



SÜREKSİZLİK BÖLGESİNE SAHİP TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZİ

Gökmen ATLIHAN

Şubat 2010

DENİZLİ

**SÜREKSİZLİK BÖLGESİNE SAHİP TABAKALI KOMPOZİT
KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZİ**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Gökmen ATLIHAN

Danışman: Yard. Doç. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU

**Şubat 2010
DENİZLİ**

DOKTORA TEZİ ONAY FORMU

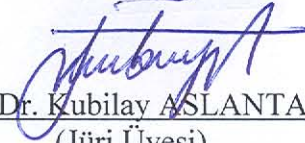
Gökmen ATLIHAN tarafından Yard. Doç. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU yönetiminde hazırlanan “SÜREKSİZLİK BÖLGESİNE SAHİP TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.



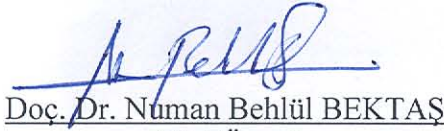
Yard. Doç. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU
Jüri Başkanı (Danışman)



Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU
(Jüri Üyesi)



Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
(Jüri Üyesi)



Doç. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ
(Jüri Üyesi)



Doç. Dr. Erdiñç Şahin ÇONKUR
(Jüri Üyesi)

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Halil KARAHAN
Müdür

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza

:



Öğrenci Adı Soyadı : Gökmen ATLIHAN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yapımında yardımlarını esirgemeyen ve en az benim kadar bu tezin oluşturulması için bana yön veren, danışmam hocam, Yard. Doç. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU' na çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında bana yönlendirmelerini eksik etmeyen tez izleme komitesi üyesi değerli hocam, Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU'ya ve değerli bilgilerini benden esirgemeyen, tez izleme komitesi hocam, Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmam sırasında maddi desteklerini 2008FBE008 nolu projesi ile sunan Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) ve Yonca-Onuk Anonim Şirketine teşekkür ederim. Tez çalışmamın deneysel kısmı için kompozit plakaları üreterek bana destek veren İzoreel Kompozit A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bana her zaman destek olan ve güler yüzünü benden hiç esirgemeyen eşim Müge ATLIHAN'a benim her zaman yanımda olan maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gökmen ATLIHAN

ÖZET

SÜREKSİZLİK BÖLGESİNE SAHİP TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZİ

ATLIHAN, Gökmen
Doktora Tezi, Makine Mühendisliği ABD
Tez Yöneticisi: Yard. Doç. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU

Şubat 2010, 108 Sayfa

Bu çalışmada, süreksizlik bölgesine sahip (delaminasyon) 16 tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekans değişimleri incelenmiştir. Çalışma analitik, nümerik ve deneysel olmak üzere üç kısımdan oluşmuştur. İlk kısım Bernoulli-Euler hipotezine dayanan delaminasyonlu ve delaminasyonsuz kompozit kirişlerin analitik çözümüdür. İkincisi sonlu elemanlar programı olan ANSYS ticari kodu kullanan nümerik çalışmadır. Son bölüm deneysel çalışmalardan oluşmuştur. Elde edilen değerlerin doğruluğunu anlamak için aynı koşullar altında sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Analitik sonuçta delaminasyonsuz kirişler için etkin elastisite modülü izotropik malzemelerin doğal frekans denklemlerinde elastisite modülünün yerine kullanılmıştır. Delaminasyonlu kirişler içinde etkin elastisite modülü kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için deney numuneleri üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda delaminasyonlu ve delaminasyonsuz kompozit kirişler için delaminasyonun yeri (kenar yada orta), büyüklüğü, sayısı (tekli yada çoklu)'na bağlı olarak frekans değişimleri araştırılmıştır. Ayrıca delaminasyonlu kompozit kirişin takviye açısının değişimi ($[30]_{16}$, $[45]_{16}$, $[60]_{16}$, $[90]_{16}$ ve $[0/90]_8$), değişik sınır şartlarının (bir ucu ankastre diğer ucu serbest, her iki ucu ankastre), nem ve sıcaklığın etkisi de incelenmiştir.

Sonuç olarak, tabakalı kompozit kirişin sınır koşullarının, delaminasyon yerinin tabaka açısının değişimi ile doğal frekansların değiştiği, çevresel sıcaklığın ve delaminasyon sayısının artması ile kirişin doğal frekansının azaldığı görülmüştür. Nemin ise tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekanslarına kayda değer bir etki yapmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal Frekans, Kompozit, Süreksizlik, Deneysel Analiz, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)

Yard. Doç. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU
Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU
Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
Doç. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ
Doç. Dr. Erdinç Şahin ÇONKUR

ABSTRACT**VIBRATION ANALYSIS OF THE DELAMINATED COMPOSITE BEAMS**

ATLIHAN, Gökmen

Ph. D. Thesis in Mechanical Engineering
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU

February 2010, 108 Pages

In this study, it was investigated natural frequency changes of the laminated composite beams consisted of 16 plies with delaminated region. Study was composed of three parts as analytical, numerical and experimental studies. The first one was analytical solutions of delaminated and non-delaminated composite beams based on Bernoulli-Euler hypotheses. The second one was a numerical study using commercial finite element software called ANSYS. And the last part was made of an experimental study. Also, to see the correctness of the values obtained, the solutions were compared with each others under the same conditions. In the analytical solution, effective elasticity moduli for non-delaminated beams were used instead of elasticity modulus in the natural frequency equation of the isotropic materials and effective elasticity moduli with delamination were also used for delaminated beams. Test specimens for experimental study were produced. In experimental study, changes in frequencies were investigated considering numbers (single or multiple), sizes and locations (middle or edge) of delaminations for delaminated and non-delaminated composite beams. It was also investigated effects of the stacking sequence ($[30^\circ]_{16}$, $[45^\circ]_{16}$, $[60^\circ]_{16}$, $[90^\circ]_{16}$ ve $[0^\circ/90^\circ]_8$), of various boundary conditions (cantilever-free, clamped-clamped), of humidity and temperature (environmental conditions) on the natural frequencies of the laminated composite beams.

It can be stated that natural frequenting of composite beams change with changes in beams' delamination number and environmental temperature. Beams' natural frequency decreases while beams' delamination number and environmental temperature increase. As for humidity, it was also observed that humidity effects natural frequency of laminated composite beams to a very small extent.

Keywords: Natural Frequency, Composite, Delaminated, Experimental Analysis, Finite Element Method (FEM)

Asist. Prof. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU
Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU
Assos. Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
Assos. Prof. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ
Assos. Prof. Dr. Erdinç Şahin ÇONKUR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Doktora Tezi Onay Formu	i
Bilimsel Etik Sayfası	ii
Teşekkür	iii
Özet	iv
Abstract	v
İçindekiler	vi
Şekiller Dizini	viii
Tablolar Dizini	xi
Simge ve Kısaltmalar Dizini	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
2.1. Tabakalı Kompozit Plakaların Titreşimi ile İlgili Çalışmalar.....	4
2.2. Tabakalı Kompozit Kirişlerin Titreşimi ile İlgili Çalışmalar.....	5
2.3. Tekli Delaminasyona Sahip Kompozit Kiriş ve Plakaların Titreşimi ile İlgili Çalışmalar	7
2.4. Çoklu Delaminasyona Sahip Kompozit Kiriş ve Plakaların Titreşimi ile İlgili Çalışmalar	10
2.5. Kiriş ve Plakalar için Deneysel Araştırmalar	14
2.6. Sıcaklık Etkisini İnceleyen Araştırmalar	17
3. KOMPOZİT MALZEME VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ	20
3.1. Kompozit Malzemeler	20
3.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	21
3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	22
3.3.1. Elyafli kompozitler	22
3.3.2. Parçacıklı kompozitler	23
3.3.3. Tabakalı kompozitler	23
3.3.4. Karma (Hibrid) kompozitler	23
3.4. Kompozit Malzeme Yapımında Kullanılan Temel Maddeler	23
3.5. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin (ETKM) Üretim Yöntemleri	24
3.6. El Yatırma Yöntemiyle Delaminasyonlu Tabakalı Kompozit Kirişin Üretimi ..	27
3.6.1. Örgülü delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişinin üretimi	27
3.6.2. Çeşitli oryantasyon açılarına sahip delaminasyonlu kompozit kirişin üretimi	32
4. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ	35
4.1. Kompozit Malzemelerin Makromekanığı	35

4.2. Tabakalı Kompozit Kirişlerin Elastisite (E_x) Modül Değişimi.....	47
4.3. Süreksizliye Sahip (Delaminasyon) Tabakalı Kompozit Kirişlerin Elastisite (E_d) Modül Değişimi.....	49
5. TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZLERİ	50
5.1. Analitik Çözüm	50
5.2. Nümerik Analiz (Ansys)	60
5.2.1. Delaminasyonlu kompozit kirişin ansys’de oluşturulması	62
5.3. Kompozit Malzemelerin Titreşimlerinin Deneysel Analizi.....	77
5.3.1. Sonlu elemanlar analizden veya deneysel analizden oluşan hatalar	80
5.3.1.1. Sonlu elemanlar analizinden kaynaklanan hatalar.....	81
5.3.1.1.1. Sınır şartlarının tam olarak belirlenmemesi.....	81
5.3.1.1.2. Kontak eleman kullanılmamasından kaynaklanan hatalar.....	82
5.3.1.2. Deneysel analizden kaynaklanan hatalar	83
5.3.1.2.1. Deney düzeneğinde sınır şartlarının tam olarak verilememesi	83
5.3.1.2.2. Darbenin kiriş eksenine tam gelmemesinden kaynaklanan hatalar.....	84
5.3.1.2.3. Ölçümün stabilite durumu olmadan alınması.....	84
5.4. Çevresel Koşulların Titreşime Etkileri.....	91
5.4.1. Nemin titreşime etkisi.....	91
5.4.2. Sıcaklığın titreşime etkisi.....	92
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	96
6.1. Sonuçlar.....	96
6.2. Öneriler	101
7. KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1: a) Orta ve b) kenar delaminasyonlu kompozit kiriş.....	2
Şekil 3.1: Kompozit malzemelerin kullanım alanları	21
Şekil 3.2: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	22
Şekil 3.3: El yatırma yöntemi.....	25
Şekil 3.4: Torba kalıplama yöntemi	25
Şekil 3.5: Püskürtme yöntemi	26
Şekil 3.6: Elyaf sarma yöntemi	26
Şekil 3.7: Profil çekme yöntemi.....	27
Şekil 3.8: Cam elyaf.....	28
Şekil 3.9: Kalıp	28
Şekil 3.10: Katalizör	29
Şekil 3.11: Teflon film	29
Şekil 3.12: Pres	30
Şekil 3.13: Delaminasyonlu tabakalı kompozit plaka.....	30
Şekil 3.14: Delaminasyonlu tabakalı kompozit plakanın kesimi	31
Şekil 3.15: Delaminasyonlu tabakalı kompozit kiriş	31
Şekil 3.16: Cam elyaf kumaş rulosu	32
Şekil 3.17: Cam elyaf kumaşının açılı kesimi.....	33
Şekil 3.18: Epoksi reçineye katalizör ilavesi	33
Şekil 3.19: Rezistanslı hidrolik pres	34
Şekil 3.20: Tabakalı kompozit plaka.....	34
Şekil 4.1: Kompozit malzemelerin yön doğrultuları.....	44
Şekil 4.2: Tabakalı kompozit kiriş	47
Şekil 4.3: Tabakalı kompozit kirişin eğilmesi	48
Şekil 5.1: Basit harmonik hareket.....	51
Şekil 5.2: Kirişteki kesme kuvveti eğilme momenti gösterimleri.....	51
Şekil 5.3: Tabakalı kompozit kiriş	54
Şekil 5.4: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 30°).....	56
Şekil 5.5: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 45°).....	56
Şekil 5.6: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 60°).....	57
Şekil 5.7: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 90°).....	57
Şekil 5.8: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 0°/90°).....	58
Şekil 5.9: Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişlerin analitik, nümerik ve deneysel olarak karşılaştırılması (30°)	59

Şekil 5.10: Yapısal Tercih Seçimi.....	61
Şekil 5.11: Shell 99 elementinin geometrisi	61
Şekil 5.12: Kompozit kirişin düğüm noktaları.....	62
Şekil 5.13: Kompozit kirişin düğüm noktalarının girilmesi.....	63
Şekil 5.14: Düğüm noktalarından çizgi oluşturulması.....	63
Şekil 5.15: Alanların oluşturulması	64
Şekil 5.16: Tabaka açılarının oluşturulması.....	64
Şekil 5.17: Tabakalı kompozit kirişin meshlenmesi	65
Şekil 5.18: Tabakalı kompozit kirişin sınır şartlarının verilmesi.....	66
Şekil 5.19: Kontak elemanın tanımlanması	66
Şekil 5.20: Kontak eleman	67
Şekil 5.21: Analiz seçimi	67
Şekil 5.22: Modal analiz tipi ve mod sayısı seçimi.....	68
Şekil 5.23: İterasyon ayarı.....	68
Şekil 5.24: Tabakalı kompozit kirişin çözümü	69
Şekil 5.25: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 30°)	70
Şekil 5.26: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 45°)	71
Şekil 5.27: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 60°)	71
Şekil 5.28: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 90°)	72
Şekil 5.29: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 0°/90°)	72
Şekil 5.30: Ankastre-ankastre koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 30°)	73
Şekil 5.31: Ankastre-ankastre koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 45°)	74
Şekil 5.32: Ankastre-ankastre koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 60°)	74
Şekil 5.33: Ankastre-ankastre koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 90°)	75
Şekil 5.34: Ankastre-ankastre koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 0°/90°).....	75
Şekil 5.35: Tabakalı kompozit kirişin deney mekanizması	77
Şekil 5.36: İvme ölçer	78
Şekil 5.37: Amplifier.....	78
Şekil 5.38: Bağlantı kartı	79
Şekil 5.39: Titreşim grafiği	80
Şekil 5.40: Bir tarafı tutulu bir tarafı serbest kiriş	81
Şekil 5.41: Her iki tarafı tutulu kiriş	81
Şekil 5.42: Basit mesnetli kiriş	81
Şekil 5.43: a) Kontak malzeme kullanılmaması durumu, b) Kontak malzeme kullanılması durumu.....	82
Şekil 5.44: Sınır şartlarının tam olarak verilmemesi.....	83
Şekil 5.45: Darbenin eksene tam olarak gelmemesi	84

Şekil 5.46: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 30°).....	85
Şekil 5.47: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 45°).....	85
Şekil 5.48: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 60°).....	86
Şekil 5.49: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 90°).....	86
Şekil 5.50: Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 0°/90°).....	87
Şekil 5.51: Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 30°)	88
Şekil 5.52: Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 45°)	88
Şekil 5.53: Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 60°)	89
Şekil 5.54: Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 90°)	89
Şekil 5.55: Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 0°/90°).....	90
Şekil 5.56: Hassas tartı.....	91
Şekil 5.57: Su tankı	92
Şekil 5.58: Sıcaklık kontrollü fırın.....	93
Şekil 5.59: Testo845 lazer termometresi ve probu	93
Şekil 5.60: Lazer termometresinin ayarlanması.....	94
Şekil 5.61: Lazer termometresi ile ısı ölçümü	94
Şekil 5.62: Kompozit kirişlerin sıcaklıkla değişim grafiği	95
Şekil 6.1: Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre 30°)	97
Şekil 6.2: Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre 45°)	97
Şekil 6.3: Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre 0°/90°)	98
Şekil 6.4: Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre-ankastre 30°).....	98
Şekil 6.5: Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre-ankastre 45°).....	99
Şekil 6.6: Kirişteki delaminasyonun yerinin belirlenmesi	99

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1: Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları.....	21
Tablo 3.2: Elyaf ve epoksinin mekanik özellikleri	32
Tablo 5.1: Kirişlerin Sınır Şartları (Springer ve Kollar 2003).....	53
Tablo 5.2: Kirişlerin Mekanik Özellikleri (Hu 2002)	54
Tablo 5.3: Ankastre kirişin doğal frekans değişimlerinin karşılaştırılması	55

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	Delaminasyon uzunluğu (mm)
L	Kirişin boyu (mm)
h	Kirişin kalınlığı (mm)
b	Kirişin eni (mm)
σ_{kopma}	Kopma gerilmesi (N/mm ²)
E	Elastisite modülü (N/mm ²)
ε_{kopma}	Kopma uzaması
ρ_m	Matrisin yoğunluğu (g/cm ³)
ρ_f	Fiberin yoğunluğu (g/cm ³)
ν	Poission oranı
σ_{ij}	Gerilme tansörü (N/mm ²)
ε_{kl}	Şekil değiştirme tansörü
C_{ijkl}	Elastik rijitlik tansörü
S_{ijkl}	Elastik gevşeklik tansörü
τ	Kayma gerilmesi (N/mm ²)
Q_{ij}	İndirgenmiş rijitlik matrisi
T_{ij}	Transformasyon tansörü
\bar{Q}_{ij}	Transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisi
E_x	x doğrultusundaki elastisite modülü (N/mm ²)
E_y	y doğrultusundaki elastisite modülü (N/mm ²)
M	Moment (Nmm)
r	Eğrilik yarı çapı (mm)
z	Tabaka kalınlığı (mm)
ϕ	Eğrilik açısı
N	Tabaka sayısı
E_f	Kirişin etkin elastisite modülü (N/mm ²)
I	Atalet momenti (mm ³)
E_d	Delaminasyonlu kirişin elastisite modülü (N/mm ²)
E_{zd}	Delaminasyonlu tabakadaki elastisite modülü (N/mm ²)
m	Delaminasyon sayısı
A_d	Delaminasyonun kapladığı alan (mm ²)
A_t	Toplam alan (mm ²)
ω	Doğal frekans (Hz)

V	Kesme kuvveti (N)
$p(x)$	Kirişin birim boyuna etki eden yük (N/mm)
t	Zaman (sn)
A_n	Kirişin genliği
n	Mod sayısı
G	Kayma modülü (N/mm ²)
a/L	Delaminasyon oranı
SEM	Sonlu elemanlar metodu
\bar{n}	Örnek sayısı
n_p	Periyot sayısı
f	Frekans (Hz)
Rot	Rotasyon
u	Uzama

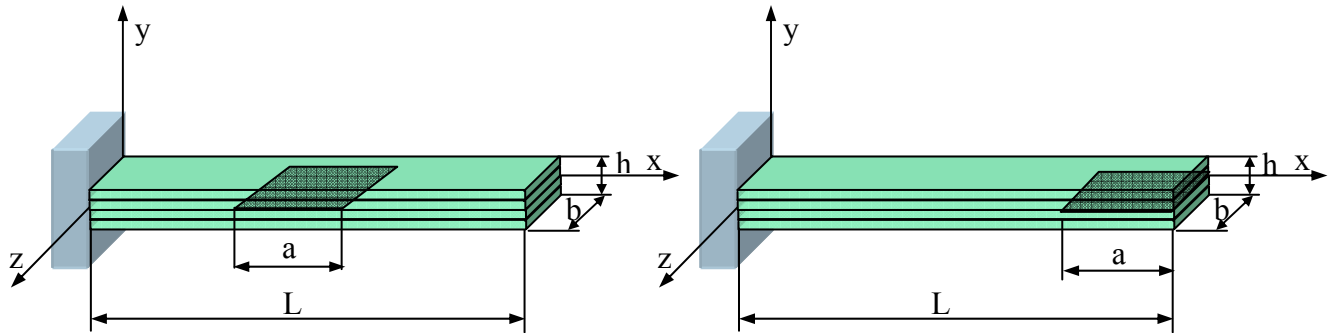
1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemet değerlerine sahip olduklarından geniş bir kullanım alanlarına sahiptirler. Kompozit malzemelerin kullanım alanları özellikle uzay, gemi, ticari ve binek arabalar gibi endüstriyel ve savunma sanayinde çok sık olarak kullanılmaktadırlar. Metal yapılarla karşılaştırıldığında, ağırlık oranına göre yüksek mukavemeti, yüksek rijitliği, mükemmel yorulma direnci ve uzun süre dayanıklılığı onların en önemli özelliklerindedir. Kompozit malzemeler, matris ve fiberlerin birleştirilmesiyle oluşurlar. Fiberler yükü taşıyıp rijitliği sağlarken matris de yükü fiberlere iletir.

Kompozit malzemelerin bu özellikleri beğenilmesine rağmen, kompozit malzemeler yapısal bütünlüklerini önemli ölçüde azaltan hasar ve kusura da büyük oranda eğilimlidirler. Tabakalı kompozit yapının tabakaları arasındaki zayıf mukavemetinden dolayı oluşan hasarlar genellikle tabakalar arası kırılmalara yani süreksizlik bölgesinin (delaminasyonun) oluşmasına sebep olur. Delaminasyonlar ya eksik ıslatma (reçinelerin az sürülmesi) ve tabakalar arası hava keseciklerinin oluşumu gibi hatalı imalat işlemi ya da yabancı bir cisim çarpması (darbe) sonucu oluşan etkenlerden oluşabilir.

Böyle bir delaminasyon hasarının tabakaların mukavemetinde ve rijitliğinde azalmaya sebep olduğu bilinmektedir. Bunun sonucu olarak delaminasyonların titreşim karakteristiklerinde bir değişime sebep oldukları da bilinmektedir. Delaminasyonlu tabakalar genellikle, delaminasyonun sayısı, yeri ve büyüklüğüne bağlı olarak yeni titreşim modları ve frekansları sergilemektedir. Özellikle, delaminasyonlar doğal frekansı azaltmaktadır ki, bu düşük frekans çalışma frekansına eşit olması durumunda rezonansa sebep olur ve yapının hasara uğramasına yol açar. Bu yüzden dinamik bir ortamda mod şekilleri gibi frekanstaki değişimleri de tahmin edebilmemiz bir zorunluluktur.

Genellikle araştırmacılar süreksizlik (delaminasyon) bölgelerini orta ve kenar olarak ikiye ayırmışlardır. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi delaminasyon genişliği b , delaminasyon uzunluğu a ve kiriş uzunluğu L olarak verilmiştir. Kiriş veya plakanın a/L oranını arttırarak ($a/L=0,1$; $a/L=0,2$ $a/L=0,9$) doğal frekans değişimlerini incelemişlerdir.



Şekil 1.1 a) Orta ve b) kenar delaminasyonlu kompozit kiriş

İncelemeler genellikle analitik ve nümerik çalışmalarla olmuştur deneysel araştırmalar ise oldukça azdır. Nümerik çalışmalarda genellikle ansys, abaqus, nasran gibi sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanan ticari programlar kullanılmıştır. Analitik çalışmalardaki kiriş çözümlerinde ise genellikle Euler – Bernoulli kiriş teoremi (Klasik kiriş teorisi) ya da Timoshenko kiriş teoremi kabulleri yapılarak doğal frekanslar bulunmuştur. Deneysel çalışmalarda ise genellikle ivme ölçer ya da laser deplasman ölçerden alınan sinyallerin bilgisayar ortamında oluşturulan program vasıtasıyla doğal frekansların bulunmasıdır. Araştırmacıların delaminasyonlarla ilgili çalışmalarını tek delaminasyona sahip olan kirişleri inceleyenler ve çoklu delaminasyonları inceleyenler olarak iki gruba ayırabiliriz. Tek delaminasyonları inceleyenleri de kendi arasında kenar delaminasyonları (Zak vd 2000) inceleyenler ve orta delaminasyonları (Brandinelli ve Massabo 2002) inceleyenler olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

Bu çalışmanın amacı, bir ucu serbest diğer ucu tutulu ve her iki ucu tutulu sınır şartlarına sahip olan delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekans değişimlerini analitik, nümerik ve deneysel olarak araştırmak ayrıca değişik çevresel koşullar altında (nem ve sıcaklık) kirişlerin doğal frekans davranışlarını inceleyerek literatürdeki boşluğu doldurmaktır. Çalışmada delaminasyon oranı (a/L) arttırılarak

kirişlerdeki doğal frekansın değişimleri analitik, nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Öncelikle delaminasyonsuz girişler ele alınmış analitik, nümerik ve deneysel çözüm yöntemleriyle girişlerin doğal frekansları bulunmuştur. Analitik çözümde giriş Euler – Bernoulli girişi olarak kabul edilmiş ve Hamilton prensibi kullanılarak doğal frekans hesaplanmıştır. Nümerik çözümde ise sonlu elemanlar yöntemini kullanan Ansys 10 kullanılmıştır. Deneysel olarak aynı sınır şartları oluşturularak girişin deneyleri yapılmıştır. Çalışmada delaminasyonsuz girişin nümerik, analitik ve deneysel sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Tezin ikinci kısmında delaminasyonlu girişler ele alınmıştır. Tekli kenar ve tekli orta delaminasyonlarla, çoklu kenar ve çoklu orta delaminasyonlu girişler sonlu elemanlarla modellenip nümerik olarak doğal frekans değerleri bulunmuştur. Ayrıca tekli ve çoklu orta delaminasyonlar analitik olarak bulunmuştur. Aynı sınır şartlarında tekli kenar ve tekli orta delaminasyonlarla, çoklu kenar ve çoklu orta delaminasyonlu girişlerin deneyleri yapılmıştır. Nümerik, analitik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Literatür araştırmalarında nemin ve sıcaklığın, tekli ve çoklu delaminasyona sahip girişin doğal frekanslarına etkisi ile ilgili araştırmalara rastlanmamıştır. Bu yüzden bu çalışmada ayrıca hidrotermal ve nemin etkileride araştırılmış ve grafiksel olarak sunulmuştur. Girişteki delaminasyonun yerinin tahmini olarak tayin edilebilmesi için sonlu elemanlar ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlar grafik haline getirilmiştir. Bu grafikte girişteki delaminasyonun yeri ve büyüklüğü hakkında bilgi sahibi olup seri üretim yapan bir işletmede büyük maddi kayıplar önlenmiş olacaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde tabakalı kompozit plak ve kirişlerin titreşimleri ile ilgili çalışmalar izotropik malzemeler için oldukça fazla bulunmaktadır. Araştırmacılar kompozit malzemeler için genellikle tabakalı kiriş ve plakaların doğal frekans değişimlerinin tabakanın açılarının, sınır şartlarının, süreksizlik bölgelerinin (delaminasyon) değişimi ile değiştiğini göstermişlerdir. Kiriş ve plakların doğal frekans değerlerini sınır şartlarının da oldukça çok etkilediğini göstermişlerdir. Bu yüzden araştırmacılar gerçek sınır şartlarını bulmak için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Doğal frekans değişimlerini etkileyen bir başka faktör ise tabaka açılarının sıralanışıdır. Son on yıla bakıldığında ise araştırmacılar doğal frekans değişimlerinin delaminasyon etkisinde nasıl değiştiğini açıklayan çalışmalar üstünde yoğunlaşmışlardır. Son makaleler genellikle delaminasyonların yerinin, sayısının ve büyüklüğünün kirişlere ya da plaklara nasıl etkilediğine yöneliktir. Araştırmacılar çalışmalarında tekli ve çoklu delaminasyonları analitik, nümerik ve deneysel olarak incelemeler yapmışlardır. Son birkaç yılda ise araştırmalar çevre şartlarının (nem, sıcaklık gibi) doğal frekanslara nasıl etkilediğine yönelik olarak sürmektedir.

2.1. Tabakalı Kompozit Plakaların Titreşimi ile İlgili Çalışmalar

Liang-Bo (1989) sonlu elemanlar metodu kullanarak tabakalı kompozit plakaların eğilme ve titreşim analizlerini yapmıştır. Kullandığı çözüm yönteminde lokal çarpılmaların ve kesme kuvvetinin etkilerini içeren bir yöntem sunmuştur. Sunduğu teorik hesaplamada tabakalı kompozit plakanın serbestlik derecesini azaltarak çözüm kolaylığını göstermiştir.

Kabir (2004) dikdörtgen geometriye sahip tabakalı plaklar için analitik yaklaşım sunmuştur. Kirchhoff hipotezine benzeyen klasik tabaka teorisi kullanarak plakanın deformasyon karakteristiklerini bulmuştur. Çözüm fonksiyonu Fourier serisinden elde ederek plağın mod şekillerinin belirlemiştir. Nümerik sonuçları tek dereceli kayma

deformasyon teorisi ve sonlu elemanlar paket programlarıyla (Ansys ve Nisa) karşılaştırmıştır.

Demasi (2006) çok tabakalı plakaların titreşimlerini incelemiştir. Sunduğu üç boyutlu sonlu elemanlar metodunu (SEM) Nastran ve literatürdeki veriler ile karşılaştırmıştır. SEM ile oluşturduğu denklem sisteminde deplasman ve kayma gerilmesini de hesaba katmış ve diğer ticari üç boyutlu sonlu elemanlar modellerine göre daha kullanışlı olduğunu göstermiştir.

Avavcı (2007) kesme kuvvetinin etkisini plakanın kalınlığı boyunca hiperbolik bir fonksiyon olarak kabul ederek ortotropik tabakalı plakanın serbest titreşimlerini, burkulmasını ve eğilmesini analiz etmiştir. Plağın sınır koşullarını belirlemede Hamilton prensibini kullanırken Navier metodunu da tabakalı plağın analitik çözümü için kullanmıştır. Burkulma yükünü ve plağın temel frekanslarını özdeğer problemi olarak çözerek bulmuştur. Sunduğu teoriyle hiperbolik kayma deformasyon teorisiyle plağın eğilmesini, burkulmasını ve serbest titreşim değerlerinin doğru olarak bulunabileceğini göstermiştir.

2.2. Tabakalı Kompozit Kirişlerin Titreşimi ile İlgili Çalışmalar

Rao vd (2001) yüksek dereceli karışım teorisini kullanarak sandviç ve tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekanslarını hesaplamak için analitik bir yöntem sunmuşlardır. Analitik yöntemde her tabakanın rijitlik ve kütle matrislerini hesaplamışlardır. Ayrıca her tabakanın iki boyutlu düzlem gerilme ve ortotropik olduğunu varsaymışlardır. Analitik sonuçlarını çeşitli teoremlerle karşılaştırmışlardır.

Chen vd (2004) diferansiyel quadrature metodu (DQM) kullanarak tabakalı kompozit kirişlerin titreşim analizlerini yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları literatürde var olan deneysel ve analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çok tabakalı yapılarda diferansiyel quadrature metodu kullanılarak kirişlerin serbest titreşimlerinin rahatlıkla bulunabileceğini göstermişlerdir.

Banerjee ve Sobey (2005) üç tabakalı sandviç bir kirişin dinamik rijitlik teorisini kullanarak kirişin serbest titreşim karakteristiğini araştırmışlardır. Bu teori kirişin

merkez tabakasını bir Timoshenko kirişi gibi, üst ve alt tabakaları ise Rayleigh kirişi gibi davrandığını düşünmüşlerdir. Sandviç kirişlerin diferansiyel hareket denklemleri kirişin her tabakanın özelliği aynı olmadığından dolayı Hamilton prensibini kullanmışlardır. Kirişin tepkisi için sınır koşulları hazırlanıp sandviç kirişin ucuna yük vermişler bu verilen harmonik yüklerden kirişten çeşitli harmonik cevaplar alınmış ve bu durum için dinamik rijitlik matrisi türeterek formülüne etmişlerdir. Sunulan bazı problemlerde mod şekilleri ve doğal frekanslar Wittrick-Williams algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca simetrik sandviç kirişin önemli ölçüde hasar durumunu da araştırmışlardır.

Sarıkanat vd (2006) basit mesnetli kalın kompozit kirişlerin doğal frekanslarının aksenal yükün etkisini araştırmak için sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Kullandıkları elementin malzeme özellikleri iki farklı ortalama değer metodu (aritmetik ve ortalama ağırlık) ile hesaplamışlardır. Bilgisayar programı vasıtasıyla aksenal yükün kirişin doğal frekanslarına etkilerini analiz etmek için kullanmışlardır. Sonuç olarak aritmetik ortalama metodunun ağırlık ortalama metoduna göre analitik sonuçlara daha yakın olduğunu göstermişlerdir.

Aydogdu ve Taşkın (2007) fonksiyonel derecelendirilmiş (FG) basit mesnetli kirişin serbest titreşim analizini Hamilton prensibini uygulayarak yapmışlardır. Navier çözüm metodunu frekansları elde etmek için kullanmışlardır. Kirişin titreşim analizinde yüksek dereceden kayma deformasyon teorisini ve klasik kiriş teorisini kullanmışlardır. Bu çalışmada sundukları sonuçları Ritz ve sonlu elemanlar metodu gibi yaklaşık metodların doğruluğunu kontrol etmek için kullanmışlardır.

Topçu vd (2008) tabakalı kompozit kirişi Euler-Bernoulli kirişi olarak düşünerek doğal frekans değerlerini elde etmişlerdir. Yaptıkları araştırmalarda tabakalı kompozit kirişin kütlesini ya da geometrisini değiştirmeden kirişin doğal frekans değerlerinin kirişin tabaka açılarının değişimi ile değiştirilebileceğini göstermişlerdir. Buldukları frekans değerlerini sonlu elemanlar yöntemi olan Ansys programından elde ettikleri değerlerle karşılaştırmışlardır.

Atlıhan vd (2009a) tabakalı kompozit kirişlerin tabaka düzeninin kirişlerin doğal frekanslarına etkilerini diferansiyel quadrature metodu (differential quadrature method

DQM) kullanarak belirlemişlerdir. Tabakalı kompozit kirişi Euler-Bernoulli kirişi olarak kabul ederek titreşim analizlerini yapmışlardır. Nümerik çalışmaları sonlu elemanlar yöntemi (Ansys) ile yapılmıştır. Elde ettikleri sonuçları literatürde var olan deneysel ve analitik sonuçlarla da karşılaştırmışlardır.

Atlıhan vd (2009b) tabakalı kompozit kirişin ağırlığını yada geometrisini değiştirmeden kirişin tabaka açılarını değiştirerek kirişin doğal frekans değerlerinin ve burkulma yükünün değiştirilebileceğini sundukları çalışmada göstermişlerdir. Tabakalı kompozit kirişi Euler-Bernoulli kirişi olarak kabul ederek titreşim ve burkulma analizlerini yapmışlardır. Tabakalı kompozit kirişin sınır şartlarını GDQM (genelleştirilmiş diferansiyel quadrature metodu) kullanarak tespit etmişlerdir.

Aydogdu (2009) Eringen'in genelleştirilmiş lokal olmayan kiriş teorisini, nanokirişlerin serbest titreşimi, burkulması ve eğilmesi analizinde kullanmıştır. Lokal olmayan yapısal eşitlikleri yaptığı analizlerde kullanmıştır. Kullandığı eşitlikleri türettikten sonra Euler-Bernoulli, Timoshenko, Reddy gibi çeşitli kiriş teoremlerinde kullanmıştır.

Kıral (2009) farklı sınır koşulları altında tabakalı simetrik kompozit kirişlerin dinamiği üzerine çalışmıştır. Kirişlerin dinamik cevabını elde etmek için Newmark integrasyon metodunu klasik tabaka teorisine dayanan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile oluşturmuştur. Matlab'ta yazılan bilgisayar verilerini dinamik analiz için kullanmıştır.

2.3. Tekli Delaminasyona Sahip Kompozit Kiriş ve Plakaların Titreşimi ile İlgili Çalışmalar

Williams ve Addesio (1997) çalışmalarında tabakalı plakalar için farklı tabaka analizine dayanan yüksek derece teorisini (Higher-order theory) sunmuşlardır. Plakanın tabakaları arasındaki delaminasyonların etkilerini de içeren denklemleri kullanmışlardır. Plağın her tabakasındaki genelleştirilmiş yer değiştirme eşitliklerini modellerinde kullanmışlardır. Geliştirdikleri teoriyle kalın ya da ince tabakalı plakaların analizi için kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Yapı içindeki delaminasyonun büyüklüğünü ve başlangıç yerini tahmin etmede bu teoriyi kullanmışlardır. Ayrıca araştırmacılar

dinamik yük koşulları altındaki kompozit yapılarıdaki delaminasyon etkilerini genelleştirilmiş plak teorisini dikkate alarak kullanmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile analitik çözümü karşılaştırmışlar ve aralarında yaklaşık olarak %8 fark olduğunu görmüşlerdir.

Adam vd (1997) delaminasyona sahip iki tabakalı elastik kirişlerin titreşimlerini başlangıç-sınır değer problemi olarak ele alıp çözmüşlerdir. Çözümlerinde Euler-Bernoulli hipotezini kullanarak, ayrı ayrı her tabakanın tutulduğunu varsaymışlardır. Çözümlerinde ara yüzeyde oluşan kesme kuvvetlerini hesaba katmışlardır. Nümerik örnekleri düzenli ve düzensiz hareket altında basit mesnetli kirişler için vermişlerdir. Çözümlerinin klasik modal analizi yaklaşımı ile karşılaştırdıklarında daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Yang vd (1998) delaminasyonlu ve delaminasyonsuz kirişlerin doğal frekanslarını nümerik olarak incelemişlerdir. Nümerik araştırmalarda Ansys paket programını kullanmışlardır. Kompozit kirişin ilk dört modunu incelemişler ve literatürdeki deneysel sonuçlarla kendi sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Luo ve Hanagud (2000) delaminasyonlu kompozit kirişler için bir model sunmuşlardır. Titreşim denklemlerinde, atalet momenti ve kesme kuvvetinin etkilerini hesaba alan titreşim denklemleri oluşturmuşlardır. Oluşturdukları denklemlerle delaminasyonlu kirişi analitik olarak çözmüşlerdir. Diğer araştırmacıların deneysel ve analitik olarak yaptıkları çalışmalarla kendi oluşturdukları modeli karşılaştırmışlardır. Deneysel verilerle kendi oluşturdukları modelin diğer analitik modellerden daha yakın olduğunu göstermişlerdir.

Hu vd (2002) çalışmalarında delaminasyonlu kompozit kirişlerin titreşim analizi için iki tane sonlu elemanlar modeli (SEM) oluşturmuşlardır. Birinci modelde kirişin elastikliğini sıfır olarak alarak buna serbest (free) model demişler, ikinci modelde kirişin elastikliğini sonsuz alarak buna da zorlanmış (constrained) model demişlerdir. Her iki model için literatürde var olan deneysel ve analitik çözümler ile kendi modellerini karşılaştırmışlardır. Delaminasyon tabakalı kompozit kirişin ortasındayken kirişin eğriliğinin aniden ve çok aşırı bir değişim gösterdiğini çalışmalarında sunmuşlardır.

Radu ve Chattopadhyay (2002) yüksek dereceli deformasyon teorisini dinamik yüke maruz delaminasyonlu kompozit plakaların dinamik kararsızlığını araştırmak için kullanmışlardır. Atalet momenti ve kesme kuvvetinin etkilerini sundukları analitik eşitliklerde hesaplamışlardır. Sundukları teoride delaminasyonun alt ve üst alanları bağımsız yer değiştirme yapabileceğini göstermişlerdir. Delaminasyonu transformasyon matris tekniğini kullanarak modellemişlerdir. Teorilerinin geçerliliğini kontrol etmek için NASRAN programı ve literatürde yer alan deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Plakanın kritik burkulma yükü ve doğal frekans değerleri delaminasyon uzunluğunun artması ile düştüğünü göstermişlerdir.

Kumar ve Shrivastava (2005) merkezi dikdörtgen şeklinde çıkarılmış kalın kare kompozit plakanın serbest titreşimini Hamilton prensibini kullanarak hesaplamışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi olarak da yüksek dereceli kayma deformasyon teorisini kullanmışlardır. Plaka tabakasının doğal frekansına dikdörtgensel şekilde kesilmiş geometrinin etkisini tam olarak anlamak için bu şekli seçmişlerdir. Kare şeklindeki kalın tabakanın ortasından dikdörtgensel bir şeklin kesilip çıkarılmasıyla doğal frekansın nasıl değiştiği ve bu kesilen yerin etrafında oluşturulan delaminasyonlu bölgenin doğal frekanslara etkilerini göstermişlerdir. Ayrıca bu modelde yüksek dereceli kesme deformasyon teorisi ile tek dereceli kayma deformasyon teorisini karşılaştırmışlardır.

Chakraborty (2005) doğal frekans verilerini kullanarak, kompozit tabakadaki delaminasyonun yerini, büyüklüğünü ve şeklini tahmini olarak bulmak için yapay sinir ağ yöntemini kullanmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeliyle $[0]_{20}$ tabakalı grafit epoxy plakanın tam ortasına delaminasyon oluşturmuştur. Çeşitli delaminasyonlara sahip (yeri, büyüklüğü ve şekli ayrı) yüzlerce sonlu elemanlar modeli oluşturularak 10 moda kadar binlerce doğal frekans değerleri elde etmiştir. Bu frekans değerlerini yapay sinir ağı yönteminde kullanarak frekansların yerini bulmaya çalışmıştır. Böylelikle optimum bir ağ yapısı elde ederek bilinmeyen verileri de (delaminasyon yeri, büyüklüğü) etkili bir şekilde bulmuştur.

Palacz vd (2005) on iki tabakalı ankastre kompozit kirişlerin delaminasyonunu incelemek için sonlu elemanlar modeli sunmuşlardır. İlk olarak delaminasyonlu kirişin gerçek dinamik rijitlik matrisini elde etmeye çalışmışlardır. Daha sonra delaminasyonlu

kirişin Fast Fourier Transform'un (FFT) hız-zaman grafiği dalga oluşum biçiminden delaminasyonları analiz etmeye çalışmışlardır. Delaminasyonların dalga oluşum biçimlerine etkilerini göstermeye çalışmışlardır. Çalışmalarında kompozit malzemeler de dalga oluşumunun analizi için tek dereceli kayma deformasyon teorisinin (First order shear demormation theory) kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Della ve Shu (2007) boyutsuz parametreleri (eksenel rijitlik oranı ve eğilme rijitliği oranı) tek delaminasyona sahip çift malzemeli kirişlerin titreşimlerini bulmak için kullanmıştır. Bu parametrelerin kullanımı delaminasyona sahip kirişin titreşimini delaminasyonlu tabakaların eğilme rijitliğinin ve axial rijitliğinin etkilerini daha iyi anlayabilmek için sunmuşlardır. Hem serbest mod (free mode) hem de zorlanmış (constained) mod modellerini delaminasyonlu kirişlerin titreşim değerlerini bulmak için kullanmışlardır.

Ramtekkar (2009) delaminasyonlu tabakalı kirişlerin serbest titreşimlerini analiz etmek için 2-D düzlem gerilme durumun için sonlu elemanlar modeli kullanmıştır. Kontak arayüz model (contact-interface model) ve zorlanmamış ara yüz model (unconstrained-interface model) olmak üzere iki model sunarak delaminasyonlu kirişlerin mod şekli ve frekanslarını hesaplamıştır. Kirişteki delaminasyonlar kirişin orta düzleminde ve düzlemin sonunda olduğu kabul edilerek frekanslar bulunmuş ve literatürde var olan verilerle karşılaştırılmıştır. Contact-interface model unconstrained-interface modele göre daha doğru değerler elde edildiğini göstermiştir.

Alnefaie (2009) delaminasyonlu kompozit plakların dinamik analizi için üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar modeli (SEM) geliştirmiştir. Plağın doğal frekans ve mod deplasmanları farklı delaminasyonlar için hesaplamıştır. Sonlu elemanlar modelini ABAQUS sonlu elemanlar programıyla yapmıştır. Sunduğu modelle plağın delaminasyon yerini tespit etmek için kullanılabileceğini göstermiştir.

2.4. Çoklu Delaminasyona Sahip Kompozit Kiriş ve Plakaların Titreşimi ile İlgili Çalışmalar

Parhi vd (2000) keyfi yerleştirilmiş çoklu delaminasyona sahip çok tabakalı kompozit plakanın dinamik analizi için basit çoklu delaminasyon modeli

geliştirmişlerdir. Herhangi bir tabakanın deplasmanları yine aynı tabakanın rijitliğini bulmak için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Kayma deformasyon teorisi varsayılarak her tabaka için sekiz düğümlü izoparametrik quadratic elemanlar türetilerek sonlu elemanlar dinamik denklemleri oluşturmuşlardır. Bu parametrik çalışmaları tekli ve çoklu delaminasyonların dinamik davranışlarını araştırmak için kullanmışlar ve literatürdeki sonuçlar ile kendi sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Lee (2000) delaminasyonlu tabakalı kirişin serbest titreşimlerini analizi akıllı tabaka teorisi (layerwise theory) kullanarak bulmuştur. Kirişin hareket denklemlerini Hamilton prensibinden türetmiştir. Nümerik sonuçları sonlu elemanlar yönteminden elde etmiştir. Delaminasyonlu kirişin titreşim frekanslarının delaminasyonun sayısının, büyüklüğünün, yerinin ve tabaka dizilişinin etkilerini bulmuştur. Akıllı tabaka yaklaşımının delaminasyonlu kompozitlerin titreşim analizi için yeterli olduğunu göstermiştir.

Lee vd (2003) çoklu delaminasyona sahip kompozit kirişin serbest titreşim analizini (yanal ve boylsal) yapmak için analitik formülasyon önermişlerdir. Çoklu delaminasyonun, kompozit kirişin dinamik karakteristiklerine etkisini araştırmak için çoklu delaminasyoları sabit ve düzgün eğildiklerini farz etmişlerdir. Çoklu delaminasyonlu kompozit kirişin genişlik boyunca serbest titreşim karakteristiklerini klasik kiriş teorisini kullanarak analitik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının deneysel kısmı tek delaminasyonlu durum için yapılmıştır. Çalışmanın nümerik kısmında ise sonlu elemanlar metodu ile yapılmıştır, bunun için ANSYS paket programını kullanmışlardır. Çalışmalarında sadece orta delaminasyonun etkilerini araştırmış ve her üç durum ve birbiri ile karşılaştırmıştır.

Kim vd (2003) tekli ve çoklu delaminasyonların yerleşim yerlerinin doğal frekansları nasıl etkilediklerini araştırmak için bir dinamik analiz metodu geliştirmişlerdir. Sundukları metodu hem deneysel sonuçlarla hem de yüksek derece teorisi (higher order theory - HOT) ile karşılaştırmışlardır. Doğal frekansların tabaka açılarının değişimi ile değiştiğini ve delaminasyonun yerinin mod şeklinin değişimi ile tespit edilebileceğini göstermişlerdir.

Shu ve Della (2004a) çoklu delaminasyona sahip kompozit kirişin serbest titreşimlerinin analitik çözümünü sunmuşlardır. Delaminasyonlu kiriş, birbiri ile bağlantılı yedi Euler-Bernoulli kirişi kullanılarak modellenmiştir. Süreklilik ve denge koşulları bağlantılı kirişler arasında sağlanmıştır. Sundukları modeli analitik ve deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Delaminasyonların yerinin ve büyüklüğünün kirişin mod şekillerine ve doğal frekans değerlerine kayda değer bir etki yaptığını göstermişlerdir.

Shu ve Della (2004b) çoklu delaminasyona sahip kirişlerin serbest titreşimlerini nümerik yaklaşım olmaksızın analitik olarak çözmüşlerdir. Çoklu delaminasyonu birçok Euler-Bernoulli kirişleri kullanarak modelleyip çözmüşlerdir. Eğilme-uzama terimleri diferansiyel eşitliklerde hesaba katmışlardır. Delaminasyonun yerinin ve büyüklüğünün doğal frekanslara etkisini araştırmışlardır. Sınır şartları olarak her iki tarafı tutulu (clamped-clamped) ve ankastre (cantilever) kiriş kullanmışlardır. Sonuçlarını literatürde var olan analitik ve deneysel bulgularla karşılaştırmışlardır.

Della vd (2004) çalışmalarında delaminasyonlu kirişin serbest titreşimini çözümünü analitik olarak sunmuşlardır. Delaminasyonlu kirişi birbirleri ile bağlantılı yedi Euler-Bernoulli kirişine ayırarak bir analitik model oluşturmuşlardır. Delaminasyonun yerinin ve büyüklüğünün kirişin mod şeklinin ve temel frekansına etkilerini araştırmışlardır. Her iki ucu tutulu (clamped-clamped) kirişin temel frekansında delaminasyonun yerinin ve büyüklüğünün değişimi kayda değer biçimde değiştiğini göstermişlerdir. Her iki ucu tutulu (clamped-clamped) kirişin, küçük delaminasyonlarda mod şekli ve temel frekansında kayda değer bir değişimin olmadığı görülmüştür. İki eş delaminasyon birbirinden uzak olursa maksimum etki olduğu, eş delaminasyonlar birbirine yakın olduğunda minimum etkinin oluştuğunu göstermişlerdir.

Della ve Shu (2005a) çoklu delaminasyona sahip kirişlerin serbest titreşimlerini nümerik yaklaşım olmaksızın analitik olarak çözmüşlerdir. Delaminasyonlu kirişi birbirleri ile bağlantılı yedi Euler-Bernoulli kirişine ayırarak bir analitik model oluşturmuşlardır. Delaminasyonlu kirişin üst ve alt sınırlarını kirişin elastikliğini sıfır olarak buna serbest (free) model demişler sonra kirişin elastikliğini sonsuz olarak buna da zorlanmış (constrained) model diyerek tabakalı kirişin doğal frekanslarını

bulmuşlardır. Delaminasyon uzunluğu artığında her iki ucu tutulu ve ankastre kiriş için doğal frekans değerlerinin düştüğünü göstermişlerdir.

Della ve Shu (2005b) çoklu delaminasyona sahip kirişlerin serbest titreşimlerini nümerik yaklaşım olmaksızın analitik olarak çözmüşlerdir. Birbirleri ile bağlantılı beş kiriş kullanmışlardır. Klasik kiriş teorisini oluşturdukları her kirişe uygulamışlardır. Delaminasyonlu yüzey tabakasının narinlik oranına dayanan karışık titreşim modlarını göstermişlerdir. Delaminasyonların yerini büyüklüğünü değiştirerek kirişin zorlanmış, kısmi zorlanmış ve serbest modlarını incelemişlerdir.

Della ve Shu (2006) çalışmalarında çok tabakalı delaminasyonlu kirişlerin serbest titreşimlerini analiz etmişlerdir. Analizlerinde serbest ve zorlanmış modları kullanmışlardır. Eğilme rijitliği ve eksenel rijitlik oranı olarak adlandırılan boyutsuz parametreleri delaminasyonlu kirişin titreşimlerini daha iyi anlamak için kullanmışlardır. Nümerik sonuçlar zorlanmış ve serbest mod kullanılarak elde edilmiştir. Zorlanmış mod frekansı delaminasyonlu bölgelerde eğilme rijitliğini önemli oranda etkilemiştir. Serbest mod frekansı en zayıf delaminasyon tabakasını kayda değer biçimde etkilemiştir. Narinlik oranı da kirişin titreşim karakteristiğini etkilediğini göstermişlerdir.

Della ve Shu (2007) bası yükü altında çift burkulma (prebuckled) durumundaki delaminasyonlu kirişin serbest titreşimi için analitik çözüm sunmuşlardır. Delaminasyonlu kirişi birbirleri ile bağlantılı yedi Euler-Bernoulli kirişine ayırarak bir analitik model oluşturmuşlardır. Delaminasyonlu kirişin elastikliğini serbest (free) model ve zorlanmış (constrained) model diyerek tabakalı kirişin doğal frekanslarını bulmuşlardır. Ayrıca eksenel doğrultusunda bası yüküne maruz delaminasyonlu kirişin mod şekli ve doğal frekans değişimlerini sunmuşlardır. Bası yükü artmasıyla delaminasyonlu kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğünü göstermişlerdir. Literatürde var olan sonuçlarla kendi sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Della ve Shu (2009) bası yükü altında çok delaminasyonlu kirişin serbest titreşimi için analitik çözüm sunmuşlardır. Delaminasyonlu kirişi birbirleri ile bağlantılı yedi Euler-Bernoulli kirişine ayırarak bir analitik model oluşturmuşlardır. Delaminasyonlu kirişin elastikliğini serbest (free) model ve zorlanmış (constrained) model diyerek

tabakalı kirişin doğal frekanslarını bulmuşlardır. Ayrıca eksenini doğrultusunda bası yüküne maruz delaminasyonlu kirişin mod şekli ve doğal frekans değişimlerini sunmuşlardır. Bası yükü ile doğal frekans arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir. Bası yükü kirişin birinci modunu önemli bir şekilde etkilediğini, ikinci modu ise daha az etkilediğini göstermişlerdir.

2.5. Kiriş ve Plakalar için Deneysel Araştırmalar

Gaudenzi vd (1997) çalışmalarında $[0/\pm 45/0]_s$ oryantasyona sahip ankastre kirişin 40 ile 2000 Hz arasındaki serbest titreşimlerini test etmişlerdir. Deneysel düzeneğin çalışma prensibi actuator ve sensor diye adlandırılan iki küçük tabakayı deney numunesine bağlayarak kirişin küçük deplasmanlarını kayıt etmişlerdir. Bu küçük deplasman hareketlerinden (titreşim) kirişin doğal frekanslarını oscilloscope vasıtasıyla bulmuşlardır. Amaçları kontrol aygıtı olarak (actuator ve sensor) analog bir devre kullanarak (piezoelectric) tabakalı kompozit kirişin titreşim kapasitesinin ölçülebileceğini göstermektir.

Diaz Valdes ve Soutis (1999) delaminasyonların tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekanslarına etkilerini resonant ultrasound spectroscopy'le incelemişlerdir. Araştırmacıların amacı delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekanslarını piezoelectric malzemelerinin (sensor-actuator) yardımıyla tespit edilebileceğini göstermektir. Böylece çok pahalı programlar kullanılmadan bu sistem ile doğal frekansları etkili olarak bulunabileceğini göstermişlerdir.

Zak vd (2000) delaminasyonlu tabakalı kompozit kiriş ve levhaların eğilmesi esnasında değişen doğal frekansları deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Delaminasyon olarak sadece kenar delaminasyonu verip ankastre kiriş ve plakayı analiz etmişlerdir. $[45/-45]_s$ oryantasyona açısına sahip glass-epoxy kiriş ve levhalar oluşturmuşlardır. Sınır şartları olarak kolaylık açısından ankastre sınır koşulunu seçmişlerdir. Deneylerde kullandıkları kiriş ve levhaların delaminasyon oluşturmak için teflon film kullanmışlardır. Kiriş ve levhanın ucundan darbe çekici ile bir sinyal vermişlerdir. Bu sinyali bir alıcı vasıtasıyla (Bently Nevada Proximity Transducer System 7200) alıp SAAS programıyla analizini yapmışlardır. Kiriş ve levhaların

eğilmedeki ilk üç doğal frekansını teorik ve deneysel olarak birbirleri ile karşılaştırmışlardır.

Zou vd (2000) piezoelectric sensor ve actuator yardımıyla tabakalı kompozit kirişin doğal frekanslarını belirlemişlerdir. Sonlu elemanlar teknikleri ile deneysel sonuçları kullanarak delaminasyonun yerini belirlemede model-dependent diye adlandırılan metodu kullanmışlardır. Metotla delaminasyonlu ve delaminasyonsuz kirişin sinyallerinin analizine göre delaminasyonun yerini belirlemişlerdir. Kullandıkları teknik etkilidir ama uygulaması pahalıdır.

Zak vd (2001) sonlu elemanlar metodu kullanılarak kenar ve orta delaminasyonlara sahip tabakalı kompozit bir plağın titreşim analizini yapmışlardır. Delaminasyonlu tabakalar arasındaki kontak kuvvetleri kontak eleman kullanılarak modellenmiştir. Plağın titreşim modları ve doğal frekans değişimleri delaminasyonun uzunluğu ve konumunu dikkat edilerek araştırmışlardır. Deneysel araştırmalarda darba çekici vasıtasıyla plakaya bir sinyal gönderilmiş, sinyal lazer deplasman ölçerle alınmış ve bilgisayara aktarılmıştır. Fast Fourier Transform (FFT) kullanılarak sinyalin analizi yapılmıştır. Nümerik hesaplamaların sonuçları ile delaminasyonlu kompozit plakanın deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır.

Lee vd (2002) aksenal bası yükü altındaki çoklu delaminasyona sahip kompozit kirişlerin serbest titreşimlerini ve elastik burkulma yükünü incelemişlerdir. Analitik çalışmada tabakalı kirişteki çoklu delaminasyonlardaki eğilmeleri sabit bir eğri gibi düşünerek genel kinematik koşulları türetmişlerdir. Deneysel çalışmalarda ise aynı boyutlara sahip tek delaminasyonlu kirişler için hem burkulmasını hem de doğal frekansını incelemişlerdir. Sınır koşulları olarak her iki tarafı tutulu (clamped-clamped) olan deney numunesinin ortasına ivme ölçer yapıştırarak doğal frekansı, strain-gage yapıştırarak da burkulma yükünü ölçmüşlerdir. Çoklu delaminasyonların yerinin ve büyüklüğünün kirişin burkulma yüküne ve doğal frekans değerlerine kayda değer bir etki yaptığını göstermişlerdir.

Kim ve Hwang (2002) delaminasyona sahip bal peteği şeklindeki sandviç kirişlerin doğal frekans değişimlerini deneysel ve teorik olarak bulmuşlardır. Ankastre koşullarındaki kirişe darbe çekici ile vurularak bir sinyal (küçük deplasmanlar) elde

etmişlerdir. Sinyal kirişin üzerine yerleştirilen bir sensor yardımıyla alınmıştır. Kuvvet ve deplasman sinyallerini Fourier transform algoritmasıyla bilgisayara kayıt etmişlerdir. Bilgisayar vasıtasıyla bu sinyaller kirişin doğal frekansı olarak okunmuştur. Bal peteği şeklindeki sandviç kirişin eğilme rijitliğinin azaldığını analitik ve deneysel olarak göstermişlerdir.

Ghoshal vd (2003) lazer titreşim ölçer kullanarak kompozit yapılardaki küçük delaminasyonları tespit edilebileceğini göstermişlerdir. Araştırmacılar delaminasyonları ölçmek için genelde kullanılan actuator ve sensorların çeşidi ve sayısına bağlı olarak bir ölçmenin yapıldığını hâlbuki VDS (Vibration Deflection Shapes) kullanılarak ölçümlerin daha sağlıklı olabileceğini çalışmalarında sunmuşlardır.

Sokolinsky vd (2004) çalışmalarında ortası köpük olan sandviç kirişin titreşimini incelemişlerdir. Ankastre koşullarındaki kirişe sinyal oluşturucu (shaker) ile bir sinyal (küçük deplasmanlar) elde edilmiştir. Sinyal kirişin üzerine yerleştirilen iki ivme ölçerden alınmıştır. Bilgisayar vasıtasıyla bu sinyaller kirişin doğal frekansı olarak okunmuştur. Elde ettikleri deneysel sonuçlarla nümerik sonuçları (Abaqus) ve analitik sonuçları karşılaştırmışlardır.

Inada vd (2004) rezonans ve anti-rezonans frekans değişiklikleri kullanarak delaminasyonların yeri ve büyüklüğünü tespit etmişlerdir. Rezonans frekansları delaminasyonun yerinin ve genişliğinin değişimine bağlı olarak değişen frekanslar, anti-rezonant frekansları ise sadece delaminasyonun yerinin değişimine bağlı olan frekanslar olarak tanımlamışlardır. Sundukları metot maliyet açısından çok düşüktür ve herhangi bir yapıya kolayca uygulanabilir. Metotlarını sonlu elamanlar modeliyle (ansys) karşılaştırmışlardır.

Yam vd (2004) ankastre kompozit plakaların sinusoidal dinamik tepkisini ölçmek için actuator ve ivmeölçer kullanmışlardır. Kompozit plakadaki delaminasyonun yerini belirlemede ölçüm değerlerine göre bir tahmin yapmışlardır. Sinusoidal sinyali oluşturmak için dalga jeneratörü (waveform generator) kullanmışlardır. Güç yükseltici (power amplifier) ve şarj yükselteçlerini (charge amplifier) generator ve transducerden gelen sinyalleri yükseltmede kullanmışlardır. FFT spektrum analiziyle de bu sinyalleri analiz ederek plakanın frekans değerini bulmuşlardır.

Hu vd (2006) çeşitli kompozit plakanın $[[0]_{16}, [90]_{16}, [(0/90)_4]_S, [\pm 45/0/90]_{2S}]$ yüzey çatlağını tespit etmek için modal analiz yöntemini kullanmışlardır. Sonlu elemanlar metodu ile deneysel verilerden plakanın mod şekillerini hesaplamışlardır. Daha sonra bu mod şekilleriyle plakanın şekil değiştirme enerjisini hesaplamışlardır. Delaminasyonlu ve delaminasyonsuz kompozit plakanın şekil değiştirme enerjisiyle yüzeysel kırığın yerini bulmada kullanmışlardır.

Whittingham vd (2006) büyük yapıların düzgünlüğünü anlamak için yaymış oldukları sinyallerin analizini yapmışlardır. Deney malzemesi olarak polimer takviyeli cam fiber kullanmışlardır. T bağlantılı deney çubuklarının bazı yerlerinde delaminasyonlar oluşturarak test etmişlerdir. Analizi piezoelektrik aktuator kullanarak bir ses sinyali üretip bu sinyalin analizini yaparak, delaminasyonların yerini tespit etmeye çalışmışlar, böylece piezoelektrik aktuator kullanılarak delaminasyonların yerini ve büyüklüğünü belirlenebileceğini göstermişlerdir.

Akhter vd (2009) interferometri yöntemini (pulsed electronic speckle pattern interferometry Pulsed-ESPI) tabakalı kompozit plakanın delaminasyonunun yerini belirlemede kullanmışlardır. Bu yöntemin temel avantajı zorlu çevresel koşullar altında ölçüm yapabilme fırsatı sunmasıdır.

2.6. Sıcaklık Etkisini İnceleyen Araştırmalar

Sundaresan vd (1999) termal yüke (kritik sıcaklık değeri üstünde) maruz tabakalı kompozit yapıların titreşim davranışlarını araştırmak için basit bir metot sunmuşlardır. Von Karman tip non-linear şekil değiştirme-deplasman ilişkisi hareket denklemlerinin türetilmesinde kullanmışlardır. Sundukları metodu non-linear frekansları tahmin etmek için kullanmışlardır.

Icardi (1999) basit mesnetli tabakalı plakanın silindirik eğilmesi durumunda frekans-yük-sıcaklık ilişkisi üzerine araştırma yapmıştır. Plaka tabakasının simetri ya da anti simetri olması durumunu araştırarak dört konu üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlar tabakanın sinüsoidal yük dağılımı altında yer değiştirme davranışı, burkulma davranışı, titreşim davranışı ve frekans-yük-sıcaklık ilişkileridir. Çalışmasında delaminasyon oranı (R) artıkça burkulma yükünün ve doğal frekansların azaldığını göstermiştir.

Almeida ve Hansen (1999) kompozit plaka üretimi sırasında termal artık gerilmelerin oluşturulduğunu ve bunda plakanın rijitliğini etkilediğini göstermişlerdir. Analitik araştırmalarında Reissner-Mindlin plaka teoremini kullanmışlardır. Sonuç olarak termal artık gerilmelerin kompozit plakanın doğal frekanslarına etkilerinin kayda değer olduğunu, doğal frekans değerlerinin artırmada kullanılabileceğini göstermişlerdir. Termal artık gerilmelerin kompozit malzemelerin tasarımın da mutlaka dikkate alınması gerektiğini çalışmalarında sunmuşlardır.

Parhi (2001) tek dereceli kayma deformasyon teorisine dayanan eş parametrik sonlu eleman formülleriyle sıcak suya maruz eğrisel çok delaminasyonlu kompozit yapının doğal frekans değişimlerini göstermiştir. Sunduğu analizde sıcaklık ve nemin kompozit tabakanın özelliklerine olan etkilerini de hesaplamışlardır. Delaminasyonların, tabaka diziliminin değişimi ile frekansın değiştiğini, sıcaklığın ve nemin artmasıyla kompozit tabakanın doğal frekans değerlerinin düştüğünü göstermiş ve literatür de mevcut olan sonuçlarla kendi sonuçlarını karşılaştırmıştır.

Kogo vd (2003) tabakalı C/C (Karbon/Karbon) kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki titreşim modlarının ve iç sürtünme değişimlerini araştırmışlardır. C/C kompozitin iç sürtünmesi 1200 K'e kadar sıcaklığın artmasıyla azaldığını, matrisin iç sürtünmesi C/C kompozitler için önemli bir faktör iken tabakanın ara yüzeyleri C/C kompozitler için iç sürtünmeye katkısının olmadığını göstermişlerdir.

Park vd (2004) şekil hafızalı alaşımlı liflerle (shape memory alloy SMA) termal burkulan kompozit plakanın titreşim davranışını analiz etmişlerdir. Analitik çalışmada tek dereceli kayma deformasyon plaka teoremine dayanan doğrusal olmayan sonlu elemanlar eşitlikleri ile çözümleri yapmışlardır. Doğal frekansların SMA'daki liflerdeki gerilme ile artırılabilceğini sunmuşlardır.

Sefrani ve Berthelot (2006) kompozit malzemelerdeki cam lifinin titreşim ve rijitlik özelliklerinin sıcaklıkla nasıl etkilendiğine bakmışlardır. Deneysel çalışmalarında ankastre kirişi bir fırına koymuşlar ve kirişe dışarıdan bir etki vererek lazer titreşim ölçer vasıtasıyla titreşimleri bir bilgisayara kayıt etmişlerdir. Kirişin titreşim kayıtlarını FFT yardımıyla doğal frekanslara dönüştürerek değişimlere bakmışlardır.

Matsunaga (2007) iki boyutlu yüksek dereceli deformasyon teorisini termal yüke maruz kompozit plakaların doğal frekans değerlerini bulmak için kullanmıştır. Kullandığı metotta normal gerilme ve kayma gerilmelerini de içine alan eşitlikleri Hamilton prensibine göre çıkarmıştır. Plakanın doğal frekans değerleri yok olana kadar ısı değerlerini artırmıştır. Literatürde var olan diğer teorilerle kendi oluşturduğu teoriyi karşılaştırmıştır.

3. KOMPOZİT MALZEME VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler çok eski dönemlerden beri günlük hayatımıza girmiştir. M.Ö. 2800 yıllarda mısırlılar tahtaları lamina halinde getirerek kullanmışlardır. Yine geçmişte bina yapımında çamur içine konulan samanlarla oluşturulan yapı da basit bir kompozit örneğidir. Doğada da kompozit oluşumuna güzel bir örnekte çam ağacının gövdesidir. Gövde içinde yaz ve kış mevsimlerinde meydana gelmiş olan yaş halkaları iç içe bir görünümündedir ve kış halkaları sert fakat kırılğan yaz halkaları ise yumuşak fakat esnektir. Böylece çam ağacının bu özelliği benzeri yapıya sahip olmayan kavak ve kayın gibi ağaçlara kıyasla daha sağlam olmasını sağlar (Sayman ve Aksoy 1980).

Malzemeler genellikle metaller, plastikler ve seramikler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bu üç grup birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri vardır. Metaller yüksek mukavemet ve yüksek ısıya karşı dayanıklı olduklarından sık kullanılmalarına rağmen yüksek yoğunluğu sebebi ile ağırdırlar. Plastikler ise düşük yoğunluktan ötürü hafiftirler fakat yüksek sıcaklıkta yapı bütünlüğünü kayıp ederler. Seramikler ise düşük yoğunlukları sayesinde hafiftirler ve mukavemet değerleri yüksektir fakat gevrek olduklarından kolayca kırılırlar. Yirminci yüzyılın malzemesi olan kompozit malzemeler ise düşük yoğunluklu olduklarından hafif, buna karşın yüksek mukavemet değerlerine sahip olduklarından geniş bir kullanım alanlarına sahiptirler. Bu çekici özelliklerinden dolayı pek çok sektörde boy göstermeleri çok doğaldır. Kompozit malzemelerin kullanım alanlarından bazı örnekler Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Kompozit malzemelerin kullanım alanları

3.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

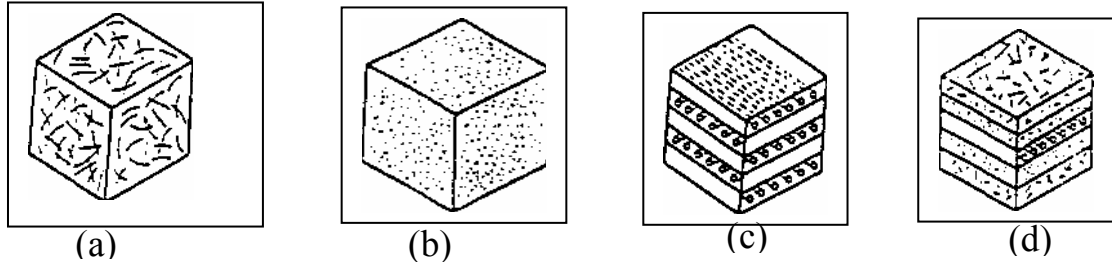
İki ya da daha fazla malzemenin birleşmesiyle oluşan kompozit malzemeler son zamanlarda dikkate değer bir hızla dünya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle kullanım alanları bir hayli geniş olan kompozit malzemeler deniz, uçak ve otomobil sektörlerinde olduğu gibi küçük ev aletlerinden, elektrik ve kimya endüstrilerine kadar yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin genel olarak avantaj ve dezavantajları Tablo 3.1’de verilmiştir (Şahin 2006).

Tablo 3.1 Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
1. Yüksek dayanım	Üretimin güçlüğü
2. Yüksek rijitlik	Pahalı olması
3. Yüksek yorulma dayanımı	İşlenmesinin güç olması
4. Mükemmel aşınma direnci	Geri dönüşümünün olmaması
5. Yüksek sıcaklık kapasitesi	Kırılma uzamasının az oluşu
6. İyi korozyon direnci	
7. İyi termal ve ısı iletkenliği	
8. Düşük ağırlık	
9. Çekicilik ve estetik görünüm	

3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında kesin kurallar olmasa da genel olarak bir sınıflandırma yapılabilir. Böyle bir sınıflandırmaya da yapılarındaki malzemenin şekli belirleyebilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

- a. Elyafli kompozitler
- b. Parçacıklı kompozitler
- c. Tabakalı kompozitler
- d. Karma kompozitler

3.3.1. Elyafli kompozitler

Elyafli kompozitler matrisin yapısında yer almasıyla oluşurlar. Fiber açısı olarak adlandırılan elyaf liflerinin doğrultusu kompozit yapının mukavemetini etkiler. Elyaf doğrultusu çekme eksenine doğrultusunda ise en yüksek mukavemet değerleri elde edilirken, çekme eksenine dik doğrultuda en düşük mukavemet değerleri elde edilir. Bu sayede elyafların doğrultu açısını değiştirerek mukavemet değerlerini de değiştirebiliriz. Eğer elyaflar homojen olarak sisteme harmanlanarak dağıtılsa her yönde eşit mukavemet değeri elde ederek izotrop bir yapı elde etmiş oluruz. Yine elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artar. Bu tezde $[30]_{16}$, $[45]_{16}$, $[60]_{16}$, $[90]_{16}$ ve $[0/90]_{16}$ yönlenmiş elyaflardan oluşan tabakalı bir yapının titreşim analizi yapılmıştır.

3.3.2. Parçacıklı kompozitler

Parçacıklı kompozitler; matris malzeme içinde diğ er bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile izotrop bir yapı elde edilmesiyle oluşturulabilirler. Matris malzeme içine seramik gibi mukavemet ve sıcaklık açısından çok yüksek malzeme katılarak parçacıklı kompozit yapının mukavemet ve sıcaklık dayanım değ erleri artırılabilir.

3.3.3. Tabakalı kompozitler

En az iki tabakanın birleşmesiyle elde edilen ve çok kullanılan kompozit çeşididir. Her tabakanın yönlenme açısı değ iş tirilerek tabakalı kompozit yapının mukavemet değ erleri artırılabilir.

3.3.4. Karma (Hibrid) kompozitler

Kompozit yapıda iki ya da daha fazla elyaf çeşidinin bulunmasıyla oluşturulurlar. Karma (Hibrit) kompozit yapıya güzel bir örnek kevlar ve grafitir. Kevlar ucuz ve tok bir elyaf türüdür fakat çok gevrek tir. Grafit ise pahalı olmasına rağmen tokluğu düşük olduğ undan gevrek değildir. Bu iki elyaf türü birleştirilerek grafitte oranla düşük maliyetli kevlar oranla da gevrek olmayan bir yapı oluşturulabilir.

3.4. Kompozit Malzeme Yapımında Kullanılan Temel Maddeler

Kompozit malzeme yapımında kullanılan malzemeleri matris malzemeleri ve elyaflar olarak ayırabiliriz.

Matrisler genel olarak üç önemli görevi üstlenirler. Bunlar elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları darbe gibi dış etkenlerden korumaktır. Matris olarak kullanılan reçineler genellikle epoksi, polyester, üretan ve fenolik gibi reçinelerdir. Epoksi reçineleri katalizör görevi yapan sertleştirici ile kullanılarak bir süre beklendikten sonra sertleşir. Genel özelliğ i ise hava şartlarından etkilenmemeleridir. Bozulmadan kalma süreleri 24 aydır. Polyester reçineleri ise sertleştirici ve hızlandırıcı katılarak bir süre beklendikten sonra sertleşirler. Genel özellikleri ise kimyasal maddelere ve hava şartlarına direnci yüksektir. Üretan reçineleri genellikle köpük ve lastik yapımlarında kullanılırlar. Kimyasal dirençleri iyidir. Fenolik reçinelerin katı ve sıvı türleri kimyasal dirençleri iyidir.

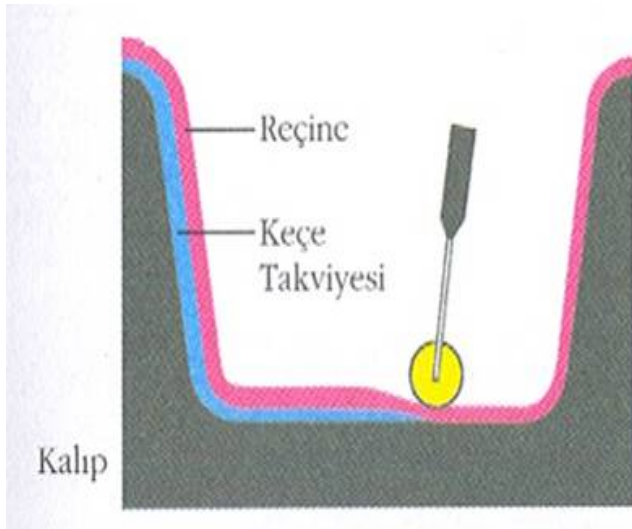
Elyaf lar matris malzemesinin içinde yer alan ve kompozite mukavemet değerlerini veren elemanlardır. Düşük yoğunluk ve mukavemet değerlerinin yüksek olması en önemli özelliği olup korozyona karşı dirençlidirler. Birçok elyaf tipi olup bunlardan en eskisi cam elyaf lardır. Son zamanlarda ise bor, karbon, silisyum karbür ve aramid gibi elyaf türleri kullanımları gittikçe artmaktadır.

Cam elyaf lar, şişe camı, kuartz camı gibi ham maddelerden üretilebilirler. Cam elde etmek için silis kumu katkı malzemeleri ile birlikte kuru halde 1260 °C ısıtılıp soğutularak elde edilir. Cam elyaf silis kumuna farklı katkı malzemeleri eklenerek farklı özellikler kazanır. Dört çeşit cam elyaf türü vardır. Bunlar A (Alkali) camı, C (Korozyon) camı, E (Elektrik) camı ve S (Mukavemet) camıdır. A (Alkali) camı yüksek oranda alkali içerir ve elektrik yalıtkanlığı kötüdür. Kimyasal direnci yüksek en yaygın kullanılan cam türüdür. C (Korozyon) camı kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir. E (Elektrik) camı alkali oranı düşük olduğundan elektrik yalıtkanlığı iyidir. S (Mukavemet) camı mukavemet açısından yüksektir. Çekme mukavemeti E (Elektrik) camına göre %33 daha yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda kullanabilmeleri ve suya karşı dirençli olmaları en önemli özelliklerindedir.

3.5. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin (ETKM) Üretim Yöntemleri

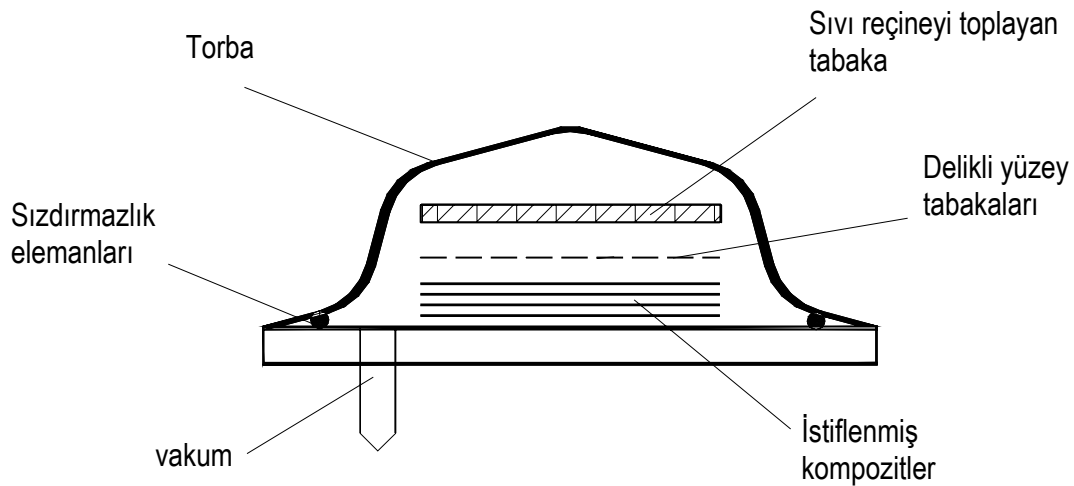
Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin birçok üretim yöntemi vardır. Bunların en önemlileri el yatırma yöntemi, torba kalıplama yöntemi, püskürtme yöntemi, elyaf sarma yöntemi, savurma (santrifüj) kalıplama yöntemi ve profil çekme yöntemidir.

El yatırma yöntemi en basit kompozit malzeme üretim metodudur. Öncelikle kullanılacak olan reçinenin özelliğine göre katalizör ve hızlandırıcı ilave edilir. Böylece reçinenin sertleşme süresi kısaltılmış olur. Rulo halindeki keçe yada örgülü elyaf istenilen ebatlarda kesilerek kalıp üzerine konur. Kullanılacak olan reçine fırça vasıtasıyla kalıp üzerindeki keçe yada elyafın üstüne sürülür fazla reçinenin atılması ve düzgün bir yüzey için kalıp preslenir ve oda sıcaklığında sertleşmesi beklenir. Genellikle tam olarak sertlik elde etmek için ısıl işlem yapılması gerekir. Şekil 3.3' el yatırma yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.3 El yatırma yöntemi

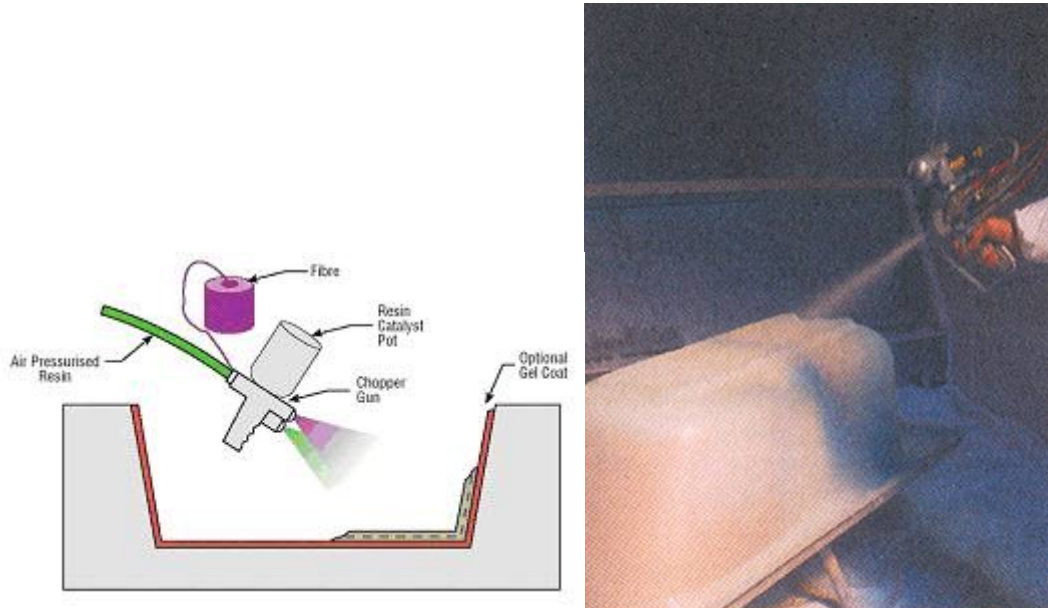
Torba kalıplama yönteminde torba içine yerleştirilen kompozit malzemeler reçinenin sürülmesinden hemen sonra vakum sayesinde torba vakumlanır. Bu sayede kompozit malzemenin yüzey kalitesi artar ve yapı içindeki havayı çıkartılarak yapının daha mukavemetli olması sağlanır. Şekil 3.4’de torba kalıplama yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Torba kalıplama yöntemi

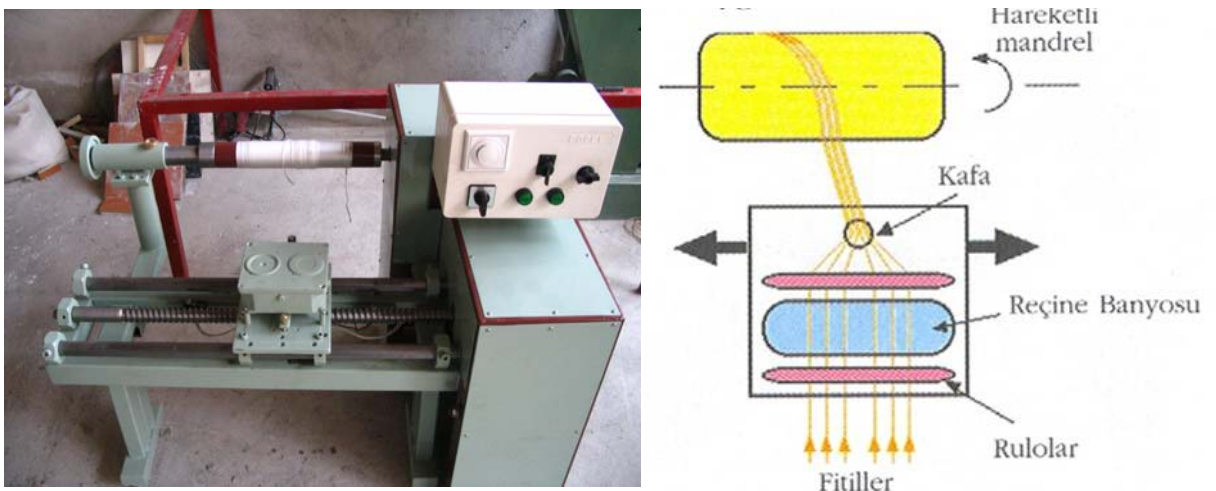
Püskürtme yöntemi el yatırma yöntemine benzer burada sadece sürülen reçine fırçayla değil de basınçlı hava vasıtasıyla kompozit yapıya etkileşimi sağlanır. Yine el

yatırma yöntemindeki işlemler bu yöntemde de uygulanır. Püskürtme yöntemi Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Püskürtme yöntemi

Elyaf sarma yöntemi, silindirik olarak üretilen malzemelerin imalatında kullanılır. Hazırlanan elyaflar belirli açılar altında reçineye sürülerek silindire sarılırlar. Bu şekilde reçineye sürülüp belli açılarla silindire sarılan elyaflar kuruyup sertleştikten sonra silindir haline gelirler. En çok kullanılan reçineler polyester ve epoksi, en çok kullanılan elyaf ise cam elyaftır. Elyaf sarma yöntemi Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



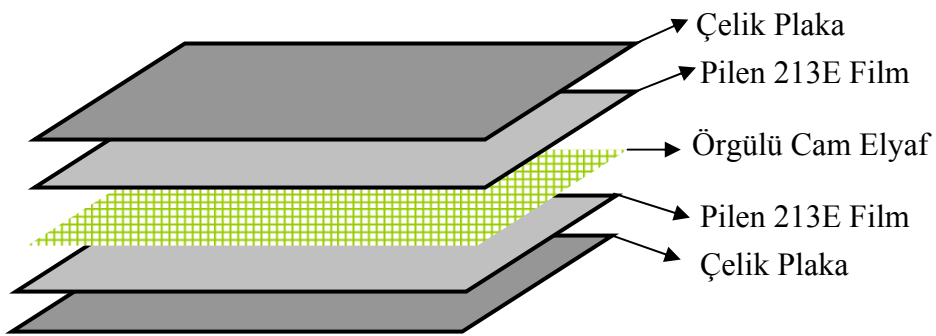
Şekil 3.6 Elyaf sarma yöntemi

Savurma (santrifüj) kalıplama yöntemi silindirik parçaların üretiminde kullanılan diğer bir yöntemdir. Elyaf sarma yöntemine benzer şekilde malzeme üretimi yapılabilir.



Şekil 3.8 Cam elyaf

Çünkü son işlem olan preslemeden sonra cam elyaf lifleri presin basıncından dolayı polyester reçinenin içinde kayarak sertleşirler (çapak oluşumu). Bu yüzden oluşturulan plakanın kenarları yaklaşık 10-15 mm kadar kesilip atılır. Cam elyaf kumaşların kesim işlemi tamamlandıktan sonra kumaşlar Şekil 3.9’da çelik plakanın üstündeki Pilen 213E film üzerine konulur.



Şekil 3.9 Kalıp

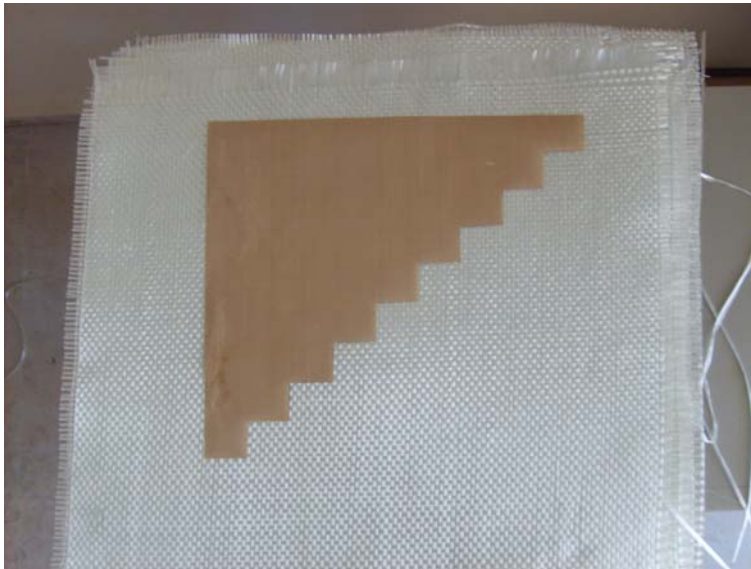
Polyester reçinenin hazırlanması işlemine geçilir. Polyester reçine bir kaba boşaltılır bu hali ile kuruması beklenirse uzun süreceğinden içine katalizörler konulmalıdır. Polyester reçineler için hızlandırıcı ve dondurucu olmak üzere iki katalizör kullanılır. Hızlandırıcı reaksiyonu hızlandırırken dondurucu sertleştirmeyi sağlar. Şekil 3.10’da iki katalizör MEKP (hızlandırıcı) ve Cobalt (dondurucu) görülmektedir. Polyester reçinenin içine

önce hızlandırıcı karıştırılır sonra dondurucu konur. Eklenen katalizörler reçinenin %0,5 ile %1 kadar olmalıdır.



Şekil 3.10 Katalizör

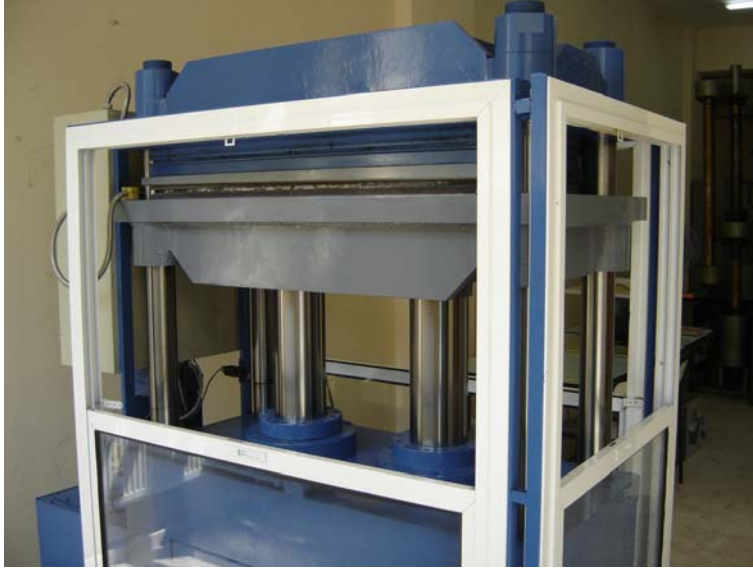
Hazırlanan polyester reçine cam elyaf kumaşın her katına rulo fırça vasıtasıyla sürülür. Bu aşamada delaminasyonlu bir plaka üretilmek isteniyorsa cam elyaflar arasına Şekil 3.11’de gösterilen teflon film konularak delaminasyonlar oluşturulabilir.



Şekil 3.11 Teflon film

Oluşturduğumuz tabakalı kompozit plakanın alt ve üst kısımlarına pilen 213E film konulur. Filmin iki görevi vardır. Birinci görevi çelik plaka ile tabakalı kompozit plaka

arasındaki yapışmayı engellemek. İkinci görevi de tabakalı kompozit yapının yüzey kalitesini artırmaktır. Pilen 213E film kompozitin mukavemetini artırmak için uygulanan ısı işlemlere de dayanıklıdır.



Şekil 3.12. Pres

Hazırlanan tabakalı kompozit plak preslenmek üzere Şekil 3.12'deki prese konur ve yaklaşık 0,3MPa pres altında iki saat beklenir. Presten çıkan tabakalı kompozit plakanın çapıkları Şekil 3.13'de görülebilir.



Şekil 3.13. Delaminasyonlu tabakalı kompozit plaka



Şekil 3.14 Delaminasyonlu tabakalı kompozit plakanın kesimi

Kompozit plakanın çapaklarının temizlenmesi Şekil 3.14’de görüldüğü gibi yapıldıktan sonra istenilen genişlikte kesilerek tabakalı kompozit kirişler Şekil 3.15’de gösterildiği gibi elde edilir. Üretilen kompozit kirişlerin mekanik özellikleri elastisite modülü 26350N/mm^2 ve poisson oranı 0,15 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.15 Delaminasyonlu tabakalı kompozit kiriş

3.6.2. Çeşitli oryantasyon açlarına sahip delaminasyonlu kompozit kirişin üretimi

$[30]_{16}$, $[45]_{16}$, $[60]_{16}$, $[90]_{16}$ ve $[(0/90)_8]_s$ oryantasyon açlarına sahip olan tabakalı kompozit plakaların üretimi İzoreel firmasında el yatırma yöntemiyle üretilmiştir. Aşağıdaki Tablo 3.2’de matris malzemesi olan epoksi reçinenin ve elyaf malzemesi olan cam elyafın mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2 Elyaf ve epoksinin mekanik özellikleri

Matris Malzemesi: Epoksi Reçine			
σ_{kopma} (MPa)	E (MPa)	ε_{kopma} (%)	ρ_m (g/cm ³)
50-60	3400	6-7	1,2
Elyaf Malzemesi: Cam Elyaf			
σ_{kopma} (MPa)	E (MPa)	ε_{kopma} (%)	ρ_f (g/cm ³)
2400	73000	4-5	2,6



Şekil 3.16 Cam elyaf kumaş rulosu

Şekil 3.16’da görüldüğü gibi tek yönlü ve ağırlığı 270 g/m² olan cam elyaf kumaştan 1000x500 mm ebatlarında üretilecek kat kadar kumaşlar kesilir. Kesme işleminde gönnye vasıtasıyla kumaşların açı değerleri verilerek Şekil 3.17’de görüldüğü gibi kompozit tabakanın açısı verilmiş olur.



Şekil 3.17 Cam elyaf kumaşının açılı kesimi

Cam elyaf kumaşlarının yapılacak tabaka kadar kesim işlemi bittikten sonra matris malzemesi olan epoksi reçine karışımı hazırlanır. Epoksinin akışkanlığını artırmak için epoksi reçinenin bulunduğu kap 30°C sıcaklığa çıkartılır ve reçineye sertleştirici Şekil 3.18'deki gibi konur. Böylelikle sürme işleminde kolaylık olur. Kalıp üzerine konulan 1000x500 mm ebatlarındaki cam elyaf kumaşlara fırça yardımıyla epoksi reçine sürülür.



Şekil 3.18 Epoksi reçineye katalizör ilavesi

Sürülen epoksi reçineli cam elyaf kumaşlar iki çelik plaka arasına konularak sıcak prese Şekil 3.19'daki gibi konulur. Cam elyaf epoksi kompozit malzeme 0,3 MPa

basınç altında ve 120°C sıcaklıkta iki saat boyunca ısıtılarak kürleştirilerek beklenir. Isıtılan ve preslenen kompozit plakalar daha sonra soğuması için bir saat kadar beklenir.



Şekil 3.19 Rezistanslı hidrolik pres

Presleme esnasında fazla olan epoksi dışarıya oluklar vasıtasıyla bir kaba akar. Bu fazla epoksi reçineleri kuruyarak kompozit plakanın kenarlarında çapaklar meydana getirir bu çapakların temizlenmesiyle kompozit plakalar elde edilir $[30]_{16}$, $[45]_{16}$, $[60]_{16}$, $[90]_{16}$ ve $[(0/90)_8]_5$ oryantasyonlarındaki tabakalı kompozit plakalar Şekil 3.20’de gösterildiği gibi üretilir sonra istenilen genişlik ve boylarda kesilerek tabakalı kompozit kirişler üretilmiş olur. Üretilen ve tezde kullanılan kompozit kirişlerin mekanik özellikleri ve geometrik özellikleri $E_1 = 44150 \frac{N}{mm^2}$, $E_2 = 12300 \frac{N}{mm^2}$, $G_{12} = 4096 \frac{N}{mm^2}$, $\nu_{12} = 0,2$, $\nu_{23} = 0,05$, $L=400$ mm, $b=20,5$ mm ve $h=3,3$ mm’dir



Şekil 3.20 Tabakalı kompozit plaka

4. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ

4.1. Kompozit Malzemelerin Makromekaniği

Kompozit malzemenin mekanik özellikleri fiber doğrultusuna bağlı olarak değişir. Bununla birlikte anizotropi durumlarından dolayı elastik özelliklerini belirlemek için gerekli sabitlerin sayısı çok fazladır. Bu durumun tam tersi olan izotrop malzemelerde ise sadece iki sabitin (E, ν) bilinmesi elastik özellikler için yeterlidir.

Genelleştirilmiş Hooke Kanunu anizotrop malzemeler için şu şekilde yazılabilir;

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (4.2)$$

$$S_{ijkl} = (C_{ijkl})^{-1} \quad (4.3)$$

Burada σ_{ij} gerilme tansörünün bileşenleri, ε_{kl} şekil değiştirme tansörünün bileşenlerini, C_{ijkl} elastik rijitlik tansörü ve S_{ijkl} elastik gevşeklik tansörünü ifade eder.

Bu denklemler açıldığı zaman her birinde 9 terim bulunan 9 denklem ortaya çıkar. C_{ijkl} ve S_{ijkl} 4. dereceden tansörler olup 81 sabit içerirler. Fakat bu 81 adet sabitin kütle kuvvetlerinin olmaması durumunda gerilme şekil değiştirme tansörleri simetrik olduğundan ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ve $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$) sabitlerin sayısı 36'ya düşer (Aran 1990).

Mekanikte genellikle kısaltılmış notasyon (Love notasyonu) olarak adlandırılan notasyonun kullanılması ile rijitlik ve gevşeklik tansörlerinin 2. dereceden olması sağlanır.

$$\begin{aligned}
\sigma_{11} &= \sigma_1 & \varepsilon_{11} &= \varepsilon_1 \\
\sigma_{22} &= \sigma_2 & \varepsilon_{22} &= \varepsilon_2 \\
\sigma_{33} &= \sigma_3 & \varepsilon_{33} &= \varepsilon_3 \\
\sigma_{44} &= \sigma_4 \quad (= \tau_{23}) & \varepsilon_{44} &= \varepsilon_4 \quad (= \gamma_{23}) \\
\sigma_{55} &= \sigma_5 \quad (= \tau_{13}) & \varepsilon_{55} &= \varepsilon_5 \quad (= \gamma_{13}) \\
\sigma_{66} &= \sigma_6 \quad (= \tau_{12}) & \varepsilon_{66} &= \varepsilon_6 \quad (= \gamma_{12})
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Böylece Hooke Kanununun yeni şekli aşağıdaki gibi olur;

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad (j = 1 \dots 6) \tag{4.5}$$

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \tag{4.6}$$

Burada C_{ij} elastik rijitlik tansörü, S_{ij} elastik gevşeklik tansörüdür.

Love notasyonuna göre anizotropik malzemeler için iki boyutlu tansörle gösterilen gerilme şekil değiştirme bağıntısı;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

Şeklinde yazılır. Yukarıdaki matris açılırsa;

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2 + C_{13}\varepsilon_3 + C_{14}\varepsilon_4 + C_{15}\varepsilon_5 + C_{16}\varepsilon_6 \\
\sigma_2 &= C_{21}\varepsilon_1 + C_{22}\varepsilon_2 + C_{23}\varepsilon_3 + C_{24}\varepsilon_4 + C_{25}\varepsilon_5 + C_{26}\varepsilon_6 \\
\sigma_3 &= C_{31}\varepsilon_1 + C_{32}\varepsilon_2 + C_{33}\varepsilon_3 + C_{34}\varepsilon_4 + C_{35}\varepsilon_5 + C_{36}\varepsilon_6 \\
\sigma_4 &= C_{41}\varepsilon_1 + C_{42}\varepsilon_2 + C_{43}\varepsilon_3 + C_{44}\varepsilon_4 + C_{45}\varepsilon_5 + C_{46}\varepsilon_6 \\
\sigma_5 &= C_{51}\varepsilon_1 + C_{52}\varepsilon_2 + C_{53}\varepsilon_3 + C_{54}\varepsilon_4 + C_{55}\varepsilon_5 + C_{56}\varepsilon_6 \\
\sigma_6 &= C_{61}\varepsilon_1 + C_{62}\varepsilon_2 + C_{63}\varepsilon_3 + C_{64}\varepsilon_4 + C_{65}\varepsilon_5 + C_{66}\varepsilon_6
\end{aligned} \tag{4.8}$$

elde edilir. (4.7)'deki matrislerin 36 elemanının tümü birbirinden bağımsız olmadığı şekil değişimi enerjisi yardımıyla gösterilebilir. Malzeme σ_i gerilmesi altında $d\varepsilon_i$ elastik şekil değişimine uğrarsa, birim hacim başına elastik enerji artışı;

$$dw = \sigma_i \cdot d\varepsilon_i \quad (4.9)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemin integrali alınırsa;

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (4.10)$$

olduğundan;

$$w = \frac{1}{2} (C_{ij} \cdot \varepsilon_j \cdot \varepsilon_i) \quad (4.11)$$

bulunur. Benzer şekilde σ_j gerilmesi altında $d\varepsilon_j$ şekil değişimi için hesaplanırsa;

$$w = \frac{1}{2} (C_{ji} \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_j) \quad (4.12)$$

bulunur. Dolayısıyla bu denklemlerin türevi alınarak;

$$\frac{\partial w}{\partial \varepsilon_i} = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad \text{ve} \quad \frac{\partial w}{\partial \varepsilon_j} = C_{ji} \cdot \varepsilon_i \quad \text{bulunur. Bir daha kısmi türev alınırsa;}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \varepsilon_i \cdot \partial \varepsilon_j} = C_{ij} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \varepsilon_j \cdot \partial \varepsilon_i} = C_{ji} \quad \text{elde edilir. Türev alma sırası türevin değerini}$$

değiştirmeyeceğinden $C_{ij} = C_{ji}$ bağıntısı geçerlidir. Benzer şekilde $S_{ij} = S_{ji}$ bağıntısı da gösterilebilir. Yani rijitlik ve gevşeklik matrislerinin her ikisi de simetriktir ve birbirinden bağımsız sabit sayısı 21'e düşer.

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Yukarıdaki eşitlik malzeme özellikleri bakımından hiçbir simetri düzlemi olmayan anizotropik malzemeleri temsil eder. Böyle bir anizotropik malzemenin diğer adı triklinik malzemedir. Bilindiği gibi kompozit malzemelerde mekanik davranışlar bakımından bazı simetri düzlemleri vardır.

Eğer malzeme özellikleri sadece bir simetri düzlemine sahipse, gerilme şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{54} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Burada simetri düzlemi $z = 0$ düzlemdir. Böyle bir malzeme monoklinik olarak adlandırılır ve bağımsız elastik sabit sayısı 13'dür. Eğer malzemede mekanik özellikler bakımından üç simetri düzlemi (ortogonal düzlemler) varsa malzeme ortotropik (ortogonal anizotropik) olarak adlandırılır. Bu durumda bağımsız sabit sayısı sadece 9 olur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Eğer malzemede bu simetrilere ek olarak mekanik özelliklerin tüm doğrultularda eşit olduğu bir düzlem varsa, bu tip malzemeler transvers izotropik olarak adlandırılır. Örneğin 1-2 düzlemi özel izotropi düzlemi ise, bu taktirde rijitliklerindeki 1 ve 2 alt indisleri yer değiştirebilir ve böylece gerilme şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki şekli alır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Eğer malzeme özelliklerine ait simetri düzlemleri sonsuz sayıda ise önceki bağıntılar izotropik malzeme durumuna indirgenebilir ve bu durumda rijitlik matrisindeki bağımsız sabit sayısı 2'dir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Yukarıda verilen değişik simetri halleri için şekil değiştirme gerilme bağıntıları ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

Anizotropik (21 bağımsız sabit)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Monoklinik (13 bağımsız sabit $z = 0$ simetri düzlemi için)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{54} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{45} & S_{55} & 0 \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Ortotropik (9 bağımsız sabit)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Transvers izotropik (1-2 simetri düzlemi hali için 5 bağımsız sabit)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

İzotropik (2 bağımsız sabit)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Ortotropik kompozit malzemenin elastik davranışını belirleyen bu sabitler ile malzemenin mühendislik sabitleri olarak adlandırılan E , ν ve G arasındaki bağıntıları bulmak amacıyla tek eksenli çekme veya kayma (kesme) deneyleri yapılır.

Takviye yönünde çekme;

Gerilmeler $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_i = 0$ ($i = 2...6$)

Birim uzamalar;

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &\neq 0 \\ \varepsilon_2 &= -\nu_{12} \cdot \varepsilon_1 \\ \varepsilon_3 &= -\nu_{13} \cdot \varepsilon_1 \\ \varepsilon_4 &= \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Bu durumda;

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= S_{11} \cdot \sigma_1 \\ S_{11} &= \frac{\varepsilon_1}{\sigma_1} = \frac{1}{E_1} \\ -\nu_{12} \cdot \varepsilon_1 &= S_{21} \cdot \sigma_1 \\ S_{12} &= \frac{-\nu_{12} \cdot \varepsilon_1}{\sigma_1} = \frac{-\nu_{12}}{E_1} \\ -\nu_{13} \cdot \varepsilon_1 &= S_{31} \cdot \sigma_1 \\ S_{31} &= \frac{-\nu_{13} \cdot \varepsilon_1}{\sigma_1} = \frac{-\nu_{13}}{E_1} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Gerilmeler;

$$\tau_{12} = \sigma_6 \neq 0, \quad \sigma_i = 0 \quad (i=1...5) \quad (4.25)$$

Birim uzamalar;

$$\begin{aligned} \varepsilon_6 \neq 0, \quad \varepsilon_5 = S_{66}\sigma_6 \\ S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Diğer sabitlerde benzer deneylerle saptanarak gevşeklik matrisi;

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{31}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

şeklini alır. Rijitlik matrisi ise $C_{ij} = (S_{ij})^{-1}$ transformasyonu ile saptanabilir.

Elyaf takviyeli tabakalar çoğunlukla ince olduklarından düzlem gerilme durumunun geçerli olduğu, yani düzleme dik gerilmelerin etkilediği kabul edilir ($\sigma_3 = 0, \sigma_4 = 0, \sigma_5 = 0$). Bu durumda sabitlerin sayısı daha da azalacağından 6 boyutlu matris yerine 3 boyutlu Q_{ij} matrisi kullanılır. Böylece Hooke bağıntısı;

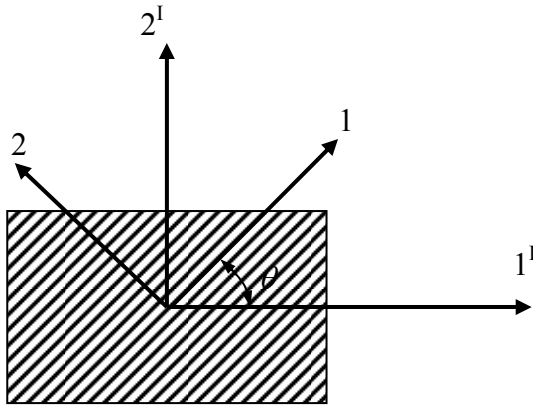
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

şeklini alır. Burada matrisin bağımsız elemanlarının sayısı 4'e indirilmiştir ve bunların mühendislik sabitleri cinsinden ifadeleri ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (4.29)$$

Buraya kadar ortotropik malzemelerin, malzemenin asal doğrultusundaki gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ele alınmıştır. Uygulanan gerilmeler her zaman malzemenin asal eksenleri ile çakışmayabilir. Böyle bir durumda farklı yönlerdeki bağıntılar transformasyon tansörü (T_{ij}) kullanılarak saptanabilir. Örneğin etkiyen malzemenin asal doğrultuları 1 ve 2 yönlerinde değil, x ve y yönlerinde (Şekil 4.1) etkimesi halinde bu gerilme halinin malzeme asal eksenleri ile çakışan bir koordinatta ifadesi veya transformasyonu şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$



Şekil 4.1 Kompozit malzemelerin yön doğrultuları

Herhangi x-y eksenlerinden malzeme asal eksenlerine pozitif yönde dönüşü veya bunun tersi;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

olur. Benzer şekilde;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

(-1) üsteli matris tersini belirtmektedir ve transformasyon matrisi $[T]$ aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Bununla beraber bir $[R]$ matrisi,

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Kullanılırsa $\frac{1}{2}$ çarpanı yok edilir ve

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

elde edilir. Eğer gerilmenin uygulandığı eksenler olan x ve y malzemenin asal eksenleri olan 1 ve 2 eksenleri ile çakışmıyorsa gerilme şekil değiştirme bağıntısı şöyle yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$= [T]^{-1}[Q][R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$= [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Burada $[T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} = [\bar{Q}]$ ile gösterilirse x-y eksenlerine ait gerilme şekil değiştirme bağıntısı;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Olarak elde edilir. $[\bar{Q}]$ 'nin bileşenleri;

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (4.41)$$

Burada \bar{Q}_{ij} indirgenmiş (Q_{ij}) rijitlik yerine transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisini temsil etmektedir. Aynı şekilde malzeme asal eksenleri ile çakışmayan bir gerilme hali için de şekil değiştirme gerilme bağıntısı bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{S}] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Burada $[R][T]^{-1}[R]^{-1}[S][T] = [\bar{S}]$ olarak gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
\bar{S}_{11} &= S_{11} \cos^4 \theta + 2(S_{12} + 2S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \\
\bar{S}_{12} &= (S_{11} + S_{22} - 4S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{12} (\sin^4 \theta \cos^4 \theta) \\
\bar{S}_{22} &= S_{11} \sin^4 \theta + 2(S_{12} + 2S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta \\
\bar{S}_{16} &= (S_{11} - S_{12} - 2S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (S_{12} - S_{22} + 2S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\
\bar{S}_{26} &= (S_{11} - S_{12} - 2S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (S_{12} - S_{22} + 2S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\
\bar{S}_{66} &= (S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - 2S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)
\end{aligned} \tag{4.43}$$

Hooke bağıntısını yazarsak;

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{\sigma_x}{S_{11} \sigma_x} = \frac{1}{S_{11}} \tag{4.44}$$

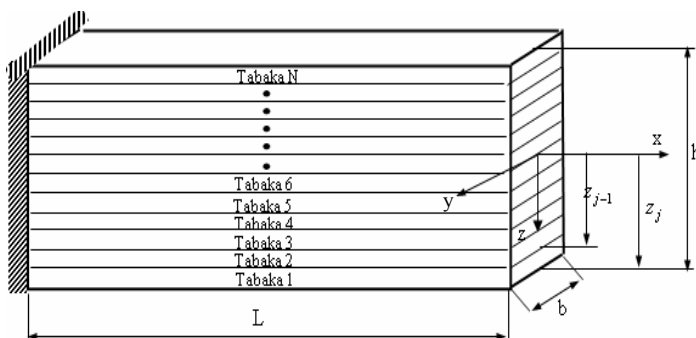
$$E_x = \frac{1}{\frac{1}{E_1} \cos^4 \theta + \left[-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{E_2} \sin^4 \theta} \tag{4.45}$$

4.2. Tabakalı Kompozit Kirişlerin Elastisite (E_x) Modül Değişimi

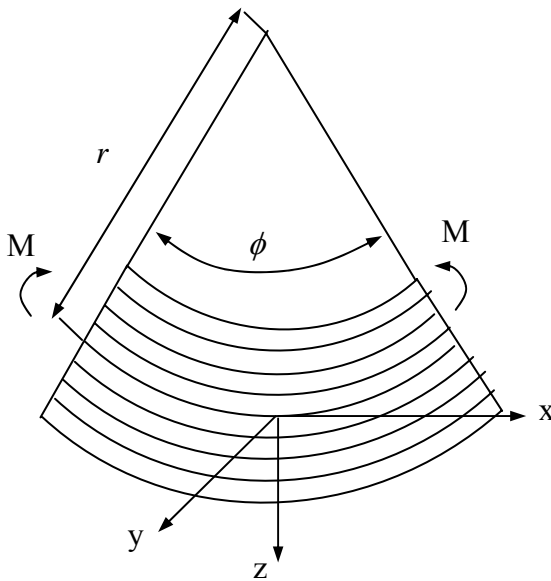
Şekil 4.2’de gösterilen tabakalı bir kompozit kirişin j.inci tabakasındaki normal gerilme şu şekilde yazılabilir;

$$(\sigma_x)_j = (E_x)_j \cdot (\varepsilon_x)_j \tag{4.46}$$

Bernoulli-Euler hipotezine göre eğilen (Şekil 4.3) tarafsız yüzeyden belli bir uzaklıktaki şekil değiştirme;



Şekil 4.2 Tabakalı kompozit kiriş



Şekil 4.3 Tabakalı kompozit kirişin eğilmesi

$$\varepsilon_x = \frac{(r+z)\phi - r\phi}{r\phi} = \frac{z}{r} \quad (4.47)$$

Burada r eğrilik yarıçapıdır. Normal gerilme ile eğilme momenti arasındaki ilişki;

$$M = 2 \int_0^{\frac{h}{2}} \sigma_x \cdot z \cdot b \cdot dz \quad (4.48)$$

veya

$$M = \frac{2b}{3r} \sum_{j=1}^N (E_x)_j (z_j^3 - z_{j-1}^3) \quad (4.49)$$

olarak yazılabilir. Burada h kirişin yüksekliği, b kirişin genişliği, N tabaka sayısı ve z_j j .inci tabakanın dış yüzeyi ile nötr yüzey arasındaki mesafedir. Eğilme momenti ile eğrilik yarı çapı arasındaki ilişki,

$$M = \frac{E_f \cdot I}{r} = E_f \cdot I \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (4.50)$$

yazılabilir.

$$E_f = \frac{8}{h^3} \sum_{j=1}^N (E_x)_j (z_j^3 - z_{j-1}^3) \quad (4.51)$$

burada E_f (Gibson 1994); kirişin etkin elastisite modülü, I atalet momentidir.

4.3. Süreksizliye Sahip (Delaminasyon) Tabakalı Kompozit Kirişlerin Elastisite (E_d) Modül Değişimi

Kompozit malzemeler yapısal bütünlüklerini önemli ölçüde azaltan hasar ve kusura da büyük oranda eğilimlidirler. Kompozit tabakaların tabakalar arası zayıf mukavemetinden dolayı kompozitlerde muhtemelen en sık rastlanılan hasar, tabakalar arası kırılma veya süreksizlik bölgesinin (delaminasyonun) oluşumudur. Delaminasyonlar, eksik ıslatma (reçinelerin az sürülmesi) ve tabakalar arası hava keseciklerinin oluşumu gibi hatalı imalat işlemi veya yabancı bir cisim tarafından oluşan düşük hızlı bir darbe gibi (örneğin bir uçağa teknisyenin düşürdüğü bir aletin veya uçağa bir kuşun çarpması gibi) belirli hizmet faktörlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkabilir. Böyle bir delaminasyon hasarının tabakaların mukavemetinde ve rijitliğinde azalmaya sebep olduğu bilinmektedir. Bunun sonucu olarak delaminasyonların titreşim karakteristiklerinde bir değişime sebep oldukları da bilinmektedir. Delaminasyonlu tabakalar genellikle, delaminasyonun sayısı, yeri ve büyüklüğüne bağlı olarak yeni titreşim modları ve frekansları sergilemektedir. Özellikle, delaminasyonlar doğal frekansı azaltmaktadır ki, bu düşük frekans çalışma frekansına yakın olması durumunda rezonansa sebep olabilir. Dinamik bir ortamda mod şekilleri gibi frekanstaki değişimleri de tahmin edebilmemiz bir zorunluluktur. Bu yüzden delaminasyona sahip bir kirişin elastisite modülü aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir.

$$E_{zd} = \frac{\sum_{i=1}^m E_{fi} z_i}{z} \quad (4.52)$$

$$E_d = (E_{zd} - E_f) \frac{A_d}{A_t} + E_f \quad (4.53)$$

Bu denklemlerde z_i i'inci tabaka kalınlığı, z kirişin kalınlığı, m delaminasyon sayısı E_f etkin elastisite modülü, E_{zd} delaminasyonlu tabakadaki elastisite modülü, E_d delaminasyonlu kirişin elastisite modülü, A_d delaminasyonun kapladığı alan ve A_t toplam alanı göstermektedir.

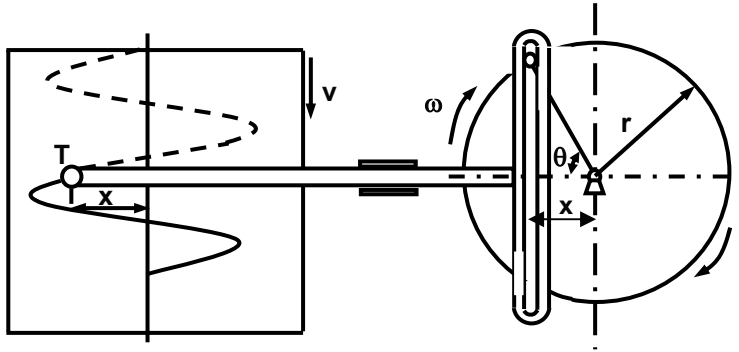
5. TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZLERİ

5.1. Analitik Çözüm

Dinamik sistem ve sistem elemanlarındaki küçük gidip gelme hareketlerine titreşim denir. Titreşim analizi açısından köprü, vapur, uzay aracı, otomobil veya herhangi bir iskelete sahip yapılar titreşim sistemi olarak bilinir. Geçmişte sistemler oldukça büyük kütlelere sahip ahşap veya taş malzemelerden oluşmaktaydı. Sistemlerin bu rijit özelliklerinin yanında titreşim doğurucu dış kuvvetler yok denecek kadar azdı. Özellikle ahşap malzemelerdeki yüksek sönümlenme özelliği sistemlerde titreşimlerin oluşumuna müsaade etmiyordu. Son yıllarda ise teknolojik gelişmelere paralel olarak demir, alüminyum gibi izotrop malzemelerin yanında kompozitlerinde makine ve dinamik sistem sanayisinde kullanılması daha hafif ve daha hızlı çalışan makinelerin gelişmesine neden olmuştur. Özellikle uzay çağı olarak bilinen günümüzde hafiflik ve yüksek hız hem fonksiyon bakımından hem de ekonomik açısından sistemlerde aranan en önemli özellik olmuştur. Hafiflik sistemin daha küçük kesitli olması dolayısıyla elastiklik yani kuvvet ve moment etkisinde daha fazla deforme olarak harekete cevap vermesi titreşim yapması demektir. Dinamik sistemlerin bu yüksek hız ve elastiklik özelliğinden kaynaklanan titreşim potansiyeli dizayn esnasında incelenip gerekli tedbir alınmadığı taktirde çalışma esnasında sistem elemanlarının erken yorulmasına ve kırılmasına sebep olur.

Kısaca günümüzde imal edilen makineler yüksek hız ve elastiklik itibarıyla oldukça fazla titreşime zorlayıcı kuvvetlere maruzdur. Bu kuvvetlerin frekans spektrumu özellikle rezonans titreşimleri açısından bilinmesi çok önemlidir. Zorlayıcı kuvvetlerden bir veya birkaçının frekansının sistemin doğal frekansıyla çakışması halinde titreşim genliği açısından tahrip edici özelliğe sahip rezonans titreşimleri meydana gelir. Çalışma frekansının kritik frekansla çakıştığı rezonans durumunda genlikler sonsuza gider bunun sonucunda gürültü ve gerilmeler artar sistem bozulur. Bu önemli olaydan dolayı rezonans titreşimleri ve istenmeyen dinamik performansla karşılaşmamak için dizayn aşamasında genel titreşim analizi yapılmalıdır (Kaya 1990).

Şekilde 5.1’de gösterilen düzenek basit harmonik harekete güzel bir örnektir. Şekildeki kağıt v hızıyla aşağı doğru çekilirken sağ taraftaki düzenek saat ibreleri yönünde çevrilirse kağıdın üzerine bir sinüzoidal bir grafik elde edilir.

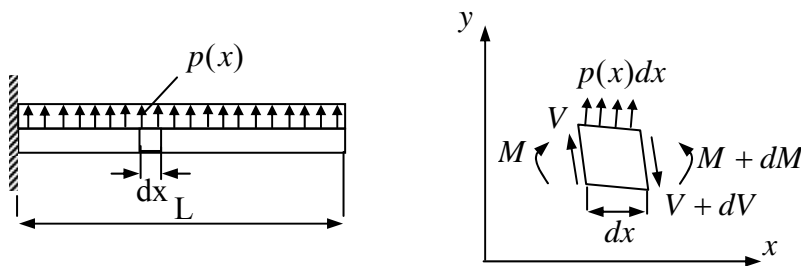


Şekil 5.1 Basit harmonik hareket

Şekilde gösterilen basit harmonik hareket genel olarak şöyle ifade edilir.

$$x = r \cos \omega t \quad (5.1)$$

Burada x genliği, r yarı çapı, ω doğal frekans, t zamanı gösterir. Euler-Bernoulli Kirişlerin titreşim analizinde dx kadar bir parça alıp bu parça üzerinde kuvvet ve moment eşitliklerini Şekil 5.2’de gösterdiğimizde;



Şekil 5.2 Kirişteki kesme kuvveti eğilme momenti gösterimleri

Bu gösterimde kirişlerin titreşimi için diferansiyel denklemde L kirişin boyunu M eğilme momentini, V kesme kuvvetini ve $p(x)$ 'de kirişin birim boyuna etki eden yükü gösterdiğine göre, aralarındaki ilişki şu şekilde yazılabilir;

$$dV - p(x)dx = 0 \quad (5.2)$$

$$\frac{dV}{dx} = p(x) \quad (5.3)$$

$$dM - Vdx - \frac{1}{2} p(x)(dx)^2 = 0 \quad (5.4)$$

Denklemden görülen ikinci derecedeki terim çok küçük olduğundan ihmal edilerek;

$$\frac{dM}{dx} = V \quad (5.5)$$

Denklem (5.3) ile denklem (5.5) arasındaki ilişki;

$$\frac{d^2M}{dx^2} = \frac{dV}{dx} = p(x) \quad (5.6)$$

olarak yazılabilir. (4,50) denklemi (5.5) denkleminde yerine yazılırsa;

$$\frac{d}{dx^2} (E_f I \frac{d^2 w}{dx^2}) = p(x) \quad (5.7)$$

Burada w ve p zamanın bir fonksiyonudur ve bu denklemin türevi alındığında;

$$E_f I \left(\frac{d^4 w}{dx^4} \right) = p(x) \quad (5.8)$$

statik yüke maruz bir kiriş için (5.8) denklemi elde edilmiş olur. Dinamik yük için d'Alembert prensibi kullanılır ve yukarıdaki ifadeye ek olarak kütle ve ivme ilave edilmelidir (Vinson ve Sierakowski 2002).

$$E_f I \frac{d^4 w(x,t)}{dx^4} = p(x,t) - \frac{\rho_m A \partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (5.9)$$

elde edilir. ρ_m malzemenin yoğunluğunu, A 'da kesit alanını, I atalet momentini, E_f tabakalı kirişin etkin elastisite modülünü göstermektedir. Bununla beraber, kirişin doğal

frekansı malzeme özelliğine ve geometrisine bağlı olup, uygulanan kuvvete bağlı değildir. Bu yüzden $p(x,t)$ sıfır olarak alınabilir. Böylece denklem aşağıdaki hali alır.

$$E_f I \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho_m A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (5.10)$$

Denkleminin homojen kısmıdır ve sınır şartlarını sağlayan düşey yöndeki sehimin koordinata ve zamana bağlı harmonik bileşenleridir.

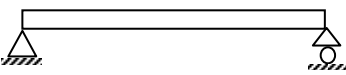
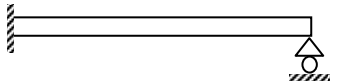
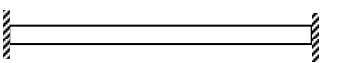
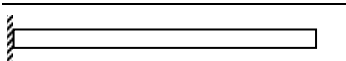
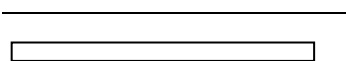
$$w(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \frac{n\pi x}{L} \cos \omega_n t \quad (5.11)$$

burada A_n genliği ve ω_n de n modundaki doğal frekansı göstermektedir. (5.11) denklem çözülüp (5.10)'da yerine konursa, her bir n değeri için ω_n aşağıdaki şekilde elde edilir (Topçu vd 2008), (Atlıhan vd 2009a), (Atlıhan vd 2009b).

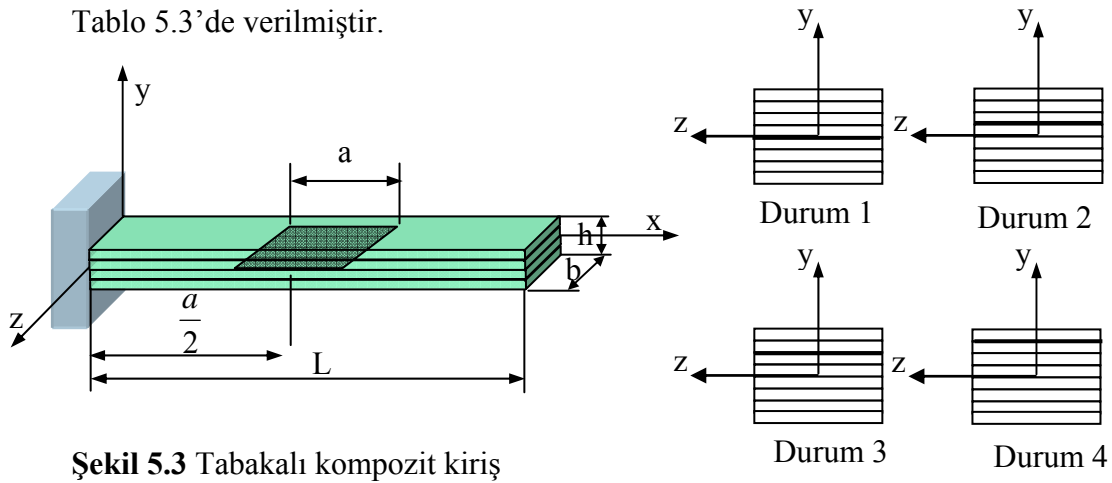
$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{E_f I}{\rho_m A}} \quad (5.12)$$

Eğer delaminasyonlu bir kirişin doğal frekansı hesaplanacaksa E_f yerine E_d alınmalıdır. Kirişlerin ya da plakların doğal frekanslarını etkileyen en önemli faktörlerden biriside Tablo 5.1'de gösterilen kirişlerin sınır şartlarıdır.

Tablo 5.1 Kirişlerin Sınır Şartları (Springer ve Kollar 2003)

Kirişin Sınır Şartları	1 mod	2 mod	Yaklaşık formülü
	3,141	6,283	$\cong n\pi$
	3,927	7,069	$\cong (n + 0,25)\pi$
	4,730	7,853	$\cong (n + 0,5)\pi$
	1,875	4,694	$\cong (n - 0,5)\pi$
	4,730	7,853	$\cong (n + 0,5)\pi$

Yapılan analitik çözümleme sonucunda elde edilen değerler ile literatürdekilerin yapmış oldukları analitik ,deneysel ve sonlu elemanlar çözümlerinin karşılaştırılması Tablo 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3 Tabakalı kompozit kiriş

Tablo 5.3’de verilen doğal frekanslara ait mekanik özellikler ve $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{2S}$ tabakalı kompozit kirişin geometrik boyutları Tablo 5.2’de verilmiştir. Ayrıca kirişin sınır şartları ve delaminasyon yeri Şekil 5,3’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Kirişlerin Mekanik Özellikleri (Hu 2002)

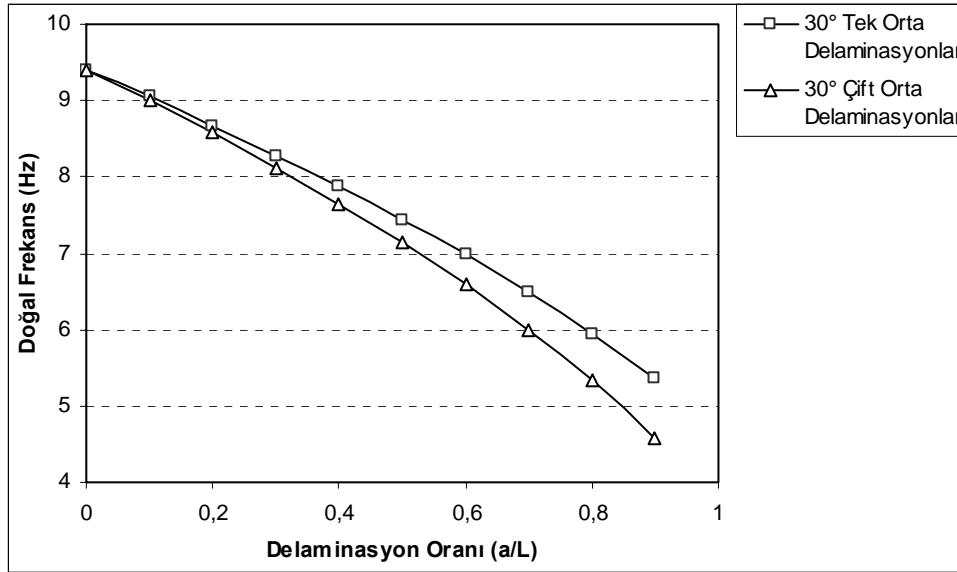
Mekanik Özellikler	Birim
E_{11}	134 GPa
E_{22}	10,3 GPa
$G_{12} = G_{13}$	5 GPa
ν_{12}	0,33
ρ	1,48 kg/m ³
L (Kirişin boyu)	127mm
b (Kirişin eni)	12,7mm
h (kirişin kalınlığı)	1,02mm

Tablo 5.3 Ankastre kirişin doğal frekans değişimlerinin karşılaştırılması

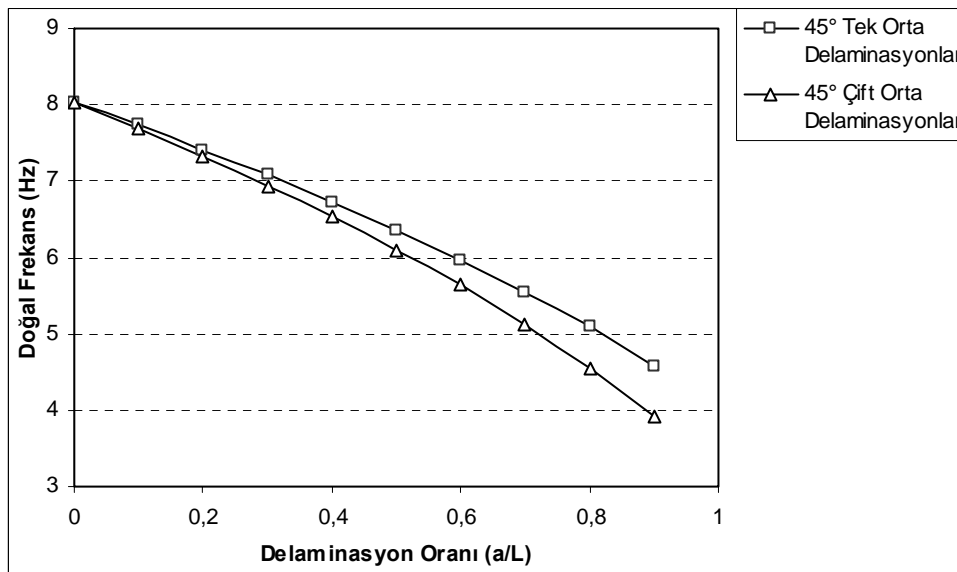
Birim (Hz)	(Hu 2002) SEM	(Hu 1999) Mindlin SEM	(Luo ve Hanagud 2000) Analitik Çözüm	(Shen ve Grady 1992) Deneysel	Tezde Kullanılan Analitik Yaklaşım
Delaminasyonsuz	81,87	82,00	81,86	80,087	81,995
1. Durum Delaminasyon Büyüklüğü (a=50,8mm ve h=0,51mm)	76,522	76,643	76,807	75,369	73,422
Delaminasyon Büyüklüğü (a=101,6mm ve h=0,51)	56,556	56,728	56,953	57,542	63,585
2. Durum Delaminasyon Büyüklüğü (a=50,8mm ve h=0,6375)	76,889	77,019	76,621	75,126	75,681
Delaminasyon Büyüklüğü (a=101,6mm ve h=0,6375)	57,717	57,896	59,335	48,335	58,602
3. Durum Delaminasyon Büyüklüğü (a=50,8mm ve h=0,765)	80,501	80,606	80,785	79,750	77,787
Delaminasyon Büyüklüğü (a=101,6mm ve h=0,765)	72,607	72,845	73,148	72,460	73,339
4. Durum Delaminasyon Büyüklüğü (a=50,8mm ve h=0,8925)	80,637	80,754	80,945	68,917	80,01
Delaminasyon Büyüklüğü (a=101,6mm ve h=0,8925)	73,778	73,779	74,047	55,626	71,500

Tezde içindeki şekiller ve tablolarda kirişin sınır şartları için bir ucu ankastre diğer ucu serbest olduğunda ankastre olarak, her iki ucu da ankastre olduğunda ise ankastre-ankastre olarak gösterilecektir.

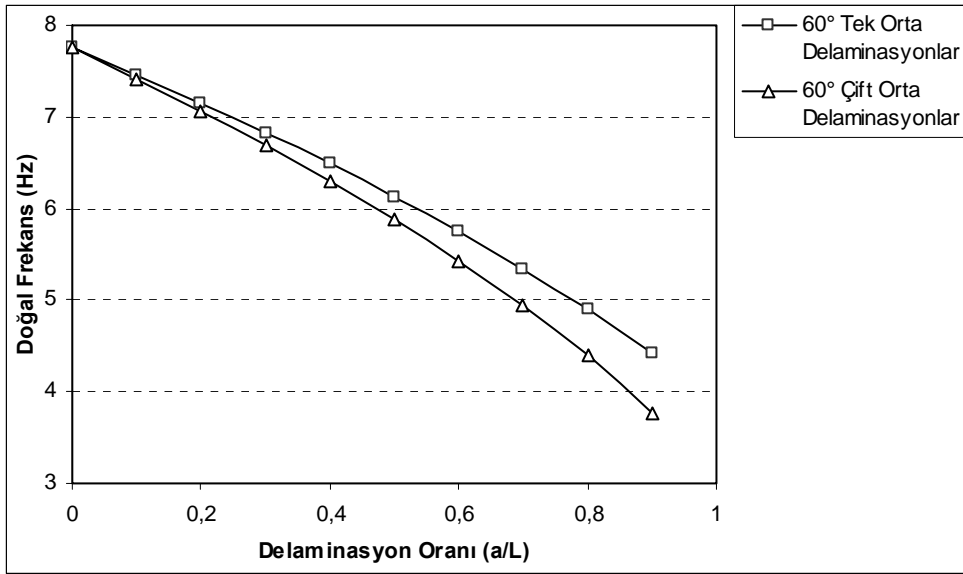
Şekil 5.4'den Şekil 5.8'e kadar görülen çeşitli delaminasyonlara sahip (a/L 0,1-0,9) tabakalı kompozit kirişlerin ankastre sınır koşullarındaki doğal frekans değişimleri görülmektedir.



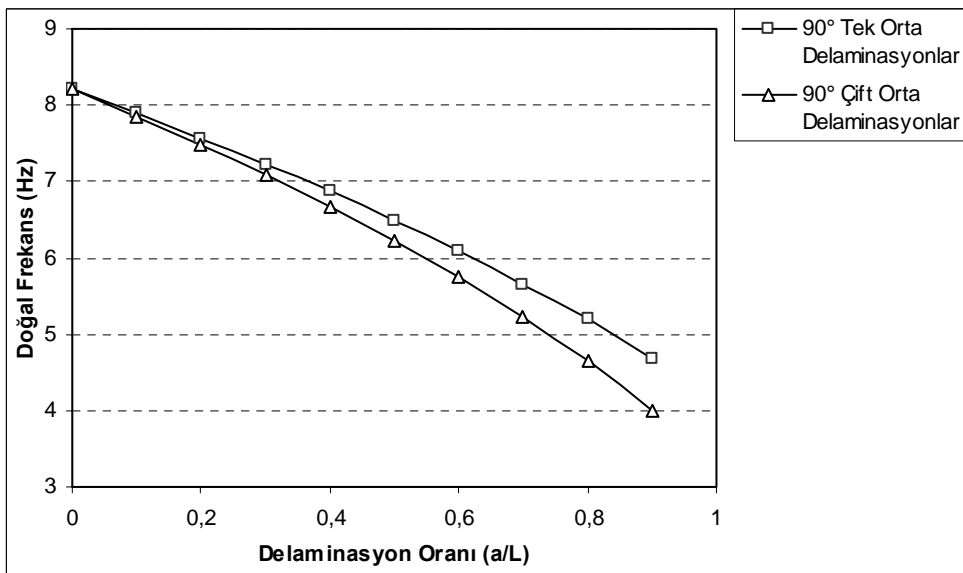
Şekil 5.4 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 30°)



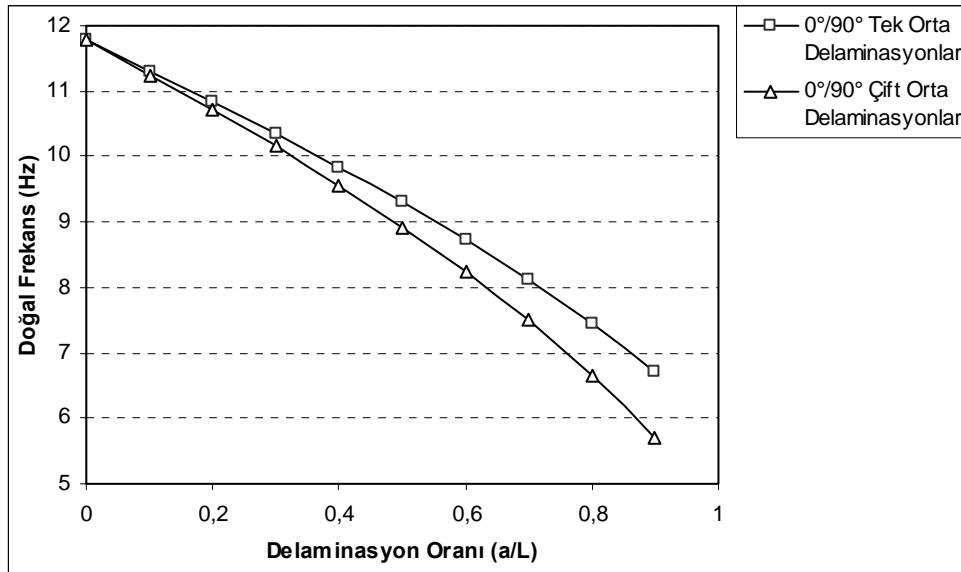
Şekil 5.5 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 45°)



Şekil 5.6 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 60°)

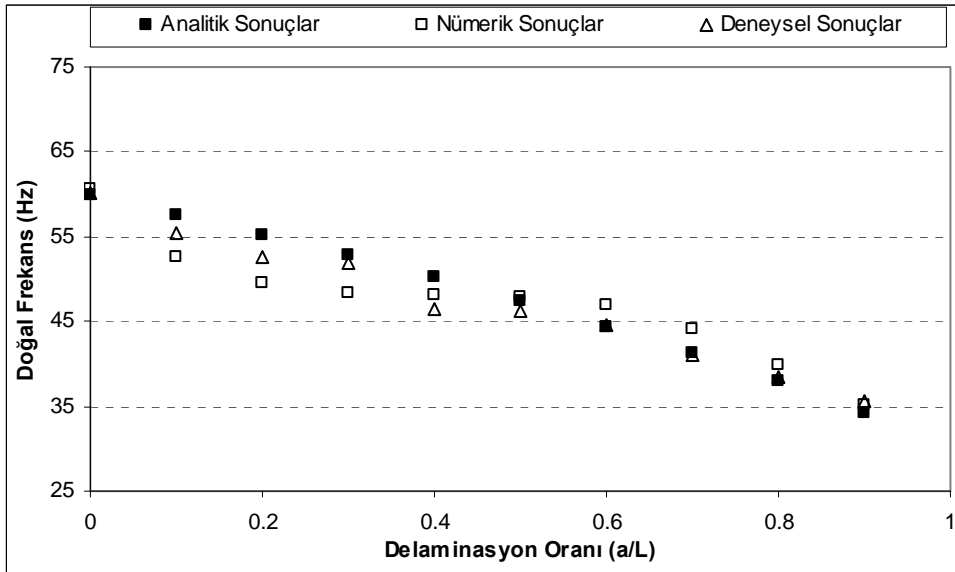


Şekil 5.7 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 90°)



Şekil 5.8 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (analitik 0°/90°)

Delaminasyonların yeri ortada olmak üzere tekli ve çoklu iki farklı veri grafiklerde sunulmuştur. Bu beş grafiğin ortak özelliklerini şöyle özetliye biliriz. Kirişlerdeki delaminasyon oranı (a/L) arttıkça kirişlerin doğal frekans değerlerinin düştüğü söylenebilir. Yine beş grafikte de delaminasyonlu kompozit kirişlerin takviye açısının değişimi ile doğal frekans değerlerinin değiştiği de görülebilir. Ayrıca tek kenar delaminasyonlarla çift kenar delaminasyonların doğal frekans değerleri incelendiğinde delaminasyon sayısı arttığında tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğü de görülmektedir.



Şekil 5.9 Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişlerin analitik, nümerik ve deneysel olarak karşılaştırılması (30°)

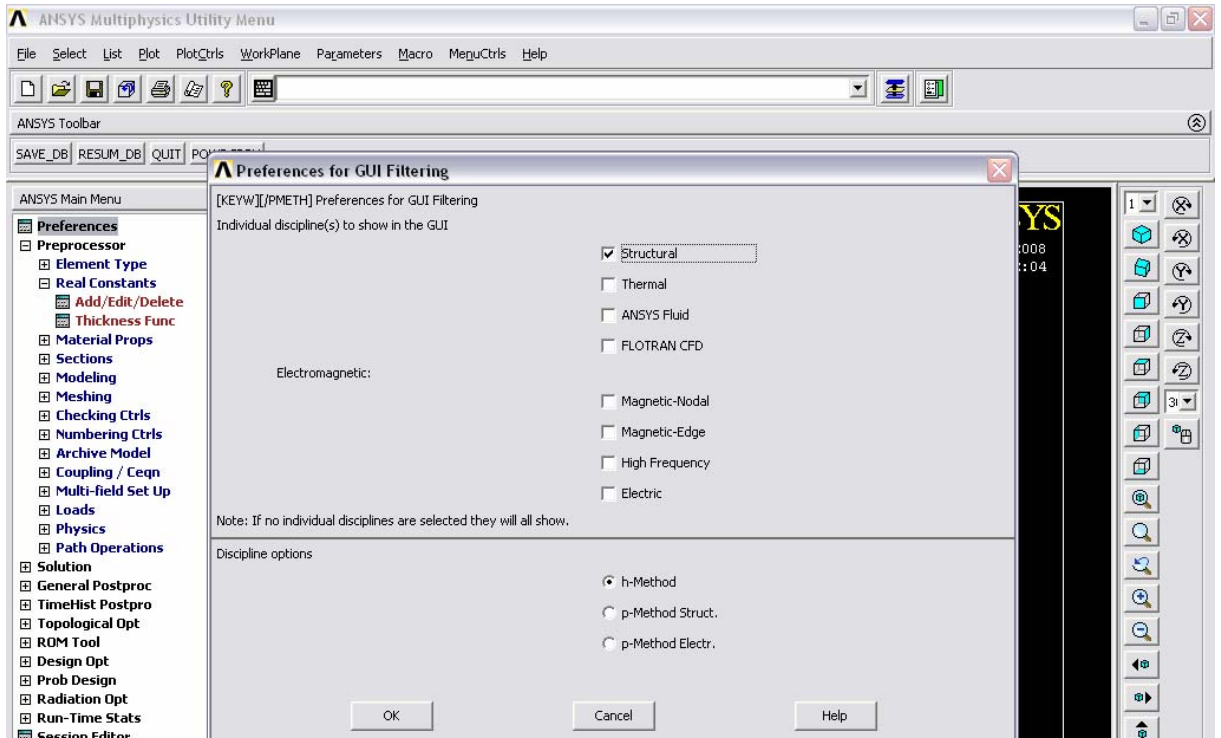
Şekil 5.9’da tabakalı kompozit kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel analiz sonuçları tek orta delaminasyon değişimi ile nasıl değiştiği gösterilmiştir ve bu üç sonucun birbirleri ile uyumlu oldukları görülmektedir. Aralarındaki farkların ise çeşitli kabullerden ve hatalı ölçümlerden kaynaklandığı söylenebilir. Analitik çalışmada Euler-Bernoulli kiriş teorisi kabul edildiği için kesme kuvvetinin etkisi yok sayılması birinci hata olarak düşünülebilir. Ayrıca ikinci hata olarak da deneylerdeki hatalı ölçümler düşünülebilir.

5.2. Nümerik Analiz (Ansys)

Sonlu elemanlar metoduyla karmaşık bir problem, bilinen veya kavranması daha kolay alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır bir hale getirilir. Oluşturulan alt problemler çözümlenip birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Örneğin gerilme analizi üzerinde çalışan mühendisler, gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir, küre gibi geometrisi bilinen şekillerle sınırlarlar. Bu elde edilen sonuçlar çoğu kez problemin yaklaşık çözümüdür ve bazen doğrudan bazen de bir kat sayı ile düzeltilerek kullanılır. Mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebi ile genellikle problemlerin tam çözümü yerine, kabul edilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir.

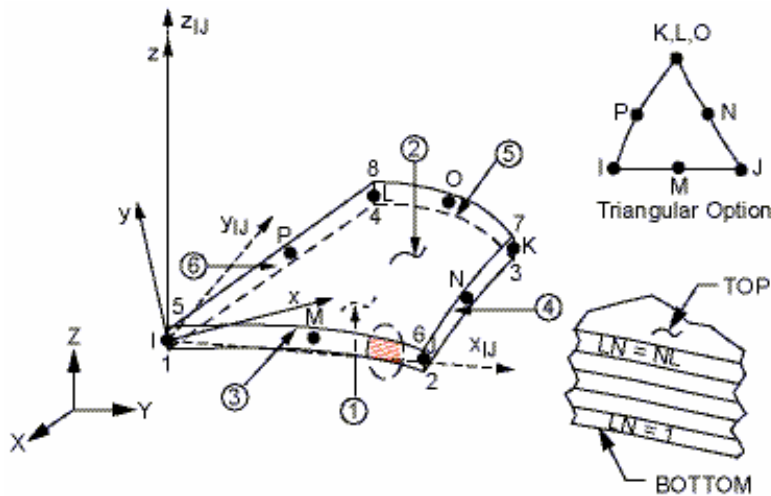
Sonlu elemanlar metodu (SEM) karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır. İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncüsü ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır (Topçu ve Taşgetiren 1998).

Piyasada SEM kullanan birçok bilgisayar programları vardır. Bunlardan en bilinenlerinden biri de ANSYS'dir. Ansys'de ilk olarak yapılacak analizin şeklini belirlememiz gerekir. Analizin yapısal, termal ya da akışkan mı olacağını karar verilmesi gerekir. Yapılan çalışma yapısal bir çalışma olacağından yapısal (structural) seçenek işaretlenmelidir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Yapısal Tercih Seçimi

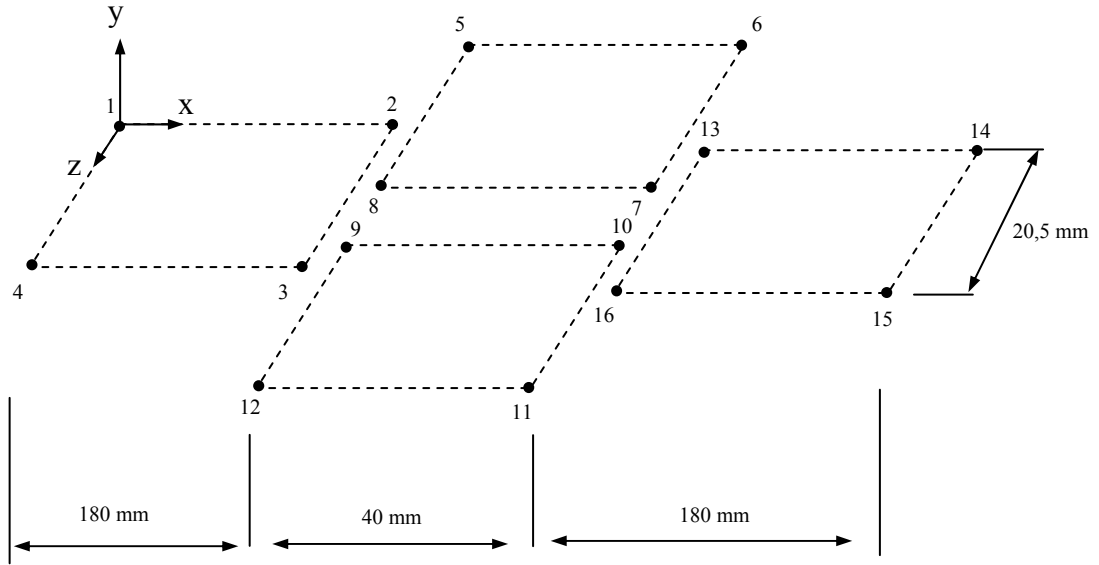
Daha sonra element tipinin belirlenmesi gerekir. Analizi yapılacak elementin titreşim, tabakalı, kompozit özelliklerinin olması gerekir. Bu özellikleri sağlayan eleman olarak Shell99 seçilmiştir. Shell99 tabakalı yapısal kabuk modeller için kullanılabilir ve 250 tabakaya kadar çalışmaya izin verir. Bu element x, y, z doğrultularında rotasyon ve öteleme yaparak 6 tane serbestlik derecesine sahiptir. Orthotropic (kompozit) malzemelerde kullanılır. Shell99 (Şekil 5.11) elementinde mesh yapılırken kübik ya da üçgen olarak eleman parçalara ayrılabilir.



Şekil 5.11 Shell 99 elementinin geometrisi

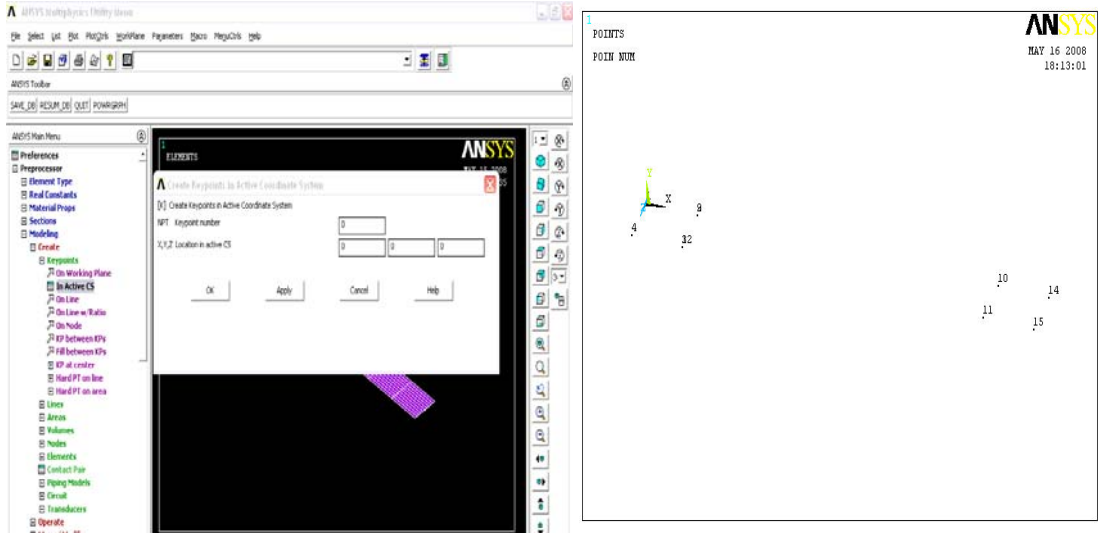
5.2.1. Delaminasyonlu kompozit kirişin ansys'de oluşturulması

Ansys Programında delaminasyonlu bir kiriş oluşturmak istendiğinde delaminasyonların başlangıç ve bitiş noktalarının tam olarak bilinmesi çok önemlidir. Bunun için öncelikle düğüm noktalarının belirlenmesi gerekir. Şekil 5.12'de 16 düğüm noktasına sahip ortasında 40 mm delaminasyon olan bir tabakalı kompozit kiriş görülmektedir.



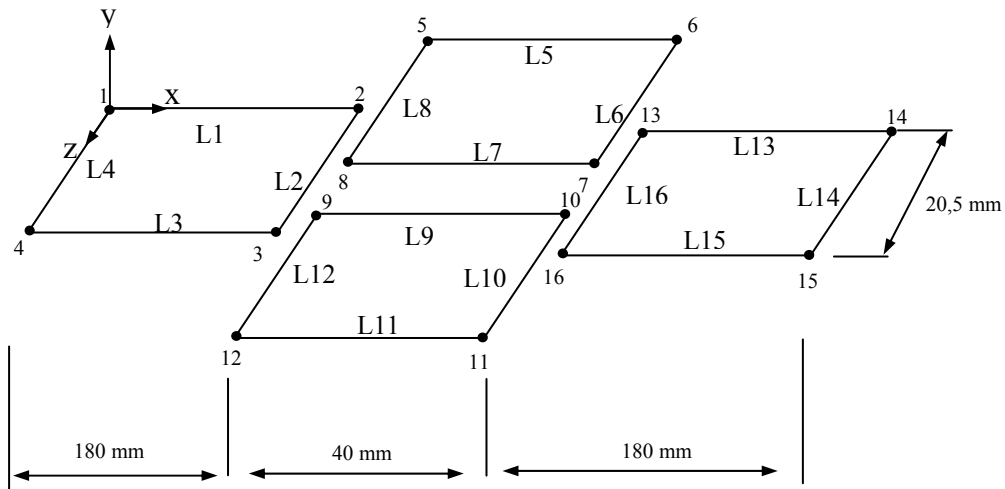
Şekil 5.12 Kompozit kirişin düğüm noktaları

Her düğüm noktası x, y ve z koordinat sistemi sıfır kabul edilerek çizilmelidir. Tüm düğüm koordinatları ansys'in komut sisteminde sırasıyla Şekil 5.13'de gösterildiği gibi girilir.



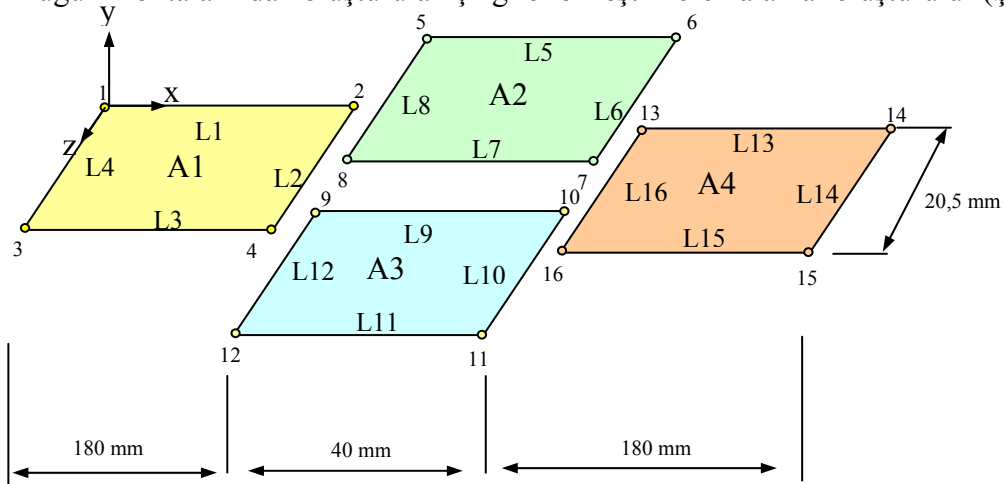
Şekil 5.13 Kompozit kirişin düğüm noktalarının girilmesi

Düğüm yerleştirildikten sonra sırayla her iki düğüm noktası line komutu ile birleştirilir böylece her iki düğüm noktası bir çizgiyi oluşturur (Şekil 5.14).



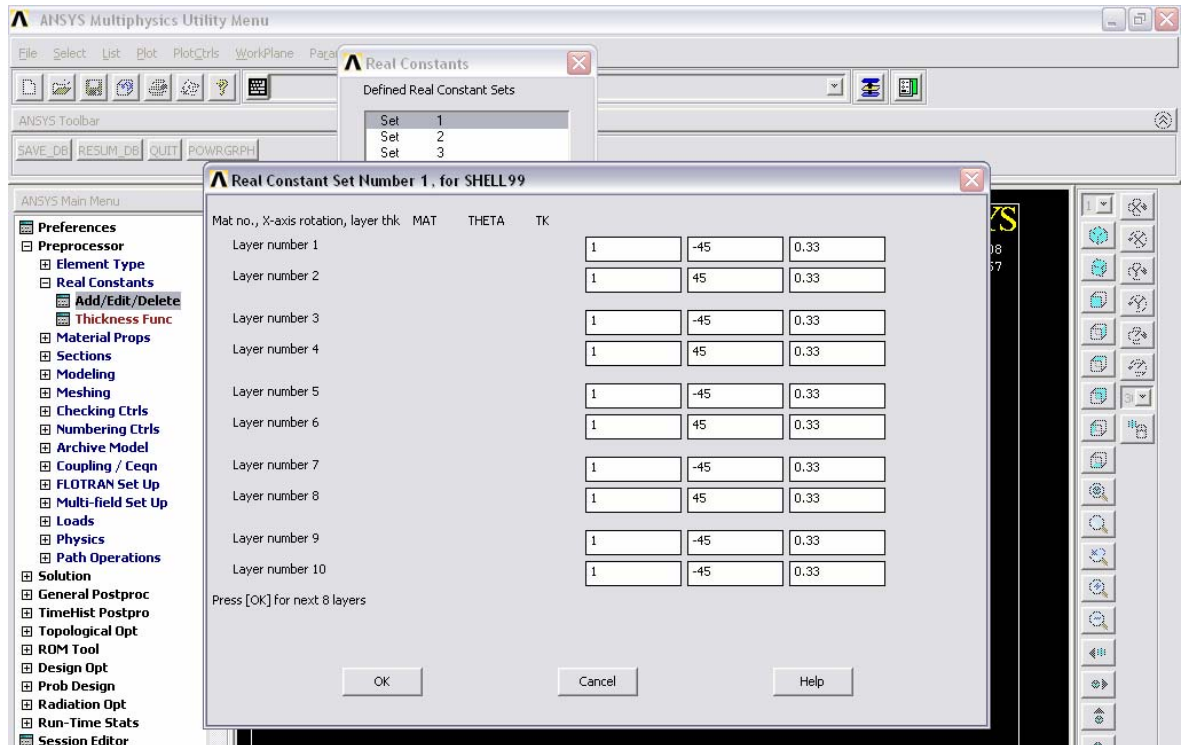
Şekil 5.14 Düğüm noktalarından çizgi oluşturulması

Düğüm noktalarından oluşturulan çizgiler birleştirilerek alanlar oluşturulur (Şekil 5.15).



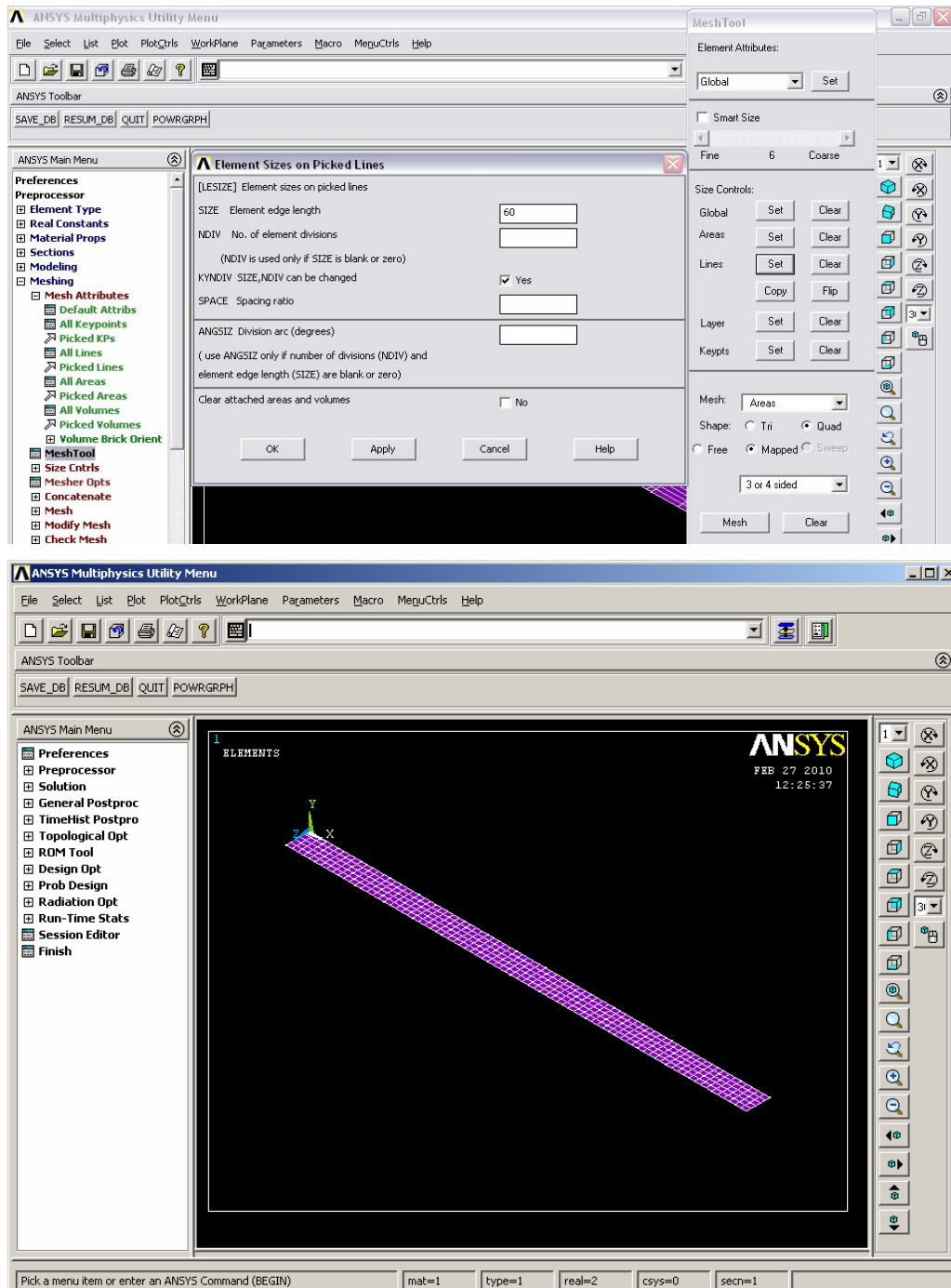
Şekil 5.15 Alanların oluşturulması

Oluşturulan alanların birbiri ile birleştirilmesi gerekir bunun için öncelikle A1 alanı sırasıyla A2 ve A3 alanları ile birleştirilir. A4 alanı da yine sırası ile A2 ve A3 alanları ile birleştirilir. Bu sayede A2 alanı ile A3 alanı birleştirilmediğinden aralarında boşluk (süreksizlik-delaminasyon) oluşturulmuş olur. Oluşturulan delaminasyonlu kirişin mekanik özellikleri (E_1 , E_2 , G_{12} ...) programdan girilir. Mekanik özellikleri verilen kirişin tabaka sayısı ve bu tabakaların açıları programdan verilir (Şekil 5.16).



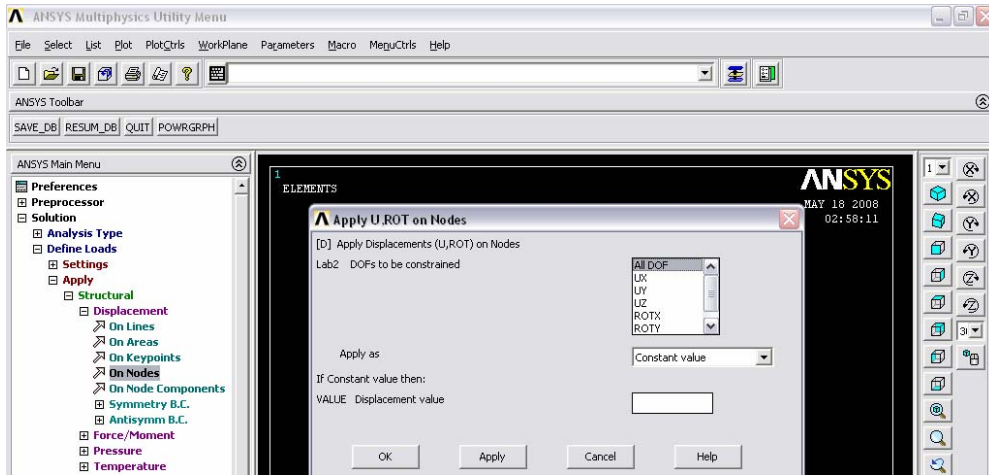
Şekil 5.16 Tabaka açılarının oluşturulması

Açıları ve tabaka sayısı verilen delaminasyonlu kiriş daha sonra meshlenir (Şekil 5.17).



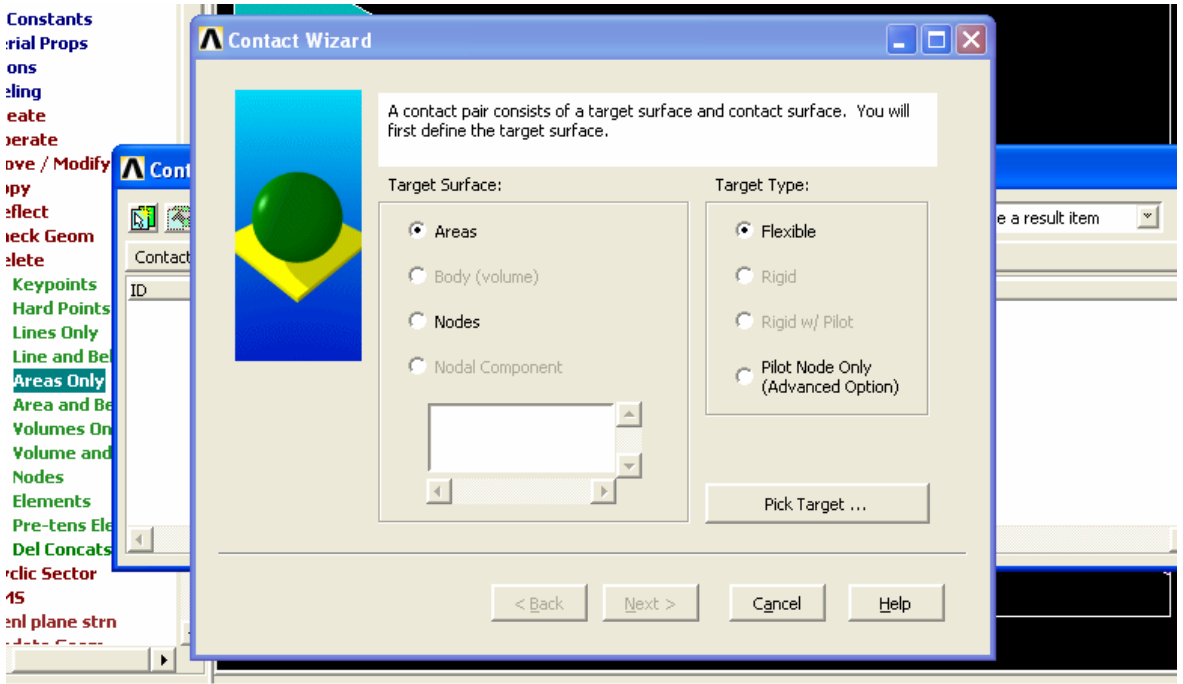
Şekil 5.17 Tabakalı kompozit kirişin meshlenmesi

Mesh işleminden sonra sınır şartlarının verilmesi gerekir. Ankastre bir kirişin bir tarafı tamamen tutturulur, diğer tarafı ise serbesttir. Tutturulan tarafın her eksenindeki (x,y,z) uzamaları ve dönmeleri sıfırdır. Bu yüzden tutulan taraf için programda “all dof” seçeneği işaretlenmelidir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18 Tabakalı kompozit kirişin sınır şartlarının verilmesi

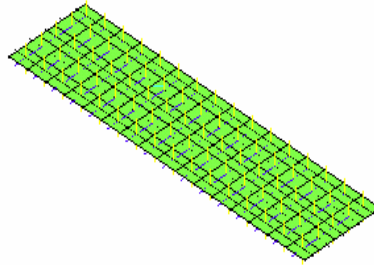
Oluşturulan delaminasyonun A2 ve A3 alanlarının arasına kontak eleman tanımlanmalıdır (Şekil 5.19). Kontak eleman (Şekil 5.20) tanımlanmazsa özellikle yüksek modlarda kirişin katmanları birbirinin içine geçer ayrıca kontak eleman kullanarak gerçek sonuca daha yakın değerler elde edilebilir.



Şekil 5.19 Kontak elemanın tanımlanması

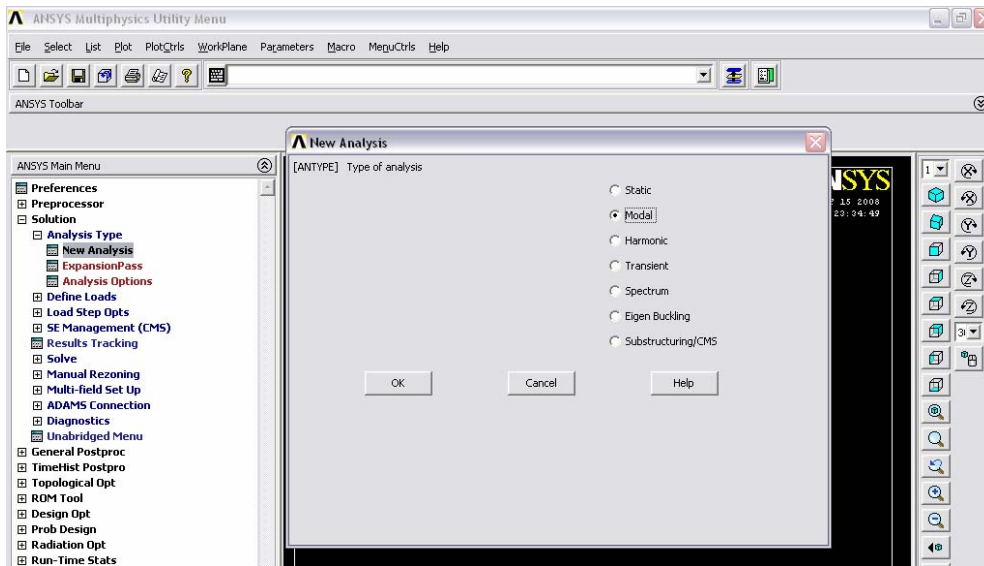
1
ELEMENTS
TYPE NUM

ANSYS
DEC 18 2008
16:20:31

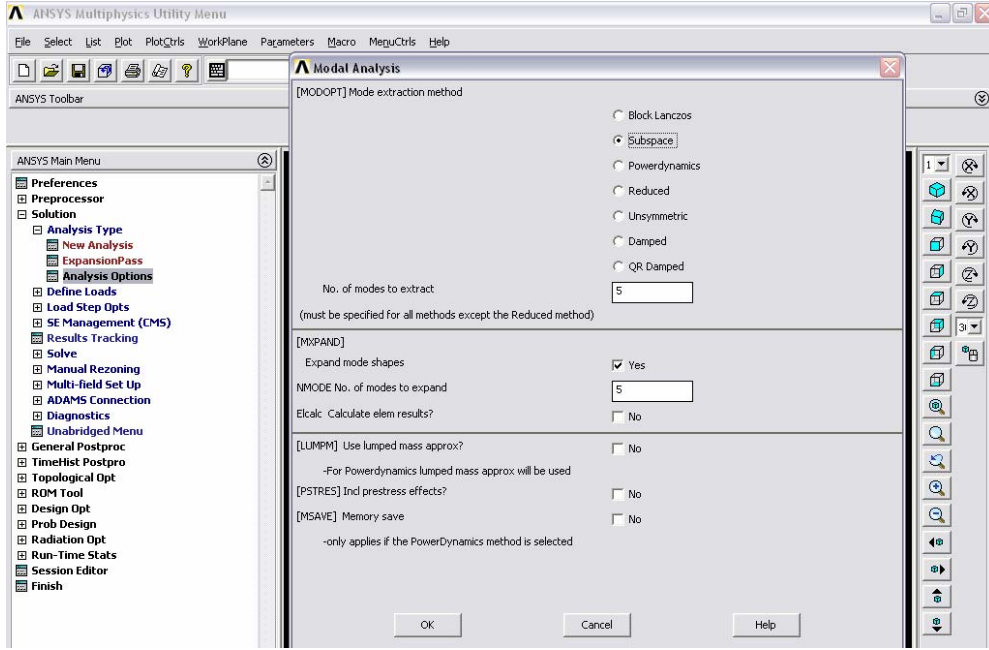


Şekil 5.20 Kontak eleman

Meshlenip, sınır şartları oluşturulan ve sonrada kontak eleman tanımlanan delaminasyonlu kompozit kiriş daha sonra çözümü için analiz seçeneğinden modal analiz seçeneği seçilir (Şekil 5.21).

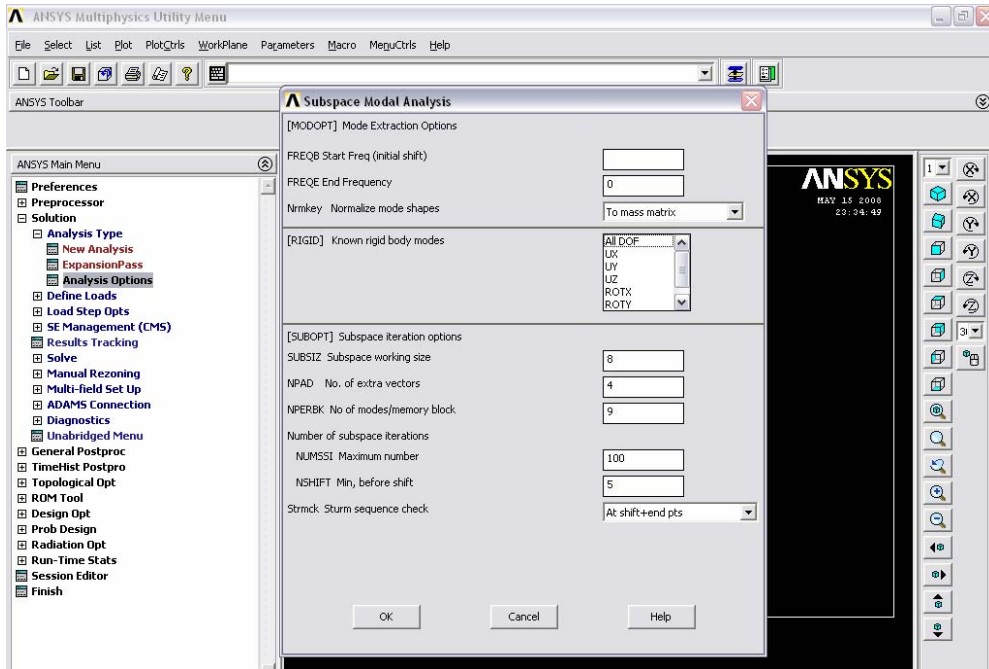


Şekil 5.21 Analiz seçimi



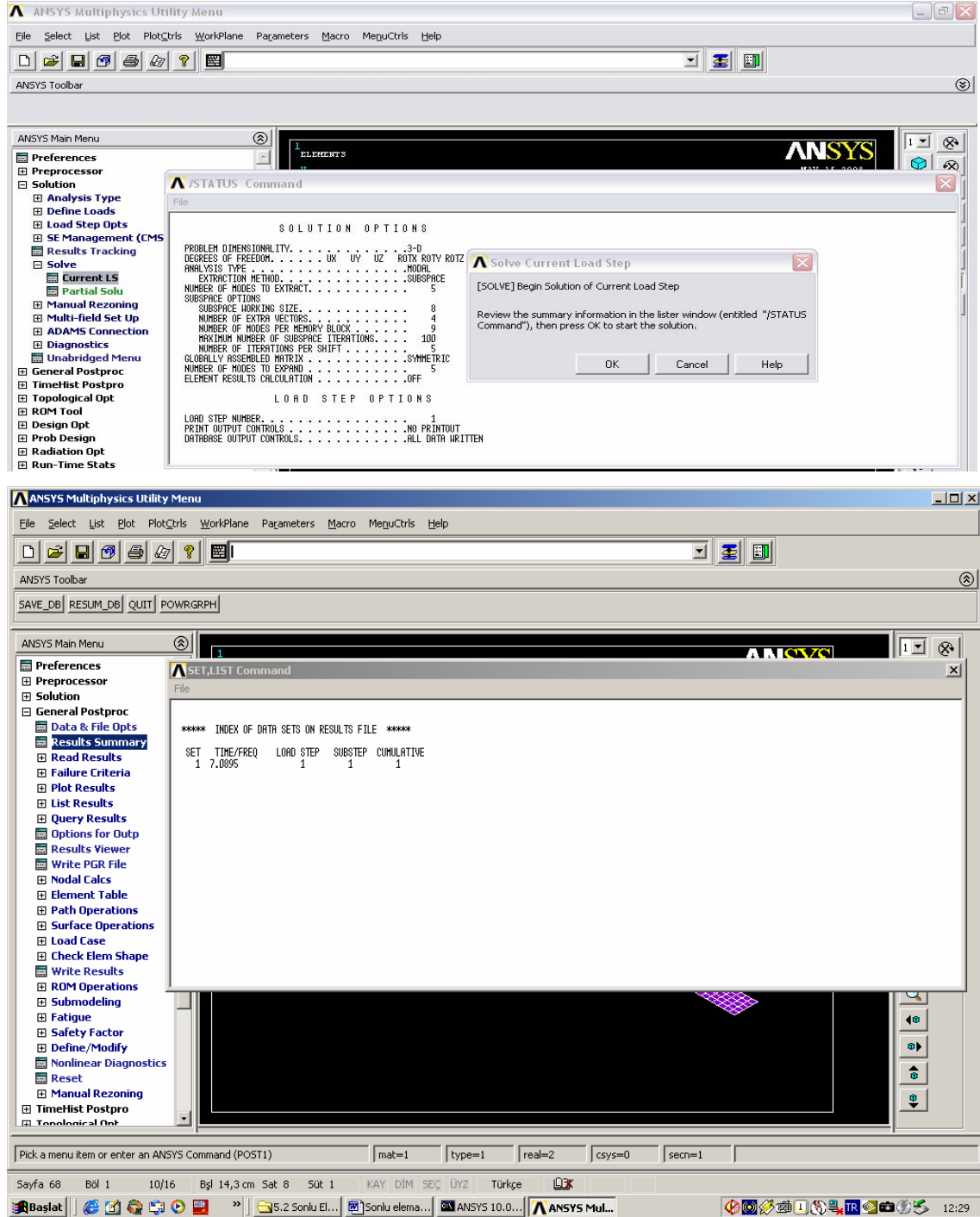
Şekil 5.22 Modal analiz tipi ve mod sayısı seçimi

Analiz seçeneğinden seçilen modal analiz için subspace seçeneğini seçilir. Aynı zamanda bu menüden kaç frekans elde etmek istiyorsak (1 mod, 2 mod...) o miktar girilir (Şekil 5.22).



Şekil 5.23 İterasyon ayarı

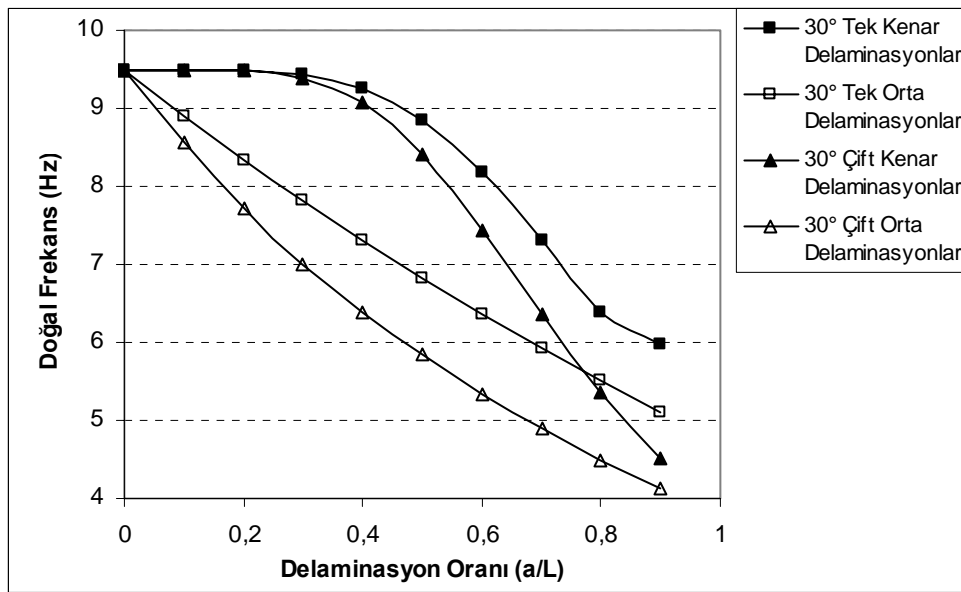
Modal ayarı yapılan tabakalı kompozit kirişin çözümü için iterasyon sayısı girilir. Burada iterasyon sayısı artırılarak gerçeğe yakın değerler bulunabilir. Bununla birlikte iterasyonun sayısının artırılması kirişin çözüm zamanı çok artırmaktadır. Bu yüzden bu tez çalışmasında iterasyon sayısı olarak 100 alınmıştır (Şekil 5.23).



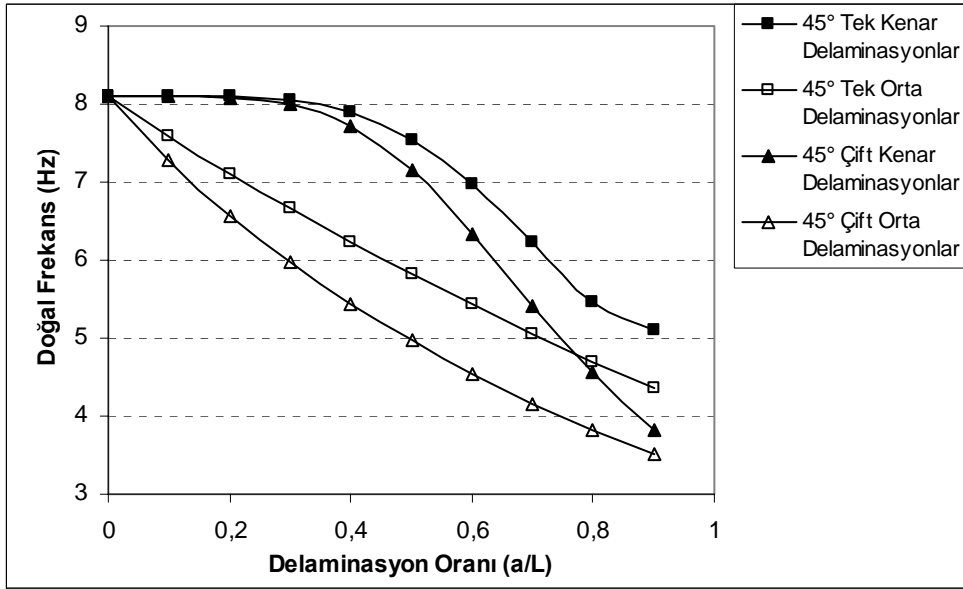
Şekil 5.24 Tabakalı kompozit kirişin çözümü

İterasyon sayısı ayarlanan kirişin çözümü yapılarak doğal frekans değerleri bulunur (Şekil 5.24).

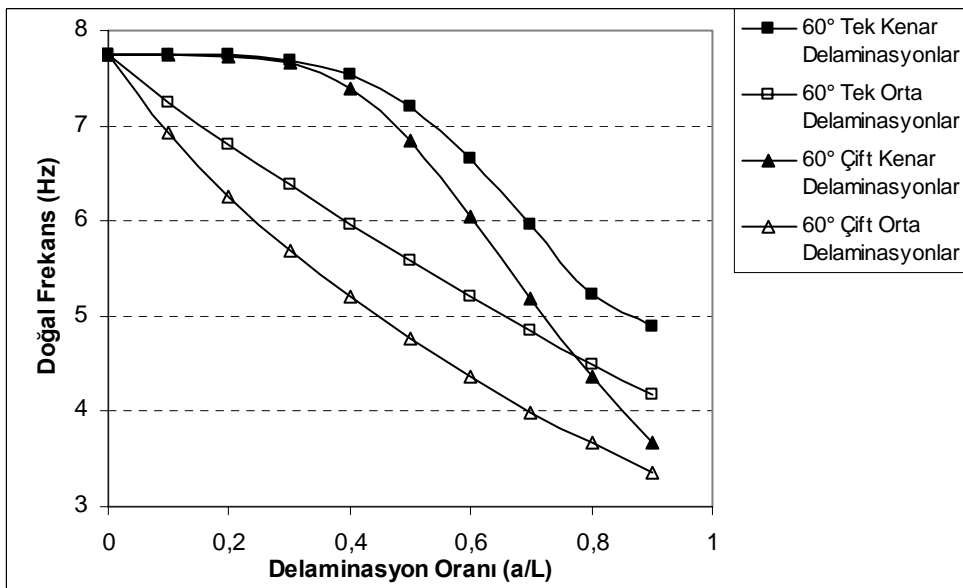
Ansys Modellenen delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişlerin a delaminasyon büyüklüğü ve L tabakalı kompozit kirişin boyunu göstermek üzere delaminasyon oranları (a/L) artırılarak doğal frekans değişimleri $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ve $0^\circ/90^\circ$ için tek kenar ve tek orta delaminasyonlar farklı sınır koşulları için grafikler halinde sunulmuştur. Her farklı delaminasyon oranı için farklı doğal frekans değerleri elde edilerek grafiklerde gösterilmiştir.



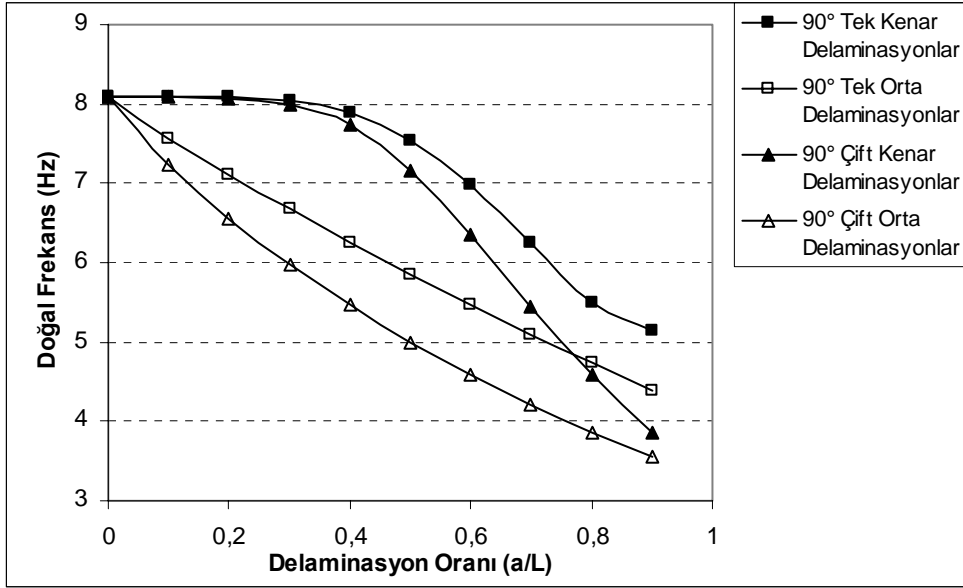
Şekil 5.25 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 30°)



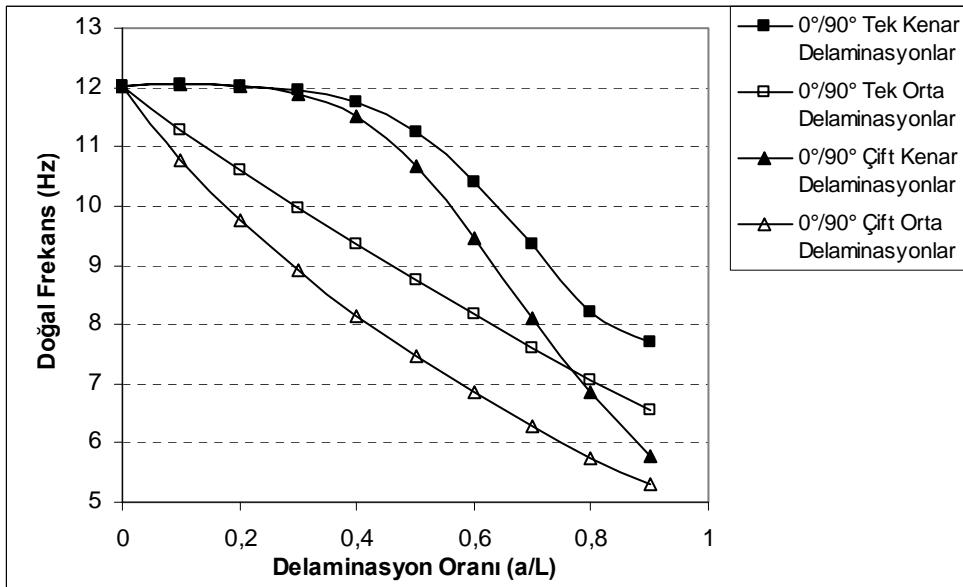
Şekil 5.26 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 45°)



Şekil 5.27 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 60°)

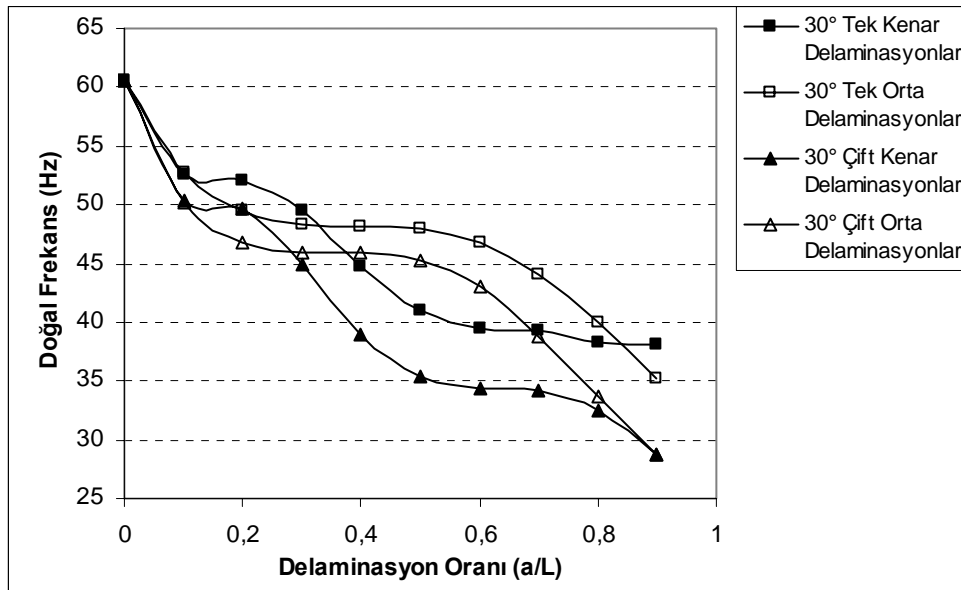


Şekil 5.28 Ankastré sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 90°)

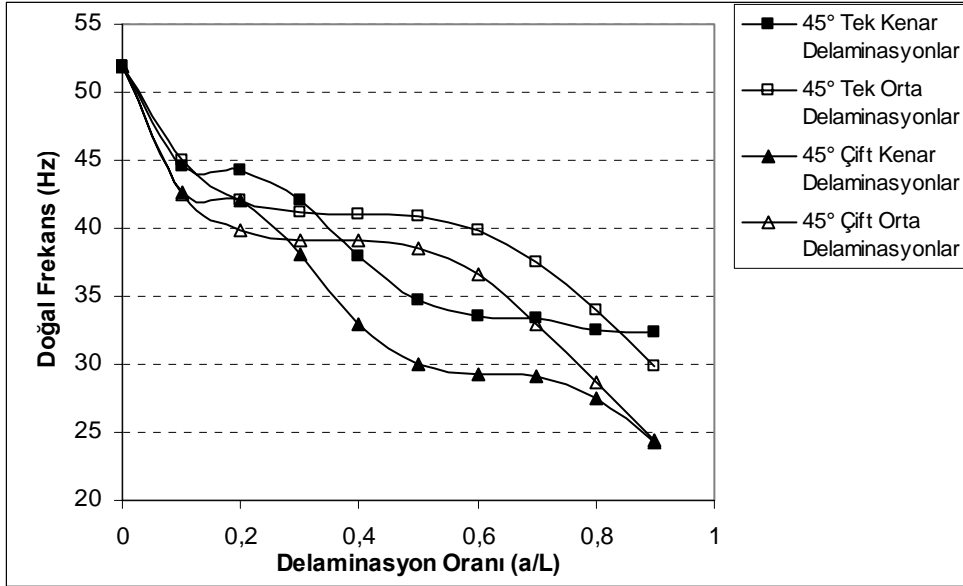


Şekil 5.29 Ankastré sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 0°/90°)

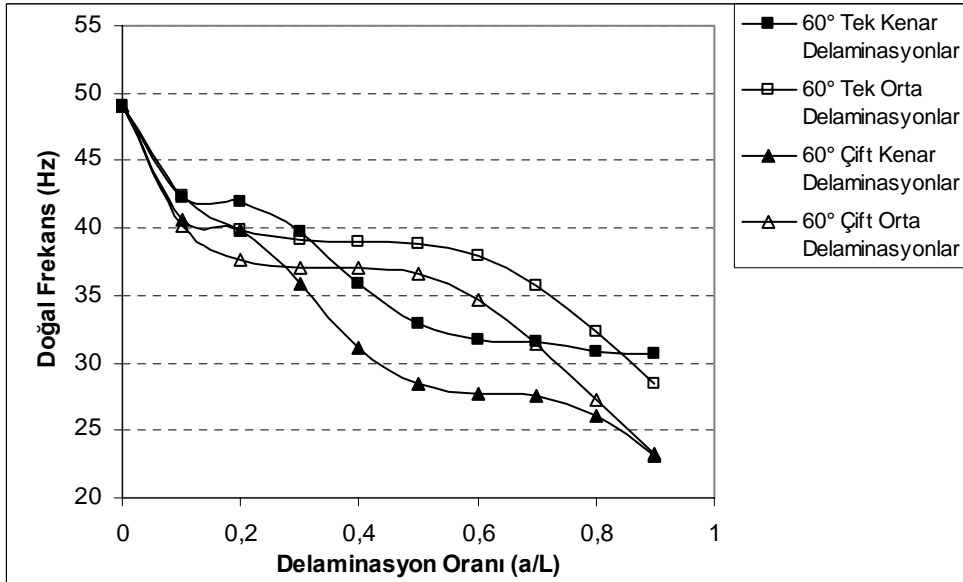
Şekil 5.25'den Şekil 5.29'a kadar görülen çeşitli delaminasyonlara sahip (a/L 0,1-0,9) tabakalı kompozit kirişlerin ankastre sınır koşullarındaki doğal frekans değişimleri görülmektedir. Delaminasyonların yerleri kenarda ve ortada olmak üzere, tekli ve çoklu olmak üzere dört farklı veri grafiklerde sunulmuştur. Yukarıdaki grafiklerin ortak özellikleri şöyle özetlenebilir. Kirişlerdeki delaminasyon oranı (a/L) arttıkça kirişlerin doğal frekans değerlerinin düştüğü söylenebilir. Yine beş grafikte de delaminasyonlu kompozit kirişlerin takviye açısının değişimi ile doğal frekans değerlerinin değiştiği de görülebilir. Ayrıca tek kenar delaminasyonlarla çift kenar delaminasyonların doğal frekans değerleri incelendiğinde delaminasyon sayısı arttığında tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğü de görülmektedir. Tek orta delaminasyonlar ile çift orta delaminasyonlar karşılaştırıldığında da aynı sonuçlarla karşılaşılmıştır.



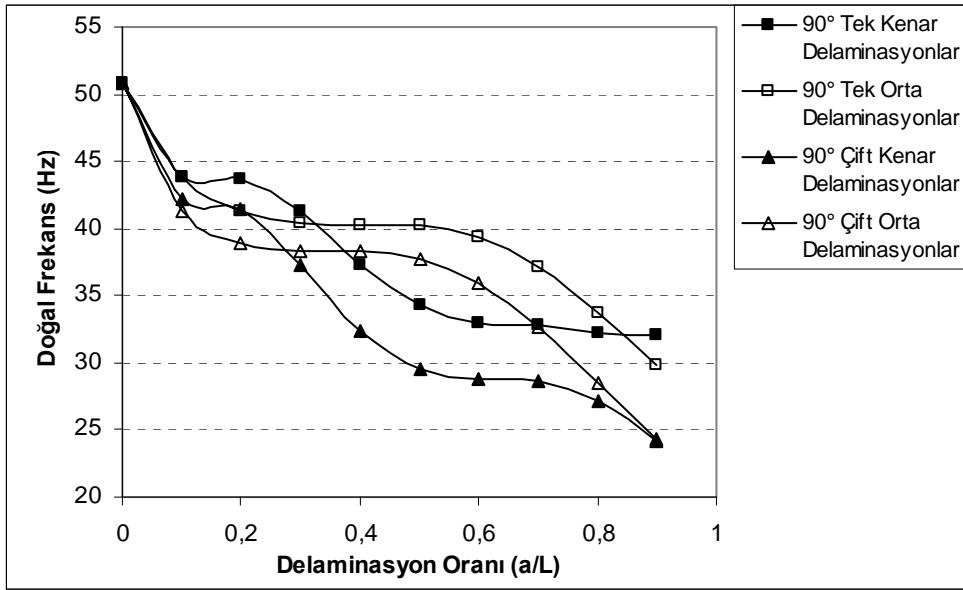
Şekil 5.30 Ankastre-ankastre koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 30°)



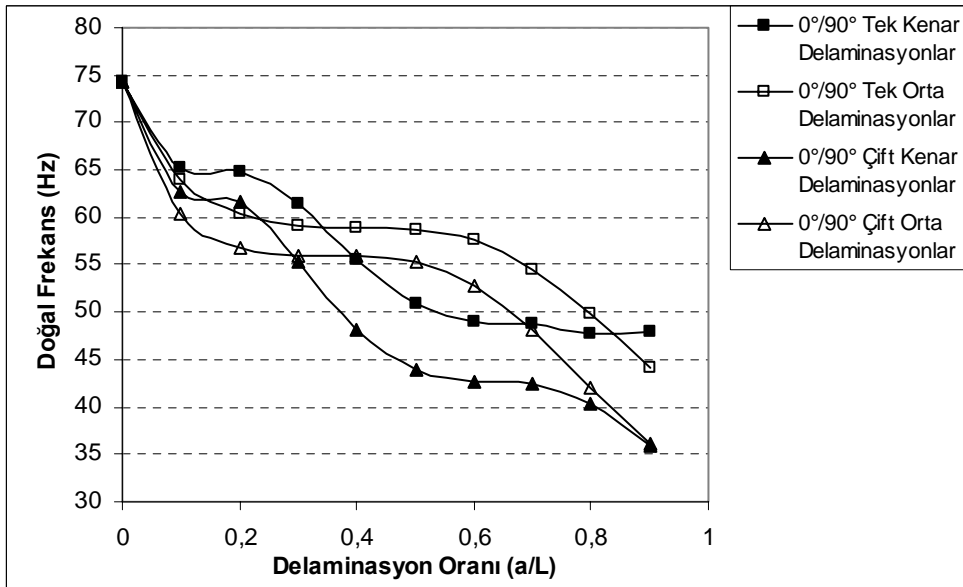
Şekil 5.31 Ankastr-ankastr koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 45°)



Şekil 5.32 Ankastr-ankastr koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 60°)



Şekil 5.33 Ankastr-ankastr koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 90°)



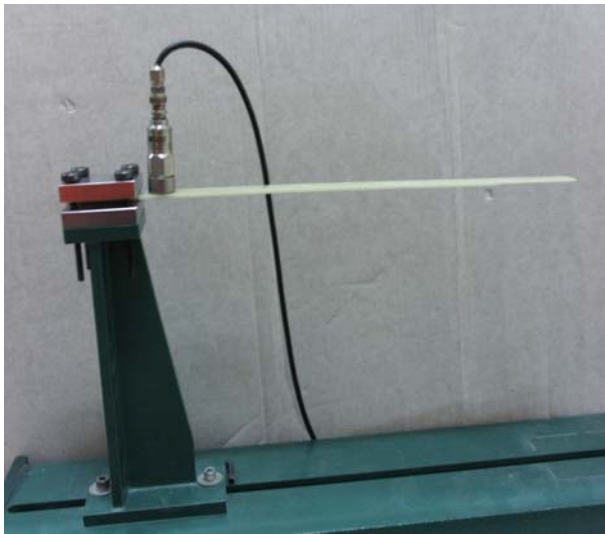
Şekil 5.34 Ankastr-ankastr koşullarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (nümerik 0°/90°)

Şekil 5.30'dan Şekil 5.34'e kadar görülen çeşitli delaminasyonlara sahip (a/L 0,1-0,9) tabakalı kompozit kirişlerin Ankastre-ankastre sınır koşullarındaki doğal frekans değişimleri görülmektedir. Delaminasyonların yerleri kenarda ve ortada olmak üzere, tekli ve çoklu olmak üzere dört farklı veri grafiklerde sunulmuştur. Bu beş grafiklerin ortak özellikleri şöyle özetlenebilir. Kirişlerdeki delaminasyon oranı (a/L) artıkça kirişlerin doğal frekans değerlerinin düştüğü söylenebilir. Yine beş grafikte de delaminasyonlu kompozit kirişlerin takviye açısının değişimi ile doğal frekans değerlerinin değiştiği görülebilir. Ayrıca tek kenar delaminasyonlarla çift kenar delaminasyonların doğal frekans değerleri incelendiğinde delaminasyon sayısı artığında tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğü de görülmektedir. Tek orta delaminasyonlar ile çift orta delaminasyonlar karşılaştırıldığında da aynı sonuçlarla karşılaşmıştır.

Yine grafiklerde görüldüğü gibi delaminasyona sahip tabakalı kompozit kirişlerin takviye açıları değiştiğinde frekans değerleri değiştiği gibi, kirişlerin sınır şartlarının değişmesi ile de doğal frekans değerlerinin değiştiği de grafiklerden görülmektedir.

5.3. Kompozit Malzemelerin Titreşimlerinin Deneysel Analizi

Tabakalı kompozit kirişlerin titreşim analizinde genellikle tabakalı kirişe bir sinyal verilir ve bu verilen sinyalin titreşim grafiğinden tabakalı kompozit kirişin doğal frekansı hesaplanır. Şekil 5.35’de gösterilen kiriş bir ucundan civatalarla tutturulup diğer ucu serbest bırakılarak ankastre haline getirilmiştir.



Şekil 5.35 Tabakalı kompozit kirişin deney mekanizması

Bir titreşim analizinde sinyali alan bir ivme ölçer (Piezoelectric Accelerometer), sinyali data karta ileten amplifier, data kart ve bilgisayardan oluşan ekipmandan oluşur. Titreşim sinyalinin analizinde öncelikle titreşim analizi yapılacak olan kirişe dışarıdan bir sinyal verilir bu sinyal Şekil 5.36’da görülen ivme ölçere gelir. Çalışmada kullanılan Wilcoxon tipi (model 786C) ivme ölçerin özelliği -50 ile 120°C arasındaki sıcaklıklardaki çevre şartlarında ve 1 ile 14000 Hz çalışma frekansına kadarki koşullarda çalışabilir. Kullanılan ivme ölçer manyetik koşullarda çalıştığından ölçümü yapılacak kirişin üstüne küçük bir metal yapııştırılarak ivme ölçer kirişe manyetik olarak yapıştırılır. İvme ölçerin ağırlığı deney numunesinin ağırlığı ile karşılaştırıldığında büyük olduğu düşünülebilir ancak ölçümde kirişin ankastre kısma yakın yere monte edildiği için ağırlığın pek fazla etkilemediği söylenebilir.



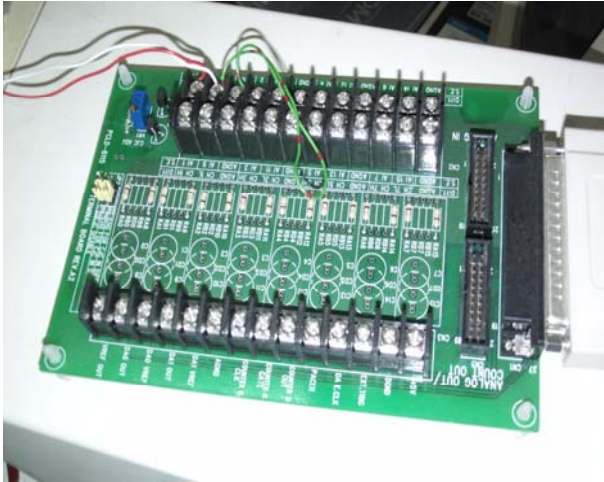
Şekil 5.36 İvme ölçer

İvme ölçere gelen sinyal buradan bağlantı kabloları yardımıyla Şekil 5.37’de gösterilen amplifier gelir burada sinyal ya hız yada ivmeye çevrilebilir. Titreşim analizi için sinyal amplifier de ivmeye çevrilerek data karta yollanır.



Şekil 5.37 Amplifier

Amplifier’e gelen sinyal kablo yardımıyla iletilmek üzere Şekil 5.38’e gösterilen bağlantı kartına gelir. Bağlantı kartına gelen veriler bilgisayardaki Anvantech data kartına aktarılır. Anvantech data kartı yüksek veri taşıma hızına sahiptir. Böylelikle ivme ölçerden elde edilen veriler bilgisayardaki data kartından Microsoft-Excel programına aktarılır ve bu program sayesinde kompozit kirişin titreşim grafiği çizilir.



Şekil 5.38 Bağlantı kartı

Tabakalı kompozit kirişin doğal frekansı şu şekilde bulunur.

$$\Delta t = \frac{t}{\bar{n}} \quad (5.13)$$

burada t milisaniye geçen zaman, \bar{n} ise bu zamanda alınan örnek sayısıdır. Bu verilerden titreşim grafiği kolaylıkla çizilebilir.

$$\Delta t_p = \Delta t \cdot n_p \quad (5.14)$$

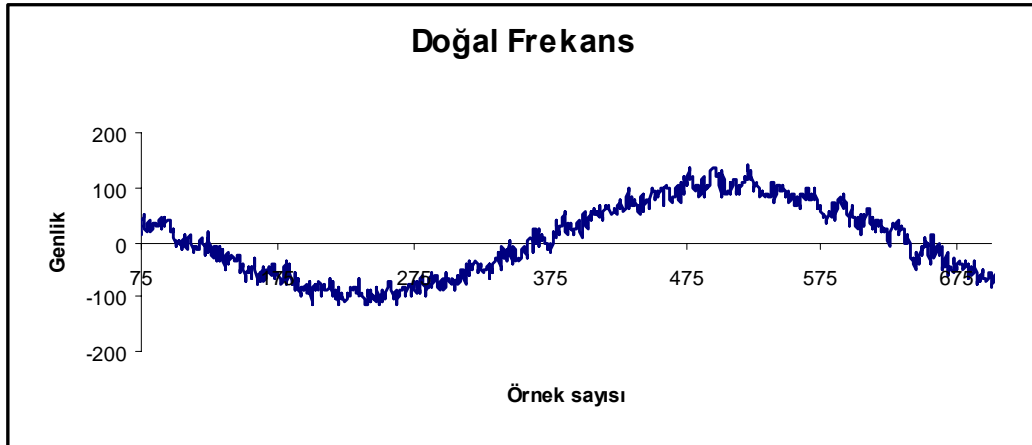
burada n_p periyot sayısıdır. Buradan frekansı hertz cinsinden;

$$f = \frac{1000}{\Delta t_p} \quad (5.15)$$

elde edilebilir. Örnek olarak 40 mm delaminasyona sahip $[\pm 45]_8$ tabakalı kompozit bir kirişin deneyde $t = 232,9808$ ms'lik süre içinde 1024 tane örnek alınmıştır. Alınan örnek Excel programında çizildiğinde titreşim grafiği aşağıdaki gibi olmuştur (Şekil 5.39). Grafiği çizilen tabakalı kompozit kirişin malzeme özellikleri $E_1 = 44150 \frac{N}{mm^2}$,

$$E_2 = 12300 \frac{N}{mm^2}, \quad G_{12} = 4096 \frac{N}{mm^2}, \quad \nu_{12} = 0,2 \text{ ve } \nu_{23} = 0,05$$

kirişin geometrisi ise $L=400$ mm $b=20,5$ mm ve $t=3,3$ mm'dir



Şekil 5.39 Titreşim grafiği

Böylece;

$$\Delta t = \frac{232,9808}{1024} = 0.227520312 \text{ ms.}$$

Şekildeki grafikteki bir periyot sayısı $n_p = 558$ için geçen zaman;

$$\Delta t_p = \Delta t \cdot n_p = 0.227520312 \cdot 558 = 126,9563341 \text{ ms.}$$

Buradan doğal frekans;

$$f = \frac{1000}{\Delta t_p} = \frac{1000}{126,9563341} = 7,87672397 \text{ Hz.}$$

olarak bulunur.

Aynı ebatlara sahip ve yine aynı delaminasyona sahip kompozit kirişin sonlu elemanlar analizi (SEM) yapıldığında kirişin doğal frekansı 8,1005 Hz. olarak bulunmuştur.

5.3.1 Sonlu elemanlar analizden veya deneysel analizden oluşan hatalar

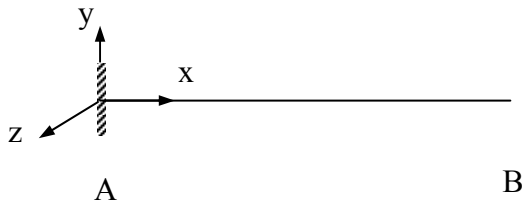
Tabakalı kompozit kirişlerin titreşim analizlerinde sonlu elemanlar modelinden veya deneysel analizden kaynaklanan hatalar olarak ikiye ayırabiliriz.

5.3.1.1. Sonlu elemanlar analizinden kaynaklanan hatalar

Sonlu elemanlar modelinden kaynaklanan hataları kendi arasında sınır şartlarından kaynaklanan hatalar ve kontak eleman kullanılmasından kaynaklanan hatalar olarak ayırabiliriz.

5.3.1.1.1. Sınır şartlarının tam olarak belirlenmemesi

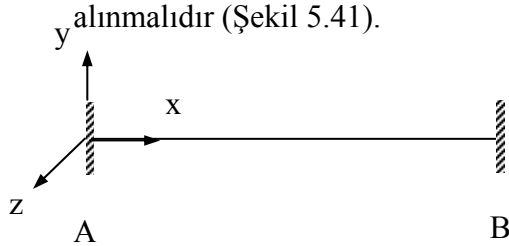
Analizi yapılan kirişin sınır şartlarının tam olarak belirlenmemesi kirişin doğal frekansının hatalı ölçülmesine neden olur. Bir tarafı tutulu bir tarafı serbest ankastre bir kirişin tutulu olan tarafının öteleme ve dönme hareketi yapamayacağından hem öteleme hemde dönme sıfır alınmalıdır (Şekil 5.40).



	Öteleme	Dönme
A	$u_x=u_y=u_z=0$	$Rot_x=Rot_y=Rot_z=0$
B	---	---

Şekil 5.40 Bir tarafı tutulu bir tarafı serbest kiriş

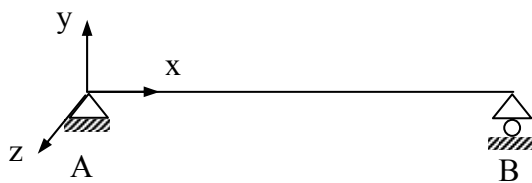
Kirişin her iki tarafı tutuluysa tutulu olan her iki tarafın öteleme ve dönmesi sıfır alınmalıdır (Şekil 5.41).



	Öteleme	Dönme
A	$u_x=u_y=u_z=0$	$Rot_x=Rot_y=Rot_z=0$
B	$u_x=u_y=u_z=0$	$Rot_x=Rot_y=Rot_z=0$

Şekil 5.41 Her iki tarafı tutulu kiriş

Eğer kiriş basit mesnetli kiriş ise(Şekil 5.42);

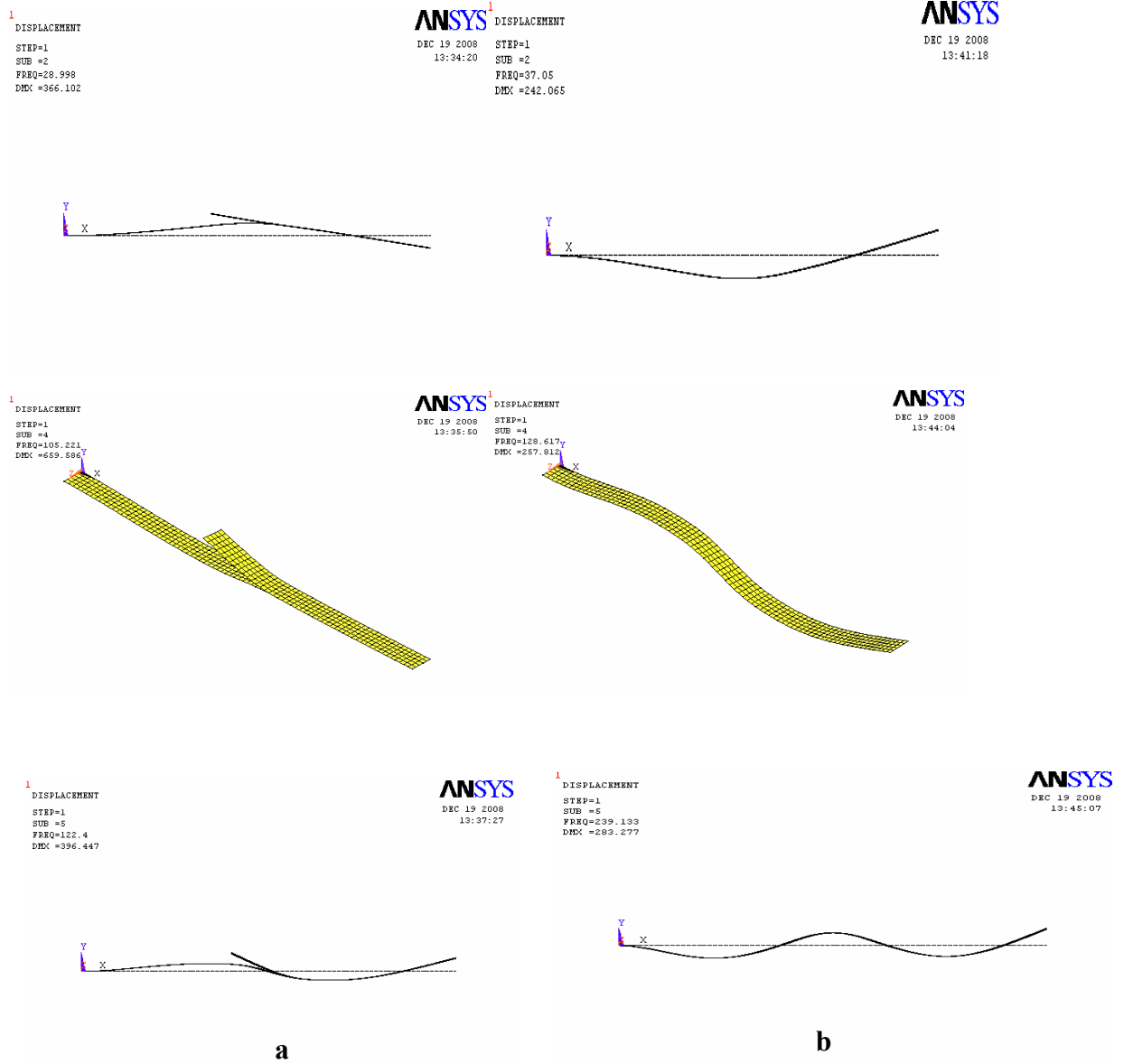


	Öteleme	Dönme
A	$u_x=u_y=u_z=0$	$Rot_x \neq Rot_y \neq Rot_z \neq 0$
B	$u_x \neq 0, u_y=u_z=0$	$Rot_x \neq Rot_y \neq Rot_z \neq 0$

Şekil 5.42 Basit mesnetli kiriş

5.3.1.1.2. Kontak eleman kullanılmamasından kaynaklanan hatalar

Doğal frekans analizi yapılacak delaminasyona sahip bir kirişin kontak eleman tanımlanmadığında özellikle yüksek frekanslarda hatalar oluşur. Kontak malzeme kullanılması veya kullanılmaması durumları aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5.43).



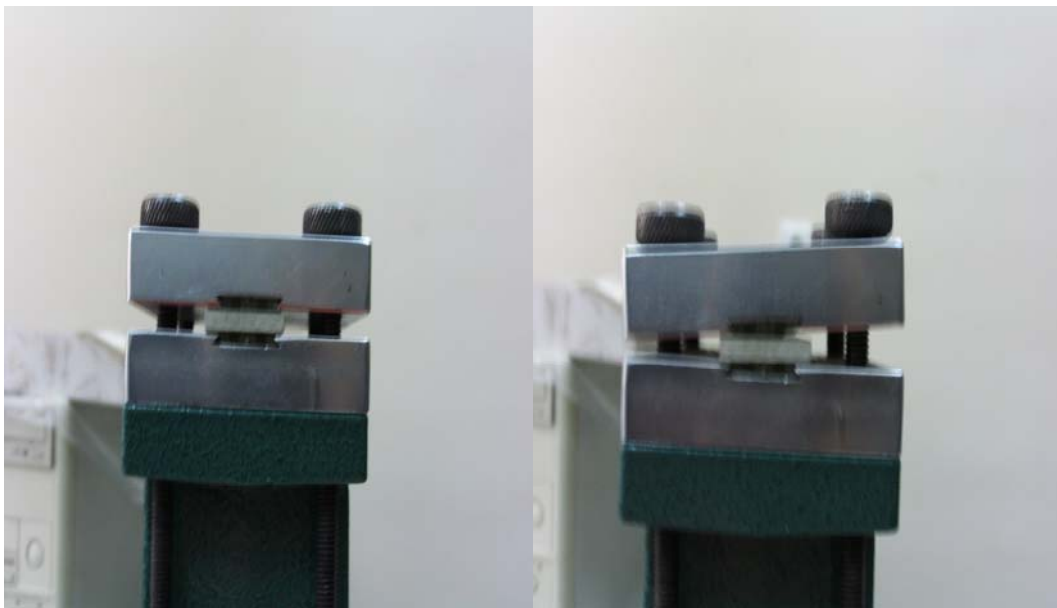
Şekil 5.43 a) Kontak malzeme kullanılmaması durumu, b) kontak malzeme kullanılması durumu

5.3.1.2. Deneysel Analizden Kaynaklanan Hatalar

Deneysel analizden kaynaklanan hataları ise deney düzeneğinde sınır şartlarının tam olarak verilememesi, darbenin (kuvvetin) kirişin eksenine tam gelmemesinden kaynaklanan hatalar ve ölçümün stabilite durumu olmadan alınmasından meydana gelen hatalar olarak sayılabilir.

5.3.1.2.1. Deney düzeneğinde sınır şartlarının tam olarak verilememesi

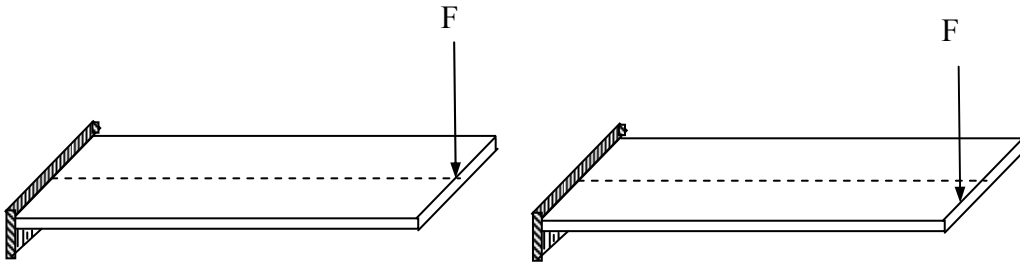
Deney düzeneğinde sınır şartlarının tam olarak verilememesi durumunda ölçümü yapılan kirişin doğal frekansında bir takım hatalar görülebilir. Genellikle bu tür hatalarda civatanın sıkımı sırasında bir civatanın diğer civataya göre daha fazla sıkılmasından kaynaklanır. Bu durumda kompozit kirişte ekseninde küçük bir kayma meydana gelir ve kiriş tam eğilme yapamayacağından kiriş modlarında hatalar meydana gelecektir. Kompozit kirişi sabitleyen civataların eşit olarak sıkıştırılarak bu sorun ortadan kaldırılabilir (Şekil 5.44).



Şekil 5.44 Sınır şartlarının tam olarak verilmemesi

5.3.1.2.2. Darbenin kiriş eksenine tam gelmemesinden kaynaklanan hatalar

Bir kirişin doğal frekans analizi yapılabilmesi için dışarıdan bir etkiye (darbe) ihtiyaç vardır. Bu etkinin kirişin tam merkez eksenine gelmesi gerekir aksi durumda kiriş tam olarak eğilmez yani eğme modu tam oluşmaz. Böyle bir durumda eksene tam gelmeyeceğinden kiriş hem eğilir hemde burulur (çarpılır). Bu da kirişin doğal frekansının sapmasına sebep olacaktır (Şekil 5.45).

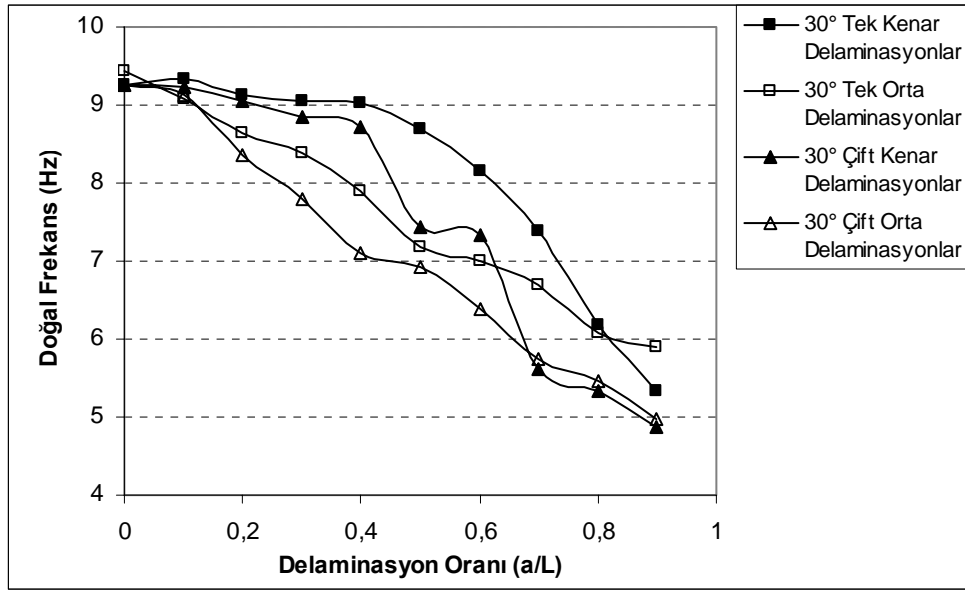


Şekil 5.45 Darbenin eksene tam olarak gelmemesi

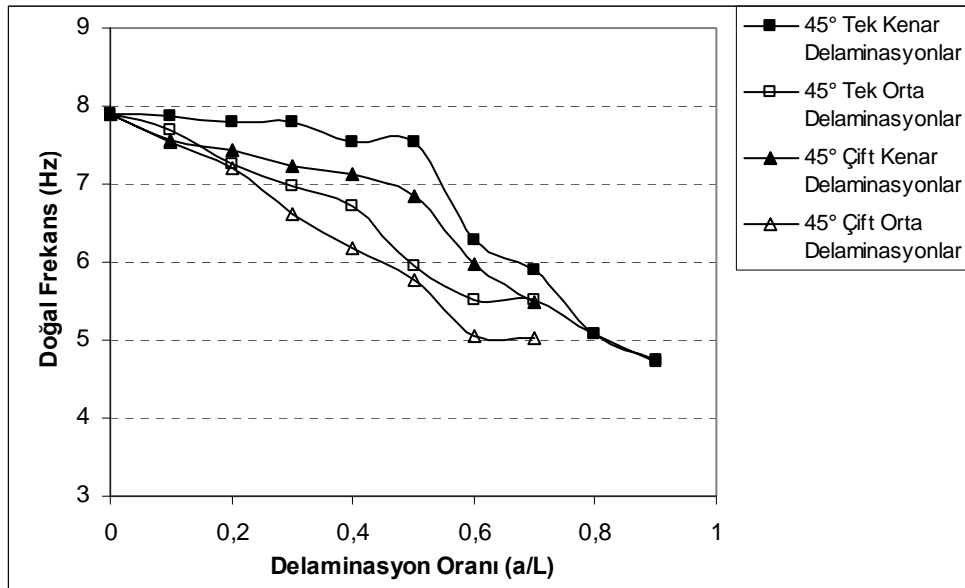
5.3.1.2.3. Ölçümün stabilite durumu olmadan alınması

Özellikle delaminasyonlu kirişlerde bu duruma çok dikkat edilmelidir, çünkü kirişimizde delaminasyon olduğu için ilk vurmada delaminasyonlu kısım ile diğer kısım tam olarak birlikte hareket edemezler. Bu durumda sanki başka bir dış etki veriliyormuş gibi kirişte bir etki olacağından doğal frekanslarda hatalar meydana gelir. Böyle durumla karşılaşmamak için bir süre beklenip kiriş kararlı durumuna gelince ölçüm alınmalıdır.

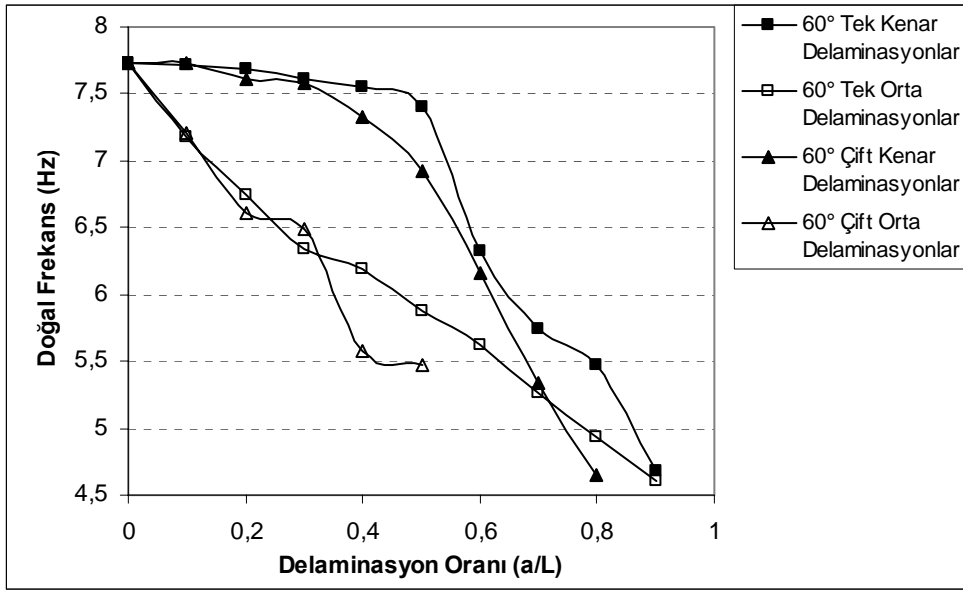
DeneySEL olarak ölçümleri yapılan tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekans değerleri delaminasyon oranı artırılarak (a/L) grafikler halinde sunulmuştur.



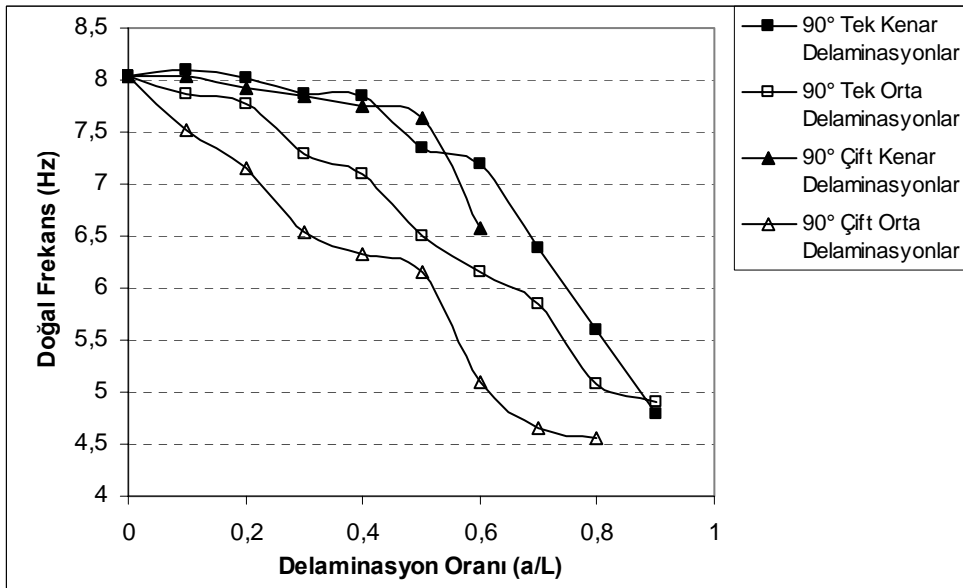
Şekil 5.46 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 30°)



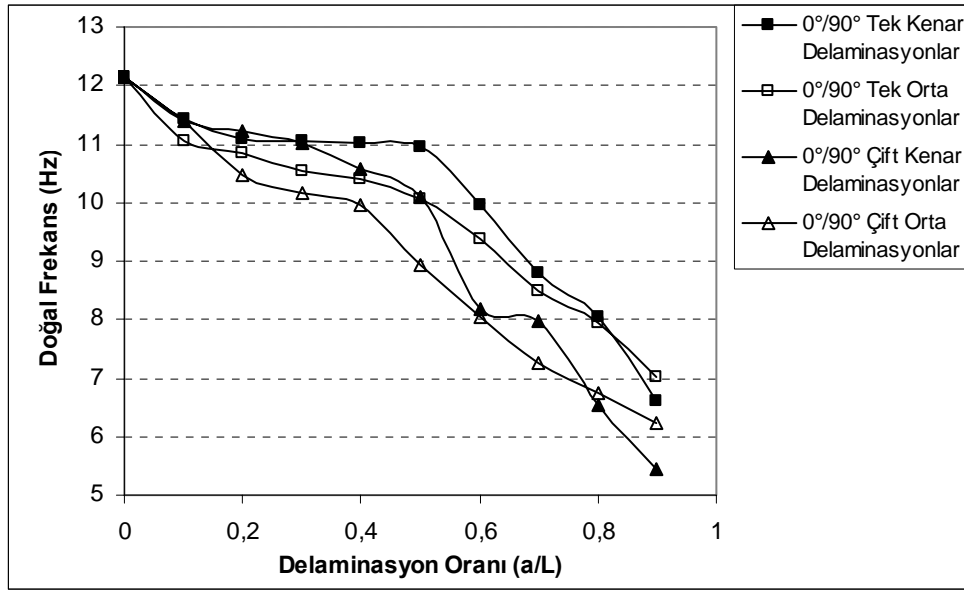
Şekil 5.47 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 45°)



Şekil 5.48 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 60°)

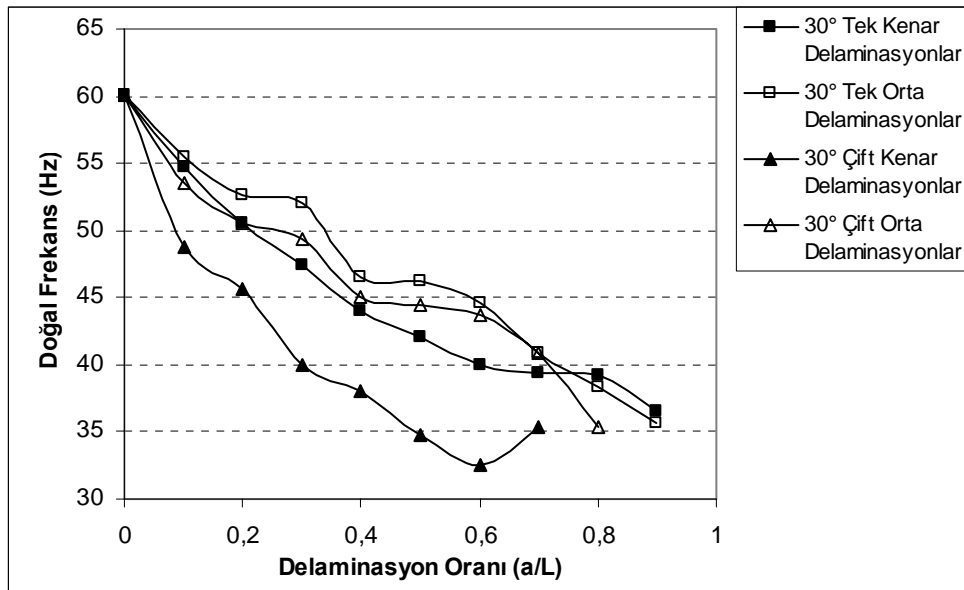


Şekil 5.49 Ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 90°)

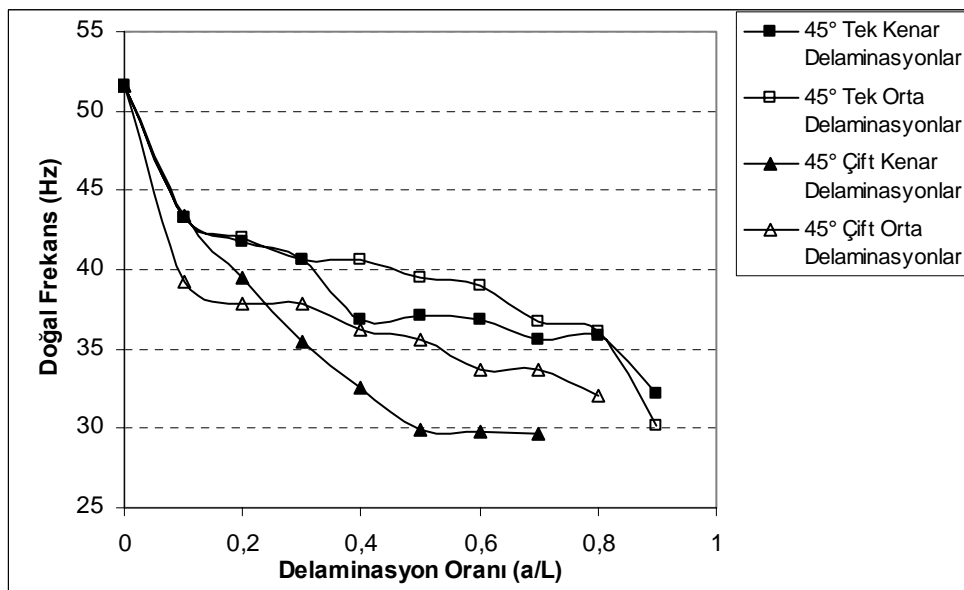


Şekil 5.50 Ankastré sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 0°/90°)

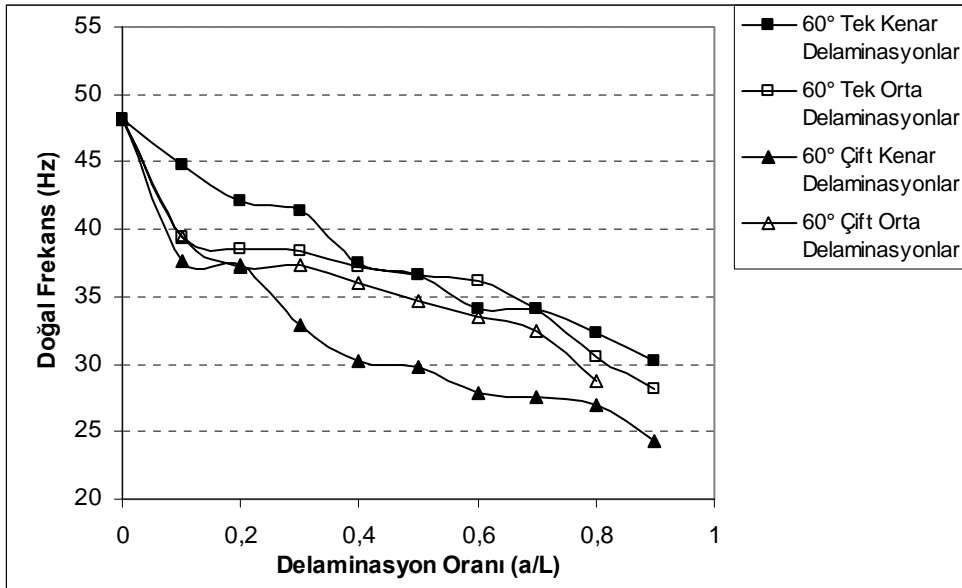
Şekil 5.46'dan Şekil 5.50'ye kadar görülen çeşitli delaminasyonlara sahip (a/L 0,1-0,9) tabakalı kompozit kirişlerin ankastré sınır koşullarındaki doğal frekans değişimleri görülmektedir. Delaminasyonların yerleri kenarda ve ortada olmak üzere, tekli ve çoklu olmak üzere dört farklı veri grafiklerde sunulmuştur. Bu beş grafiklerin ortak özelliklerini şöyle özetlenebilir. Kirişlerdeki delaminasyon oranı (a/L) arttıkça kirişlerin doğal frekans değerlerinin düştüğü söylenebilir. Yine beş grafikte de delaminasyonlu kompozit kirişlerin takviye açısının değişimi ile doğal frekans değerlerinin değiştiği de görülebilir. Ayrıca tek kenar delaminasyonlarla çift kenar delaminasyonların doğal frekans değerleri incelendiğinde delaminasyon sayısı arttığında tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğü de görülmektedir. Tek orta delaminasyonlar ile çift orta delaminasyonlar karşılaştırıldığında da aynı sonuçlarla karşılaşılmıştır.



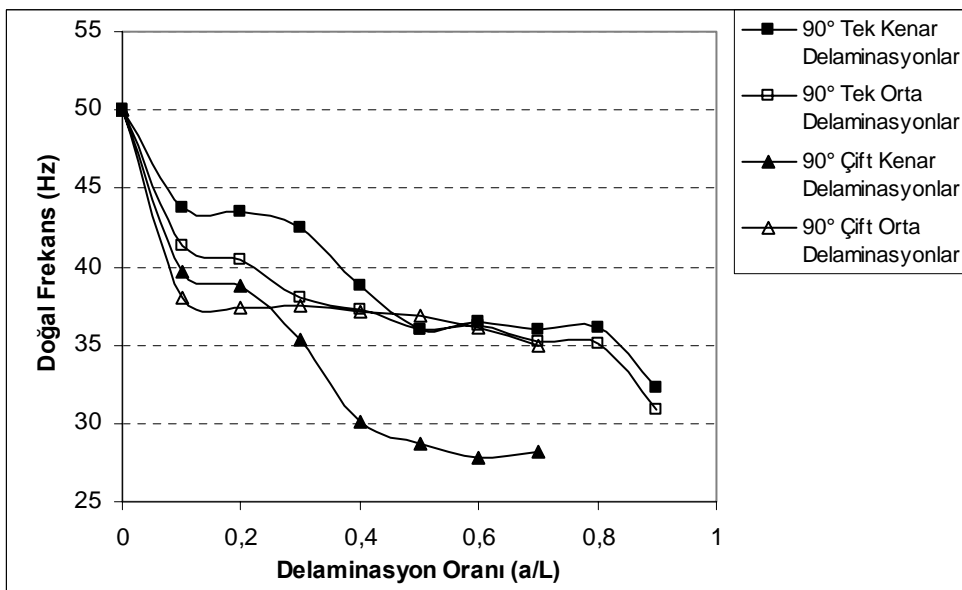
Şekil 5.51 Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 30°)



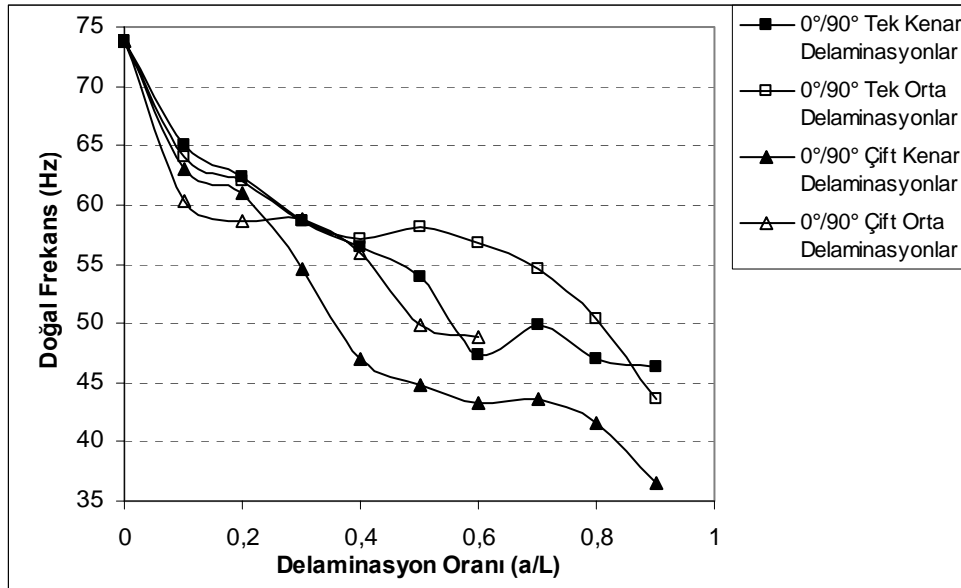
Şekil 5.52 Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 45°)



Şekil 5.53 Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 60°)



Şekil 5.54 Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 90°)



Şekil 5.55 Ankastre-ankastre sınır şartlarındaki delaminasyonlu tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri (deneysel 0°/90°)

Şekil 5.51'den Şekil 5.55'e kadar görülen çeşitli delaminasyonlara sahip (a/L: 0,1-0,9) tabakalı kompozit kirişlerin ankastre-ankastre sınır koşullarındaki doğal frekans değişimleri görülmektedir. Delaminasyonların yerleri kenarda ve ortada olmak üzere, tekli ve çoklu olmak üzere dört farklı veri grafiklerde sunulmuştur. Bu beş grafiklerin ortak özelliklerini şöyle özetlenebilir. Kirişlerdeki delaminasyon oranı (a/L) arttıkça kirişlerin doğal frekans değerlerinin düştüğü söylenebilir. Yine beş grafikte de delaminasyonlu kompozit kirişlerin takviye açısının değişimi ile doğal frekans değerlerinin değiştiği görülebilir. Ayrıca tek kenar delaminasyonlarla çift kenar delaminasyonların doğal frekans değerleri incelendiğinde delaminasyon sayısı arttığında tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğü de görülmektedir. Tek orta delaminasyonlar ile çift orta delaminasyonlar karşılaştırıldığında da aynı sonuçlarla karşılaşmaktayız.

Delaminasyona sahip tabakalı kompozit kirişlerin takviye açıları değiştiğinde frekans değerleri değiştiği gibi, kirişlerin sınır şartlarının değişmesi ile de doğal frekans değerlerinin değiştiği de grafiklerden görülmektedir.

5.4. Çevresel Koşulların Titreşime Etkileri

Bu çalışmada kompozit kirişlerin doğal frekanslarını, tabaka açısı, delaminasyonlu bölgeler ve sınır şartları gibi faktörlerin etkilediği gösterilmiştir. Bu faktörlerden farklı olarak çevresel koşulların (nem ve sıcaklık) frekanslara nasıl etkilediği gösterilecektir.

5.4.1. Nemin titreşime etkisi

Nemin kompozit kirişlerin titreşimine etkilerini araştıran çalışmalar son derece sınırlıdır. Genel olarak kompozit malzemelerin yapıdan kaynaklanan durumundan dolayı su emme kabiliyetleri son derece sınırlıdır. Kompozit yapıyı oluşturan reçine ve elyaflar plastik özellik göstermelerinden dolayı suyu emmezler fakat eğer matrisle elyaf arasında bir çatlak varsa su buraya yerleşebilir. Çalışmanın bu kısmında su emilmesinin titreşime etkisini araştırmak üzere deneyler yapılmıştır. Çeşitli delaminasyonlara sahip deney numuneleri Şekil 5.56'da gösterilen hassas tartıyla ağırlıkları tartılarak not edilmiştir.



Şekil 5.56 Hassas tartı

Ağırlıkları bilinen delaminasyonlu kirişler Şekil 5.57'de gösterilen su tankına bırakılmıştır.



Şekil 5.57 Su tankı

Su tankına bırakılan kirişler 6 ay boyunca her ay ağırlıkları ve doğal frekansları ölçülmüştür. Ölçümlerden önce her numunenin içinde ve dışında su zerrelere kalmayacak şekilde kurulanmıştır. Ölçümler sonucunda kompozit kirişlerin ağırlığında bir artış olmadığı için kirişlerin su absorbe etmediği söylenebilir. Ayrıca, yapılan titreşim deneylerinde de bir farklılık saptanmamıştır. Böylelikle suyun deneyde kullanılan kompozit kirişlerin titreşimlerini bu süre içerisinde etkilemediği gözlemlenmiştir.

5.4.2. Sıcaklığın titreşime etkisi

Tabakalı kompozit kirişlerin titreşimlerinin sıcaklık etkisinde nasıl değiştiğini gösteren çalışmalar son yıllarda artmaktadır. Fakat sıcaklığın delaminasyonlu kirişlere etkisi gösteren çalışmalar ise hala birkaç tane ile sınırlıdır. Çalışmanın bu kısmında oda sıcaklığında (23° C), 50° C, 75°C ve 100° C'deki sıcaklıklarda delaminasyonlu kompozit kirişlerin doğal frekans değişimi gösterilmeye çalışılmıştır.

Kompozit numuneler Şekil 5.58'de gösterilen fırına konmuş ve 23°C, 50°C, 75°C ve 100°C'de, kararlı hale gelmesi için en az yarım saat beklendikten sonra titreşim deneyleri yapılmıştır. Bu sıcaklıklardan 100°C'de titreşim ölçümü tam olarak alınamamıştır. Bunun nedeni 100°C'de kompozit kirişin elastisite modülünün değerinin

çok düşük olması ve yapısını (rijitliğini) koruyamamasıdır. Bu nedenden dolayı bu sıcaklık değerinde ölçüm yapılamamıştır.



Şekil 5.58 Sıcaklık kontrollü fırın

Sıcaklığın ayarlanması için fırının sıcaklığı yapılacak deney sıcaklığından 5-10 C° kadar yüksek olmalıdır. Çünkü numuneler dış ortamda kısa süre içinde soğurlar ve ölçüm yapılacak sıcaklık değerlerini kayıp ederler. Bu yüzden tam ölçüm sıcaklıkları verilebilmesi için lazer termometreleri kullanmak gerekmiştir.



Şekil 5.59 Testo845 lazer termometresi ve probu

Şekil 5.59'da Lazer termometresi (Testo845) ve probu görülmektedir. Lazer termometresinin ayarlamak için öncelikle deneyi yapılacak kirişin oda koşullarındaki ısı değeri Şekil 5.60'daki gibi ayarlanır.



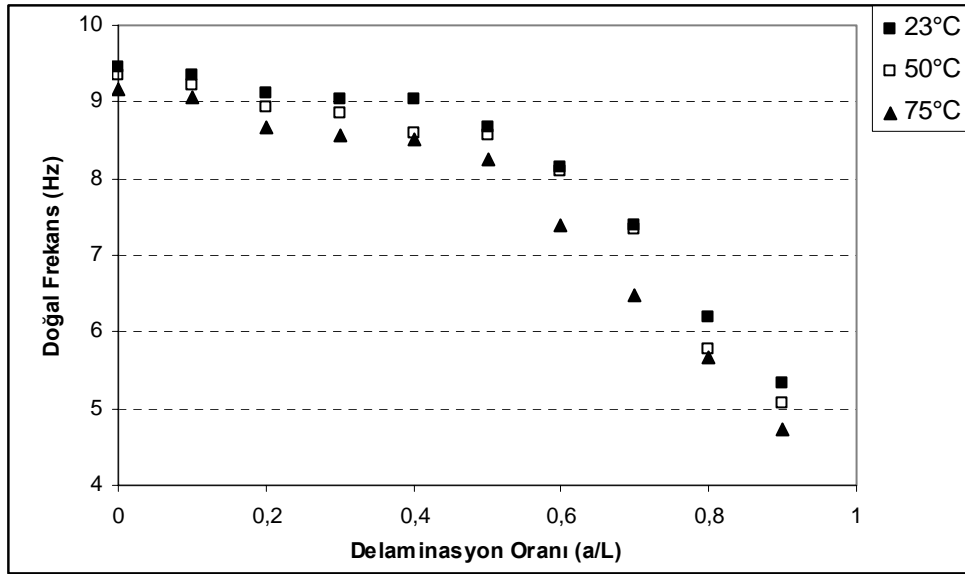
Şekil 5.60 Lazer termometresinin ayarlanması

Oda koşullarında ısı değeri ayarlanan lazer termometresi sıcaklığı ölçülecek olan kirişe Şekil 5.61’de gösterildiği gibi tutulur.



Şekil 5.61 Lazer termometresi ile ısı ölçümü

Kirişin sıcaklığı istenilen sıcaklığa gelince titreşim deneyi yapılarak, kirişin doğal frekans değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.62 Kompozit kırıların sıcaklıkla değişim grafiği

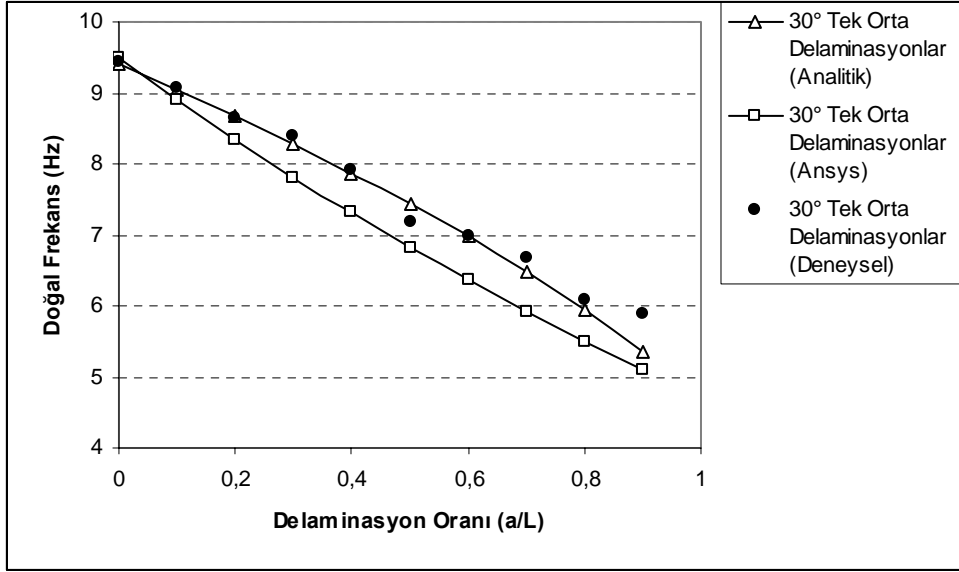
Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler Şekil 5.62’de grafikte gösterilmiştir. Grafikten delaminasyon oranı artıkça doğal frekans değerlerinin düştüğü gibi, sıcaklık artıkça da kırıların doğal frekans değerlerinde azalma olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

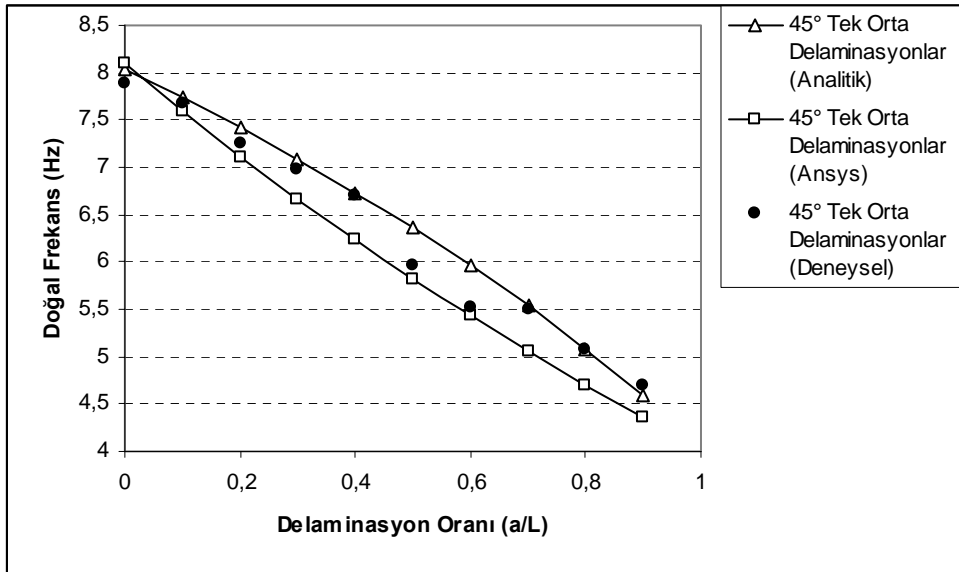
6.1. Sonuçlar

Yapılan çalışmada delaminasyonların ve çevresel koşulların tabakalı kompozit kirişlerin titreşimine etkileri nümerik, analitik ve deneysel olarak incelenmiştir. Delaminasyonun büyüklüğünün, yerinin ve sayısının kirişin doğal frekanslarına nasıl etki ettiği gösterilmeye çalışılmıştır. Kompozit kirişlerin tabaka açılarının değişimi ile doğal frekansların nasıl değiştiği araştırılmıştır. Ayrıca sınır şartlarının da doğal frekansa etkileri araştırılmıştır. Yine çevre şartlarından nemin etkisi araştırılmış bunun için numuneler 6 ay boyunca su havuzunda tutulmuştur. Sıcaklık faktörünün doğal frekanslara etkileri araştırılmış ve oda şartlarında (23°C), 50°C, 75°C ve 100°C sıcaklıklarda tabakalı kirişin doğal frekans değerleri araştırılmıştır.

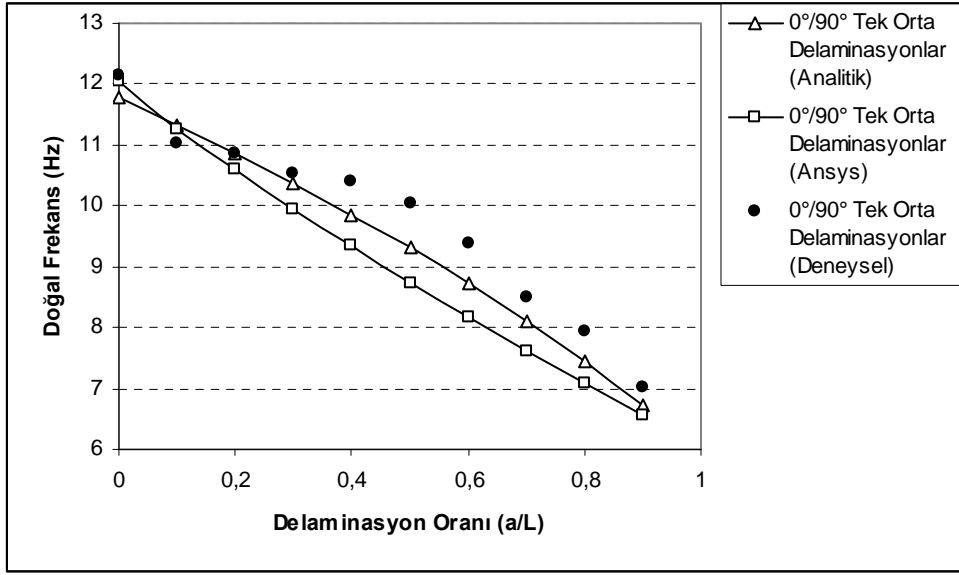
Şekil 6.1'den Şekil 6.3'e kadar olan ankastre sınır koşullarındaki tabakalı kompozit kirişlerin çeşitli açılarda (30°, 45° ve 0°/90°) analitik, nümerik (ansys) ve deneysel analiz sonuçları tek orta delaminasyon değişimi ile nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te ankastre-ankastre sınır koşullarındaki tabakalı kompozit kirişlerin 30° ve 45° oryantasyon açısındaki analitik, nümerik ve deneysel analiz sonuçları tek orta delaminasyonlar için verilmiştir. Bu beş grafiğin doğal frekans analiz sonuçlarının (analitik, nümerik ve deneysel) birbirleri ile uyumlu oldukları görülmektedir. Aralarındaki farkların ise çeşitli kabullerden ve hatalı ölçümlerden kaynaklandığı söylenebilir. Analitik çalışmada Euler-Bernoulli kiriş teorisi kabul edildiği için kesme kuvvetinin etkisi yok sayılması birinci hata olarak düşünülebilir. Ayrıca ikinci hata olarak da deneylerdeki hatalı ölçümler düşünülebilir.



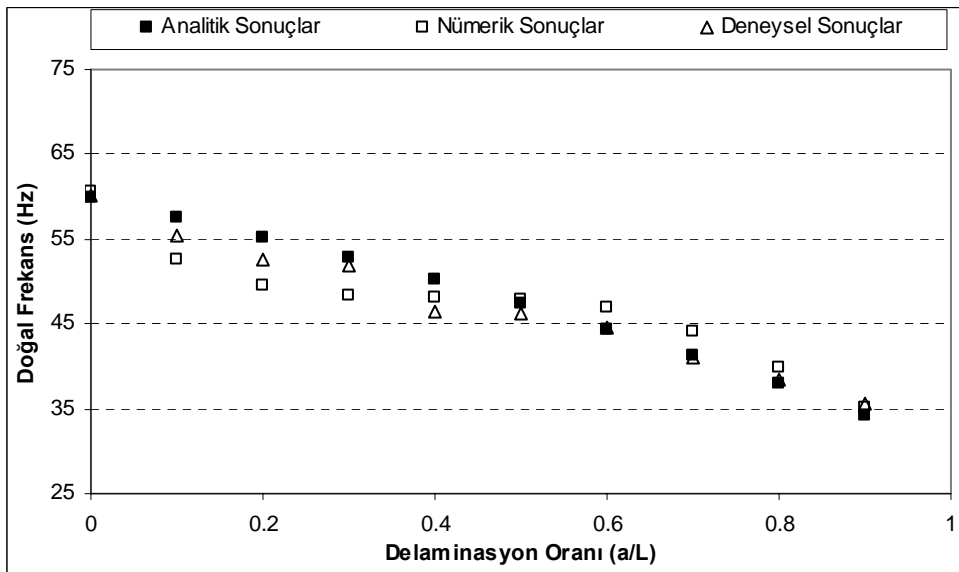
Şekil 6.1 Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre 30°)



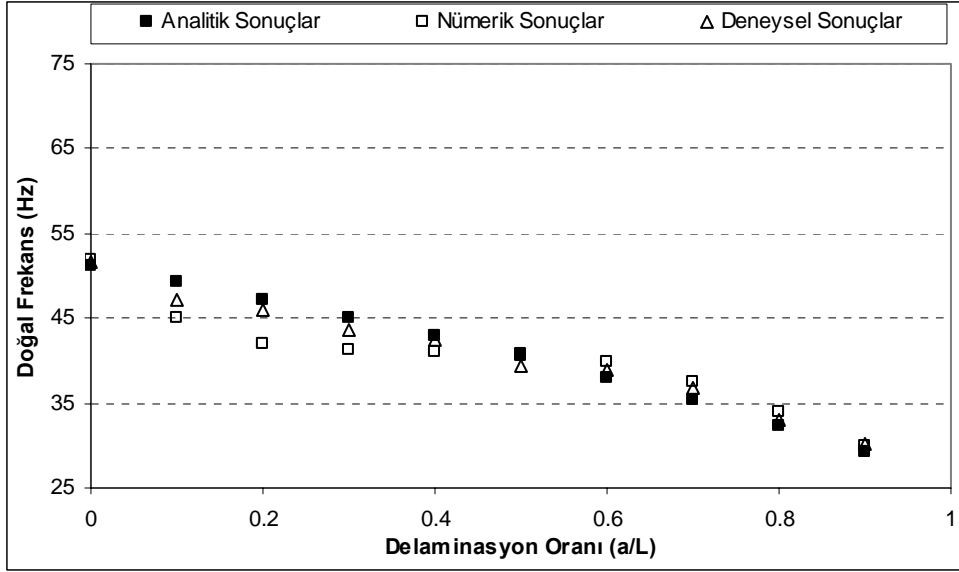
Şekil 6.2 Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre 45°)



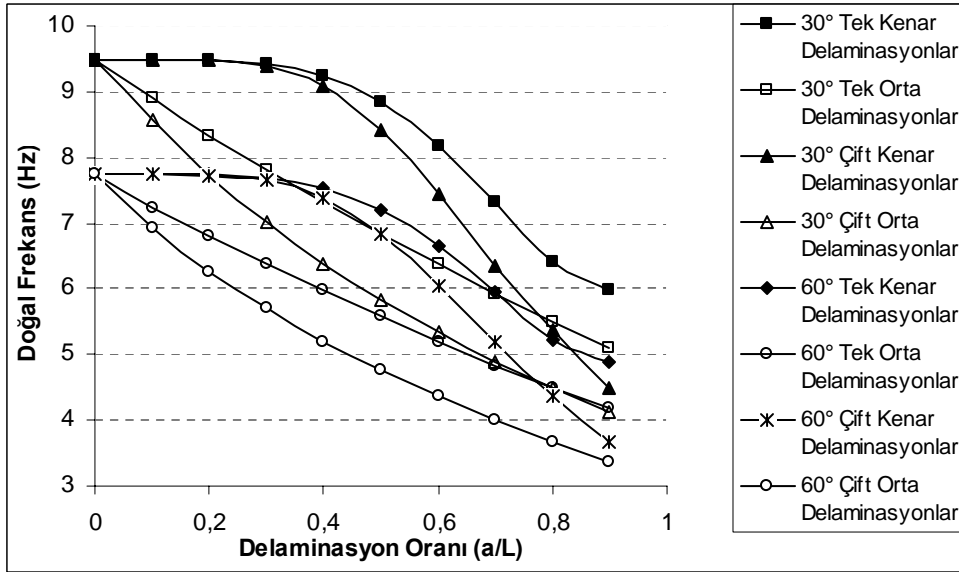
Şekil 6.3 Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre 0°/90°)



Şekil 6.4 Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre-ankastre 30°)



Şekil 6.5 Kirişlerin analitik, nümerik (ansys) ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (ankastre-ankastre 45°)



Şekil 6.6 Kirişteki delaminasyonun yerinin belirlenmesi

Bir ucu ankastre öteki ucu serbest bir kırışteki doğal frekans değerinin fiber takviye açısına, delaminasyonun yerine, büyüklüğüne ve sayısına göre değişimi nümerik olarak Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Bu sınır şartında kenar delaminasyonlarda yaklaşık 0,35 delaminasyon oranına kadar belirgin bir düşme görülmemiş, 0,35 delaminasyon oranından sonra keskin

düşüşler gözlenmiştir. Bu olayın tersine orta delaminasyona sahip kirişlerdeki doğal frekans düşmeleri 0,1'den itibaren keskin olarak görülmektedir. Aynı ebatlara sahip kompozit kirişin delaminasyon oranı (a/L) 0,4'de oryantasyon açısı 60° derecede çift orta delaminasyona sahip ise yaklaşık olarak 5,2 Hz iken eğer kiriş tek orta delaminasyona sahip ise doğal frekans değeri yaklaşık 6 Hz değerine yaklaşmaktadır. Aynı zamanda grafikten kirişin oryantasyon açısının 30° derecemini yada 60° dereceye mi sahip olduğu yapılacak deney ile belirlenip ne kadar delaminasyona sahip olduğu belirlenebilir. Böyle bir grafik imalat esnasında veya sonradan ortaya çıkan delaminasyonun nerede ve ne kadar büyüklüğe sahip olduğuna dair bir fikir edinmeye yardımcı olabilir. Bunun sonucu olarak fabrika imalata başlamadan veya imalat esnasında üretim biçimini değiştirerek büyük bir maddi kayıp veya ileride oluşabilecek kaza önlenir.

Tez çalışmasında elde edilen veriler ışığında tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekans değerlerindeki değişim için aşağıdaki sonuçlar söylenebilir:

Tabakalı kompozit kirişin delaminasyon oranı (a/L) arttıkça, kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğü görülmüştür. Çünkü tabakalı kirişin rijitliği delaminasyon oranının artmasıyla gittikçe azalmaktadır. Bunun sonucu olarak da doğal frekans değerleri düşmektedir. Tabakalı kompozit kirişlerin grafik değerlerinden kirişlerdeki delaminasyon sayısı arttığında da kirişin doğal frekans değerlerinde düşmenin daha fazla olduğu görülmüştür.

Kirişlerin analizinde, kirişin tabaka düzeninin değişimi ile doğal frekansın değişebileceği görülmüştür. Böylelikle çalışma frekansları biliniyorsa kompozit kirişin tasarımında istenmeyen rezonans durumunun oluşmaması için takviye açılarının bu değişiminden faydalanılabilir. Kompozit kirişlerin doğal frekans değerleri $[30]_{16}$, $[45]_{16}$, $[60]_{16}$, $[90]_{16}$ $[(0/90)_4]_s$ oryantasyon düzeninde en yüksek değeri $[(0/90)_4]_s$ oryantasyon düzenine sahip olan kirişte elde edilmiştir.

Kompozit kirişlerin sınır şartlarının değişimi ile doğal frekans değerlerinin büyük oranda değiştiği deneysel, nümerik (ansys) ve analitik çalışmalar ile tespit edilmiştir.

Kompozit kirişlerin nem emme eğilimlerinin çok düşük olduğu ve bu yüzden doğal frekans değerlerinde deney süresince (6 ay) bir değişim olmadığı görülmüştür.

Çevre şartlarından sıcaklığın doğal frekanslar üzerine etkisinin olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür. Sıcaklık değerleri (23°, 50°C, 75°C ve 100°C) artıkça doğal frekans değerleri de gittikçe azalmaktadır. Sıcaklık değeri 100°C'ye ulaştığında kiriş rijitliğini kaybederek kirişin etkin elastisite modülü düşmekte, bunun sonucu olarak uygulanan kuvvet altında çarpılmalar olmakta ve stabil değiştiği için doğal frekans değeri bu sıcaklıkta ölçülememiştir.

Deneysel çalışmada doğal frekans değerlerini sınır şartlarının tam olarak verilmemesi gibi faktörlerin etkilediği görülmüştür. Bu yüzden deneysel çalışmalarda sınır şartlarının çok iyi oluşturulması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Sonlu eleman çalışmalarında kontak eleman kullanılmasının kirişin doğal frekans değerlerinin daha doğru çıkması için önemli olduğu görülmüştür.

6.2. Öneriler

Kirişteki delaminasyonun yerinin tahmini olarak tayin edilebilmesi için sonlu elemanlar, analitik veya deneysel verilerden elde edilen sonuçlar grafik haline getirilebilir. Bu grafiklerle kirişteki delaminasyonun yeri ve büyüklüğü hakkında bilgi sahibi olunup seri üretim yapan bir işletmede büyük maddi kayıplar önlenmiş olunacaktır. Çalışmada ayrıca hidrotermal etkilerde daha kapsamlı araştırılıp tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerlerine nasıl etkilediği araştırılabilir. Bu uygulamalar plaklara da uygulanarak plaklardaki doğal frekans değerlerinin nasıl değiştiği de araştırılabilir.

7. KAYNAKLAR

- Adam, C., Heuer, R., and Jeschko, A., (1997) Flexural Vibrations of Elastic Composite Beams with Interlayer Slip. *Acta Mechanica*, 125: 17-30.
- Akavcı, S.S., (2007) Buckling and Free Vibration Analysis of Symmetric and Antisymmetric Laminated Composite Plates on an Elastic Foundation. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26: 1907-1919.
- Akhter, N., Jung, H.C., Chang, H.S., and Kim, K.S., (2009) Location of Delamination in Laminated Composite Plates by Pulsed Laser Holography. *Optics and Laser in Engineering*, 47: 584-588.
- Almeida S.F.M., and Hansen, J.S., (1999) Natural Frequencies of Composite Plates with Tailored Thermal Residual Stresses. *International Journal of Solids and Structures*, 36: 3517-3539.
- Alnefaie, K., (2009) Finite Element Modeling of Composite Plates with Internal Delamination. *Composite Structures*, 90: 21-27.
- Aran, A., (1990) Elyaf Takviyeli Kompozit Kirişler. *İstanbul Teknik Üniversitesi rektörlük ofset atölyesi*, İstanbul, 50s.
- Atlıhan G., Çallıoğlu, H., Conkur, E.Ş., and Topcu, M., (2009a) Free Vibration Analysis of the Laminated Composite Beams by Using DQM. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28: 881-892.
- Atlıhan, G., Demir, E., Girgin, Z., and Çallıoğlu, H., (2009b) Free Vibration and Buckling Analysis of the Laminated Composite Beams by Using GDQM. *Advanced Composites Letters*, 18: 37-44.
- Aydogdu, M., (2009) A General Nonlokal Beam Theory: Its Application to Nonbeam Bending, buckling and vibration. *Physica E*, 41: 1651-1655.
- Aydogdu, M., Taşkın, V., (2007) Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams with Simply Supported Edges. *Materials and Design*, 28: 1651-1656.
- Banerjee, J., R., Sobey, A.J., (2005) Dynamic Stiffness Formulation and Free Vibration Analysis of A Three-Layered Sandwich Beam. *International Journal of Solids and Structures*, 42: 2181-2197.
- Chakraborty, D., (2005) Artificial Neural Network Based Delamination Prediction in Laminated Composites. *Materials and Design*, 26: 1-7.

- Chen, W.Q., Lv, C.F., and Bian, Z.G., (2004) Free Vibration Analysis of Generally Laminated Beams Via State-Space Based Differential Quadrature. *Composite Structures*, 63: 417-425.
- Della, C.N., and Shu, D., (2007) Free Vibration Analysis of Delaminated Bimaterial Beams. *Composite Structures*, 80: 212-220.
- Della, C.N., Shu, D., and MS Rao, P., (2004) Vibration of Beams with two Overlapping Delaminations. *Composite Structures*, 66: 101-108.
- Della, C.N., and Shu, D., (2005a) Free Vibration Analysis of Composite Beams with Overlapping Delaminations. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 46: 509-526.
- Della, C.N., and Shu, D., (2005b) Vibration of Beams with Double Delaminations. *Journal of Sound and Vibration*, 282: 919-935.
- Della, C.N., and Shu, D., (2006) Vibration of Delaminated Multilayer Beams. *Composites Part B:Engineering*, 37: 227-236.
- Della, C.N., and Shu, D., (2007) Vibration of beams with two Overlapping Delaminations in Prebuckled States. *Composites Part B:Engineering*, 38: 109-118.
- Della, C.N., and Shu, D., (2009) Free Vibration Analysis of Multiple Delaminated Beams under Axial Compressive Load. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28: 1365-1380.
- Demasi, L., (2006) Quasi-3D Analysis of Free Vibration of Anisotropic Plates. *Composite Structures*, 74: 449-457.
- Gaudenzi, P., Carbonaro, R., and Barboni, R., (1997) Vibration Control of an Active Laminated Beam. *Composite Structures*, 38: 1-4.
- Ghoshal, A., Chattopdhyay, A., Schulz, M.J., Thornburgh, R., and Waldron, K., (2003) Experimental Investigation of Damage Detection in Composite Material Structures using a Laser Vibrometer and Piezoelectric Actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 14: 521-537.
- Gibson, R.F., (1994) Principles of Composite Material Mechanics. *McGraw-Hill*, Singapore, 194s.
- Hu, N., Fukunaga, H., Kameyama, M., Aramaki, Y., and Chang, F.K., (2002) Vibration Analysis of Delaminated Composite Beams and Plates using a Higher Order Finite Element. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44: 1479-1503.
- Hu, H., Wang, B.T., Lee, C.H., and Su, J.S., (2006) Damage Detection of Surface Cracks in Composite Laminates using Modal Analysis and Strain Energy Method. *Composite Structures*, 74: 399-405.

- Icardi, U., (1999) FreeVibration of Composite Beams Featuring Interlaminar Bonding Imperfections and Exposed to Thermomechanical Loading. *Composite Structures*, 46: 229-243.
- Inada, T., Shimamura, Y., Todoroki, A., and Kobayashi, H., (2004) Development of the Two Step Delamination Identification Method by Resonant and Anti Resonant Frequency Changes. *Key Engineering Materials*, 270-273: 1852-1858.
- Kabir, H.R.H., (2004) On Free Vibration Response and Mode Shapes of Arbitrarily Laminated Rectangular Plates. *Composite Structures*, 65: 13-27.
- Kaya, F., (1990) Titreşim Mühendisliği. *Seçkin Yayın Dağıtım*, İstanbul, 2s.
- Kıral, Z., (2009) Damped Response of Symmetric Laminated Composite Beams to Moving Load with Different Boundary Conditions. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Sage Publications, , 28 (20), 2511-2526.
- Kim, S.K., Chattopadhyay, A., and Ghoshal, A., (2003) Characterization of Delamination Effect on Composite Laminates using A New Generalized Layerwise Approach. *Composite Structures*, 81: 1555-1566.
- Kim, H.Y., and Hwang, W., (2002) Effect of Debonding on Natural Frequencies and Frequency Response Functions of Honeycomb Sandwich Beams. *Composite Structures*, 55: 51-62.
- Kogo, Y., Lijima, Y., Igata, N., and Ota, K., (2003) Internal friction of Carbon Carbon Composites at Elevated Temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 355: 148-153.
- Kollar, L.Pç, and Springer, G.S., (2003) Mechanics of Composite Structures. *Cambridge University Pres*, Cambridge, United Kingdom, 308s.
- Kumar, A., and Shrivastava, R.P., (2005) Free Vibration of Square Laminates with Delamination Around a Central Cutout using HSDT. *Composite Structures*, 70: 317-333.
- Lee, J., (2000) Free Vibration Analysis of Delaminated Composite Beams. *Composite Structures*, 74: 121-129.
- Lee, S., Park, T., and Voyiadjis, G.Z., (2003) Vibration Analysis of Multi Delaminated Beams. *Composites Part B:Engineering*, 34: 647-659.
- Lee, S., Park, T., and Voyiadjis, G.Z., (2002) Free Vibration Analysis of Axially Compressed Laminated Composite Beam Columns with Multiple Delaminations. *Composites Part B:Engineering*, 33: 605-617.
- Liang-bo, D., (1989) Bending and Vibration of Composite Laminated Plates. *Applied Mathematics and Mechanics*, 10: 345-352.

- Luo, H., and Hanagud, S., (2000) Dynamics of Delaminated Beams. *International Journal of Solids and Structures*, 37: 1501-1519.
- Matsunaga, H., (2007) Free Vibration and Stability of Angle Ply Laminated Composite and Sandwich Plates under Thermal Loading. *Composite Structures*, 77: 249-262.
- Palacz, M., Krawczuk, M., and Ostachowicz, W., (2005) The Spectral Finite Element Model for Analysis of Flexural Shear Coupled Wave Propagation. Part 2: Delaminated Multilayer Composite Beam. *Composite Structures*, 68: 45-51.
- Parhi, P.K., Bhattacharyya, S.K., and Sinha, P.K., (2000) Finite Element Dynamic Analysis of Laminated Composite Plates with Multiple Delaminations. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 19: 863-882.
- Parhi, P.K., Bhattacharyya, S.K., and Sinha, P.K., (2001) Hygrothermal Effects on the Dynamic Behavior of Multiple Delaminated Composite Plates and Shells. *Journal of Sound and Vibration*, 248(2): 195-214.
- Park, J.S., Kim, J.H., and Moon, S.H., (2004) Vibration of Thermally Post Buckled Composite Plates Embedded with Shape Memory Alloy Fibers. *Composite Structures*, 63: 179-188.
- Radu, A.G., and Chattopadhyay, A., (2002) Dynamic Stability Analysis of Composite Plates Including Delaminations using a Higher Order Theory and Transformation Matrix Approach. *International Journal of Solids and Structures*, 39: 1949-1965.
- Ramtekkar, G.S., (2009) Free Vibration Analysis of Delaminated Beams using Mixed Finite Element Model. *Journal of Sound and Vibration*, 328: 428-440.
- Rao, M.K., Desai, Y.M., and Chitnis, M.R., (2001) Free Vibration of Laminated Beams Using Mixed Theory. *Composite Structures*, 52: 149-160.
- Şahin, Y., (2006) Kompozit Malzemelere Giriş. *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 28s.
- Sarıkanat, M., Yıldız, H., and Baltacı, A., (2006) Determination of the Effects of Axial Load on the Natural Frequency of a Composite Beam with Finite Element Method. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25: 1165-1172.
- Sayman, O., ve Aksoy, S., (1980) Kompozit Malzemeler. *Ege Üniversitesi yayını*, İzmir, 104s.
- Sefrani, Y., and Berthelot, J.M., (2006) Temperature Effect on the Damping Properties of Unidirectional Glass Fibre Composites. *Composites Part B:Engineering*, 37: 346-355.
- Shu, D., and Della, C.N., (2004a) Free Vibration Analysis of Composite Beams with two Non-Overlapping Delaminations. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46: 509-526.

- Shu, D., and Della, C.N., (2004b) Vibration of Mutiple Delaminated Beams. *Composite Structures*, 64: 467-477.
- Sokolinsky, V.S., Von Bremen, H.F., Lavoie, J.A., and Nutt, S.R., (2004) Analytical and Experimental Study of Free Vibration Response of Soft Core Sandwich Beams. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 6: 239-261.
- Sundaresan, P., Singh, G., and Rao, V., (1999) A Simple Approach to Investigate Vibratory Behaviour of Thermally stressed Laminated Structures. *Journal of Sound and Vibration*, 219: 603-618.
- Topcu, M., Atlıhan, G., Çallıoğlu, H., and Çonkur, E.Ş., (2008) Stacking Sequence Effects on Natural Frequency of Laminated Composite Beams. *Advanced Composites Letters*, 17: 5-11.
- Topcu, M., ve Taşgetiren, S., (1998) Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodu. Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli, 2s.
- Valdes., S.H.V., and Soutis, C., (1999) Delamination Detection in Composite Laminates from Varistions of their Modal Characteristics. *Journal of Sound and Vibration*, 228: 1-9.
- Vinson, J.R., and Sierakowski, R.L., (2002) The Behavior of Structures Composed of Composite Materials. Second Edition, *Kluwer Academic Publishers*, New York, USA, 180s.
- Whittingham, B., Li, H.C.H., Herszberg, I., and Chiu, W.K., (2006) Disbond Detection in Adhesively Bonded Composite Structures using Vibration Signatures. *Composite Structures*, 75: 351-363.
- Williams, T.O., and Addressio, F.L., (1997) A Dynamic Model for Laminated Plates with Delaminations. *Int. Journal Solids Structures*, 35: 83-106.
- Yam, L.H., Wei, Z., and Cheng, L., (2004) Nondestructive Detection of Internal Delamination by Vibration Based Metod for Composite Plates. *Journal of Composite Materials*, 38: 2183-2198.
- Yang, S., Gibson, R.F., Gu, L., and Chen, W.H., (1998) Modal Parameter Evaluation of Degraded Adhesively Bonded Composite Beams. *Composite Structures*, 43: 79-91.
- Zak, A., Krawczuk, M., and Ostachowicz, W., (2000) Numerical and Experimental Investigation of Free Vibration of Multilayer Delaminated Composite Beams and Plates. *Computational Mechanics*, 26: 309-315.
- Zak, A., Krawczuk, M., and Ostachowicz, W., (2001) Vibration of a Laminated Composite Plate with Closing Delamination. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 12: 545-551.

Zou, Y., Tong, L., and Steven, P., (2000) Vibration Based Model Dependent Damage (Delamination) Identification and Health Monitoring For Composite Structures. *Journal of Sound and Vibration*, 230: 357-378.

ÖZGEÇMİŞ

- Adı, Soyadı:** Gökmen ATLIHAN
- Doğum yeri ve tarihi:** İzmir, 01.01.1976
- Lisans Eğitimi:** Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, (1995–1999), Denizli.
- Y. Lisans Eğitimi:** Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (1999–2002), Denizli.
- Çalıştığı kurum:** 2000 yılında, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2005 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora programına başlayan, evli olan Gökmen ATLIHAN, halen aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.