

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKILLI MALZEMELER YARDIMIYLA PLAK  
TİTREŞİMLERİNİN AKTİF KONTROLÜ**

Makine Müh. İlkay KURT

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Kontrol Programında Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER**

**İSTANBUL, 2010**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET .....	x
ABSTRACT .....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. BASİT MESNETLİ DİKDÖRTGEN PLAĞIN YER DEĞİŞTİRME İFADESİNİN BULUNMASI.....	4
2.1 Kartezyen Koordinat Sisteminde Plakların Diferansiyel Denklemi.....	4
2.1.1 Koordinat Sistemi ve İşaret Düzeni.....	4
2.1.2 Plak Elemanının Dengelenmesi.....	7
2.1.3 Gerilim, Gerinim ve Yer Değiştirmeler Arasındaki İlişki.....	8
2.1.4 Yer Değiştirmeye Bağlı Olarak İfade Edilen İç Kuvvetler .....	11
2.2 Sınır Şartları.....	12
2.2.1 Basit Mesnetlenmiş Kenar Sınır Şartı.....	12
2.3 Çift Trigonometri Serisi İle Navier Çözümü .....	12
2.4 Plakların Serbest Titreşimi .....	14
2.5 Dikdörtgen Plakların Zorlanmış Düşey Titreşimi .....	15
3. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER .....	18
3.1 Piezoelektrik Malzemelerin Tarihçesi .....	18
3.2 Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri.....	19
3.3 Piezoelektrik Özelliği Etkileyen Faktörler .....	22
3.3.1 Yaşlanma .....	23
3.3.2 Mekanik Sınırlamalar .....	23
3.3.3 Elektriksel Sınırlamalar .....	23
3.3.4 Isısal Sınırlamalar .....	23
3.3.5 Frekansın Etkisi .....	24
3.4 Piezoelektrik Malzeme Çeşitleri.....	24
3.4.1 Doğal Piezoelektrik Malzemeler (Kristaller).....	25
3.4.2 Piezoelektrik Seramik Malzemeler.....	25
3.4.3 Polimer Piezoelektrikler .....	27
3.4.4 Kompozit Piezoelektrikler .....	27
3.5 Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları.....	28
3.5.1 Algılayıcılar (Sensörler) .....	29
3.5.2 Üreteçler .....	29
3.5.3 Eyleyiciler.....	29
3.5.4 Transdüserler .....	30

4.	DÜŞEY TİTREŞİME ZORLANMIŞ PLAĞIN MATLAB/SIMULINK İLE MODELLENMESİ.....	31
4.1	Plak Modelinden Elde Edilen Sonuçlar .....	33
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	38
5.1	Deney Düzeneginin Kurulması .....	38
5.1.1	Plakta Basit Mesnetin Gerçekleştirilmesi.....	38
5.1.2	Piezoelektrik Parçaların Plak Üzerine Yapıştırılması.....	41
5.1.3	Donatıların Bağlanması .....	41
5.2	Deney Sonuçları.....	42
5.2.1	Basit Mesnetli Plağın Doğal Frekanslarının Bulunması.....	42
5.2.2	Aktif Kontrol Sonuçları .....	43
6.	SONUÇLAR.....	47
	KAYNAKLAR.....	48
	ÖZGEÇMİŞ.....	51

## SİMGE LİSTESİ

a, b	X ve Y yönlerindeki plak boyutları
c	Sönüm katsayısı
D	Plağın eğilme rijitliği
E	Elastiklik modülü
f	Titreşen yapısal bir sistemin frekansı
g	Yerçekimi ivmesi
G	Kayma modülü
h	Plağın kalınlığı
I	Eylemsizlik momenti
m,n	Pozitif tamsayılar
$m_x, m_y$	Kartezyen koordinat sisteminde birim uzunluktaki eğilme momenti
$m_{xy}$	Kartezyen koordinat sisteminde birim uzunluktaki burulma momenti
$M_x, M_y$	Momentler
$P_x, P_y, P_z$	Kuvvetler
p	Zorlayıcı frekans
$q_x, q_y$	Kartezyen koordinat sisteminde kesme kuvvetleri
t	Zaman
T	Sıcaklık
u, v, w	X, Y, Z yönlerindeki yer değiştirme bileşenleri
$v_x, v_y$	Birim uzunluktaki kenar kuvvetleri
x, y, z	Kartezyen koordinatlar
X, Y, Z	Kartezyen koordinat sisteminin eksenleri
$\alpha, \beta$	Açılar
$\gamma, \gamma_{xy}$	Kayma gerinimi, X, Y düzlemindeki kayma gerinimi
$\delta$	Deformasyon
$\epsilon_x, \epsilon_y$	X ve Y yönlerindeki normal gerinimler
$\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$	Deforme olmuş orta düzlemin eğriliği
$\nu, \nu_x, \nu_y, \nu_{xy}$	Poisson oranı
$\sigma_x, \sigma_y$	X ve Y yönündeki normal gerilmeler
$\tau, \tau_{xy}$	Kayma Gerilmeleri
$\chi$	Deforme olmuş orta düzlemin çarpılması
$\omega$	Serbest titreşimin frekansı (rad/s)

## KISALTMA LİSTESİ

APC	American Piezo Ceramics
LQG	Linear Quadratic Gaussian
PT	Kurşun Titanat
PVDF	Polyvinylidene Difluoride
PZN	Kurşun Çinko Niobat
PZT	Kurşun Zirkonat Titanat

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 (a) Düşey yüklü dikdörtgen plak, (b) Plak elemanının gerilme bileşenleri (Szilard, 2004).....	5
Şekil 2. 2 Orta düzlemdeki elemanın iç ve dış kuvvetlerinin (a) detaylı gösterimi (b) şematik gösterimi (Szilard, 2004) .....	6
Şekil 2. 3 Plak elemanındaki gerilimler (Szilard, 2004).....	9
Şekil 2. 4 Yer değiştirmeden önceki ve sonraki kesit (Szilard, 2004).....	9
Şekil 2. 5 Açısal Deformasyon (Szilard, 2004).....	10
Şekil 2. 6 Noktasal kuvvet ile yüklenmiş dikdörtgen plak (Szilard, 2004).....	13
Şekil 3. 1 Piezoelektrik elemanın davranışı (APC International, 2006; Aydos, 2009).....	21
Şekil 4. 1 Üzerindeki eyleyici ve algılayıcılar bulunan plak modeli.....	31
Şekil 4. 2 Plak üzerindeki PZT eyleyicilerin üç nokta ile gösterimi (a) eyleyici tarafından üretilen momentlerin gösterimi (b) plağa etki eden eşdeğer kuvvetlerin gösterimi (Tavakolpour vd., 2009) .....	32
Şekil 4. 3 Plağın Matlab/Simulink modelinin şematik gösterimi .....	32
Şekil 4. 4 Plağın orta noktasından (a/2,b/2) zorlanmasıyla (100 N ve 475 rad/s) (a) 1. algılayıcının bulunduğu noktada (b) plak orta noktasında (c) 2. algılayıcının bulunduğu noktada yer değiştirme ve ivmelerin kontrolcüsüz ve kontrolcülü zaman cevapları .....	34
Şekil 4. 5 Plağın orta noktasından (a/2,b/2) zorlanmasıyla (50 N ve 315 rad/s) (a) 1. algılayıcının bulunduğu noktada (b) plak orta noktasında (c) 2. algılayıcının bulunduğu noktada yer değiştirme ve ivmelerin kontrolcüsüz ve kontrolcülü zaman cevapları .....	35
Şekil 4. 6 Plağın rastgele bir noktadan (0.16,0.06) zorlanmasıyla (100 N ve 315 rad/s) (a) 1. algılayıcının bulunduğu noktada (b) plak orta noktasında (c) 2. algılayıcının bulunduğu noktada yer değiştirme ve ivmelerin kontrolcüsüz ve kontrolcülü zaman cevapları .....	36
Şekil 4. 7 Plağın rastgele bir noktadan (0.16,0.06) zorlanmasıyla (50 N ve 475 rad/s) (a) 1. algılayıcının bulunduğu noktada (b) plak orta noktasında (c) 2. algılayıcının bulunduğu noktada yer değiştirme ve ivmelerin kontrolcüsüz ve kontrolcülü zaman cevapları .....	37
Şekil 5. 1 Basit mesneti uygulamak için kullanılan yöntemlerin şematik gösterimi (a) Kenarı oyuklu plak (b) Bıçaklarla sabitlenmiş plak (c) Şime tutturulmuş plak (d) Kısmi menteşelenmiş plak (Aglietti ve Cunningham, 2002) .....	38
Şekil 5. 2 Şimlerle yapılan basit mesnetin deneysel uygulaması (Aglietti ve Cunningham, 2002).....	40
Şekil 5. 3 Yaylara asılı deney düzeneği (Aglietti ve Cunningham, 2002) .....	40
Şekil 5. 4 Deney kurulumunun şematik gösterimi .....	41
Şekil 5. 5 Basit mesnetli plağın doğal frekanslarının bulunması .....	42
Şekil 5. 6 Basit mesnetli plağa titreşim uyarıcı ve piezoelektrik malzemeler bağlı iken (a) yandan (b) üstten görünüşü.....	43

Şekil 5. 7 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (25 Hz frekans ve 0.05 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları.....	44
Şekil 5. 8 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (75 Hz frekans ve 0.1 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları.....	44
Şekil 5. 9 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (50 Hz frekans ve 0.1 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları.....	45
Şekil 5. 10 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (25 Hz frekans ve 0.1 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları.....	45
Şekil 5. 11 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (50 Hz frekans ve 0.05 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları.....	46
Şekil 5. 12 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (75 Hz frekans ve 0.05 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları.....	46

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Basit mesnetli plak değerleri . . . . .	33
Çizelge 5.1 Plağın doğal frekansları . . . . .	43

## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans eğitimimin başlangıcından tezin tamamlanmasına kadar süren uzun çalışmam boyunca her türlü desteğini ve ilgisini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez kapsamındaki deneysel çalışmalarımda yaptığı yardımlarından dolayı Sayın Arş. Gör. Şaban ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım.

## **ÖZET**

Bu çalışmada, dikdörtgen elastik plağın basit mesnetli sınır şartı durumunda çift trigonometrik serilerle Navier Çözümü kullanılarak statik ve dinamik durum için düşey yer değiştirmeleri Matlab/Simulink ile analitik olarak elde edilmiştir.

PZT esaslı piezoelektrik malzemeler eyleyici ve algılayıcı olarak kullanılarak plağın düşey titreşimlerinin PID kontrolcü ile aktif kontrolü teorik ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

## **ABSTRACT**

In this study, transverse deflections of rectangular elastic plate on simple supported boundary conditions using Navier's double trigonometric series method were obtained analytically for static and dynamic situations with Matlab/Simulink .

Active control of plate's transverse vibrations with PID controller was achieved theoretically and experimentally using PZT based piezoelectric materials as actuators and sensors.

## 1. GİRİŞ

Plaklar kalınlığı diğer boyutlarına göre çok daha küçük olan, iki boyutlu düzlemsel yapılardır. Plaklar serbest, basit, elastik, nokta mesnetli ve sabit sınır şartlı olabilir. Plağa etki eden statik ve dinamik yükler genellikle plak yüzeyine diktir. Bu dış kuvvetler, düşey kayma kuvvetleriyle, iç eğilme ve burulma momentleriyle taşınır. Plak yapılarının çoğu elastisite teorisinin denklemleri ile analiz edilir. Plak diferansiyel denklemlerinin kesin çözümleri sadece özel sınır ve yük şartlarında elde edilir. Fakat çoğu durumda değişik enerji metotları birçok plak problemine kullanılabilir analitik çözümler sunar (Szilard, 1974).

Farklı şekillerdeki kalın ve ince plaklar binalarda, köprülerde, uçaklarda, arabalarda, uzay platformlarında yaygın olarak kullanılan en pratik yapılardır. Bu yapıların birçoğu hafif ve esnek olduğundan istenmeyen bozuculardan kolaylıkla etkilenirler. Bozucular performansta azalmaya, kararsızlığa ve yüksek gerilme altındaki yapılarda hasara bile neden olabilir. Bu etkiler plak benzeri yapılarda titreşim kontrolünün gerekliliğini ortaya koymaktadır (Kouhi vd., 2007).

Akıllı bir yapı genellikle bir veya daha fazla aktif malzemeden oluşur. Bu aktif malzemeler istenen fonksiyonu sağlamak için şu alanlardan en az ikisiyle eşleşir: mekanik, elektrik, manyetik, termal, kimyasal ve optik. Bu eşleşme sırasında bu malzemelerin şekil değiştirme, dış uyarıcılara cevap verme ve fiziksel, geometrik ve reolojik özelliklerini değiştirme kabiliyeti vardır. Akıllı yapıların yapı taşlarından olan akıllı malzemelerden bazıları piezoelektrik ve piroelektrik malzemeler, elektroeolojik ve magnetoeolojik akışkanlar, elektrosınırlayıcı, manyetosınırlayıcı malzemeler ve şekil hafızalı alaşımlardır. Birçok mekatronik ve titreşim kontrol sistemlerinde aktif malzeme olarak en çok piezoelektrik malzemeler kullanılır (Jalili, 2010).

Uzay teknolojisinin gelişmesiyle birlikte uzay yapıları daha büyük, daha esnek olmaya ve modal frekansları, sönüm oranları da düşük olmaya başlamıştır. Büyük uzay yapılarının yüksek hassasiyetteki ihtiyaçlarına karşılık verebilmek için titreşim sönümlenmelerde aktif kontrol uygulamaları daha önce olmadığı kadar çok önemli hale gelmiştir. Son yıllarda piezoelektrik transdüserler gibi akıllı malzemeler esnek yapıların titreşim kontrolünde algılayıcı ve eyleyici olarak yaygın olarak kullanılmıştır. Son on yıldır akıllı yapılar kontrol ve dinamik alanında büyük ilgi uyandırmış ve bu alanlarda bir çok başarılı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Qui vd., 2007).

Plak titreşimleriyle ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu konuda en iyi kaynak olabilecek

ve en çok bilinen eser Leissa (1969) tarafından kaleme alınmıştır. İnce dikdörtgen plakların serbest titreşimini incelediği çalışmasında (Leissa, 1973) bütün muhtemel sınır şartlar için analitik sonuçlar kapsamlı olarak verilmiştir.

İstenmeyen yapısal titreşimleri sönümlemede pasif ve aktif kontrol yöntemleri kullanılır. Pasif kontrol yöntemi yüksek frekanslarda etkin olduğu için sadece belli seviyeye kadar sistem cevaplarını kontrol edebilir. Bu yüzden esnek yapıların çok modlu titreşimlerini enerji vererek sönümlemek için aktif kontrol gereklidir (Fuller vd., 1996; Clark vd., 1998).

Piezoelektrik malzemeleri algılayıcı ve eyleyici olarak kullanarak esnek yapıların aktif titreşim kontrolü son yıllarda birçok araştırmacının büyük ilgisini çekmiştir. Proulx ve Cheng (2000), en iyi kontrol performansını elde edebilmek için piezoelektrik eyleyici kullanımında eyleyici etkilerinin tam olarak anlaşılması gerektiğini belirtmiştir. Çok parçalı piezoelektrik kullanıldığında simülasyon modelini iyi doğrulukta sağladığını göstermiştir.

Çevresine duyarlı olan ve istenen şekilde tepki verebilen piezoelektrik algılayıcı ve eyleyicilerden oluşan sistemlere akıllı yapılar denir. Akıllı yapıların titreşim kontrolündeki uygulamaları Bailey ve Hubbart'ın (1985) çalışmasına dayanır. Bu çalışmada ankastre mesnetli bir çubuğun titreşimlerini PVDF eyleyici kullanarak kontrol etmişlerdir. Anderson vd. (1994), PZT ve PVDF gibi piezoelektrik malzemeleri eyleyici ve algılayıcı olarak kullanarak titreşim kontrolü yapmıştır. Bu çalışmasında piezoelektrik eyleyici ve algılayıcıların eş zamanlı olarak uygulamasını başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir. Batra vd. (1996), piezoelektrik eyleyiciler etkisinde basit mesnetli dikdörtgen elastik plakların titreşimini incelemiştir.

Tzou ve Fu (1994), Fuller vd., (1996), Clark vd., (1998), değişik dikdörtgen geometrilerdeki piezoelektrik parçalar kullanarak basit mesnetli elastik dikdörtgen plağın titreşim cevabı için dinamik modelini kurmuşlardır. Crawley ve Lazarus (1991), izotrop ve anizotrop esnek plaklar için dinamik model elde ederek kontrolcü tasarımı üzerine çalışmışlardır.

Plak titreşimlerinin piezoelektrik eyleyicilerle kontrolünde çeşitli kontrolcüler kullanılmıştır. Fanson, ve Caughey, (1990), piezoelektrik eyleyici ve algılayıcılar kullanarak ankastre çubuğun titreşimlerini pozitif pozisyon geri besleme kontrolcüyle sönümlemiştir. Falangas vd. (1994), dikdörtgen plakta algılayıcı olarak ivmeölçer, eyleyici olarak da PZT kullanarak aktif sönümleme yapmıştır. Bu çalışmasında  $H_\infty$  metod ve oran geri besleme olmak üzere iki farklı kontrolcü kullanmıştır. Hwang vd. (1997), tüm kenarlarından sabitlenmiş dikdörtgen ince plakta piezoelektrik eyleyici ve algılayıcı kullanarak robust LQG kontrolü gerçekleştirmiştir.

Li vd. (2003),  $\mu$ -sentez kontrolcü ile kompozit plaklarda parçalı piezoelemanlar kullanarak titreşim kontrolü yapmıştır. Caruso vd. (2003), bir kenarından bağlı elastik ve dikdörtgen plakta PZT algılayıcı ve eyleyici kullanarak değişik  $H_2$  kontrolleri ile titreşimleri sönümlenmiştir. Zhang vd. (2004), plakta piezoelektrik eyleyiciler ile robust titreşim kontrolünü gerçekleştirmiştir. Baudry vd. (2005), periyodik titreşim altındaki plakta birden fazla PZT eyleyici ve PVDF algılayıcı çifti kullanarak dağıtılmış aktif harmonik titreşim kontrol yapmıştır. Benzer olarak Qiu ve Haraguchi (2006), uyarlanabilir kontrol sistemi kullanarak piezoelektrik eyleyiciler ile plak titreşimlerini kontrol etmiştir.

Yang vd. (2006), piezoelektrik algılayıcı ve eyleyicilerle silindirik kabukların titreşimlerinin sönümlenmesinde en uygun kontrol sistemi tasarımını yapmak üzere geri besleme kontrol katsayılarını, piezoelektrik algılayıcı ve eyleyicilerin boyutlarını, sayılarını ve yerleştirilme pozisyonlarını hesaba katmıştır.

Havacılık uygulamalarında uzay araçlarının esnek parçalarının hafif ve geniş olması istenir. Bu yüzden bu parçalar dış bozucu etkilerden doğan titreşim cevaplarına çok hassastır. Bu esnek parçalardan bazıları güneş panelleri ve plaka şekilli antenler gibi ankastre plaklardır. Genellikle ankastre plakta eğilme ve burulma titreşimleri birlikte oluşacaktır. Ölçüm amacıyla eğilme ve burulma momentlerini birbirinden ayırmada en uygun yerleştirmeye jiroskop ve PZT parçaları algılayıcı ve eyleyici olarak kullanılır. Qui vd. (2009), bu şekildeki piezoelektrik plak sisteminin hareket denklemini çıkarmışlardır. Esnek plağın titreşimlerini sönümlenmede ayırık zamanda kayan kip değişken yapı kontrol (VSC) algoritması kullanılmıştır. Choi ve Sohn (2006), aynı şekilde ayırık zamanda kayan kipli kontrolcüyü çubuklar üzerine kullanmıştı ve deneysel olarak gerçekleştirmişti.

Han ve Lee (1999), Akıllı kompozit plağa piezoelektrik algılayıcı ve eyleyicilerin yerleştirilmesinde en etkin yerlerin bulunması için genetik algoritmalar kullanmışlardır. Qui vd. (2007), bir kenarından sabitlenmiş esnek plağın aktif titreşim kontrolünde piezoelektrik algılayıcı ve eyleyicilerin gözlemlenebilirliğe ve kontrol edilebilirliğe dayalı en uygun şekilde yerleştirilmesini incelemiştir. Bu çalışmasında, titreşimleri azaltmada pozitif pozisyon geri beslemeli ve oransal-türevsel kontrol birleştirilerek bir kontrol metodu uygulanmıştır.

## 2. BASİT MESNETLİ DİKDÖRTGEN PLAĞIN YER DEĞİŞTİRME İFADESİNİN BULUNMASI

### 2.1 Kartezyen Koordinat Sisteminde Plakların Diferansiyel Denklemi

#### 2.1.1 Koordinat Sistemi ve İşaret Düzeni

Bir plağın şekli, plak kalınlığını ( $h$ ) her noktada ikiye ayıran orta düzlemin geometrisini tanımlayarak yeterli bir biçimde ifade edilir (Şekil 2.1). Genellikle Kirchoff ve Love'a atfedilen küçük yer değiştirme plak teorisi aşağıdaki varsayımlara dayanır (Szilard, 1974).

a) Plak malzemesi elastik, homojen (her noktada aynı fiziksel özelliklere sahip) ve izotropdur (her doğrultuda aynı davranışı gösteren).

b) Plak başlangıçta düzdür.

c) Plağın kalınlığı diğer boyutlarına nazaran küçüktür. Plağın en küçük kenar uzunluğu kalınlığından en az on kat daha geniştir.

d) Plak kalınlığıyla karşılaştırılınca yer değiştirmeler küçüktür. Kalınlığın onda birinden beşte birine kadar maksimum yer değiştirme küçük-yer değiştirme teorisi için sınır kabul edilir. Bu sınırlandırma uzunluk açısından da ifade edilebilir, yani maksimum yer değiştirme en küçük kenar uzunluğunun ellide birinden daha azdır.

e) Yer değiştirmiş orta düzlemin eğimleri bütünlüğe nazaran küçüktür.

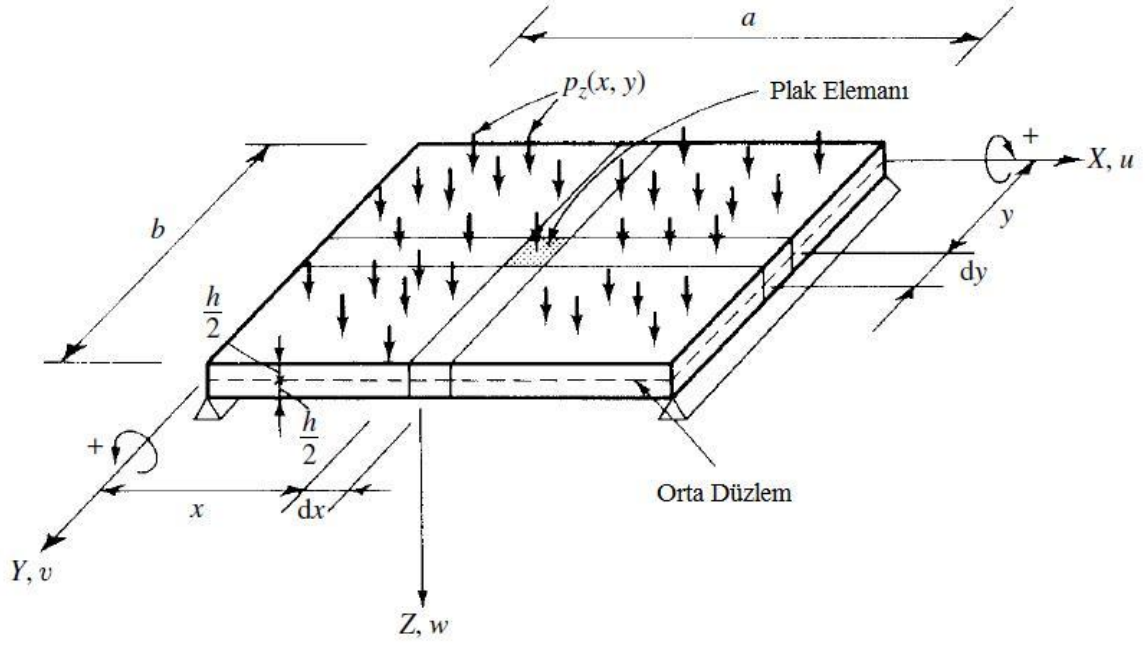
f) Deformasyonlar başlangıçta orta düzleme dik düz çizgilerdir ve orta düzleme dik düz çizgiler olarak da kalırlar. (Enine kaymalardan oluşan deformasyonlar ihmal edilecektir.)

g) Plağın yer değiştirmesi başlangıç düzlemine dik orta düzlemin noktalarının yer değiştirmesi sonucu oluşur.

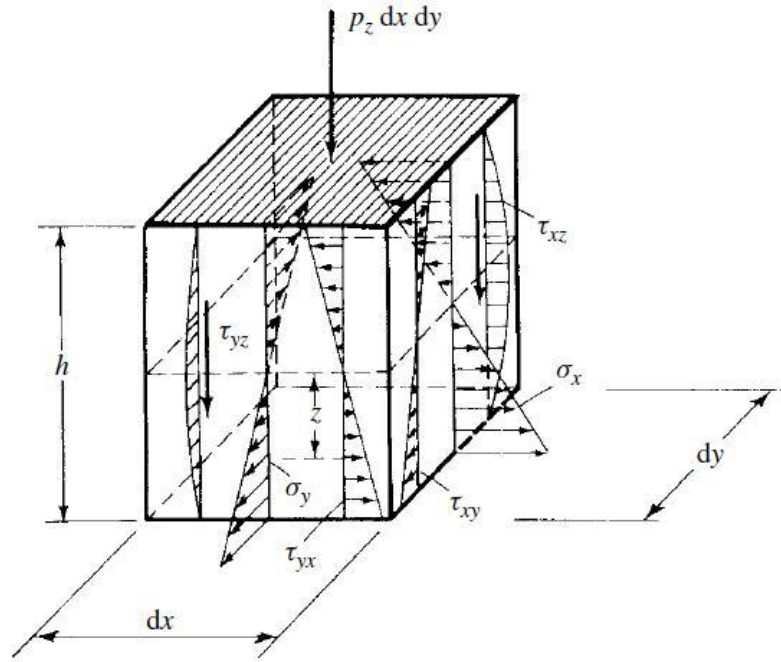
h) Orta düzleme dik gerilmeler ihmal edilir.

Küçük ve büyük ölçekli testler bu varsayımların geçerliliğini kanıtlamıştır. Eğilmeye dirençli plaklarda kolaylaştırıcı bir varsayım eklenebilir:

i) Düzlem içi kuvvetler tarafından üretilen orta düzlemdeki gerilmeler eğilme sonucu oluşan gerilmelere kıyasla genellikle ihmal edilir.



(a)

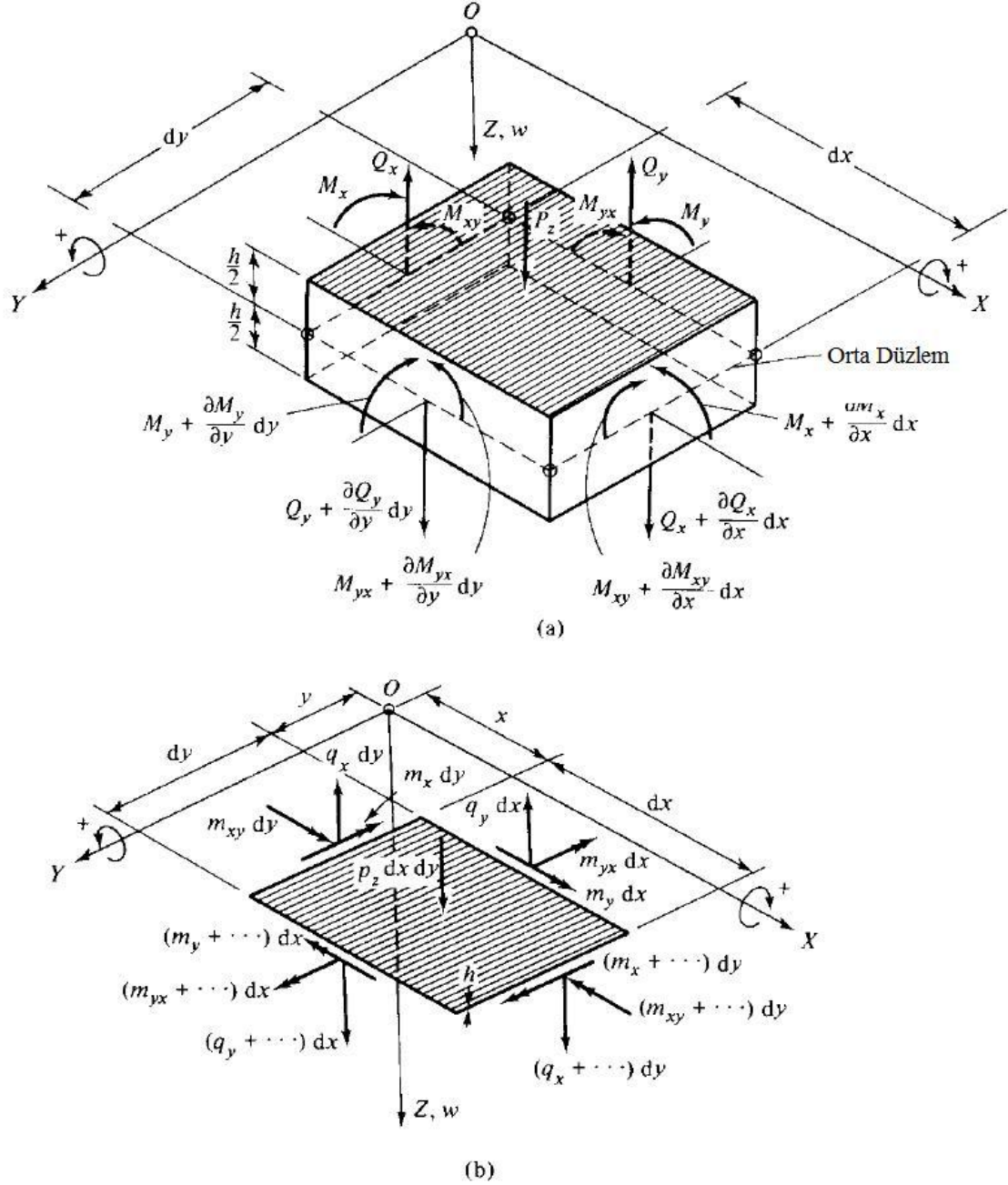


(b)

Şekil 2. 1 (a) Düşey yüklü dikdörtgen plak, (b) Plak elemanının gerilme bileşenleri (Szilard, 2004)

Dikdörtgen plaklar için Kartezyen koordinat sisteminin kullanımı en uygundur (Şekil 2.1). Dış kuvvetler, iç kuvvetler ve yer değiştirme bileşenleri ( $u$ ,  $v$ , ve  $w$ ),  $X$ ,  $Y$ , ve  $Z$  koordinat eksenlerinin pozitif yönünü gösterdiklerinde pozitif kabul edilirler. Genel mühendislik

uygulamalarında, pozitif momentler yapının alt kısmındaki liflerde gerilme oluşturur. Bu işaret düzeni plaklar için de geçerlidir. Plaktan çıkarılan elementsel paralel yüzlü bir kesit düşünülünce, Şekil 2. 2'de gösterildiği gibi, pozitif iç kuvvetler ve momentler yan yüzeylere verilir. Elementin dengesini sağlamak için negatif iç kuvvetler ve momentler uzak kenarlarda olmalıdır (Szilard, 1974).



Şekil 2. 2 Orta düzlemdeki elemanın iç ve dış kuvvetlerinin (a) detaylı gösterimi (b) şematik gösterimi (Szilard, 2004)

### 2.1.2 Plak Elemanının Dengelenmesi

Plağın sadece orta düzleme dik kuvvetlere maruz kaldığı varsayılırsa, altı temel dengeleme denklemlerinden şu üçü kullanılabilir (Szilard, 1974):

$$\sum M_x = 0 \quad \sum M_y = 0 \quad \text{ve} \quad \sum P_z = 0 \quad (2.1)$$

Plak davranışı pek çok yönüyle iki boyutlu çubukların davranışına benzer. Dış yük  $P_z$  enine kayma kuvvetlerini  $Q_x$  ve  $Q_y$ , ve eğilme momentlerini  $M_x$  ve  $M_y$  oluşturur. İki boyutlu çubuklardan en önemli farkı burulma momentlerinin  $M_{xy}$  ve  $M_{yx}$  varlığıdır (Şekil 2.2a). Plak teorisinde orta düzlemin birim uzunluklarındaki iç kuvvetleri ve momentleri kullanmak yaygındır (Şekil 2.2b). İç kuvvetleri birim uzunluktaki iç kuvvetlerden ayırmak için  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_{xy}$  ve  $m_{yx}$  notasyonları kullanılır.

Dengenin diferansiyel denklemi şu şekilde kurulur (Szilard, 1974):

- Uygun bir koordinat sistemi seçilir ve bir plak elemanının taslağı çizilir (Şekil 2.2)
- Eleman üzerinde etkili olan bütün dış ve iç kuvvetler gösterilir.
- Pozitif iç kuvvetler artışlarıyla beraber ( $q_x + \dots$ ,  $q_y + \dots$  vb.) yakın kenarlara uygulanır.
- Negatif iç kuvvetler uzak kenarlara uygulanır.
- Artışlar kesik bir Taylor serisiyle açıklanır.

$$q_x + dq_x = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad , \quad m_y + dm_y = m_y + \frac{\partial m_y}{\partial y} dy \quad (2.2)$$

- Eleman üzerinde etkili olan iç ve dış kuvvetlerin dengesi açıklanır.

Örneğin  $Y$  ekseninin etrafındaki bütün kuvvetlerin momentlerinin toplamının sıfır olması şu şekilde açıklanır (Şekil 2.2b):

$$\begin{aligned} & \left( m_x + \frac{\partial m_x}{\partial x} dx \right) dy - m_x dy + \left( m_{yx} + \frac{\partial m_{yx}}{\partial y} dy \right) dx - m_{yx} dx \\ & - \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy \frac{dx}{2} - q_x dy \frac{dx}{2} = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Sadeleştirmeden sonra,  $\frac{1}{2} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} \right) (dx)^2 dy$  'yi içeren terimi daha uzun dizinin küçük bir parçası olduğu için ihmal edilir. Böylece denklem aşağıdaki halin alır.

$$\frac{\partial m_x}{\partial x} dx dy + \frac{\partial m_{yx}}{\partial y} dy dx - q_x dx dy = 0 \quad (2.4)$$

(2.4) ifadesi  $dx dy$  ile bölüldükten sonra aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial m_{yx}}{\partial y} = q_x \quad (2.5)$$

Aynı şekilde X eksenini etrafındaki momentlerin toplamı da aşağıdaki sonucu verir.

$$\frac{\partial m_y}{\partial y} + \frac{\partial m_{xy}}{\partial x} = q_y \quad (2.6)$$

Z yönündeki tüm kuvvetlerin toplamı üçüncü denge denklemini verir:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} dxdy + \frac{\partial q_y}{\partial y} dxdy + p_x dxdy = 0 \quad (2.7)$$

(2.7) ifadesi  $dxdy$  ile bölüldükten sonra aşağıdaki hali alır.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = -p_x \quad (2.8)$$

(2.5) ve (2.6) denklemlerini (2.8) denkleminin yerine koyunca ve  $m_{xy} = m_{yx}$  olunca aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial y^2} = -p_x(x, y) \quad (2.9)$$

(2.9) denklemindeki eğilme ve burulma momentleri gerilmelere bağlıdır ve gerilmeler yer değiştirme bileşenlerinin ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) fonksiyonudur. İleriki basamaklarda, iç kuvvetler ve yer değiştirme bileşenleri ilişki içerisinde olacaktır.

### 2.1.3 Gerilim, Gerinim ve Yer Değiştirmeler Arasındaki İlişki

Szillard (1974), yer değiştirmiş orta düzlemin eğilme değişimlerine aşağıda verildiği gibi ulaşmıştır. Malzemenin elastik olduğu varsayımı iki boyutlu Hooke kanununun kullanılmasını mümkün kılar ve aşağıdaki ifadeler plak elemanında gerilim ve gerinimi ilişkilendirir.

$$\sigma_x = E \varepsilon_x + \nu \sigma_y \quad (2.10)$$

$$\sigma_y = E \varepsilon_y + \nu \sigma_x \quad (2.11)$$

(2.10)'u (2.11)'in yerine koyunca aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (2.12)$$

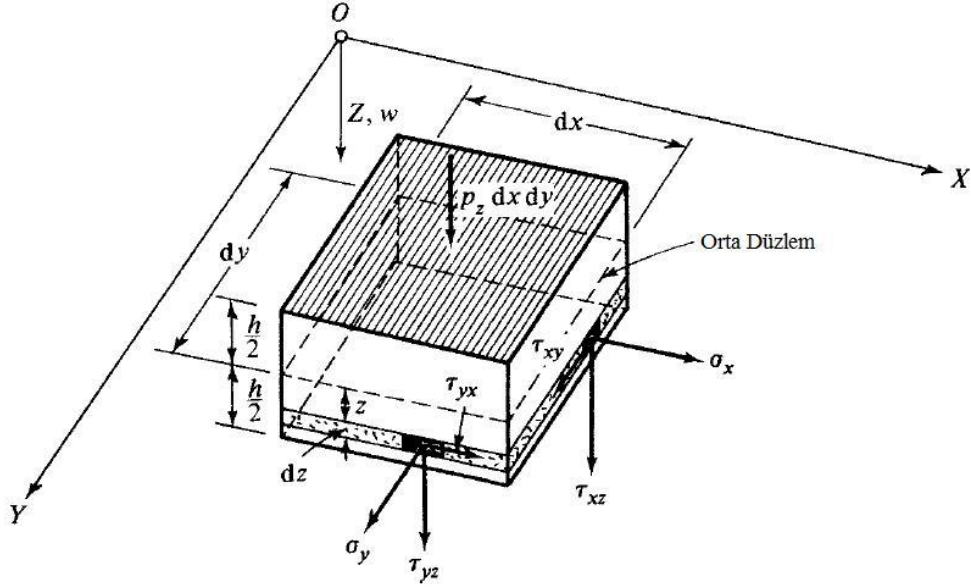
Aynı şekilde aşağıdaki ifade çıkarılabilir.

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \quad (2.13)$$

$m_{xy}$  ve  $m_{yx}$  burulma momentleri, kayma gerinimi ( $\gamma$ ) ile Hooke ilişkisi içerisinde olan

düzlem içi kayma gerilimlerini ( $\tau_{xy}$  ve  $\tau_{yx}$ ) üretir ve aşağıdaki ifadeyi verir (Şekil 2.3).

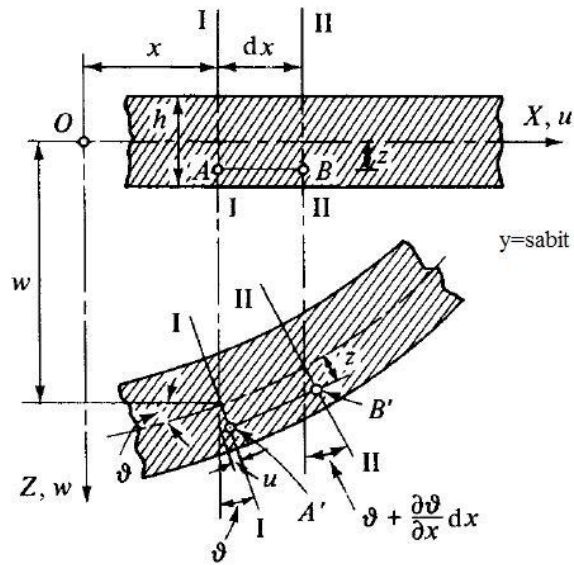
$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{xy} = \tau_{yx} \quad (2.14)$$



Şekil 2. 3 Plak elemanındaki gerilimler (Szilard, 2004)

Şekil 2.4'de gösterildiği gibi  $Y=\text{sabit}$  için bir kesit alınırsa yer değiştirme öncesindeki ve sonrasındaki kesit karşılaştırılır. (e) ve (f) varsayımları kullanılarak I-I ve II-II doğrularının dönme açısını aşağıdaki gibi ifade ederiz.

$$\vartheta = -\frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{ve} \quad \vartheta + \dots = \vartheta + \frac{\partial \vartheta}{\partial x} dx \quad (2.15)$$



Şekil 2. 4 Yer değiştirmeden önceki ve sonraki kesit (Szilard, 2004)

Orta düzleminden  $z$  uzaklığında konumlanmış  $\overline{AB}$  doğrusu deformasyondan sonra  $\overline{A'B'}$  haline gelir (Şekil 2.4). Gerinim ifadesi kullanılarak aşağıdaki sonuca ulaşılır.

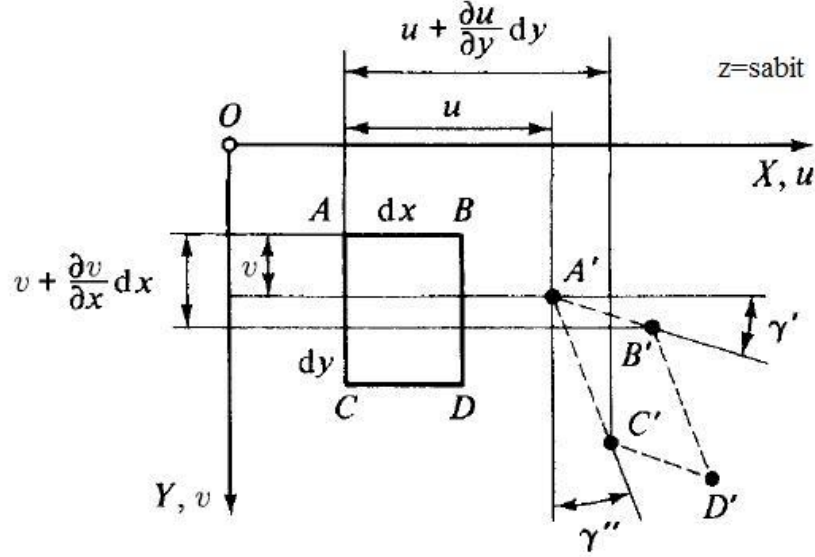
$$\varepsilon_x = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{\overline{A'B'} - \overline{AB}}{\overline{AB}} = \frac{[dx + z(\partial\vartheta/\partial x)dx] - dx}{dx} = z \frac{\partial\vartheta}{\partial x} \quad (2.16)$$

(2.15) denklemini yukarıdaki ifadenin yerine koyulursa aşağıdaki sonuca ulaşılır.

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2} \quad (2.17)$$

Aynı mantık  $Y$  yönündeki dik gerilmelere bağlı gerinim olan  $\varepsilon_y$ 'yi verir.

$$\varepsilon_y = -z \frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2} \quad (2.18)$$



Şekil 2. 5 Açısal Deformasyon (Szilard, 2004)

Açısal deformasyon  $\gamma_{xy} = \gamma' + \gamma''$  orta düzlemde sabit  $z$  uzaklığında bulunan  $ABCD$  dikdörtgen paralelkenarı (Şekil 2.5) ile yer değiştirmiş plak yüzeyindeki deforme olmuş  $A'B'C'D'$  nin kıyaslanması ile belirlenir. Şekil 2.5'deki iki küçük üçgenden aşağıdaki ifadeler çıkarılır.

$$\gamma' = \frac{\partial v}{\partial x} , \quad \gamma'' = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.19)$$

Şekil 2.4'den ise aşağıdakiler elde edilir.

$$u = z\vartheta = -z \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.20)$$

$$v = -z \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.21)$$

Sonuç olarak aşağıdaki ifadeye varılır.

$$\gamma_{xy} = \gamma' + \gamma'' = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.22)$$

Yer değiştirmiş orta düzlemin eğilme değişimleri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\kappa_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \kappa_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \chi = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.23)$$

Plaktaki çarpıklığı  $\chi$  temsil eder.

#### 2.1.4 Yer Değiştirmeye Bağlı Olarak İfade Edilen İç Kuvvetler

Szilard (1974), plağın ana diferansiyel denkleminde aşağıda verildiği gibi ulaşmıştır. Gerilim bileşenleri  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  (Şekil 2.3) plak elemanında temel çubuk teorisine benzer bir eğilme momenti oluşturur. Böylece dik gerilim bileşenlerinin bütünleşmesiyle, plak elemanı üzerinde etkili eğilme momentleri oluşur.

$$m_x = \int_{-(h/2)}^{+(h/2)} \sigma_x z dz, \quad m_y = \int_{-(h/2)}^{+(h/2)} \sigma_y z dz \quad (2.24)$$

Aynı şekilde kayma gerilimleriyle oluşan burulma momentleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$m_{xy} = \int_{-(h/2)}^{+(h/2)} \tau_{xy} z dz, \quad m_{yx} = \int_{-(h/2)}^{+(h/2)} \tau_{yx} z dz \quad (2.25)$$

Fakat  $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau$  olduğu için  $m_{xy} = m_{yx}$

(2.17) ve (2.18) denklemleri (2.12) ve (2.13) denklemlerinin yerine koyulursa, dik gerilimler  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  düşey yer değiştirme  $w$  açısından ifade edilir.

$$\sigma_x = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.26)$$

$$\sigma_y = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2.27)$$

(2.24) denklemlerinin integrasyonu yukarıdaki ifadelerin  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$ 'nin yerine geçmesinden sonra aşağıdaki ifadeleri verir.

$$m_x = -\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = D(\kappa_x + \nu \kappa_y) \quad (2.28)$$

$$m_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = D(\kappa_y + \nu \kappa_x) \quad (2.29)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.30)$$

Yukarıdaki ifade plağın eğilme rijitliğini gösterir. Aynı şekilde, burulma momentinin düşey yer değiştirme açısından ifadesi şu şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned} m_{xy} = m_{yx} &= \int_{-(h/2)}^{+(h/2)} \tau z dz = -2G \int_{-(h/2)}^{+(h/2)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} z^2 dz \\ &= -(1 - \nu)D \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = D(1 - \nu)\chi \end{aligned} \quad (2.31)$$

(2.28), (2.29) ve (2.31) denklemlerinin (2.9) denklemi yerine koyulması düşey yüklere maruz kalmış plağın ana diferansiyel denklemini verir.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p_z(x,y)}{D} \quad (2.32)$$

## 2.2 Sınır Şartları

Ana plak denkleminin (2.32) kesin çözümü herhangi bir plak probleminin sınır şartlarını ve diferansiyel denklemini karşılamalıdır. (2.32) denklemi dördüncü dereceden diferansiyel denklem olduğu için yer değiştirmeler ya da iç kuvvetler için her bir sınırdaki iki sınır şartı gereklidir. Plakların eğilme teorisinde üç iç kuvvet bileşeni düşünülmelidir. Bunlar eğilme momenti, burulma momenti ve kayma kuvvetidir. Sınır şartlarını oluşturmada kullanılan yer değiştirme bileşenleri düşey yer değiştirmeler ve eğimdir (Szilard, 1974).

### 2.2.1 Basit Mesnetlenmiş Kenar Sınır Şartı

Sınır boyunca yer değiştirme ve eğilme momenti sıfır olduğu için bu tip sınır koşulunun ifadesi yer değiştirme ve kuvvet içerir (Szilard, 1974).

$$(w)_x = 0, (w)_y = 0 \quad (2.33)$$

$$(m_x)_x = \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)_x = 0, (m_y)_y = \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_y = 0 \quad (2.34)$$

## 2.3 Çift Trigonometri Serisi İle Navier Çözümü

Szilard (1974), statik yük altındaki plağın düşey yer değiştirmesini veren ifadeyi aşağıdaki şekilde göstermiştir. 1820’ de Navier, Fransız Bilim Akademisine, basit mesnetli dikdörtgen plakların eğilmesinin, çift trigonometri serisi ile çözümünü üzerine bir çalışma sundu. Navier çözümü, diferansiyel denklemi cebirsel denkleme dönüştürdüğü ve böylece matematiksel işlemleri kolaylaştırdığı için diferansiyel denklemlerin zorlanmış çözümü olarak da

adlandırılır.

Navier çözümünün uygulandığı dikdörtgen plakların sınır şartları şu şekildedir.

$$(w)_{x=0, x=a} = 0, (w)_{y=0, y=b} = 0 \quad (2.35)$$

$$(m_x)_{x=0, x=a} = 0, (m_y)_{y=0, y=b} = 0 \quad (2.36)$$

Bu ifadeler bütün kenarlardaki basit mesnetli kenar şartlarını temsil eder.

Düşey yüklemeye maruz kalmış plâğın ana diferansiyel denkleminin çözümü Navier metoduyla aşağıdaki şekillerde elde edilir.

a) Yer değiştirmeler çift sinüs serisiyle ifade edilir.

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.37)$$

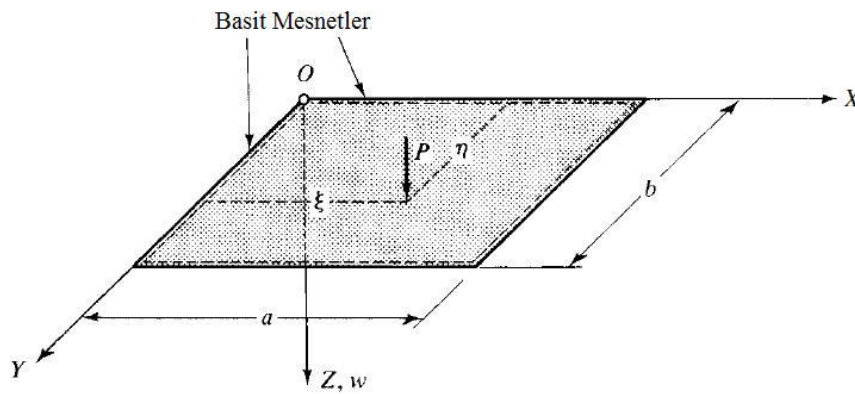
Bu ifade yukarıda verilen bütün sınır şartları sağlar. (2.37) denkleminde  $W_{mn}$  açılımının katsayıları bilinmiyor.

b) Düşey yüklemeye  $p_z$  de çift sinüs serisinde açılır.

$$p_z(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (2.38)$$

Çift Fourier serisinin yük açılımından  $P_{mn}$  katsayısı aşağıdaki ifadeden bulunur.

$$P_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b f(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy \quad (2.39)$$



Şekil 2. 6 Noktasal kuvvet ile yüklenmiş dikdörtgen plak (Szilard, 2004)

Şekil 2.6'daki gibi plak noktasal kuvvet ile yüklendiğinde  $P_{mn}$  aşağıdaki gibi olur.

$$P_{mn} = \frac{4P}{ab} \sin \frac{m\pi \xi}{a} \sin \frac{n\pi \eta}{b} \quad (2.40)$$

c) (2.37) ve (2.38) denklemleri (2.32) ana diferansiyel denkleminin yerine koyulursa bilinmeyen  $W_{mn}$ 'nin kolayca hesaplanabileceği bir cebirsel denklem elde edilir.

Böylece belirli m ve n değerleri için (2.32) denklemi aşağıdaki hale gelir.

$$W_{mn} \left[ \frac{m^4 \pi^4}{a^4} + \frac{2m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} + \frac{n^4 \pi^4}{b^4} \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = \frac{1}{D} P_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.41)$$

$$W_{mn} = \frac{P_{mn}}{D\pi^4 [(m^2/a^2) + (n^2/b^2)]^2} \quad (2.42)$$

Özetle, plak yer değiştirmesi için analitik bir çözüm aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$w(x, y) = \frac{1}{D\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_{mn}}{[(m^2/a^2) + (n^2/b^2)]^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.43)$$

## 2.4 Plakların Serbest Titreşimi

Szillard (1974), plakların serbest titreşimini inceleyerek doğal frekans ifadesini aşağıdaki gibi göstermiştir. Şekil 2.2'deki plak elemanının düşey yer değiştirmeye bağlı atalet kuvveti aşağıdaki gibidir.

$$p_z = -\bar{m} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\bar{m} \ddot{w} \quad (2.44)$$

Burada  $\bar{m}$  birim alandaki plak birim alanının kütlesini vermektedir. Plakların dinamik analizinde düşey yükler ve sebep oldukları düşey yer değiştirmeler zamana bağlıdır. (2.32) denkleminde atalet kuvvetini ekleyerek plak hareketinin zorlamalı, sönümsüz diferansiyel denklemi elde edilir.

$$D \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = p_z(x, y, t) - \bar{m} \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} \quad (2.45)$$

Serbest titreşimde dış kuvvet  $p_z$  sıfırdır ve (2.45) ifadesi aşağıdaki şeklini alır.

$$D \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \bar{m} \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.46)$$

Bu ifadede dönül atalet kuvvetleri ihmal edilmiştir ve bu ifadenin çözümü aşağıdaki şekilde ele alınacaktır.

$$w(x, y, t) = W(x, y) \cdot \theta(t) \quad (2.47)$$

$$W(x, y) = X(x) \cdot Y(y) \quad (2.48)$$

Burada  $W(x, y)$  şekil fonksiyonunu tanımlarken yer değiştirmelerin zamana bağlılığının  $\theta(t)$  harmonik olduğu varsayılır.

$$\theta(t) = \sin \omega t, \quad \dot{\theta}(t) = \cos \omega t \quad (2.49)$$

$w(x, y, t)$  çözümünü plağın sınır şartlarını ve  $t=0$ 'daki hareketin başlangıç şartlarını karşılamalıdır. Bu şartlar  $(w)_{t=0}$  ve  $(\dot{w})_{t=0}$ 'dır. (2.47) denklemi (2.46) yerine koyulursa ve  $x, y$  bağımsız değişkenlerine bağlı diferansiyelini göstermek için üssü, zamana bağlı diferansiyelini göstermek için noktalar konulursa serbest titreşimin ana diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi ortaya çıkar.

$$X''''(x).Y(y).\theta(t) + 2X''(x).Y''(y).\theta(t) + X(x).Y''''(y).\theta(t) + \frac{\bar{m}}{D}X(x).Y(y).\ddot{\theta}(t) = 0 \quad (2.50)$$

$$X''''Y + 2X''Y'' + XY'''' - \frac{\bar{m}w^2}{D}XY = 0 \quad (2.51)$$

Basit mesnetli sınır şartlar için şekil fonksiyonu çift Fourier serisi ile verilebilir.

$$W(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.52)$$

Burada  $m=1,2,3,\dots$  ve  $n=1,2,3,\dots$ 'dir. (2.52) denklemi (2.51)'da yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{m^4\pi^4}{a^4} + 2\frac{m^2\pi^2}{a^2} \cdot \frac{n^2\pi^2}{b^2} + \frac{n^4\pi^4}{b^4} - \frac{\bar{m}w^2}{D} = 0 \quad (2.53)$$

$$w_{mn} = \pi^2 \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\bar{m}}} \quad (2.54)$$

## 2.5 Dikdörtgen Plakların Zorlanmış Düşey Titreşimi

Szillard (1974), dinamik yük altındaki plağın düşey yer değiştirmesini veren ifadeyi aşağıdaki şekilde göstermiştir. Yapıların zorlanmış titreşiminde, plakların zamana bağlı  $P(t)$  kuvvetine karşı dinamik cevapları verilir. Plağın  $p_z(x, y, t)$  dış kuvvetine karşı dinamik cevabını belirlerken yer değiştirmeler için  $w(x, y, t)$ , hızlar, ivmeler ve gerilmeler gibi diğer büyüklüklerin elde edilebileceği bir ifade gerekir.

Plakların klasik metotlarla zorlanmış titreşim analizi sınır değer problemlerinin çözümünü içerir. Basit mesnetli plakta zamanla harmonik olarak değişen gelişigüzel (uzayda) düşey yük aşağıdaki gibidir.

$$p_z(x, y, t) = P(x, y)\theta(t) = P(x, y)\sin pt \quad (2.55)$$

Bu basit harmonik tahrik ile beraber hareketin ana diferansiyel denklemi (2.45) denklemdir. Çözüm iki kısımda aranır.

$$w(x, y, t) = w_H(x, y, t) + w_P(x, y, t) \quad (2.56)$$

Burada  $w_H$  hareket denkleminin (2.46) homojen formunun çözümünü gösterirken,  $w_P$  (2.45) denkleminin kısmi çözümüdür. Homojen çözüm plağın doğal frekansındaki serbest titreşimleri ile ilişkili olduğu için kısmi çözüm, tahrik kuvveti frekansındaki ( $p$ ) kararlı durum salınımına tekabül eder. Serbest titreşim tam sönümlü kabul edildiğinden yalnızca harmonik tahrik düşünülür. Kuvvet fonksiyonunun zamana bağlı olmayan kısmı çift trigonometrik serisi ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.57)$$

(2.53) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$p_z(x, y, t) = \sin pt \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.58)$$

Navier metoduyla uyumlu olarak kısmi çözüm aşağıdaki ifadede aranır.

$$w_P(x, y, t) = \sin pt \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.59)$$

(2.57) ve (2.53) denklemleri hareketin ana diferansiyel denklemine (2.45) yazıldığında belirli  $m, n$  değerleri kullanılarak aşağıdaki ifadeye varılır.

$$W_{mn} = \left[ D\pi^4 \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 - \bar{m}p^2 \right] = P_{mn} \quad (2.60)$$

Bu denklemin sol tarafındaki ilk terim, serbest titreşim (2.54) denkleminde aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$W_{mn} = \frac{P_{mn}}{\bar{m}(w_{mn}^2 - p^2)} \quad (2.61)$$

Tahrikin zamana bağlı değişiklikleri küçük ise  $p$ ,  $w_{mn}$  ile karşılaştırıldığında küçük olur ve yer değiştirmeler statik yüklemekten elde edilenlere tekabül eder. Statik durum için (2.61) denklemi aşağıdaki hale gelir.

$$W'_{mn} = \frac{P_{mn}}{\bar{m}w_{mn}^2} \quad (2.62)$$

Serbest ve zorlanmış titreşimlerin eşzamanlı hareketi düşünüldüğünde (2.47) ve (2.59) denklemlerinin süperpozisyonu bu duruma tekabül eder. Serbest titreşen basit mesnetli plağın düşey yer değiştirmeleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{W}_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin (w_{mn}t - \alpha) \quad (2.63)$$

Burada  $\alpha$  faz açısını temsil eder ve başlangıç şartından elde edilebilir. Başlangıç şartı aşağıdaki gibiyse  $\alpha = 0$ 'dır.

$$w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial t} = 0, \quad t=0 \quad (2.64)$$

Eşzamanlı serbest ve zorlanmış titreşimlerin birleşik çözümü aşağıdaki gibi yazılır.

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{W}_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin(w_{mn}t - \alpha) \\ + \sin pt \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.65)$$

İkinci başlangıç şartından ( $t = 0$ 'da  $\dot{w} = 0$ ) aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\bar{W}_{mn} = -\frac{p}{w_{mn}} W_{mn} \quad (2.66)$$

Sonuç olarak (2.65) denklemini aşağıdaki hale gelir.

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \sin pt - \frac{p}{w_{mn}} \sin w_{mn}t \right) W_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.67)$$

Burada  $W_{mn}$  (2.61),  $w_{mn}$  (2.54),  $P_{mn}$  ise noktasal düşey yükleme durumunda (2.40) ve D (2.30) denklemlerinden bulunurlar.

### 3. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER

#### 3.1 Piezoelektrik Malzemelerin Tarihçesi

Günümüzde piezoelektrik ya da piezoelektrik olgu olarak adlandırılan özellik, ilk olarak yüzyıllar öncesinde tourmaline kristali olarak bilinen farklı renkleri bulunan şeffaf taşlarda fark edilmiştir. Bu özelliğin fark edilmesinden sonra birçok bilim adamının bu konuda çalışmalar yapmış olmasına karşın, bir malzemede piezoelektrik etki ilk olarak 1880'li yıllarda Pierre ve Jacques Curie tarafından gösterilmiştir. Pierre ve Jacques Curie, uygulanan basınçla orantılı bir voltaj üreten sıkıştırılmış bazı kristal malzemelerin bir yüzünden diğer yüzüne bir voltaj uygulayarak malzemenin şeklinde bir değişiklik oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Piezoelektriklik olarak adlandırılan bu karakteristik özellik quartz ve tourmaline gibi kristalize malzemelerde görülmektedir (Lawver, 2001; Bayar, 2007).

Piezoelektrik malzemelerden olan piezoelektrik quartz, I. Dünya Savaşı esnasında ultrasonik dalgalar oluşturmak amacı ile sonar olarak ve algılayıcılar olarak kullanılmıştır. Böylece ilk olarak piezoelektrik malzemeler laboratuvar ortamının dışında bir uygulamada kullanılmışlardır (Piefort, 2001; Bayar, 2007).

1920'li yıllara gelindiğinde quartz malzemeler osilatörün rezonans frekansının kontrolü için kullanılmaya başlandı. Bu gelişmeleri takip eden süreçte piezoelektrik malzemelerin mikrofonlar, ivmeölçerler, ultrasonik dönüştürücüler, eğiciler gibi birçok uygulama alanları olmuştur. Ancak yapılan çalışmalar, malzemelerin aletlerdeki performanslarının sınırlı olmasını ortadan kaldıracak düzeye ulaşmamışlardır. Elektronik alanında gelişmelerin başlaması ile piezoelektrik malzemelerde de bir gelişme süreci başlamış oldu. İlk olarak ferroelektrik seramikler (piezoelektrik seramikler / piezoseramikler) bulundu ve bu buluş piezoelektrik malzemelerin kullanım alanlarını oldukça genişletti (Piefort, 2001; Bayar, 2007).

Piezoelektrik malzemelerle, eyleyici ve algılayıcı maksadı ile kullanılarak, ses ve titreşim kontrolü yapılabileceği 1980'li yıllarda kanıtlanmıştır ve bu alanda araştırmalar günümüzde de devam etmektedir. Ülkemizde piezoelektrik malzemeler üzerine ilk çalışmalar sayın Prof. Dr. M. Cengiz Dökmeci tarafından yapılmıştır. Bu konudaki ilk çalışmaları piezoelektrik malzemenin üretilen çubukların titreşim analizi üzerine yapmıştır (Dökmeci, 1974; Bayar, 2007).

### 3.2 Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri

Piezoelektrik malzemelerin büyük çoğunluğu kristalli katılardır. Bunlar tek kristalli ve çok kristalli katılar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Tek kristalli katılar doğal olarak elde edilebildiği gibi yapay yollarla da elde edilebilir. Çok kristalli katı yapılar ise piezoelektrik özelliği sonradan kazandırılan malzemelerdir (Piefort, 2001; Bayar, 2007).

Bir malzemede piezoelektrik olgunun meydana gelebilmesi için; malzemenin kristal kafes yapısında merkezi simetrik özellik göstermemesi gerekmektedir. Bunun anlamı kafes yapıyı oluşturan atomik yapılardan, bir eksen boyunca olan atomik yapının diğer eksenleri oluşturan atomik yapıdan farklı olmasıdır. Sonuç olarak, piezoelektrik olgu, kristal kafes yapıdaki iyonların yer değiştirmeleri sonucu oluşur. Kristal kafesteki iyonların yer değiştirmelerine ise yük çiftlerinin polarizasyonu neden olur ve bunun sonucunda da mekanik deformasyon oluşur (Gandhi ve Thompson, 1992; Bayar, 2007).

Kristal simetriye sahip olmayan malzemelerde gözlenen ve gerilme veya deformasyonun elektrik alanla olan ilişkisini anlatan piezoelektrik özellik; toplam 32 adet kristal yapının sadece 21 tanesinde gözlenir. Bu malzemeler; sülfatları, fosfatları, tartaratları, oksitleri ve çeşitli şeker yapıları içerebilir. Bunların 10 tanesi birim kafes yapılarında dipole sahiptirler ve ısı uzamalar veya büzölmeler dahi yüzeylerinde elektrik yükü oluşması için yeterlidir. Bu malzemeler piroelektrik malzemeler olarak adlandırılırlar. Her piroelektrik malzeme piezoelektriktir fakat her piezoelektrik malzeme piroelektrik değildir (Tressler vd., 1995; Aydos, 2009).

Doğrudan ve dolaylı olarak iki gruba ayrılan piezoelektrik etki bir malzemede mekaniksel ve elektriksel davranışları arasındaki etkileşimleri göstermektedir. Doğrudan piezoelektrik etki; piezoelektrik özelliğe sahip olan malzemenin uygulanan kuvvetle orantılı olarak küçük fakat ölçülebilir bir elektrik yükü oluşturma kabiliyetinden meydana gelmektedir. Dolaylı piezoelektrik etki; uygulanan elektrik alanın piezoelektrik malzemede deformasyona yol açmasıdır. Bu etki genelde eyleyici tasarımlarında uygulanmaktadır (Piefort, 2001; Bayar, 2007).

Doğal olarak elde edilemeyen, genellikle ticari amaçlarla üretilmek istenen piezoelektrik malzemelerin üretimi; istenen yönde piezoelektrik özellik yaratmak için malzeme yüksek şiddette elektrik alana maruz bırakılırken malzemeye yüksek sıcaklık uygulanmasını gerektirir. Bu işleme kutuplama adı verilmektedir. Ancak kutuplama işlemi bittiğinde piezoelektrik malzeme, piezoelektrik özellik göstermez. Bu duruma neden olan ise

malzemedeki dipollerin gelişi güzel dağılmasıdır. Kutuplama eksenini doğrultusunda bir voltaj uygulanmasının üzerine dipoller tekrar yönlendirilirler. Dipollerin bu yeni yönelimleri malzemenin sahip olduğu piezoelektrik özelliği göstererek, şeklinde bir değişiklik oluşmasına neden olur (Gandhi ve Thompson, 1992; Bayar, 2007).

Elektrik alan içerisinde bulunmayan katı maddelerin yapısında, pozitif ve negatif yüklerin sayıları birbirlerine eşittir. Başka bir deyişle elektriksel olarak nötr durum yani denge hali söz konusudur. Teorik olarak bu dengenin, yapıda boyutsal bir şekil değişimi ile bozulması ve malzeme yüzeylerinde elektriksel yüklerin oluşması beklenir. Kristal simetri, bu elektriksel yüklerin oluşumunu olanaklı kılan en önemli faktördür. Piezoelektrik malzemelerin mekanik etkiye yanıtı, kristal yapılarındaki atomların dizilişi ile belirlenen kristal yönelme ve uygulanan mekanik gerilme ile oluşan uzamanın yönü arasındaki açılara bağlıdır. Yani, mekanik uzamalar tensörel olarak ifade edilir ve aksi yönlerde değer olarak farklılık göstermezler. Piezoelektrik malzemelerde oluşan elektriksel kutuplama ve elektriksel alan ise vektörel büyüklüklerdir ve değerleri yöne bağlıdır ve malzemenin kristal yapısı tarafından belirlenir, ayrıca malzemenin karakteristik bir özelliğidir. Dolayısıyla mekanik bir gerilmenin malzemedeki oluşturacağı elektriksel kutuplama, malzemeye bağlı olacaktır ve her piezoelektrik malzeme için kristal yapısına göre karakteristik bir değer olacaktır (Tressler vd., 1995; Aydos, 2009).

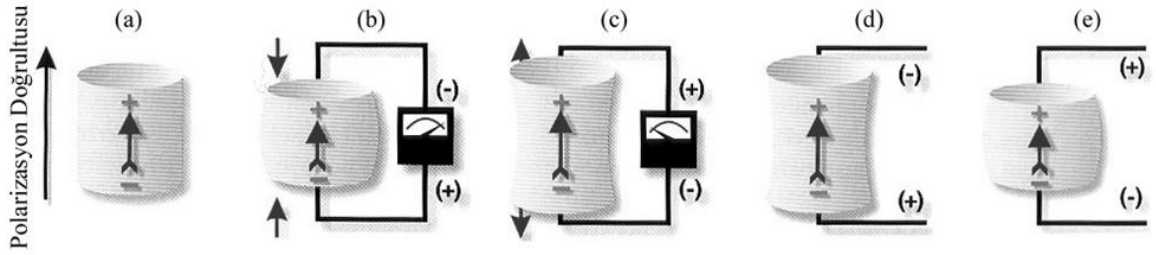
İzotropik malzemelerde, elektrik alanının neden olduğu mekanik gerilme veya deformasyon ters yönlerde birbirine eşit olurken, izotropik olmayan malzemelerde, farklı bir ilişki gözlenecektir. Bu özellik sadece yüksek dielektrik sabitli malzemelerde yani ferroelektrik malzemelerde gözlenir (Tressler vd., 1995; Aydos, 2009).

Ferroelektrik malzemeler, kristal yapısı yüksek elektrik alan altında ani olarak kutuplanabilme yeteneğine sahip olan malzemeler olarak tanımlanabilirler. Ferroelektrik malzemeler, piezoelektrik malzemelerin bir türüdür ve piezoelektrik malzemelerde gözlenen kristal yapının yüksek elektrik alan altında kutuplanabilmesi ferroelektrik özellik olarak adlandırılır (Aydos, 2009).

Çok kristalli ferroelektrik seramikler, başlangıçta toplam elastik enerjileri en az olacak şekilde her bir tane içerisinde dipolleri rastgele doğrultularda polarizasyona sahip bölgeler (domainler) içerirler. Bu rastgele dizilişten dolayı ferroelektrik malzemeler piezoelektrik özellik göstermezler. Ancak, uygun sıcaklıklarda, bir eşik değerden daha büyük bir statik elektrik alanına maruz kaldıklarında başka bir deyişle kutuplandıklarında piezoelektrik özellik

kazanabilirler (APC International, 2006; Aydos, 2009).

Polarizasyon da diyebileceğimiz kutuplama işlemi sırasında malzemenin yüzeylerine yerleştirilen elektrotlar yardımıyla malzeme üzerine DC gerilim uygulanarak yüksek bir elektrik alan ( $5\text{kV/cm}$ ) oluşturulur ve dipollerin bu elektrik alana paralel olarak yönelmesi sağlanır. Polarizasyon esnasında bölgeler uygulanan elektrik alan doğrultusunda gerek ters çevirme ile gerekse belirli bir açı kazanma yoluyla yeniden dizilerek anizotropik duruma gelirler. Polarizasyon sonrasında çok fazla gerilen bölgelerin bir kısmı yeniden eski durumlarına dönebilirler, fakat büyük bir çoğunluğunda kutuplama kalıcıdır. Dolayısıyla polarizasyon öncesi malzeme izotropiktir ve bu durumda piezoelektrik davranış göstermez. Polarizasyon sonunda ise uygulanan elektrik alanı ile dipoller bir eksene doğru yönelirler ve polikristallerden oluşan tüm yapıda net bir elektriksel dipol momentini oluşturur. Bu yapıda aynı yöne yönelmiş izole dipollerin oluşturduğu bölgeler vardır (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Aydos, 2009).



Şekil 3. 1 Piezoelektrik elemanın davranışı (APC International, 2006; Aydos, 2009)

Herhangi bir piezoelektrik seramik eleman üzerine uygulanan mekanik basma veya çekme gerilmesi, voltaj üreterek elemanın dipol momentini bozar, polarizasyon doğrultusunda basma veya polarizasyona dik yönde çekme, polarizasyon voltajıyla aynı polariteye sahip bir voltaj üretir. Polarizasyon yönünde çekme veya polarizasyon doğrultusuna dik yönde basma uygulandığında ise piezoelektrik seramik eleman, polarizasyon voltajına zıt polariteye sahip bir voltaj üretir (Şekil 3.1). Seramik elemanın bu şekildeki basma ve çekme mekanik enerjilerini elektrik enerjisine çevirmesine üreteç davranışı denir. Bu davranış; ateşleme sistemlerinde, kuru pillerde, sensör cihazlarda vb. ürünlerde kullanılır (APC International, 2006; Aydos, 2009).

Basınç kuvveti ve piezoelektrik seramik eleman tarafından bu basınç kuvvetine bağlı olarak elde edilen voltaj lineer orantılıdır. Bu ilişki tersinirdir, uygulanan voltaj ve elde edilen birim uzamalar için de geçerlidir (Kaçar, 2009).

Seramik elemana polarizasyon voltajı ile aynı polariteye sahip bir voltaj, polarizasyon doğrultusunda uygulandığı takdirde, seramik eleman uzayacak ve çapı küçülecektir. Polarizasyon voltajı ile ters polariteye sahip bir voltaj, polarizasyon doğrultusunda uygulandığında ise, seramik elemanın boyu kısılacak ve çaptan genişleyecektir (APC International, 2006; Aydos, 2009).

Seramik eleman üzerine AC voltajı uygulanırsa, eleman uygulanan voltajın frekansında sinüzoidal bir şekilde sırayla uzayıp kısılacaktır. Seramik elemanın bu şekilde elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmesine motor davranışı denir ve piezoelektrik motorlarda, ses ve ultrasonik titreşim üreten cihazlarda vb. birçok üründe kullanılır. Uygulanan gerilmeler ve oluşan voltaj malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu durum uygulanan voltaj ve elde edilen gerinim değerleri için de geçerlidir (APC International, 2006; Aydos, 2009).

Anizotropik özellik, piezoelektrik malzemelerin temel karakteristiğini oluşturmaktadır. Bu nedenle; piezoelektrik malzemelerin mekaniksel ve elektriksel davranışları, malzemeye dışarıdan uygulanan elektrik alanın uygulama eksenine dayanmaktadır. Buna ek olarak; malzemenin elektrik yanıtı, dışarıdan uygulanan mekanik yükün uygulama doğrultusuna dayanmaktadır. Bu nedenle tasarım yöntemlerinde piezoelektrik malzemenin tasarımdaki konumu, anizotropik özelliklerden dolayı çok dikkatli yapılmalıdır (Wilson, 2002; Bayar, 2007).

### **3.3 Piezoelektrik Özelliği Etkileyen Faktörler**

Her piezoelektrik malzeme, diğer malzemeler gibi, özelliklerinin belirlediği sınırlar dâhilinde belirli çalışma koşulları altında en iyi performansı sergiler. Bir piezoelektrik malzemeyi bu sınırların üzerinde çalışmaya zorlamak veya fark etmeden bu sınırları aşmak, piezoelektrik malzemenin beklenen performansı vermemesi veya fonksiyonlarını tamamen yitirmesi ile sonuçlanabilir. Bu durum kısmen veya tamamen piezoelektrik malzemenin polarizasyonun ortadan kalkmasına ve buna bağlı olarak zaman içerisinde piezoelektrik malzeme özelliklerini belirleyen piezoelektrik sabitlerde kayıp oluşmasına sebep olabilmektedir. Piezoelektrik seramik bir elemanın birçok özelliği polarizasyondan sonra zamanla logaritmik bir şekilde azalır (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics, 2007; Aydos, 2009).

### 3.3.1 Yaşlanma

Yaşlanma, zaman içerisinde piezoelektrik malzeme özelliklerinde yaşanan kayıp veya azalma olarak tanımlanabilir. Yaşlanma, normal şartlar altında kullanılan bir piezoelektrik malzemede dahi beklenen bir durumdur. Yaşlanmanın gerçek hızı, seramik elemanın bileşimine ve elemanı hazırlamak için seçilen imalat yöntemine sıkı sıkıya bağlıdır. Elemanı, mekanik, elektrik ve termal limitlerin üstünde kullanmak seramik elemanın yaşlanmasına katkıda bulunacaktır (Morgan Electro Ceramics, 2007; Aydos, 2009).

### 3.3.2 Mekanik Sınırlamalar

Bir piezoelektrik malzemede, mekanik gerilme seviyeleri bölgelerin yönlendirmelerini bozmaya yetecek büyüklükte ise, bölgelerin sıralanışını yok edebilir. Bu, polarizasyon ile kazandırılan piezoelektrik özelliğin kısmen veya tamamen ortadan kalkması anlamına gelmektedir. Piezoelektrik malzemenin mekanik gerilmeye dayanma sınırı malzemedeki malzemeye değişir (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics, 2007; Aydos, 2009).

### 3.3.3 Elektriksel Sınırlamalar

Polarize edilmiş piezoelektrik bir malzeme, polarizasyondan sonra polarizasyon doğrultusuna ters yönde güçlü bir elektrik alanına maruz kalırsa piezoelektrik malzeme depolarize olacaktır. Depolarizasyonun derecesi; malzemenin maruz kaldığı, ters elektrik alanının uygulama süresine, sıcaklığa ve diğer faktörlere bağlıdır. Fakat 200-500 V/mm veya daha büyük elektrik alanları, önemli bir depolarizasyona neden olur. AC akımın depolarizasyon etkisi ise döngünün, polarizasyon alanına zıt olduğu her bir yarım çevrimde gerçekleşir (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics, 2007; Aydos, 2009).

### 3.3.4 Isısal Sınırlamalar

Çalışma sıcaklığı arttıkça, piezoelektrik özellikler artan sıcaklığa bağlı olarak azalma gösterir. Eğer bir piezoelektrik malzeme, piezoelektrik malzemeler için kritik sıcaklık değeri olan Küri sıcaklığına ısıtılacak olursa, malzeme içindeki bölgeler yok olacak ve malzeme depolarize olacaktır. Artık bu noktadan sonra piezoelektrik malzeme oda sıcaklığına veya uygun çalımsa sıcaklığına getirilse bile piezoelektrik özellik göstermeyecektir. Dolayısıyla piezoelektrik malzemelerin çalışma sıcaklıkları Küri sıcaklıklarının altında olmak zorundadır. Piezoelektrik

seramik bir eleman için tavsiye edilen en üst kullanma sıcaklığı, Kiri sıcaklığının yarısıdır. Tavsiye edilen sıcaklık aralığındaki kullanımlarda, domenlerin dizilimindeki değişimler geri dönüşümlüdür. Ayrıca ani sıcaklık dalgalanmaları, piezoelektrik seramik bir elemanı depolarize edebilecek nispeten yüksek voltajlar üretebilirler (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics, 2007; Aydos, 2009).

Sonuç olarak, piezoelektrik bir malzemenin piezo özelliklerini ifade eden değerler belli süreler için geçerlidirler. Bundan dolayı piezoelektrik malzeme seçimi, çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Malzemenin çalışma koşulları altında bozulma veya değişime uğrama süresi ne kadar uzunsa malzeme o kadar karardır denilebilir (Aydos, 2009).

### **3.3.5 Frekansın Etkisi**

Bir piezoelektrik eleman AC elektrik alanına maruz kaldığında, elemanın boyutları elektrik alanının frekansına bağlı olarak titreşim şeklinde sürekli bir artma/azalma gösterir. Seramik elemanın elektrik alanına verdiği tepki olan titreşim, yani elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmüş hali, seramik malzemenin bileşimi, şekli ve hacmi tarafından belirlenir. Seramik elemanın en kolay şekilde titreştiği ve en etkin şekilde elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürdüğü frekans, rezonans frekansı olarak adlandırılır (APC International, 2006; Aydos, 2009).

### **3.4 Piezoelektrik Malzeme Çeşitleri**

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 kullanılacak 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 (Gözen, 2002; Sevgi, 2009).

Yaygın olarak kullanılan piezoelektrik malzemelerin başında piezoseramikler ve piezopolimerler gelmektedir. Kurşun zirkonat titanat (PZT) en iyi bilinen piezoseramik ve PVDF (Poliviniliden Florid) en iyi bilinen piezopolimer malzemelerdir. Her iki sınıfa giren

piezoelektrik malzemelerin çok kapsamlı özelliklerinden dolayı çok çeşitli uygulama alanları vardır. (Bayar, 2007).

Bu iki piezoelektrik malzeme sınıfının farklı özellikleri farklı uygulama alanlarında üstünlük göstermelerine neden olmaktadır. Örneğin; piezoseramik elemanların yüksek rijitliği, elektrik enerjisini verimli bir şekilde mekanik enerjiye dönüştürmesini sağlamaktadır. Bu dönüşüm de piezoseramik malzemeden üretilmiş parçaya iyi çalışma kabiliyeti vermektedir. (Gandhi ve Thompson, 1992; Bayar, 2007).

### 3.4.1 Doğal Piezoelektrik Malzemeler (Kristaller)

Uygulama açısından piezoelektrik etki ilk olarak Langevin tarafından sonar transdüserlerde kullanılmıştır. Langevin, bu transdüserlerde piezoelektrik malzeme olarak kuvarstan faydalanmıştır. Kuvarsın sahip olduğu özelliklerden dolayı; düşük iç sürtünme, yüksek mekanik mukavemet ve kimyasal dayanımı; hala piezoelektrik malzeme olarak geniş bir kullanım alanı vardır. Kuvars kristalleri genelde frekans kontrollerinde ve elektrik filtre devrelerinde kullanılmaktadırlar (Üzgür, 2006).

Doğal piezoelektrik malzemelerden, en verimli piezoelektrik davranışı elde etmek için mevcut kristalleri belirli kristalografik doğrultuları göz önüne alarak kesmek ve şekillendirmek gerekmektedir. Birçok doğal piezoseramik arasından en çok kullanılanı, kuvarstır. Kuvars kristali günümüzde az da olsa hızlandırıcılarda kullanılmaktadır. Fakat kuvarsın elektromekanik çift katsayısının düşük olması, kuvarsın elektromekanik enerji dönüşümünün esas olduğu uygulamalarda tercih edilmemesine neden olmaktadır. Doğal kristaller, çok kararlı olduklarından sensör uygulamaları için en uygun piezoelektrik malzemeler olarak kabul edilirler. Özelliklerinin çok kararlı olması, sistemde kullanılan sensör için daha uzun kullanım ömrü sunar. Fakat en verimli piezoelektrik davranışı elde etmek için kristal doğrultuları göz önüne alma zorunluluğu en büyük dezavantajlarıdır (Tressler vd., 1995; Aydos, 2009).

### 3.4.2 Piezoelektrik Seramik Malzemeler

1943'de, birbirlerinden bağımsız çalışan Amerikan, Japon ve Rus bilim adamları baryum titanatın ( $BaTiO_3$ ) çok yüksek dielektrik katsayısına sahip olduğunu buldular. 1946'da Von Hippel  $BaTiO_3$  seramiğinin ferroelektrik özelliğe sahip olduğunu keşfetti. Robert ise ferroelektrik malzemelerin, yüksek DC elektrik alanı altında kutuplandıktan sonra

piezoelektrik etkiye sahip olduklarını buldu. Bu keşif çok kristalli piezoelektrik seramiklerinin doğuşu olarak kabul edilir. Sonotone Corporation 1947 yılında ilk  $BaTiO_3$  cihazı olan gramofon pikaplarını yaptı. Daha sonra 1951'de baryum titanat seramikleri balık bulucularda kullanıldı ve su altında çok iyi performans verdiler. (Buchanan, 1991; Üzgür, 2006).

Piezoelektrik seramik malzemeler, doğal piezoelektrik malzemelere göre fiziksel, kimyasal, mekanik ve piezoelektrik özellikleri açısından daha kullanışlı oldukları gibi, kimyasal olarak da daha kararlıdır. Ayrıca neme ve atmosferik koşullara karşı da daha dayanıklıdır. Özel uygulamalara kolaylıkla adapte edilebilirler, karmaşık geometri veya büyük hacim gerektiren uygulamalar için kolay ve ucuz üretim olanağı sağlarlar (Tressler vd., 1995; Aydos, 2009).

Piezoelektrik seramik bir malzeme hazırlamak için, ince toz halindeki başlangıç metal oksit tozları belirli oranlarda karıştırıldıktan sonra homojen bir toz karışımı elde etmek için ısıtılırlar. Elde edilen toza organik bir bağlayıcı eklenerek disk, tel, bar, levha, vb. şekillerde yapısal elemanlara dönüştürülebileceği gibi toz olarak da saklanabilirler. Çeşitli formlar verilmiş seramik elemanlar belirli süreler dâhilinde pişirme programları uygulanarak fırınlanırlar. Bu fırınlama işlemi sinterleme olarak adlandırılır ve başlıca amacı toz parçacıklarını birbirine bağlayan yoğun kristal yapıya dönüştürmektir. Bu işlemlerden sonra elemanlar soğumaya bırakılır ve gerekirse istenilen ölçülerde kesilir veya çapakları alınır (APC International, 2006; Aydos, 2009).

1954 yılında, Jaffe kurşun titanat ( $PbTiO_3$ ) ve kurşun zirkonattan ( $PbZrO_3$ ) oluşan katı çözeltilinin morfortropik faz sınırında (MPB) yüksek piezoelektrik katsayılarına sahip olduğunu keşfetti. Bu sınır hemen hemen sıcaklıktan bağımsız olduğu için, faz sınırında çok yüksek piezoelektrik etki elde etmek mümkündür. Böylece PZT ( $PbZrTiO_3$ ) seramikleri, piezoelektrik özellikleri baryumtitanatın yaklaşık iki katı olduğundan ve  $-50^{\circ}C$ 'den  $200^{\circ}C$ 'ye kadar faz dönüşümüne uğramadıkları için baryum titanatların yerini alıp baskın piezoelektrik malzeme oldular (Jaffe vd., 1971; Üzgür, 2006).

PZT (Kurşun Zirkonat Titanat), en iyi bilinen piezoseramik malzemedir. Piezoseramikler genel olarak gevrek malzemeler olmalarından dolayı, bu piezoelektrik malzemedeki küçük yüzey alanlarıyla orantılı küçük, basit şekilli parçalar üretilmektedir. PZT, %0,1'lik geri alınabilen birim uzamaya sahiptir. Genellikle eyleyicilerin yapılarında kullanılırlar ve geniş frekans alanına sahiptirler (Piefort, 2001; Bayar, 2007).

### 3.4.3 Polimer Piezoelektrikler

Piezoelektrik polimerlerin büyük çoğunluğu florakarbon esaslı polimerlerden oluşur. Bu polimerler arasında PVDF, üzerinde en çok çalışma yürütülen piezoelektrik polimerdir. PVDF, yüksek oranda kristal bir yapıya sahiptir, yapıdaki kristallik %50 ile %70 arasında değişmektedir. Piezoseramiklerle karşılaştırdığımız zaman PVDF'lerin bazı avantajları söz konusudur. Bunların başında iyi mekanik dayanım, düşük akustik empedans, imalat kolaylığı ve mükemmel esneklik gelmektedir. En büyük dezavantajları ise polarizasyonlarının zor olmasıdır. PVDF'yi polarize etmek için 1.2MV/cm gibi çok yüksek elektrik alanları oluşturmak gerekmektedir (Aydos, 2009).

Piezoelektrik etki polimerin moleküler kutup dipollerinin aynı doğrultuda yönlendirilmesi ile elde edilir. Florid karbona nazaran daha fazla elektronegatif olduğundan dolayı PVDF piezoelektrik malzemeye dönüştürülebilmektedir. Florid atomları karbon atomlarının elektronlarını çeker. Böylece  $CF_2$  grupları zincir içinde kutupsal olurlar ve böylece elektrik alana maruz bırakıldıklarında sıralanırlar. Buna karşit olarak, piezopolimer şekil değiştirdiğinde makroskopik dipoller oluşacaktır. PVDF üzerine çalışmalar, ilk olarak 1960'lı yılların sonlarına doğru Kawai tarafından yapılmıştır. En iyi bilinen bu piezopolimer malzeme, piezoseramik malzemelere karşılık esnek plastik malzemelerdir. İnce plakalar olarak çeşitli şekillerde ve boyutlarda üretilmektedir. PZT gibi algılayıcı üretiminde yaygın olarak kullanılan piezoelektrik malzemelerdir (Piefort, 2001; Bayar, 2007).

### 3.4.4 Kompozit Piezoelektrikler

Piezoelektrik kompozitlerin sensörler imalinde kullanılmasının temel sebebi; kutuplanmış PZT'nin düşük hidrostatik duyarlılığıdır. Kompozit sensörlerle bu performansın artırılması hedeflenir. Piezoelektrik kompozitler, temel olarak seramiğin polimer esaslı bir fazla karıştırılmasıyla elde edilirler. Kompozitler her bileşenin en zayıf noktasını iyileştirerek, her bileşenden en iyi şekilde faydalanmamızı sağlar. Bu duruma en iyi örnek ise kompozit hidrafonlardır. Kompozit hidrafonların çoğu, biri piezoseramik, diğeri polimer iki fazdan oluşur (Aydos, 2009).

Piezoelektrik kompozitlerde başarılı bir polarizasyon ve buna bağlı olarak iyi piezoelektrik özellikler sağlamak için parçacıklar ile matrisin bağı kuvvetli olmalıdır. Ayrıca kuvvetli bir bağ oluştururken, piezoelektrik seramik tozları homojen bir şekilde matriste dağıtmak, kompozitin çok daha verimli bir piezo-performans sergilemesine yardımcı olmaktadır.

Yüksek ısı direnç katsayısına sahip polimer kullanmak, kompozitin yüksek sıcaklıklar altında kutuplanabilmesini olanaklı hale getirmektedir (Tressler vd., 1995; Aydos, 2009).

### 3.5 Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları

Piezoelektrik malzemeler, akıllı yapılar olarak en çok eyleyici ve algılayıcı üretiminde kullanılmaktadırlar. Buna ek olarak başta titreşim kontrolü olmak üzere eyleyicilerin ve algılayıcıların yapısında çok sık olarak kullanılmaktadır. Titreşim kontrolünde olduğu gibi kontrol amaçlı uygulamalarda da kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda kontrol edilmek istenen şey kullanıldığı parçada oluşan yer değiştirme miktarı ya da ses-gürültü kontrolü olabilir (Bayar, 2007).

FA-18 savaş uçağının kanat, gövde ve stabilizör kontrolü ile F-15 uçağının panel kontrolünde kullanılan piezoelektrik dönüştürücüler havacılıkta piezoelektrik malzeme kullanımının yaygınlığına dair somut örneklerdir. Denizaltılarda, uydu yapılarında ve helikopter rotorlarında da çeşitli amaçlarla piezoelektrik dönüştürücüler kullanılmaktadır (Sevgi, 2009).

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, sönümlenme ve gerilme dağılımı aktif kontrolünde etkili olduğu görülmektedir (Sevgi, 2009).

Günlük hayatta ise piezoelektrik malzemeler; çeşitli elektronik donanımlarda, çakmaktarda, masa ve kol saatlerinde, akustik ve hassas ölçüm yapan mikroskoplarda, yüksek frekansta ses üretimi sağlayan ultrasonik aygıtlarda, yarıiletken 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. Çakmaktarda 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 iğnelere 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. 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 (Sevgi, 2009).

### **3.5.1 Algılayıcılar (Sensörler)**

Algılayıcılar, ivmelenme veya basınç gibi fiziksel bir parametreyi elektrik sinyaline çevirir. Bazı algılayıcılarda fiziksel parametre direk piezoelektrik elemanın üzerine etkir ve elektrik sinyalini oluşturur. Bazen de algılayıcılarda mevcut olan piezoelektrik elemana akustik sinyallerin etkimesi sonucu oluşan titreşimlerle elektrik sinyali oluşturulur. Genellikle kurulan sistemler, algılayıcıdan gelen sinyalleri işleyerek duyulabilir, görülebilir veya hissedilebilir cevaplara dönüştürürler. Piezoelektrik eleman kullanılarak yapılan algılayıcıların eksenel ve fleksör olmak üzere iki temel çeşidi mevcuttur (APC International, 2006; Aydos, 2009).

### **3.5.2 Üreteçler**

Üreteç olarak tasarlanan piezoelektrik malzemeler, gerilim (voltaj) üretirler. Bu özelliklerinden ötürü herhangi bir elektrot aralığında ark oluşturabildiklerinden yakıt ateşleyicilerinde, gaz sobaları, kombi gibi cihazlarda, kaynak ekipmanlarında ve daha birçok cihazda piezo çakmak (ateşleme aparatı) olarak kullanılırlar. Piezoelektrik ateşleme sistemleri, küçük ve basittirler. Bu özellikleri bazı durumlarda, kalıcı mıknatıslar veya yüksek voltaj dönüştürücüler ve kapasitörler gibi, alternatif sistemlere göre avantaj sağlar. Ayrıca piezoelektrik bir elmandan elde edilen elektrik enerjisini depolama imkânı da mevcuttur. Çok katlı kapasitörleri oluşturmada kullanılan teknikler çok katlı piezoelektrik üreteçlerinin yapımında da kullanılmıştır. Bu şekilde üretilen üreteçler elektronik devreleri beslemede kullanılan kuru pilleri oluşturmak için kullanılmaya çok elverişlidirler (APC International, 2006; Aydos, 2009).

### **3.5.3 Eyleyiciler**

Tetikleyici, tahrikçi veya aktüatör olarak da adlandırılabilen eyleyiciler, elektrik sinyalini

hassas ötelenmeye (yer değişimine) çevirirler. Eyleyiciler, temel olarak aksel, enine ve fleksör aktüatörler olarak gruplandırılırlar. Eyleyicilerin gösterdiği yüksek hassasiyetteki hareketten makinelerde kullanılan takımların hassas şekilde kalibrasyonundan, çeşitli sistemlerde kullanılan optik lens veya aynaların kalibrasyonuna kadar birçok yüksek duyarlılık gerektiren uygulamada yararlanır. Ayrıca piezoelektrik eyleyiciler, uygulamasına göre hidrolik valfleri, küçük hacimdeki motorları veya özel amaçlı motorları kontrol etmede de kullanılabilirler. Eyleyiciler, bir çeşit piezoelektrik motorlardır ve en büyük avantajları elektromanyetik gürültü oluşturmamalarıdır. Ayrıca eğer eyleyicinin gerçekleştirdiği ötelenme engellenirse, eyleyici kullanılabilir bir kuvvet üretmiş olur (APC International, 2006; Aydos, 2009).

#### **3.5.4 Transdüserler**

Piezoelektrik transdüserler, elektrik enerjisini ses veya ses üstü titreşen mekanik enerjiye çevirebilirler. İşitilebilen ses meydana getiren transdüserlerin, aynı şekilde ses üreten elektromanyetik cihazlara göre; kompaktlık, basitlik, güvenilirlik ve yüksek ses için gerekenden daha az enerji ihtiyacı gibi artıları vardır. Bu özelliklerinden dolayı pil ile çalışan ve ses üreten cihaz uygulamalarında idealdirler. Piezoelektrik etki iki yönlü olduğundan transdüserler, elektrik enerjisinden ultrasonik sinyaller üretebildiği gibi ses dalgasını da elektrik sinyaline dönüştürebilirler. Bu özelliğinden dolayı transdüserler kullanılarak mesafe, akış, sıvı seviyesi ölçen cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlarda sinyal gönderme ve alma işlemleri tek bir piezoelektrik transdüserle yapılabildiği gibi her iki işlem için ayrı piezoelektrik transdüser kullanan cihazlar da mevcuttur. Ayrıca piezoelektrik transdüserlerden temizlemede, sıvıların atomizasyonunda, seramik veya diğer gevrek malzemelerin işlenmesinde, plastik malzemelerin kaynak işlemlerinde, medikal uygulamalarda vb. ultrasonik titreşimler oluşturduğu için yararlanır (APC International, 2006; Aydos, 2009).

#### 4. DÜŞEY TİTREŞİME ZORLANMIŞ PLAĞIN MATLAB/SIMULINK İLE MODELLENMESİ

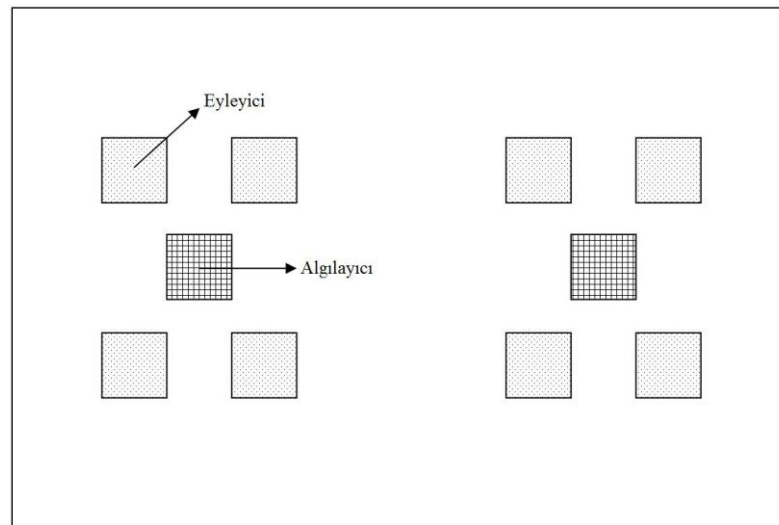
Plak düzlemine dik ve noktasal kuvvet ile düşey titreşime zorlanmış, her bir kenarından basit mesnetli dikdörtgen plağın herhangi bir (x,y) noktasında t zamanında düşey yer değiştirmesini analitik çözüm ile veren ifade (2.67) denkleminde (2.61) ve (2.40) denklemleri yazılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \sin p t - \frac{p}{w_{mn}} \sin w_{mn} t \right) \frac{\left( \frac{4P}{ab} \sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{n\pi\eta}{b} \right)}{\bar{m}(w_{mn}^2 - p^2)} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4.1)$$

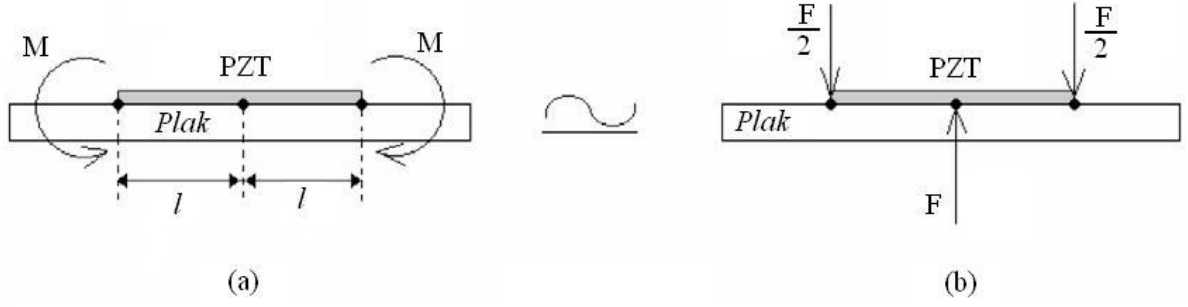
Plak düzlemine dik ve noktasal kuvvet ile statik çökmeye zorlanmış, her bir kenarından basit mesnetli dikdörtgen plağın herhangi bir (x,y) noktasında düşey yer değiştirmesini analitik çözüm ile veren ifade (2.43) denkleminde (2.40) denklemi yazılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$w(x, y) = \frac{4P}{\pi^4 ab D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{n\pi\eta}{b}}{[(m^2/a^2) + (n^2/b^2)]^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4.2)$$

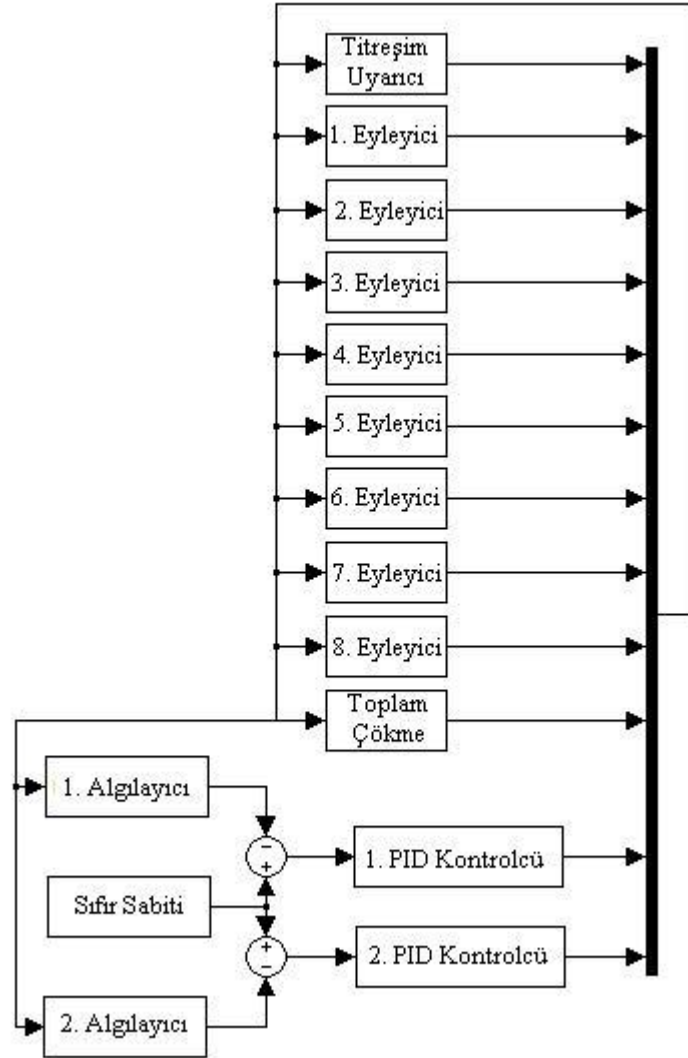
Şekil 4.1'de görüldüğü gibi plak üzerine piezoelektrik eyleyici ve algılayıcılar bulunmaktadır. Plak, titreşim uyarıcı (shaker) ile istenen noktadan titreşime zorlanmaktadır. Algılayıcılar tarafından alınan sinyal kontrolcüde işledikten sonra eyleyicilere gönderilmekte ve plak üzerine yük uygulamaktadır. PZT eyleyicinin kısalmaları ve uzamaları Şekil 4.2(a)'da görüldüğü gibi plak üzerinde momentler oluşturacaktır. Bu momentler Şekil 4.2(b)'deki gibi kuvvetlere indirgenebilir.



Şekil 4. 1 Üzerindeki eyleyici ve algılayıcılar bulunan plak modeli



Şekil 4. 2 Plak üzerindeki PZT eyleyicilerin üç nokta ile gösterimi (a) eyleyici tarafından üretilen momentlerin gösterimi (b) plağa etki eden eşdeğer kuvvetlerin gösterimi (Tavakolpour vd., 2009)



Şekil 4. 3 Plağın Matlab/Simulink modelinin şematik gösterimi

Matlab/Simulink ile plağın titreşim uyarıcı ve her bir piezoelektrik eyleyici etkisi altındaki yer değiştirmeleri (x,y) noktasına göre bulunmaktadır. Sadece titreşim uyarıcı etkisindeki plağın

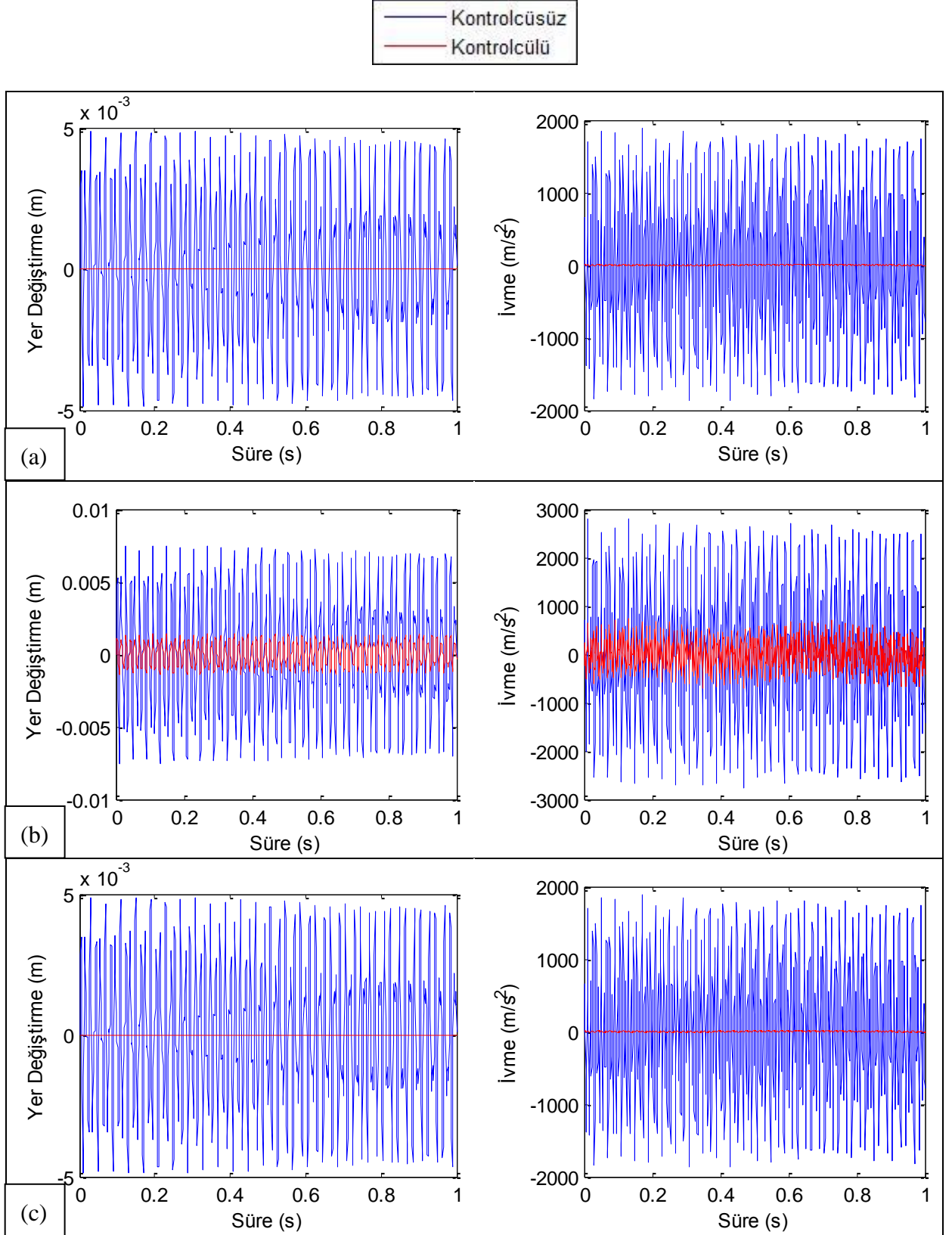
titreşimleri kontrolcüsüz yer değiştirmeleri vermektedir. Kontrolsüz yer değiştirmeler bulunurken (4.1) denklemi kullanılmıştır. Eyleyicilerin yer değiştirmelerine katkısı (4.2) denklemi ile bulunmuştur.  $m=1,2,3$  ve  $n=1,2,3$  alınmıştır. Titreşim uyarıcı ve sekiz eyleyiciler için ayrı ayrı olarak bulunan yer değiştirmelerin toplamı toplam çökmeyi vermektedir. Toplam çökme, plak titreşimlerinin kontrolcülü yer değiştirmelerini vermektedir. Toplam çökmenin her bir algılayıcının bulunduğu noktadaki değeri o algılayıcının sinyalini oluşturmaktadır. Bu sinyallerin sıfır sabitinden farkı PID kontrolcülerin girişleri olmaktadır. PID katsayıları:  $P=300$ ,  $I=1$ ,  $D=10$  olarak kullanılmıştır. Birinci kontrolcüden alınan veriler ilk dört eyleyicinin, ikinci kontrolcüden alınan veriler ise diğer dört eyleyicinin genlik girişleridir. (şekil 4.3).

#### 4.1 Plak Modelinden Elde Edilen Sonuçlar

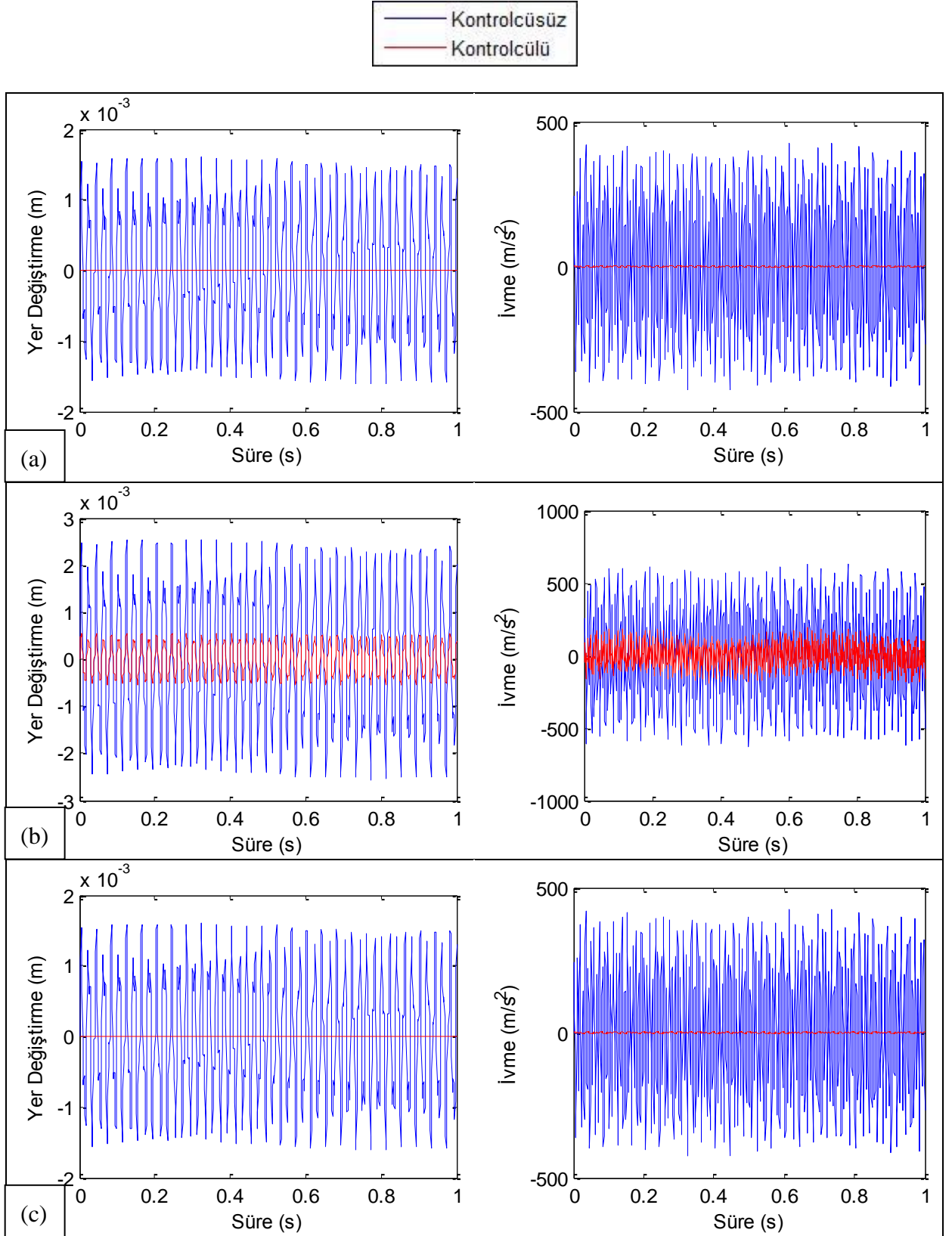
Matlab/Simulink ile model sonuçlarının bulunmasında çözücü ode4 (Runge-Kutta) ve 0.001 sabit basamaklı olarak seçilmiştir. Çizelge 4.1'deki değerler kullanılarak yer değiştirmeler ve doğal frekanslar ölçölmüştür.

Çizelge 4.1 Basit mesnetli plak değerleri

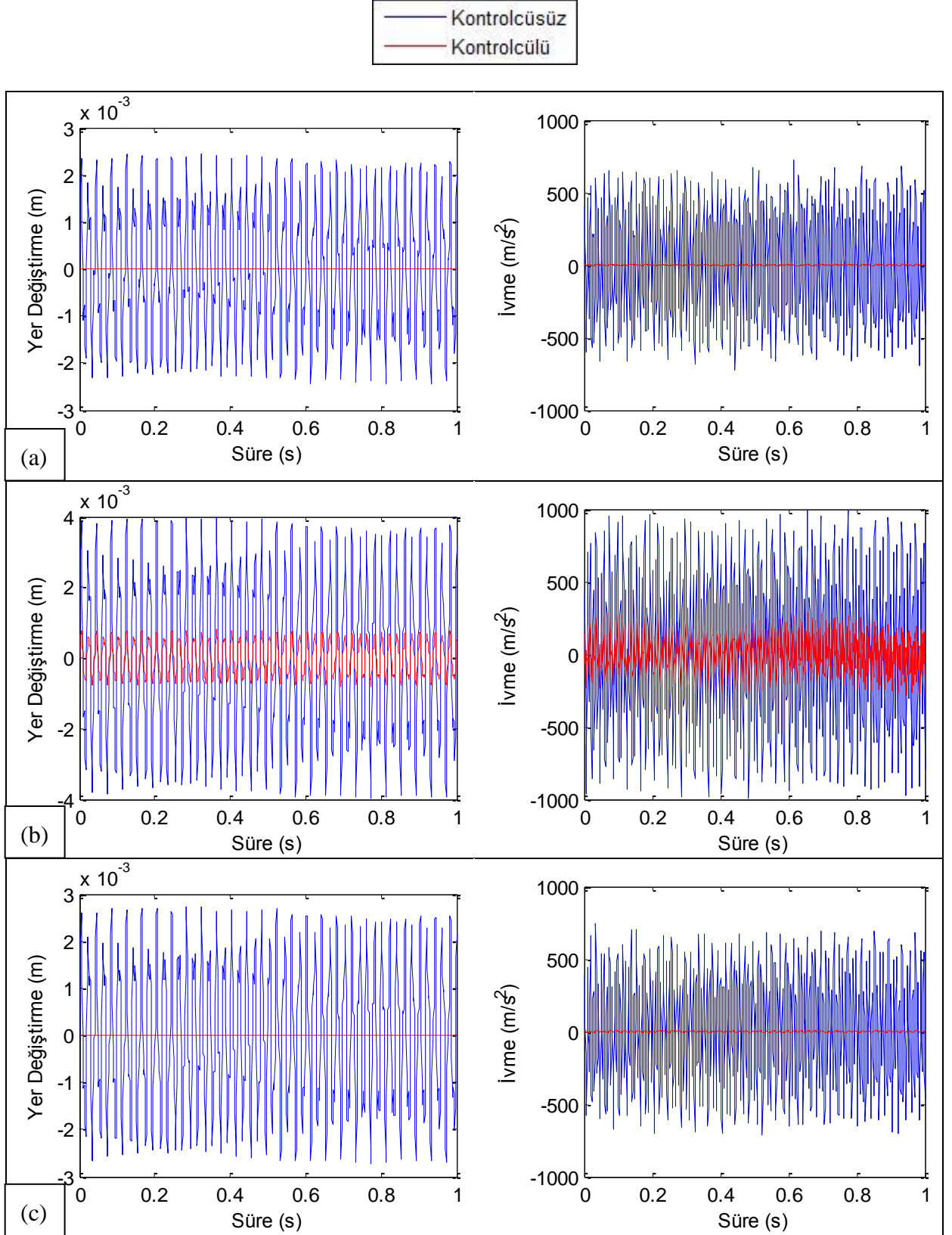
Uzunluk, $a$	298 mm
Genişlik, $b$	199 mm
Kalınlık, $h$	1.4 mm
Elastiklik modölü, $E$	2705 kg/m <sup>3</sup>
Yoğunluk, $\rho$	7.1 Gpa
Poisson Oranı, $\nu$	0.33



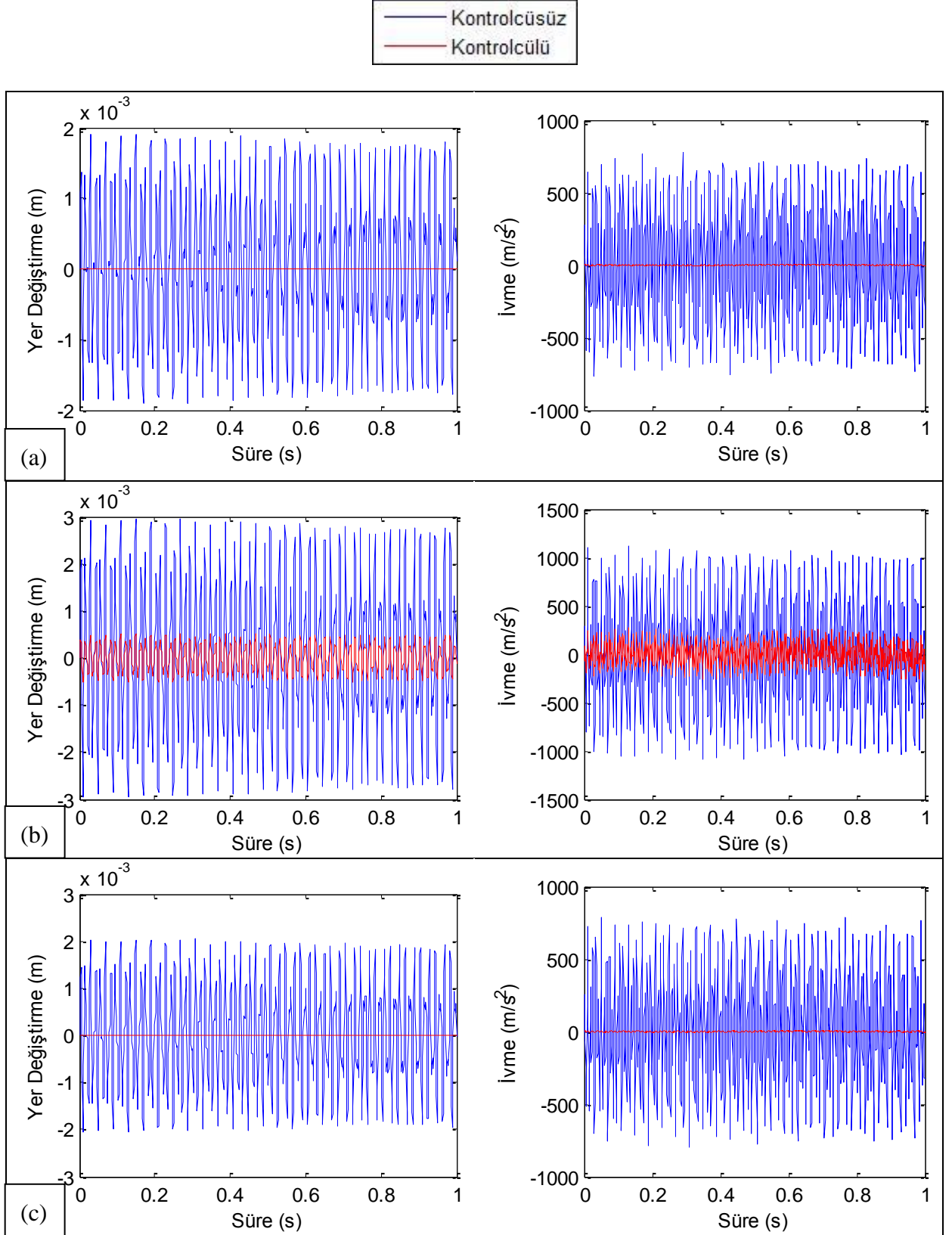
Şekil 4. 4 Plaçın orta noktasından (a/2,b/2) zorlanmasıyla (100 N ve 475 rad/s) (a) 1. algılayıcının bulunduğu noktada (b) plak orta noktasında (c) 2. algılayıcının bulunduğu noktada yer değiştirme ve ivmelerin kontrolcüsüz ve kontrolcülü zaman cevapları



Şekil 4. 5 Plâğın orta noktasından (a/2,b/2) zorlanmasıyla (50 N ve 315 rad/s) (a) 1. algılayıcının bulunduğu noktada (b) plak orta noktasında (c) 2. algılayıcının bulunduğu noktada yer değiştirme ve ivmelerin kontrolcüsüz ve kontrolcülü zaman cevapları



Şekil 4. 6 Plâgın rastgele bir noktadan (0.16,0.06) zorlanmasıyla (100 N ve 315 rad/s) (a) 1. algılayıcının bulunduğu noktada (b) plak orta noktasında (c) 2. algılayıcının bulunduğu noktada yer değiştirme ve ivmelerin kontrolcüsüz ve kontrolcülü zaman cevapları



Şekil 4. 7 Plâğin rastgele bir noktadan (0.16,0.06) zorlanmasıyla (50 N ve 475 rad/s) (a) 1. algılayıcının bulunduğu noktada (b) plak orta noktasında (c) 2. algılayıcının bulunduğu noktada yer değiştirme ve ivmelerin kontrolcüsüz ve kontrolcülü zaman cevapları

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

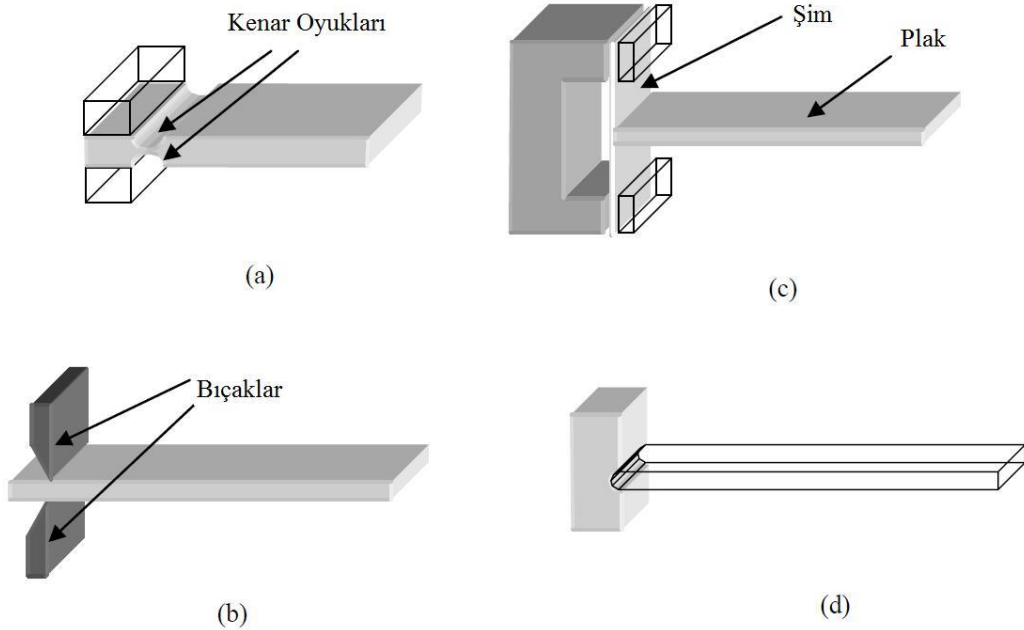
Bu çalışmada alüminyum bir plağın titreşimleri, üzerine yapıştırılan piezoelektrik parçalar yardımıyla kontrol edilmiştir. Plak kenarları 300x200 mm boyutlarında, kalınlığı ise 1.5 mm'dir. Alüminyumun yoğunluğu  $2700 \text{ kg/m}^3$ , elastiklik modülü ise 71 Gpa'dır.

### 5.1 Deney Düzenekinin Kurulması

Deney düzenekinin kurulmasını üç aşamada incelenebilir. Öncelikle plağın basit mesnetli olarak kurulması, ardından piezoelektrik parçaların plak üzerine yapıştırılması ve son olarak da bütün donatıların birbirine bağlanması anlatılacaktır.

#### 5.1.1 Plakta Basit Mesnetin Gerçekleştirilmesi

Bir çubuk ya da plak için, teorik basit mesnetin etkisine yakın olan bir fiziksel basit mesnet kurmak için pek çok yöntem vardır. Aglietti ve Cunningham (2002), dört yöntemden bahseder.



Şekil 5. 1 Basit mesneti uygulamak için kullanılan yöntemlerin şematik gösterimi (a) Kenarı oyuklu plak (b) Bıçaklarla sabitlenmiş plak (c) Şime tutturulmuş plak (d) Kısmi menteşelenmiş plak (Aglietti ve Cunningham, 2002)

Şekil 5.1(a)'da görüldüğü gibi basit mesnet kurmak için kenar boyunca düşük momentli bir alan oluşturulur. Bu plağın kenarları boyunca alt ve üst yüzeylerde iki derin oyuk

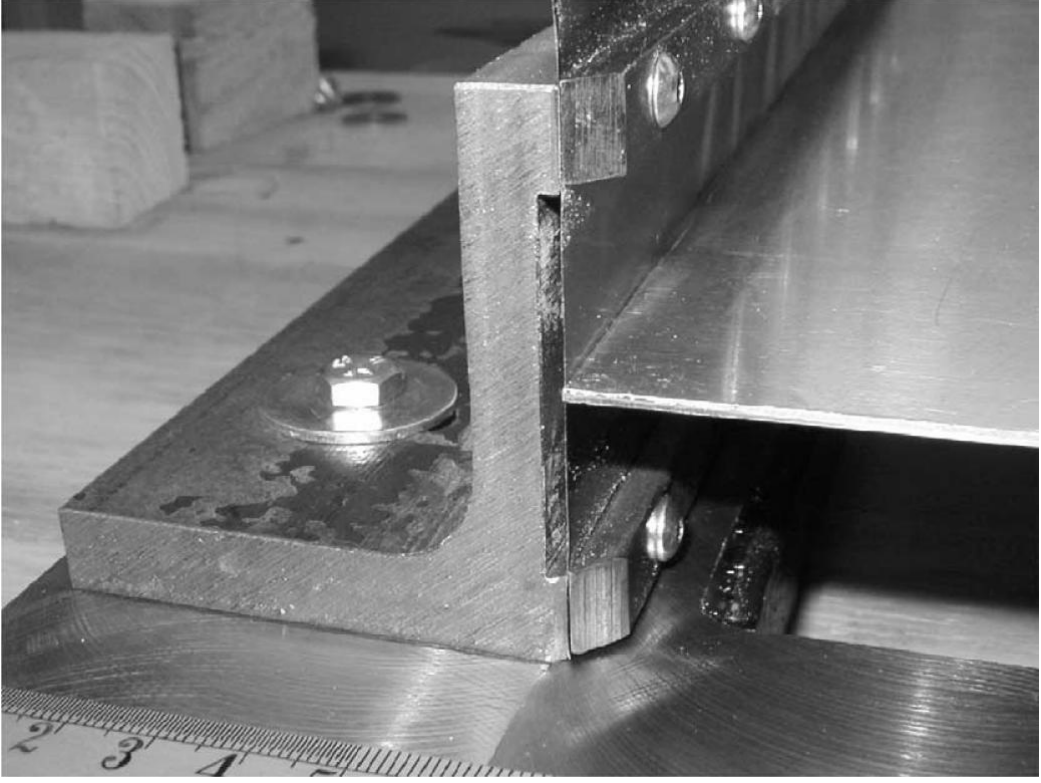
oluşturularak elde edilir. Böylece kenarın plak dışı yer değiştirmelerinden kaçınılır. Bu yöntemin uygulanmasının ve mod şekillerinin çıkarılmasının kolay olmasına rağmen titreşimin teorik doğal frekanslarını doğru vermez. Sıcaklık değişimleri plak üzerinde istenmeyen öngerilme yapabilir.

Diğer bir yöntem de Şekil 5.1(b)'de gösterildiği gibi kenarı iki bıçak arasında sabitlemektir. Montaj ve üretim açısından uygulaması en kolay yöntemdir fakat ideal basit mesnetin gerçekleştirilmesinde doğruluğunun hesaplanması zordur. Burada problem bıçağın kenarı ve plak arasındaki temas yüzeyidir. Eğer bıçaklar fazla sıkı bağlanırsa plağın dönme hareketleri kısıtlanır. Yeterince sıkı bağlanmazsa da plak yüzeyi bıçağın kenarları arasında kayabilir. Ayrıca sıcaklık değişimleri plakta öngerilmeler oluşturabilir.

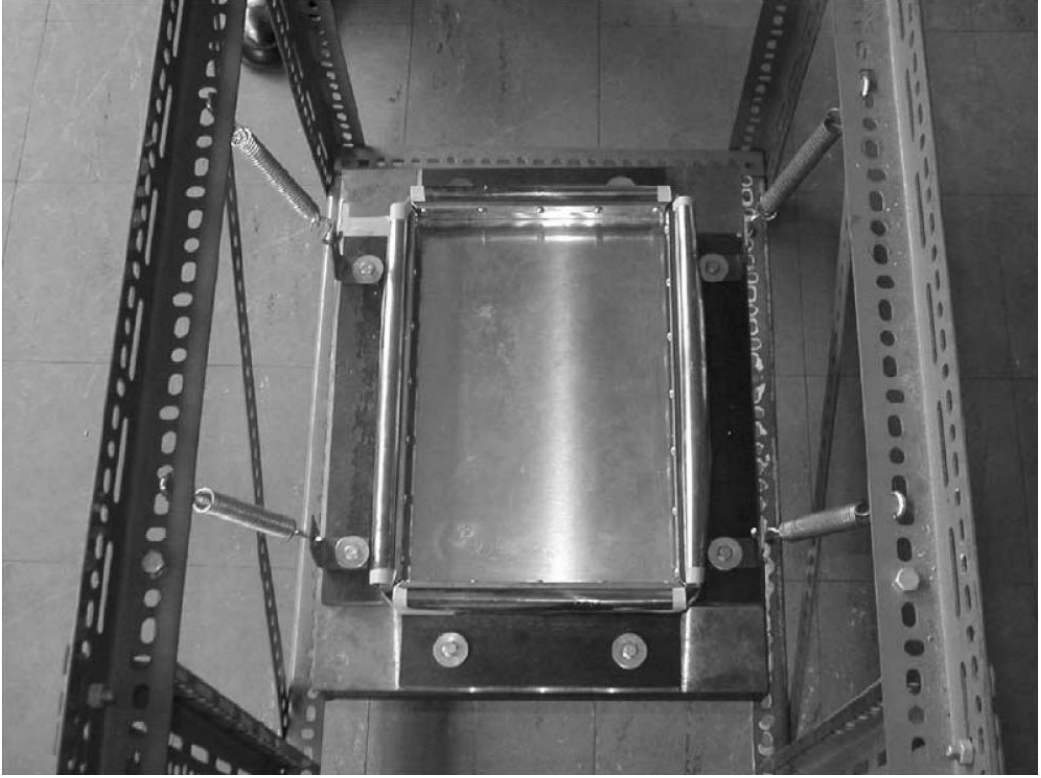
Basit mesneti gerçekleştirmek için kullanılan bir başka yöntem de Şekil 5.1(d)'de görüldüğü üzere kısmi menteşedir. Mesnette plağın kenarıyla birleşen yarım daire kesitli yatay bir oyuk yapılır. Bu yöntemin düzgün çalışması için oyuk ve plak kenarının tam olarak birbirine geçmesi gereklidir. Bu yöntemin olası bir dezavantajı oyuğun yüzeyi ve plağın kenarı arasında oluşan bir sürtünmedir. Ayrıca sıcaklık değişiklikleri plakta yüksek baskılı öngerilmeler oluşturabilir.

Dördüncü yöntem olarak plak kenarları boyunca basit mesnetli sınır şartın gerçekleştirilmesi için plak kenarı boyunca dik olarak bağlanan çok ince bir sacın (şim), düşük dönme rijitlik ve yüksek düzlem içi rijitlik özelliklerinden faydalanılır. Şimin yüksek eğilme esnekliği sayesinde kenar boyunca ihmal edilebilir dönme rijitliği elde edilir. Aynı zamanda, Şekil 5.1(c)'deki gibi üst ve alt kenarları sabitlenmiş şimin yüksek düzlem içi rijitliği, plak kenarının düzlem dışı hareketlerini kısıtlar. Ayrıca şimlerin esnekliği, plakta büyük düzlem içi öngerilmelere sebep olmaksızın sıcaklık değişimi durumunda genleşmeyi ve büzüşmeyi sağlar.

Bu çalışma kapsamında plakta basit mesnetin gerçekleştirilmesinde şim mesnetleri kullanılmıştır. Kullanılan şimlerin kalınlıkları 0.05 mm'dir. Şimin sabitlenmiş üst ve alt kenarları arasındaki mesafe 40 mm'dir. Şimler L ketitli çelik çubuklara tutturulmuştur. Çubuklar ise 20 mm kalınlıklı çerçeveye bağlanmıştır. Çerçevenin iç kısmından alüminyum plak boyutları kesilip çıkarılmıştır. L kesitli çelik çubuklar frezelenerek şimlerin arkasında boşluk oluşturulmuştur. Alüminyum plağın şimlere yapıştırılması için epoksi metal yapıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 5.2). Bütün plak düzeneği Şekil 5.3'de gösterildiği gibi mesnetlenen plağa serbest mesnetli sınır şartlarını sağlamak için dört adet gerilme yayına asılmıştır.



Şekil 5. 2 Şimlerle yapılan basit mesnetin deneysel uygulaması (Aglietti ve Cunningham, 2002)



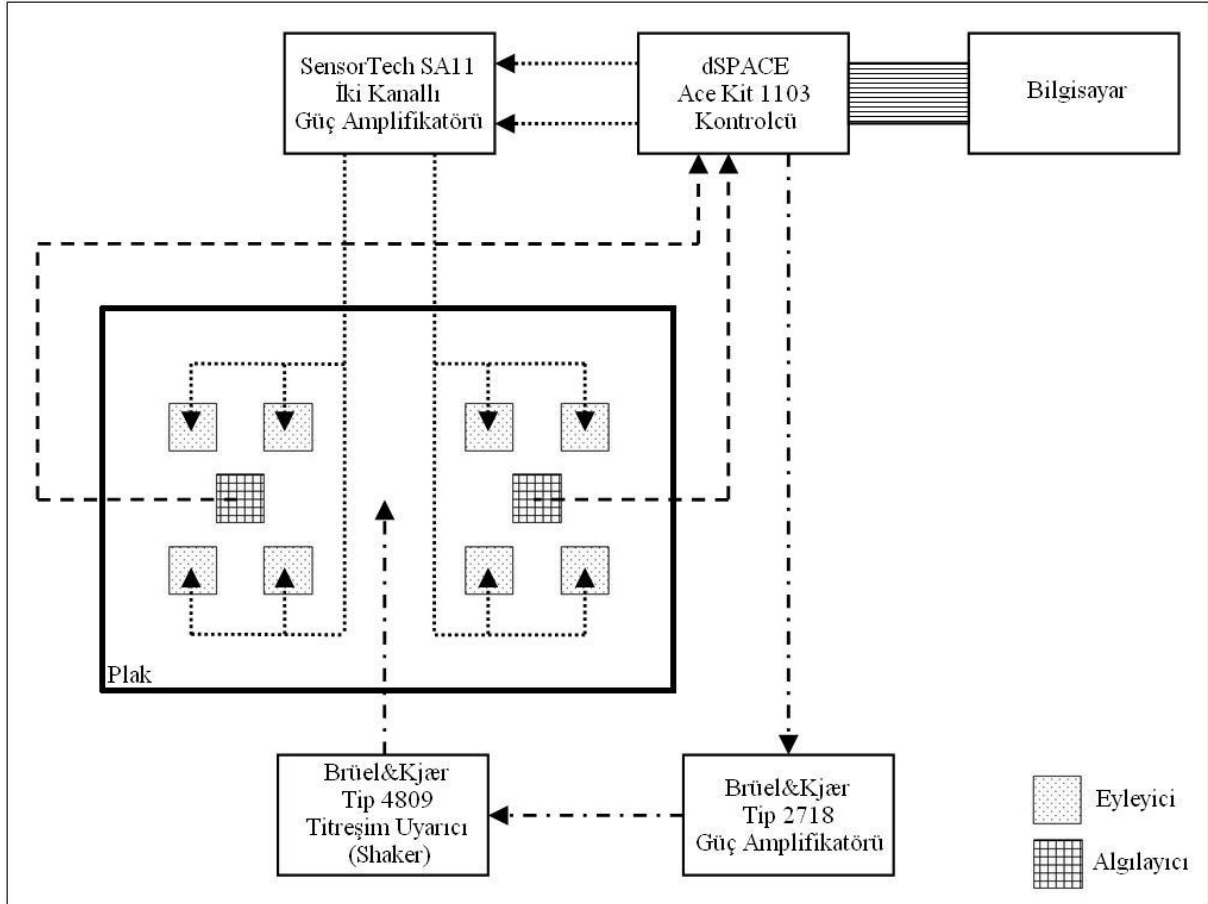
Şekil 5. 3 Yaylara asılı deney düzeneği (Aglietti ve Cunningham, 2002)

### 5.1.2 Piezoelektrik Parçaların Plak Üzerine Yapıştırılması

Bu çalışmada alüminyum plak üzerine 10 adet SensorTech BM532 markalı piezoelektrik parça bağlanmıştır. Bunlardan sekizi eyleyici, diğer ikisi ise algılayıcıdır. Eyleyiciler dörderli olmak üzere iki grup halinde çalışır. Bir gruptaki dört eyleyiciye herhangi bir anda aynı gerilim uygulanmaktadır. Her bir gruptaki eyleyicilere gönderilen gerilim o gruba ait olan algılayıcı tarafından alınan sinyale göre belirlenir (Şekil 4.1).

Piezoelektrik parçalar plak üzerine Sun-Fix metal epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Yapıştırıcının elektrik iletkenlik özelliği bulunmalı, piezoelektrik parçalar ile plak arasında elektrik akımının iletimine engel olmamalıdır.

### 5.1.3 Donatıların Bağlanması



Şekil 5. 4 Deney kurulumunun şematik gösterimi

Piezoelektrik algılayıcılardan alınan sinyaller dijital kontrol sistemine gönderilir. Bu kontrol sistemi, Matlab/Simulink yazılımını ve dSPACE 1103 kontrolcüsünü içeren bilgisayardaki bir platform üzerine kuruludur. Kontrolcü tarafından üretilen kontrol sinyalleri SensorTech SA11

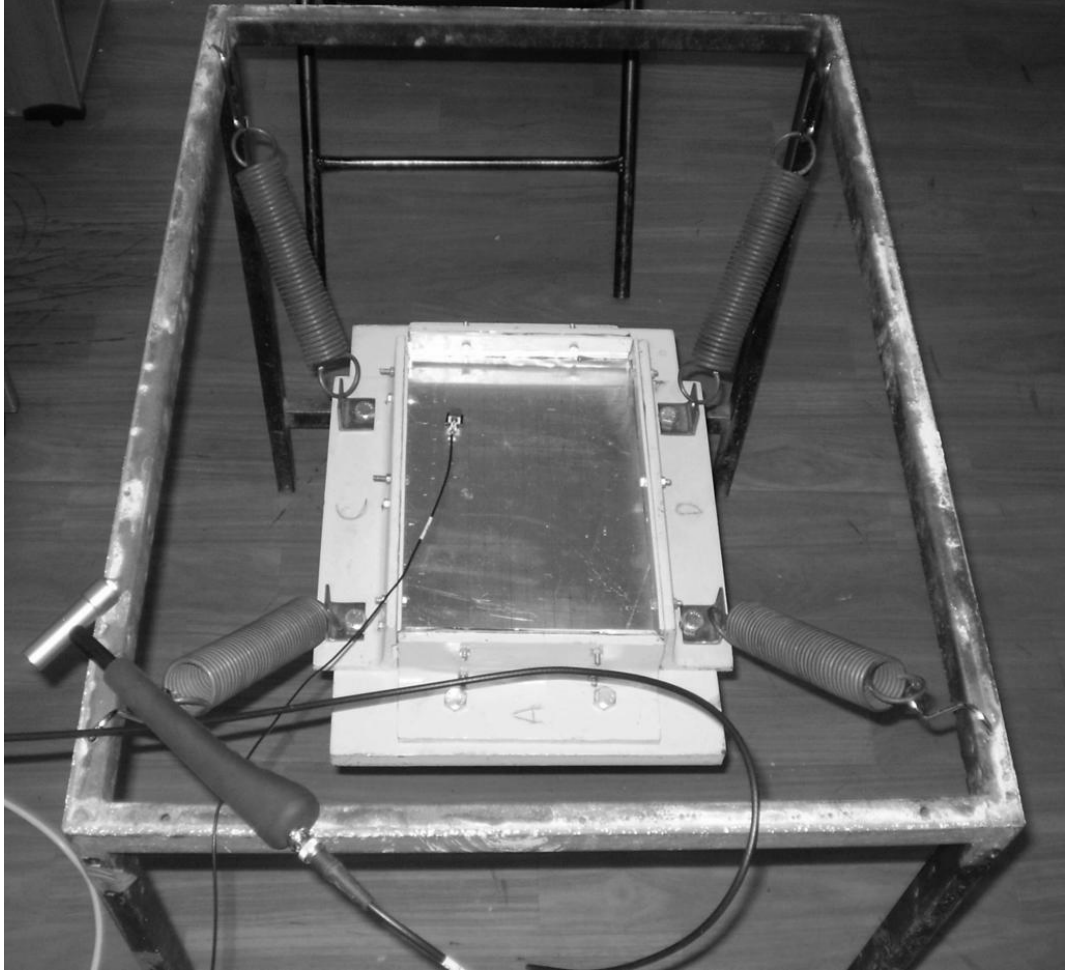
iki kanallı yüksek gerilim güç amplifikatörü ile  $\pm 9$  V arasındaki gelen gerilimi 15 kat yükselterek  $\pm 135$  V arasında gönderir. Sistemi tahrik etmek için Brüel&Kjær 4809 tipi titreşim uyarıcı (shaker) kullanılmıştır. Kontrolcüden alınan sinyal Brüel&Kjær 2718 tipi güç amplifikatörü ile yükseltilerek titreşim uyarıcıya iletilir (Şekil 5.4).

## 5.2 Deney Sonuçları

### 5.2.1 Basit Mesnetli Plağın Doğal Frekanslarının Bulunması

NetdB DAQ12 titreşim analizörü kullanılarak doğal frekanslar ölçüldü (Şekil 5.5). (2.54) denkleminin (2.30) denklemi eklenerek bulunan (5.1) denklemi kullanılarak doğal frekanslar hesaplandı ve Çizelge 5.1'de karşılaştırıldı.

$$w_{mn} = \pi^2 \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{Eh^3}{12\rho h(1-\nu^2)}} \quad (5.1)$$



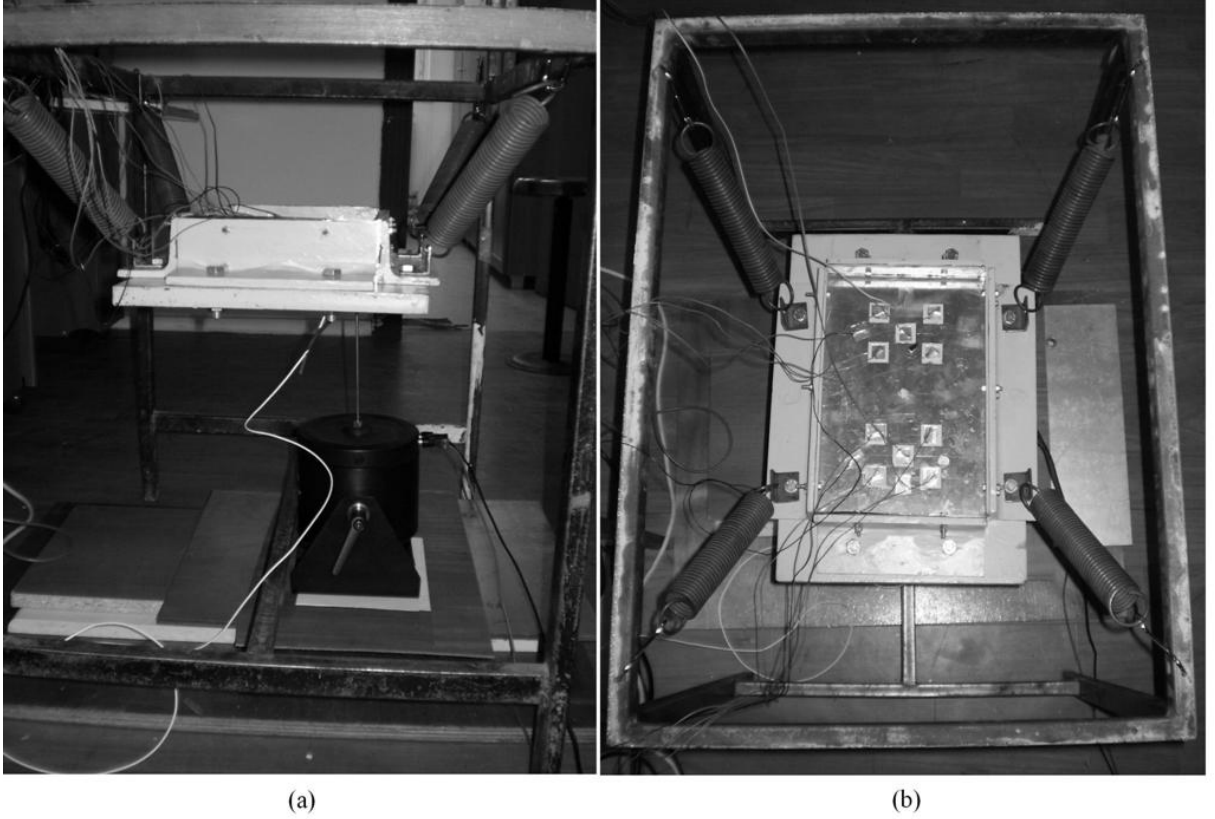
Şekil 5. 5 Basit mesnetli plağın doğal frekanslarının bulunması

Çizelge 5.1 Plağın doğal frekansları ( $\omega$ )

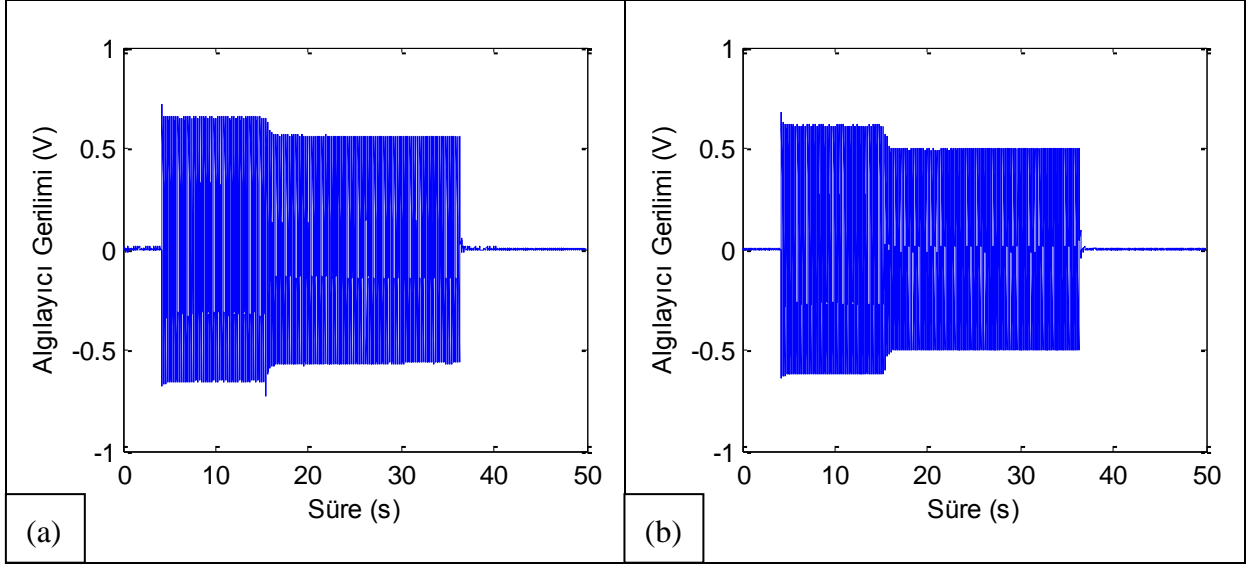
m	1	2	1	3	2	3
n	1	1	2	1	2	2
Hesaplanan $\omega$ (Hz)	125.801	242.194	386.809	436.183	503.203	697.192
Ölçülen $\omega$ (Hz)	128.125	242.188	386.719	438.281	496.875	697.656

### 5.2.2 Aktif Kontrol Sonuçları

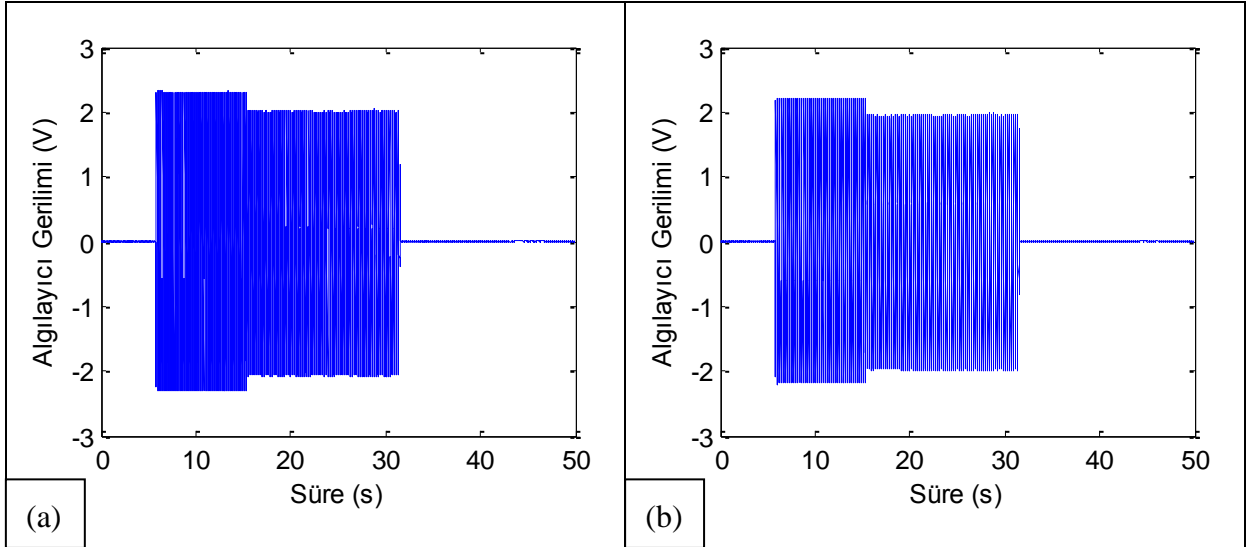
Titreşim uyarıcı, plağa alt tarafından rastgele seçilen (0.16,0.06) noktasından tutturulmuştur (Şekil 5.6a). Kablolar piezoelektrik malzemelerin üzerlerine alüminyum bant ile yapıştırılmış, iletkenlikte oluşabilecek sorunlar önlenmiştir (Şekil 5.6b). PID katsayıları: P=300, I=1, D=10 seçilerek teorik modelle aynı kontrolcü kullanılmıştır.



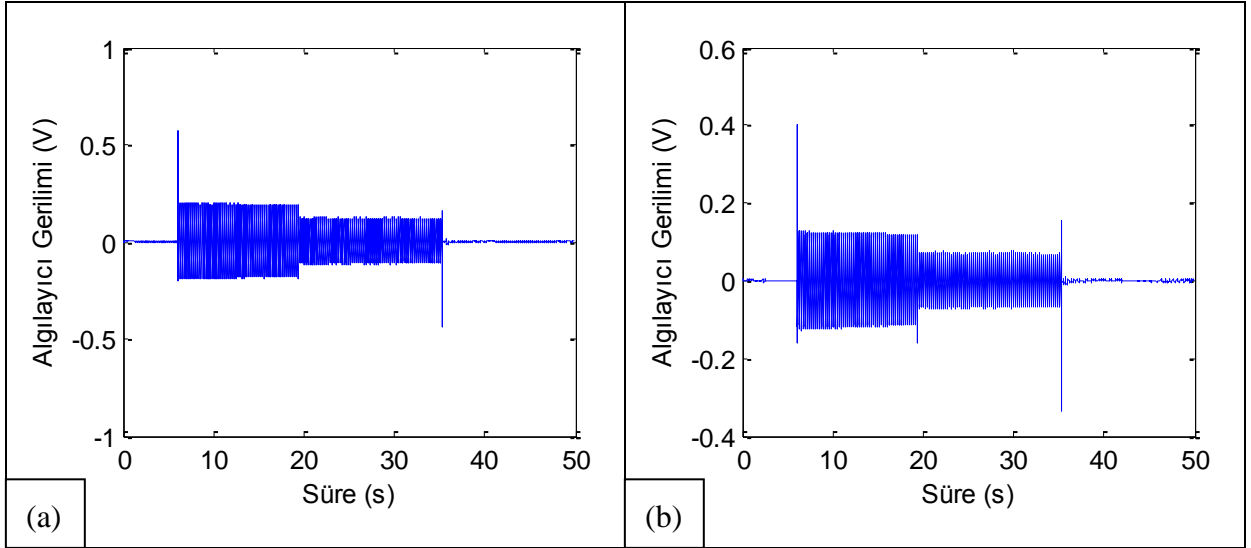
Şekil 5. 6 Basit mesnetli plağa titreşim uyarıcı ve piezoelektrik malzemeler bağlı iken (a) yandan (b) üstten görünüşü



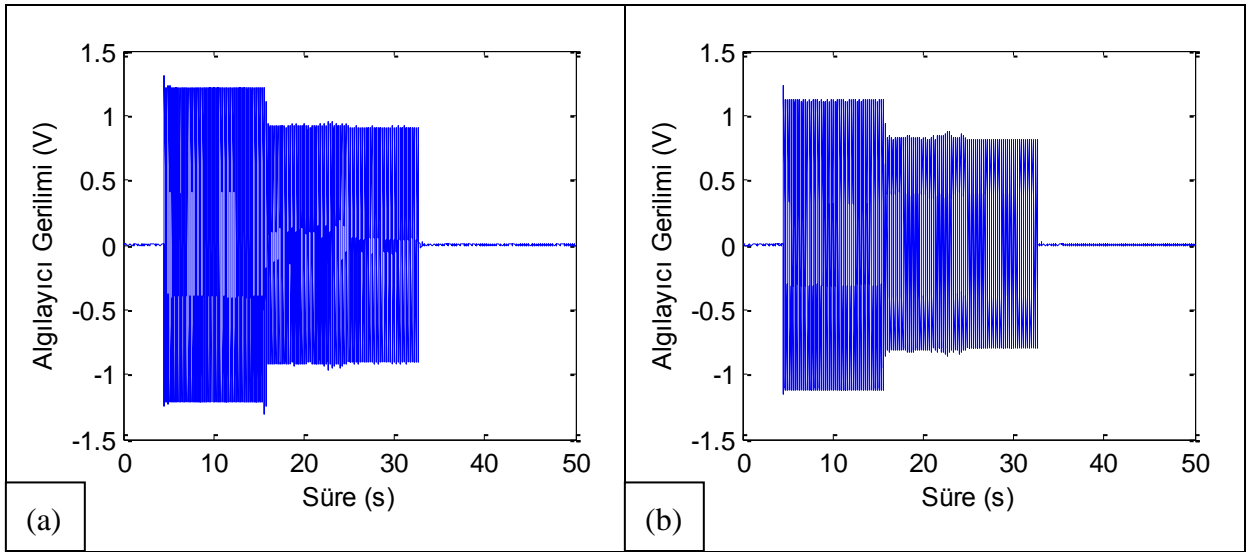
Şekil 5. 7 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (25 Hz frekans ve 0.05 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları



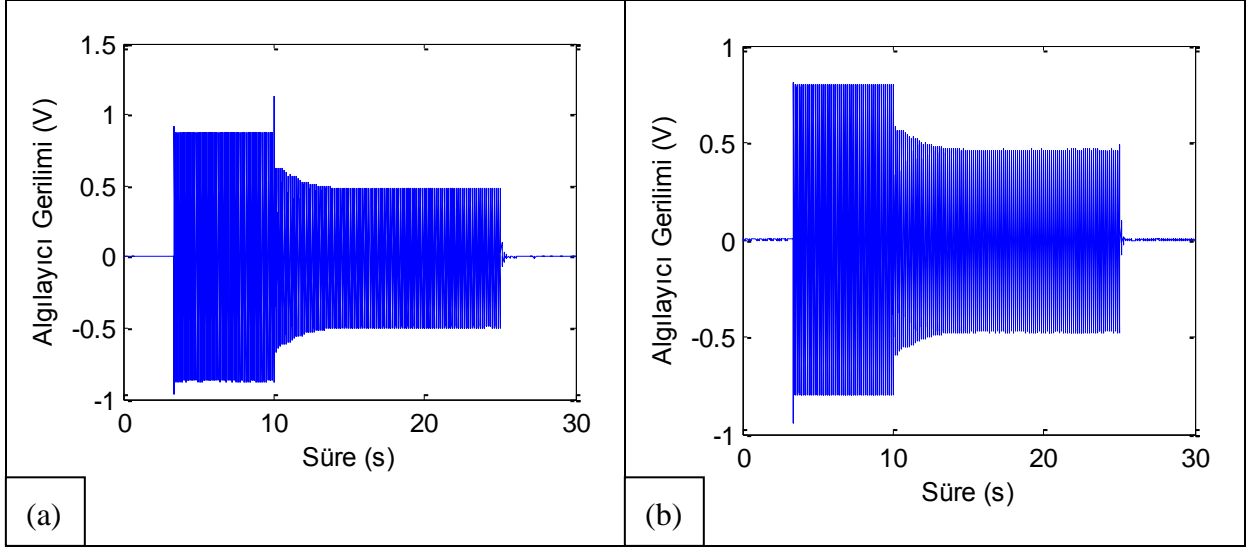
Şekil 5. 8 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (75 Hz frekans ve 0.1 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları



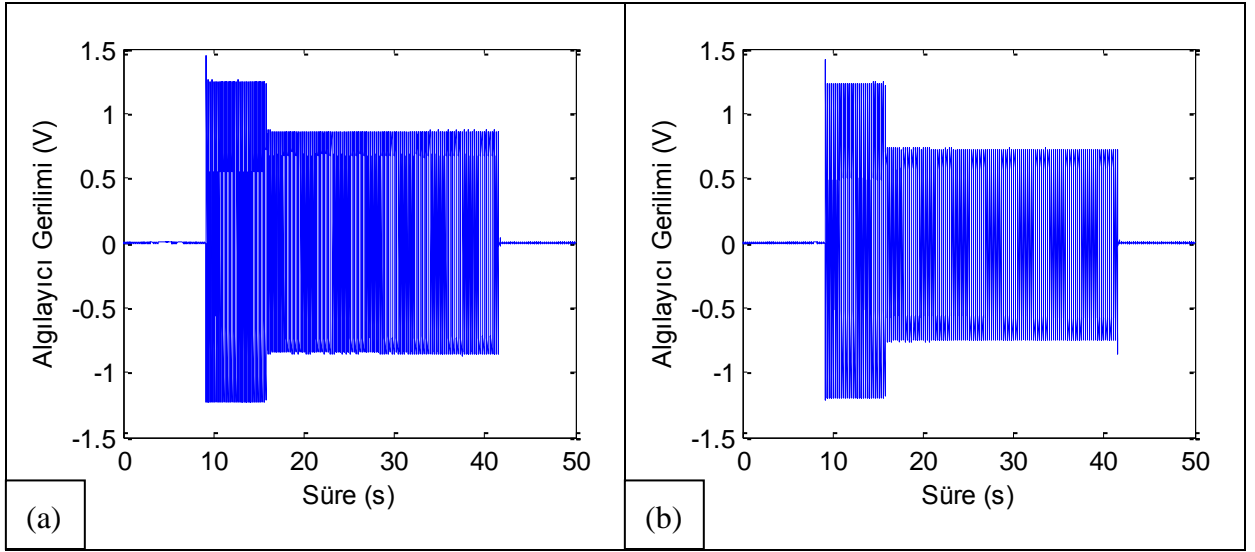
Şekil 5. 9 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (50 Hz frekans ve 0.1 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları



Şekil 5. 10 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (25 Hz frekans ve 0.1 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları



Şekil 5. 11 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (50 Hz frekans ve 0.05 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları



Şekil 5. 12 (a) 1. algılayıcının ve (b) 2. algılayıcının sırayla sistem durgunken, titreşim uyarıcı devredeyken, titreşim uyarıcı (75 Hz frekans ve 0.05 V genlik değerleri için) ve kontrolcü devredeyken ve titreşim uyarıcı kapalıyken ölçülen gerilim zaman cevapları

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, öncelikle dikdörtgen elastik plağın diferansiyel denklemi Navier metodu kullanılarak basit mesnetli sınır şartı durumu için çözüldü. Statik ve dinamik yük durumları için basit mesnetli plak analitik olarak modellenerek, oluşturulan modelin düşey yer değiştirmeleri Matlab/Simulink programı yardımıyla elde edildi. Oluşturulan plak modeli üzerinde PID kontrolcü kullanılarak aktif kontrol uygulaması gerçekleştirildi. Plak üzerinde oluşan titreşimler büyük oranda sönümlendi.

Plak deneysel olarak basit mesnetlenerek doğal frekansları ölçüldü ve teorik sonuçlarla yakınlığı görüldü. Değerlerdeki farklılıklar; çok ince olan şimlerin düzgün şekilde delinerek düzeneğe bağlanmasının zor olması ve şim üzerinde delme işlemi sırasında meydana gelen bölgesel deformasyonların düzensizliğe sebep olması, plak ile şimleri birbirine yapıştırımda kullanılan yapıştırıcının yeterince rijit olmaması ve kenarlar boyunca küçük düşey yer değiştirmelere müsaade etmesi gibi sebeplere bağlanmıştır.

Daha sonra, plağa piezoelektrik eyleyiciler ve algılayıcılar yapıştırılarak teorik modelde kullanılan PID kontrolcü deneysel sisteme uygulanmış ve değişik zorlama durumları için farklı oranlarda titreşimlerin sönümlendiği görülmüştür.

Teorik model ile deneysel sonuçlar arasındaki farkların sebepleri; plak ile piezoelektrik parçaların mükemmel yapıştırılamaması ve bunun sonucunda plak üzerindeki titreşimlerin gerçek gerilim değerlerine dönüştürülememesi veya piezoelektrik parçalara gönderilen gerilimin plak üzerinde istenen gerilmeyi oluşturamaması, titreşim uyarıcının çubuğunun plağa mükemmel yapıştırılamaması olabilir.

Gelecekte yapılması düşünülen çalışmalarda; değişik sınır şartlar ve değişik plak şekilleri için plak titreşimleri incelenebilir, plak diferansiyel denkleminin çözümünde değişik sayısal yöntemlerle sonuçlar karşılaştırılabilir, PID kontrolcü yerine daha gelişmiş kontrolcüler kullanılarak aktif kontrolün başarısı artırılabilir, izotropik plak uygulamaları yerine ortotropik plak uygulamaları da gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Aglietti, G. S. ve Cunningham, P. R., (2002), "Is a Simple Support Really That Simple?", *Journal of Sound and Vibration*, 257:321-335.
- Anderson, E. H. ve Hagood, N. W., (1994), "Simultaneous Piezoelectric Sensing/Actuation: Analysis And Application To Controlled Structures", *Journal of Sound and Vibration*, 174:617-639.
- APC International Ltd. Product Manual, (2006), *Piezoelectric Ceramic: Principles and Applications*, Pennsylvania, USA.
- Aydos, O., (2009), *Akıllı Çubukların Tasarım ve Analizi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Bailey, T. ve Hubbard, J. E., (1985), "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam." *Journal of Guidance Control Dynamics*, 8:605–611.
- Batra, R. C., Liang, X. G. Ve Yang, J.S., (1996), "The Vibration of a Simply Supported Rectangular Elastic Plate due to Piezoelectric Actuators", *International Journal of Solids and Structures*, 33:1597-1618.
- Baudry, M., Micheau, P. ve Berry, A. (2005), "Decentralized Harmonic Active Vibration Control of a Flexible Plate Using Piezoelectric Actuator-Sensor Pairs", *Journal of Acoustical Society of America*, 119:262-277.
- Bayar, S., (2007), *Malzeme Özellikleri Sıcaklığa Bağlı Olan Bir Piezoelektrik Plağın Statik Analizi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Buchanan, Z.C., (1991), *Ceramic Materials for Electronics: Processing, Properties and Applications*, Marcel Deccer Inc., ABD.
- Caruso, G., Galeani, S. ve Menini, L., (2003), "Active Vibration Control of an Elastic Plate Using Multiple Piezoelectric Sensors and Actuators".*Simulation Modelling Practice and Theory*, 11:403-419.
- Choi, S.B. ve Sohn, J.W., (2006), "Chattering Alleviation in Vibration Control of Smart Beam Structures Using Piezofilm Actuators: Experimental Verification", *Journal of Sound and Vibration*, 294:640–649.
- Clark, R.L., Saunders, W.R. ve Gibbs, G., (1998), *Adaptive Structures: Dynamics and Control*, John Wiley and Sons, New York.
- Crawley, E. ve Lazarus, K.B., (1991), "Induced strain actuation of isotropic and anisotropic plates", *AIAA Journal*, 29:944–951.
- Dökmeçi, M. C., (1974), "A Theory of High Frequency Vibrations of Piezoelectric Crystals Bars", *International Journal of Solids and Structures*, 10:401-409.
- Ergun C., Yılmaz S., Özdemir E., Gül Ö. ve Kalenderli Ö., (2006), "Piezoelektrik Malzemeler ve Uygulama Alanları", *Denizli Uluslararası Malzeme Konferansı, Pamukkale*.

- Falangas, E. R., Dworak, J. A. ve Koshigoe, S. (1994), "Controlling Plate Vibrations Using Piezoelectric Actuators", *Control Systems Magazine*, 14:34-41.
- Fanson, J.L. ve Caughey, T.K., (1990), "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures", *AIAA Journal*, 28:717-724.
- Fuller, C.R., Elliott, S.J. ve Nelson, P.A., (1996), *Active Control of Vibration*, Academic Press, San Diego.
- Gandhi, M. V. ve Thompson, B. S., (1992), *Smart Materials and Structures*, Chapman and Hall, London.
- Gözen, Ş., (2002), *Effects of Surface-Bonded Piezoelectric on Beam Structures*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Han, J. H. ve Lee, I., (1999), "Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators for Vibration Control of a Composite Plate Using Genetic Algorithms", *Smart Materials and Structures*, 8:257-267.
- Hwang, J. K., Choi, C. H., Song, C. K. ve Lee, J. M., (1997), "Robust LQG Control of an All-Clamped Thin Plate with Piezoelectric Actuators/Sensors", *Transactions on Mechatronics*, 2:205-212.
- Jaffe, B., Cooke, W. R. Ve Jaffe, H., (1971), *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, ABD.
- Jalili, N., (2010), *Piezoelectric-Based Vibration Control*, Springer, Boston.
- Kaçar, A., (2009), *Katmanlı Kompozit Bir Plağın Piezoelektrik Yamalar Yardımıyla Titreşim Kontrolü*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kouhi, S., Poshtan, J. ve Montazeri, A., (2007), "Feedforward and Feedback  $H_2$  Controllers for Active Vibration Control of a PZT Laminated Thin Plate", *International Conference on Intelligent and Advanced Systems 2007*.
- Lawver, A., (2001), "Thunder: A New Frontier in Research for Smart Materials", *Smart Materials Bulletin*, 2001:5-9.
- Leissa, A. W., (1969), *Vibration of Plates*, NASA SP-160, Washington, D.C..
- Leissa, A. W., (1973), "The Free Vibration of Rectangular Plates", *Journal of Sound and Vibration*, 31:257-293.
- Li, Y. Y., Cheng, L. ve Li, P., (2003), "Modeling and Vibration Control of a Plate Coupled with piezoelectric material", *Composite Structures*, 62:155-162.
- Morgan Electro Ceramics, (2007), *Piezo Ceramics Tutorial*, USA.
- Piefort, V. (2001), *Finite Element Modeling of Piezoelectric Active Structures*, Université Libre de Bruxelles, Brüksel.
- Piezo Kinetics Inc., (2007), *PKI Catalog*, USA.
- Proulx, B. ve Cheng, L., (2000), "Dynamic Analysis of Piezoceramic Actuation Effects on

Plate Vibrations”, *Thin-Wall Structures*, 37:147–162.

Qui, J. ve Haraguchi M., (2006), “Vibration Control of a Plate using a Self-sensing Piezoelectric Actuator and an Adaptive Control Approach”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17:661-669.

Qui. Z. C., Zhang, X. M., Wu, H. X. ve Zhang, H. H., (2007), “Optimal Placement and Active Vibration Control for Piezoelectric Smart Flexible Cantilever Plate”, *Journal of Sound and Vibration*, 301:521-543.

Qui. Z. C., Wu, H. X. ve Zhang, D., (2009), “Experimental Researches on Sliding Mode Active Vibration Control of Flexible Piezoelectric Cantilever Plate Integrated Gyroscope”, *Thin-Walled Structures*, 47:836-846.

Sevgi, H. E., (2009), *Piezoelektrik Yamalı Katmanlı Kompozit Bir Kirişin Titreşim Analizi ve Kontrolü*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Szillard, R., (1974), *Theories and Applications of Plate Analysis*, Prentice-Hall, New Jersey.

Tavakolpour, A. R., Mailah, M., Darus, I. Z. M. ve Tokhi, O., (2009), “Self-Learning Active Vibration Control of a Flexible Plate Structure with Piezoelectric Actuator”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18:516-532.

Tressler, J. F., Alkoy, S. ve Newham, R. E., (1995), “Piezoelectric Sensors and Sensor Materials”, *Journal of Electroceramics*, 4:277-272.

Tzou, H. S. ve Fu, H. Q., (1994), “A Study of Segmentation of Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators, Part I: Theoretical Analysis”, *Journal of Sound and Vibration*, 172:247-259.

Üzgür, A. E., (2006), *Zil Tipi Piezokompozit Transdüser Tasarımları ve Akustik Uygulamaları*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Wilson, J. R., (2002), “Active Aeroelastic Wing: A New/Old Twist on Flight”, *Aerospace America*, 40:34-37.

Yang, Y., Jin, Z. ve Soh, C. K., (2006), “Integrated Optimization of Control System for Smart Cylindrical Shells Using Modified GA”, *Journal of Aerospace Engineering*, 19:68-79.

Zhang, W., Qui, J. ve Tani, J., (2004), “Robust Vibration Control of a Plate Using Self-sensing Actuators of Piezoelectric Patches”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15:923-931.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi 31.10.1984

Doğum Yeri İstanbul

Lise 1999-2002 Özel Çınar Lisesi

Lisans 2003-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2008-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri  
Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim  
Dalı, Makine Teorisi ve Kontrol Programı

**Çalıştığı Kurum**

2009-devam ediyor

Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma  
Görevlisi