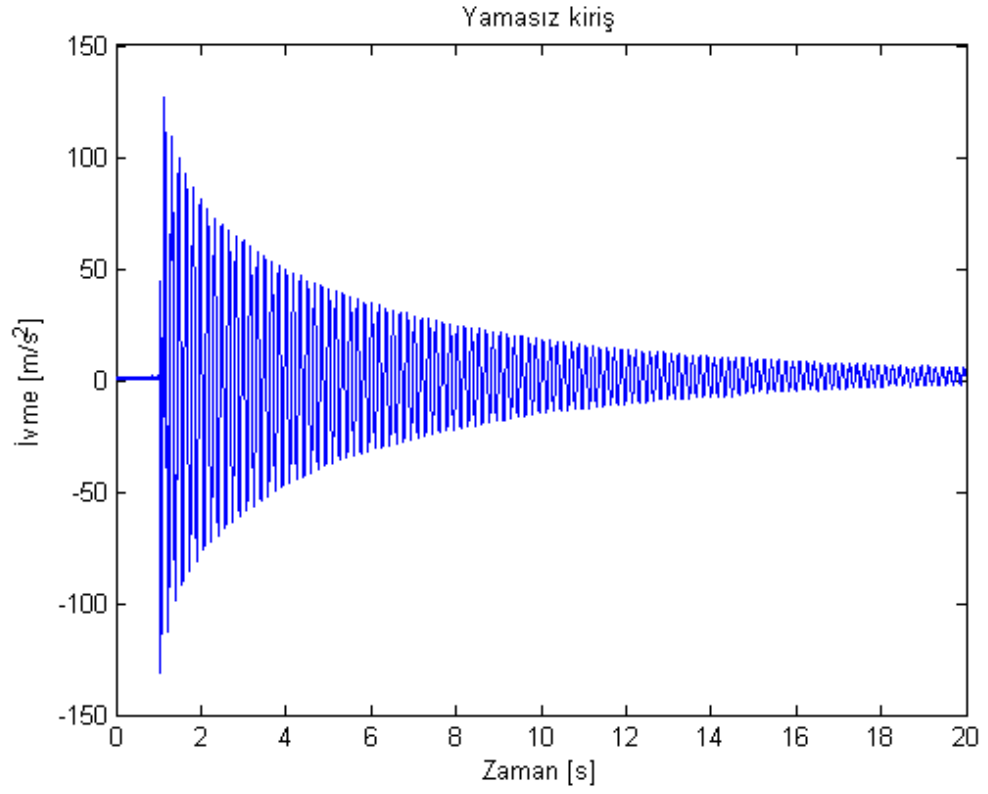


Şekil B.3 : Tek yamalı kiriş için çekiç testi ile elde edilen kuvvet-zaman grafiği.

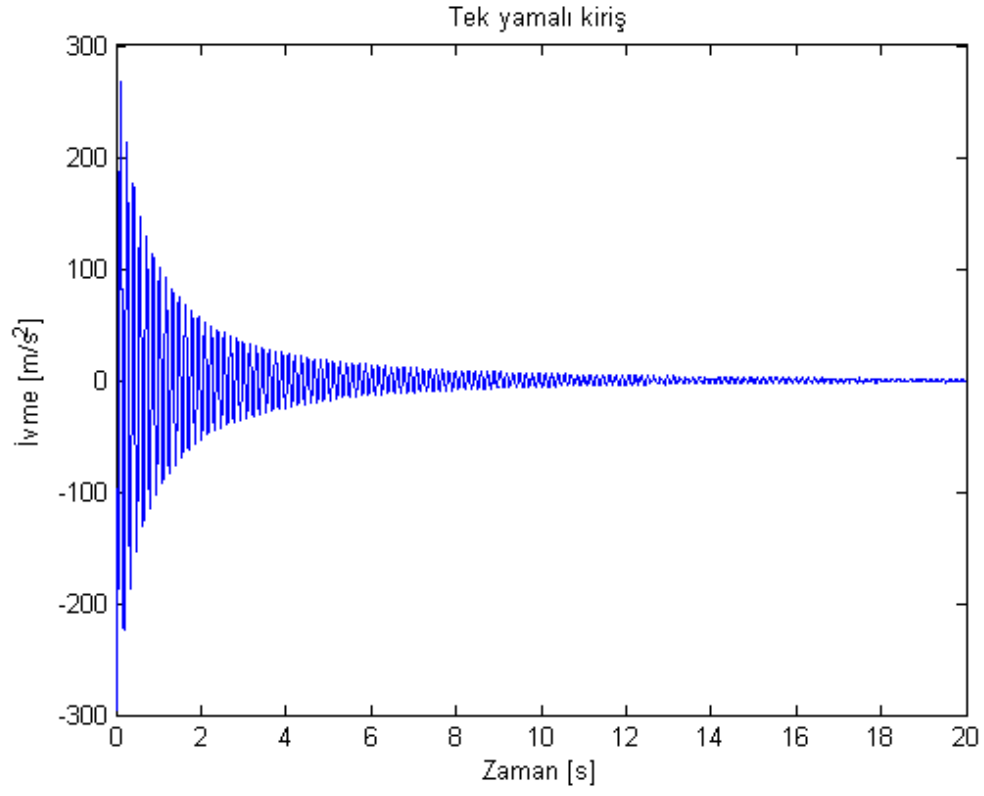


Şekil B.4 : Tek yamalı kiriş için çekiç testi ile elde edilen ivme-zaman grafiği.

EK B. 2: DİNAMİK GERİNİM ÖLÇÜMÜ VERİLERİ



Şekil B.5 : Yamasız kiriş için dinamik gerinim ölçümü ile elde edilen ivme-zaman grafiği.



Şekil B.6 : Yamalı kiriş için dinamik gerinim ölçümü ile elde edilen ivme-zaman grafiği.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hafize Ebru SEVGİ
Doğum Yeri ve Tarihi: Çanakkale, 30.11.1985
Adres: Nilüfer, Bursa
Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi
Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi
Uçak Mühendisliği Bölümü (2003–2007)