

DELAMİNASYON HASARLI TABAKALI KOMPOZİTLERİN TİTREŞİM  
DAVRANIŞI

ASIM ANIL ÖNDER

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
2012

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DELAMİNASYON HASARLI TABAKALI KOMPOZİTLERİN  
TİTREŞİM DAVRANIŞI

ASIM ANIL ÖNDER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI  
DOÇ. DR. ZÜLEYHA ASLAN

SİVAS  
2012

Bu alışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Kenan KOSER

Üye

Yrd. Doç. Dr. Tahsin BOYRAZ

Üye (Danışman)

Doç. Dr. Züleyha ASLAN

ONAY

Bu tez çalışması, 02/07/2012 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

---

Prof. Dr. Mustafa DEĞİRMENCİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 24.09.2008 tarihli ve 009 sayılı toplantısında kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

## ÖZET

### DELAMİNASYON HASARLI TABAKALI KOMPOZİTLERİN TİTREŞİM DAVRANIŞI

Asım Anıl ÖNDER

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Züleyha ASLAN

2012, 82 sayfa

Bu tezde, düşük hızlı darbe yüklemesi sonucunda çok sayıda şerit delaminasyon hasarı oluşmuş E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit plakların titreşimi üzerine çalışılmıştır. Nümerik çalışma için ANSYS ticari amaçlı sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. ANSYS'in doğrulaması için dört adet şerit delaminasyona sahip kompozit bir plağın doğal frekansı deneysel olarak tespit edilmiş ve nümerik sonuçla kıyaslanmıştır. Ayrıca literatürde bulunan tek delaminasyonlu kompozitlerin analitik olarak bulunan doğal frekansları da ANSYS sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tek delaminasyon uzunluğunun ve derinliğinin, sabit uzunluktaki delaminasyon sayısının (tek delaminasyondan 15 delaminasyona kadar) ve darbe yüklemesi sonucunda oluşan kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonların doğal frekansa ve mod şekillerine etkisi belirlenmiştir. Ayrıca en büyük delaminasyon boyutunun, küçük delaminasyon boyutlarının ve fiber oryantasyonunun kompozit plağın doğal frekansı üzerine etkisi nümerik olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre delaminasyon hasarının boyutu, konumu ve şekli doğal frekansı ve mod şekillerini önemli derecede etkilemektedir. Delaminasyon hasarının oluşması vibrasyon karakteristiğini değiştirir.

**Anahtar kelimeler:** Tabakalı kompozit, E-cam lifi/epoksi, Çok katlı delaminasyon, Doğal frekans.

## ABSTRACT

### VIBRATION OF LAMINATED COMPOSITES WITH DELAMINATION

Asım Anıl ÖNDER

Master of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Züleyha ASLAN

2012, 82 pages

In this thesis, the vibration of E-glass/epoxy laminated composite plates which have multiple stript delaminations due to low-velocity impact is investigated. ANSYS software is used for the numerical analysis. To prove the accuracy of the software, the natural frequency of laminated composite plate with four delaminations is obtained experimentally and compared with numerical result. In addition, articles about single delaminated composites are investigated and some analytical results at literature are compared with ANSYS software. The effects of depth and length of single delamination, number of delaminations with fixed length (from 1 to 15) and triangular and reversed triangular shape of multiple delaminations through the thickness due to low velocity impact, are investigated on behalf of natural frequencies and mode shapes. The effects of the longest delamination size, the other beneath delamination sizes and fiber orientation on the natural frequency of the composite plate are also investigated numerically. It was observed that the natural frequency and mode shapes were highly influenced by the delamination size, location and shape. The presence of delamination changes the vibration characteristics.

**Key words:** Laminated composites, E-glass/epoxy, Multiple delaminations,  
Natural frequency.

## TEŞEKKÜR

Bu çalıőmamda bana, bilgisi ve tecrübesiyle her alanda yardımcı olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Züleyha ASLAN'a, ve her zaman olduğu gibi yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca “Delaminasyon Hasarlı Tabakalı Kompozitlerin Titreşim Davranışı” konulu Yüksek Lisans Tez Projemi, CÜBAP M-439 nolu proje ile destekleyen Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER .....	8
2.1. Kompozit Malzemelerin Önemi .....	9
2.2. Kompozitlerin Avantaj ve Dezavantajları .....	11
2.3. Modern Kompozit Malzemeler ve Sınıflandırılması .....	13
2.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları .....	15
3. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ .....	18
3.1. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	18
3.1.1. Simetrik tabakalar (Jones, 1998) .....	19
3.1.2. Antisimetrik tabakalar (Jones, 1998) .....	20
3.2. Ortotropik Malzemelerin Mekanik Davranışı .....	21
3.2.1. Ortotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme – Şekil Değiştirme Bağıntısı (Jones, 1998) .....	21
3.2.2. Ortotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme Halinde Gerilme - Şekil Değiştirme Dönüşümü (Reddy, 2004) .....	24
3.2.3. Tabakalarda Gerilme - Şekil Değiştirme Davranışı (Jones, 1998).....	25
3.3. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Delaminasyon Hasarı .....	28
4. MATERYAL VE METOD .....	31
4.1. Tabakalı Kompozit Malzeme ve Özellikleri.....	31
4.2. Nümerik Metod.....	32
5. SONUÇLAR.....	36
5.1. ANSYS'in Doğrulaması .....	36
5.1.1. ANSYS'in Literatürdeki Analitik Çalışmalarla Karşılaştırılması.....	36
5.1.2. ANSYS'in Deneysel Sonuçla Karşılaştırılması .....	40
5.2. Parametreler .....	42
5.2.1. Delaminasyon Uzunluğunun Doğal Frekansa Etkisi .....	42
5.2.2. Tek Delaminasyon Konumunun Doğal Frekansa Etkisi .....	43
5.2.3. Eşit Boydaki Delaminasyon Sayısının Doğal Frekansa Etkisi.....	44
5.2.4. Kalınlık Doğrultusunda Üçgen Görünümlü Delaminasyon - En Büyük Delaminasyon Uzunluğunun Doğal Frekansa Etkisi .....	44
5.2.5. Kalınlık Doğrultusunda Üçgen Görünümlü Delaminasyon - Küçük Delaminasyonların Uzunluğunu Belirleyen <i>b</i> Boyutunun Doğal Frekansa Etkisi.....	47

5.2.6. Orta Ara Yüzeye Kadar, Kalınlık Doğrultusunda Üçgen ve Ters Üçgen Görünümlü Delaminasyonların Doğal Frekansa Etkisinin Karşılaştırılması .....	49
5.2.7. Fiber Oryantasyonunun Delaminasyon Hasarlı Kompozit Plağın Doğal Frekansına Etkisi .....	50
5.3. Delaminasyon Uzunluğunun Doğal Frekansa Etkisi .....	51
5.4. Tek Delaminasyon Konumunun Doğal Frekansa Etkisi .....	54
5.5. Eşit Boydaki Delaminasyon Sayısının Doğal Frekansa Etkisi .....	56
5.6. Kalınlık Doğrultusunda Üçgen Görünümlü Delaminasyon - En Büyük Delaminasyon Uzunluğunun Doğal Frekansa Etkisi .....	59
5.7. Kalınlık Doğrultusunda Üçgen Görünümlü Delaminasyon - Küçük Delaminasyonların Uzunluğunu Belirleyen <i>b</i> Boyutunun Doğal Frekansa Etkisi ..	63
5.8. Orta Ara Yüzeye Kadar, Kalınlık Doğrultusunda Üçgen ve Ters Üçgen Görünümlü Delaminasyonların Doğal Frekansa Etkisinin Karşılaştırılması .....	66
5.9. Fiber Oryantasyonunun Delaminasyon Hasarlı Kompozit Plağın Doğal Frekansına Etkisi .....	70
5.10. Mod Şekillerinin Karşılaştırılması .....	71
6. YORUMLAR .....	77
7. KAYNAKLAR .....	79
8. ÖZGEÇMİŞ .....	82

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kompozit malzeme türleri (Soy, 2009) .....	15
Şekil 3.1 Fiber takviyesine göre tabakalı kompozit türleri. a) Sürekli fiber takviyeli b) Örgü fiber takviyeli c) Kırılmış fiber takviyeli d) Hibrid kompozit (Gibson, 1994) .....	18
Şekil 3.2 İzotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998) .....	20
Şekil 3.3 Ortotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998) .....	20
Şekil 3.4 Antisimetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998) .....	21
Şekil 3.5 Tek yönlü fiber takviyeli bir tabakanın malzeme koordinat sistemi (Reddy, 2004) .....	21
Şekil 3.6 Malzeme koordinat sistemi (Reddy, 2004) .....	25
Şekil 3.7 Deforme olmamış ve deforme olmuş tabaka kenar elemanı (Jones, 1998) .....	26
Şekil 3.8 Tabaka kalınlığı boyunca birim şekil değiştirme ve gerilme değişimi (Jones, 1998) .....	28
Şekil 3.9 a) Kalın ve b) ince malzemelerde delaminasyon hasarının oluşumu (Vaidya, 2011) .....	29
Şekil 3.10 $[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$ fiber oryantasyonuna sahip kompozit malzemede delaminasyon hasarının görünümü (Tita, 2008) .....	30
Şekil 3.11 $[+45^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}]_s$ fiber oryantasyonuna sahip tabakalı kompozit malzemelerde delaminasyon hasarı görüntüsü (Tita, 2008) .....	30
Şekil 4.1 Tabakaların dizilimi .....	32
Şekil 4.2 Kompozit plaka boyutları .....	32
Şekil 4.3 Tabakalı SOLID186 elemanı (ANSYS 13.0 Help, 2012) .....	33
Şekil 4.4 CONTA174 ve TARGE170 elemanları ( ANSYS 13.0 Help, 2012) .....	33
Şekil 4.5 Sonlu elemanlar modeli .....	34
Şekil 4.6 Delaminasyon hasarının modellenmesi .....	34
Şekil 5.1 G.S. Ramtekkar'ın delaminasyonlu tabakalı kompozit modeli (Ramtekkar, 2009) .....	36
Şekil 5.2 Kontaklı ve kontaklız modellerin karşılaştırılması. a) kontaklı model, b) kontaklız model .....	39
Şekil 5.3 ANSYS in deneysel karşılaştırılması için kullanılan 4 adet şerit delaminasyon hasarı olan kompozit plaka .....	40
Şekil 5.4 Deneysel doğal frekans ölçüm sonuçları .....	41
Şekil 5.5 Tek şerit delaminasyon hasarının kompozit plaktaki konumu .....	43
Şekil 5.6 Tek delaminasyonun kalınlık doğrultusundaki yeri .....	43
Şekil 5.7 Çok sayıda eşit boyda şerit delaminasyon .....	44
Şekil 5.8 Kalınlık doğrultusunda üçgen delaminasyon hasarı .....	45
Şekil 5.9 a) Kalınlık doğrultusunda üçgen görünümlü delaminasyon, b) Kalınlık doğrultusunda ters üçgen görünümlü delaminasyon .....	49
Şekil 5.10 Tek delaminasyon uzunluğunun doğal frekansa etkisi (Tek taraftan ankastre mesnetli- kontaklı ve kontaklız model) .....	51
Şekil 5.11 Tek delaminasyon uzunluğunun doğal frekansa etkisi (İki taraftan ankastre mesnetli-kontaklı ve kontaklız model) .....	53
Şekil 5.12 Tek delaminasyon derinliğinin doğal frekansa etkisi (Tek ankastre mesnetli model) .....	54
Şekil 5.13 Tek delaminasyon derinliğinin doğal frekansa etkisi (Çift ankastre mesnetli model) .....	55

Şekil 5.14 Eşit boydaki delaminasyon sayısının doğal frekansa etkisi (Tek ankastre mesnetli) .....	56
Şekil 5.15 Eşit boydaki delaminasyon sayısının doğal frekansa etkisi (Çift ankastre mesnetli) .....	57
Şekil 5.16 Tek ankastre mesnetli kompozit plakta, üçgen görünümlü delaminasyon için (a/L) oranının doğal frekansa etkisi .....	60
Şekil 5.17 Çift ankastre mesnetli kompozit plakta, üçgen görünümlü delaminasyon için (a/L) oranının doğal frekansa etkisi .....	62
Şekil 5.18 Tek ankastre mesnetli kompozit plakta üçgen görünümlü delaminasyon için b'nin doğal frekansa etkisi .....	63
Şekil 5.19 Çift ankastre mesnetli kompozit plakta üçgen görünümlü delaminasyon için b'nin doğal frekansa etkisi .....	64
Şekil 5.20 Orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonun doğal frekansa etkisi – tek tarafından ankastre mesnetli .....	66
Şekil 5.21 Orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonun doğal frekansa etkisi – iki tarafından ankastre mesnetli .....	68
Şekil 5.22 Fiber oryantasyonunun delaminasyon hasarlı tabakalı kompozitin doğal frekansına etkisi – tek tarafından ankastre mesnetli model için .....	70
Şekil 5.23 a) Hasarsız, b) üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 1. mod şekilleri .....	72
Şekil 5.24 a) Hasarsız, b) üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 2. mod şekilleri .....	73
Şekil 5.25 a) Hasarsız, b) üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 3. mod şekilleri .....	74
Şekil 5.26 a) Hasarsız, b) üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 4. mod şekilleri .....	75
Şekil 5.27 a) Hasarsız, b) üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 5. mod şekilleri .....	76

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 2.1 Konvansiyonel ve kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ( <a href="http://www.scribd.com/doc/80551602/Kompozit-Malzemeler-Ders-Notlar%C4%B1">http://www.scribd.com/doc/80551602/Kompozit-Malzemeler-Ders-Notlar%C4%B1</a> ).....	11
Tablo 4.1 E-cam lifi/epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri (Şahin, 2008).	31
Tablo 5.1 ANSYS ile elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması - 1. Ara yüz (Shen ve Grady, 1992), (Ramtekkar, 2009).....	37
Tablo 5.2 ANSYS ile elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması - 2. Ara yüz (Shen ve Grady, 1992), (Ramtekkar, 2009).....	37
Tablo 5.3 ANSYS ile elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması - 3. Ara yüz (Shen ve Grady, 1992), (Ramtekkar, 2009).....	37
Tablo 5.4 ANSYS ile deneysel sonucun karşılaştırılması .....	41
Tablo 5.5 Tek delaminasyon uzunluğu $a$ 'nın plak boyu $L$ 'ye oranı.....	43
Tablo 5.6 Kalınlık doğrultusunda üçgen delaminasyon hasarı için her bir ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları .....	46
Tablo 5.7 Delaminasyon uzunluklarını belirleyen $b$ 'nin değişimine bağlı olarak her ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları ( $a=90$ mm) .....	48
Tablo 5.8 Orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen görünümü delaminasyon için her bir ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları.....	50
Tablo 5.9 Orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda ters üçgen görünümü delaminasyon için her bir ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları.....	50
Tablo 5.10 a) Tek ankastre mesnetli kontaklı, b) Tek ankastre mesnetli kontaklı numunelere ait ilk 5 mod doğal frekans değerleri .....	52
Tablo 5.11 a) Çift ankastre mesnetli kontaklı, b) Çift ankastre mesnetli kontaklı numunelere ait ilk 5 mod doğal frekans değerleri .....	53
Tablo 5.12 Tek ankastre kontaklı numunenin delaminasyon derinliği için ilk 5 mod doğal frekans değerleri .....	55
Tablo 5.13 Çift ankastre mesnetli kontaklı numunenin delaminasyon derinliği için ilk 5 mod doğal frekans değerleri .....	55
Tablo 5.14 Tek ankastre mesnetli kompozit plak için artan delaminasyon sayısına bağlı olarak ilk 5 mod doğal frekans değerleri .....	58
Tablo 5.15 Çift ankastre mesnetli kompozit plak için artan delaminasyon sayısına bağlı olarak ilk 5 mod doğal frekans değerleri .....	58
Tablo 5.16 Tek ankastre mesnetlenmiş kompozit plakta üçgen görünümü delaminasyon için ( $a/L$ ) oranının doğal frekansa etkisi (ilk 5 mod).....	61
Tablo 5.17 Çift ankastre mesnetlenmiş kompozit plakta üçgen görünümü delaminasyon için ( $a/L$ ) oranının doğal frekansa etkisi (ilk 5 mod).....	61
Tablo 5.18 Üçgen görünümü delaminasyon için $b$ 'nin doğal frekansa etkisi a) Tek tarafından ankastre mesnetli plak için b) iki tarafından ankastre mesnetli plak için .....	65
Tablo 5.19 Tek tarafından ankastre mesnetli model için orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümü delaminasyonun doğal frekansa etkisi .....	67
Tablo 5.20 İki tarafından ankastre mesnetli model için orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümü delaminasyonun doğal frekansa etkisi .....	69
Tablo 5.21 Fiber oryantasyonunun delaminasyon hasarlı tabakalı kompozitin doğal frekansına etkisi – tek tarafından ankastre mesnetli model için.....	71

## 1. GİRİŞ

Kompozit malzeme, belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme grubudur. Üç boyutlu nitelikteki bu bir araya getirmede amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir (Ersoy, 2002).

Hangi çeşidi olursa olsun kompozit malzemeler konusu nispeten yeni olup II. Dünya Savaşında başlamıştır. O zamandan beri de; malzeme üretim teknolojisi, malzemenin karakterize edilmesi ve deney teknikleri üzerinde gelişmeler hızla devam etmektedir. Bu gelişmelerin itici yönünü, malzemelerin yüksek çekme dayanımı/yoğunluk oranı ve yüksek elastik modülü/yoğunluk oranının elde edilmesi oluşturmaktadır (Şahin, 2006).

Kompozit malzemelerin birçok çeşidi olmasına karşın son yıllarda araştırmacıların daha sıkça üzerinde durdukları tür tabakalı kompozitlerdir. Bunun nedeni tabakalı kompozit malzemelerin sahip olduğu mekanik özellikler dolayısı ile havacılık, uzay, denizcilik vb. gibi geniş ve geleceğe dönük sektörlerde sıkça kullanılabilir ve geliştirilebilir olmasıdır. Bu durum da tabakalı kompozitlerin mekanik, malzeme, işleme, statik-dinamik ve hasar mekanizmaları gibi özelliklerinin iyi bilinmesini gerektirir. Bu özelliklerden belki de en önemlisi bu malzemelerdeki hasarların nasıl ve ne gibi etkenler tarafından meydana geldiğidir. Bu konu çerçevesinde en önemli olay düşük hızlı darbe mekanizmasıdır. Düşük hızdan kastı açıklamak gerekirse, örnek olarak tabakalı kompozit malzemelerin yapımı sırasında çalışma mekanında bulunan farklı boyutlardaki cisimlerin yanlışlıkla malzemenin üzerine düşmesi ve hasara sebep olması verilebilir. Çok küçük ebatlarda bir cismin çarpması bile bu tür malzemelerde önemli hasarlar meydana getirebilir.

Düşük hızlı darbe yükü üzerine son yıllarda birçok araştırmacı çalışmaktadır. Aslan ve ark. (2002), düşük hızlı, büyük kütleli darbeye maruz kalan tabakalı örgü E-cam lifi/epoksi kompozit plakaların dinamik karakteristiklerini boyut etkileri bakımından incelemişlerdir. Aslan ve ark. (2003), düşük hızlı darbeye maruz E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozitin kalınlık ve boyut etkisini deneysel ve nümerik olarak araştırmış, 3DIMPACT paket programı ile tabakalar arasında oluşan delaminasyon bölgelerini bulmuşlardır. Guan ve Yang (2002), kompozit tabakaların düşük hızlı darbe ve hasar proseslerini temas kanunları, hasar başlangıcı ve buna karşılık gelen rijitlik

değişimi ve sönümlenmeyi göz önüne alarak sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Khalili ve ark. (2007), düşük hızlı darbeye maruz bırakılan akıllı hibrid kompozit plağın dinamik cevabı üzerine çalışmış ve bazı geometrik ve malzeme parametrelerinin Shape Memory Alloy ( SMA ) teller yerleştirilmiş kompozit plağın cevabı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Uyaner ve Kara (2007), düşük hızlı darbeye maruz kalan E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozitlerin dinamik cevabını deneysel olarak incelemişlerdir. Darbe deneylerinde çok yönlü fiber takviyeli,  $[0^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}]_s$  fiber oryantasyonuna sahip tabakalı kompozit plakları kullanmışlardır. Lee ve Huang (2003), düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozit plakların arta kalan mukavemeti ve hasar prosesi üzerine çalışmışlardır. Karbon/epoksi malzemeden üretilen tabakalı kompozit plakaya darbe etkisi vermek için ağırlık düşürme testlerinde yarı küresel uçlu bir çarpan cisim kullanılmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar programı ABAQUS'u kullanarak plakalar tamamen kırılana kadar oluşan hasarı belirlemişlerdir. Tita ve ark. (2008), ince kompozit tabakaların düşük hızlı darbe etkisi ile oluşan hasarını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Sonlu eleman analizi için ABAQUS paket programından yararlanmışlardır.

Düşük hızlı darbenin bu kadar önemli olmasının nedeni meydana getirdiği hasarlardır. Bu hasarların en önemlisi delaminasyon hasarıdır. Delaminasyon hasarında kompozit malzeme içerisinde süreksizlik bölgeleri meydana gelir ve bu durum malzemelerde darbelerin oluşturduğu kuvvetler sonucunda tabakaların ara yüzlerinin birbirinden ayrılması ile başlayan, daha sonra ise takviye ve matriks fazlarının da kırılmasına yol açarak malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen bir hasar türüdür.

Son yıllarda delaminasyon hasarlı kompozitler ve mekanik özellikleri üzerine birçok bilim adamı çalışmaktadır. Parhi ve ark. (2000), birden fazla delaminasyon içeren tabakalı kompozit plakaların dinamik sonlu eleman analizi üzerine çalışmıştır. Rastgele yerleştirilmiş birden fazla delaminasyon içeren model kullanılmış ve dinamik sonlu eleman eşitlikleri her tabaka için birinci dereceden kayma deformasyon teorisi (FOSDT) ile 8 düğümlü izoparametrik dörtgen elemanlar kullanılarak türetilmiştir. Serbest titreşim ve kısa süreli analiz için elde edilen nümerik sonuçlar, farklı sınır şartlarına sahip tekli ve çoklu delaminasyonlu plakalar için sunulmuştur. Gao ve ark. (2007), tabakaları arasına termoplastik partiküller eklenmiş karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin mod II delaminasyonu ve hasar direnci üzerine çalışmışlardır. Darbeden sonra basma mukavemeti üzerindeki termoplastik partikül ara yüz sertleştirme etkisini

değerlendirmek için ara yüzeyine termoplastik partikül yerleştirilen ve yerleştirilmeyen üç tip karbon/epoksi kompozit malzeme kullanmışlardır.

Acharyya ve ark. (2009), delaminasyonlu silindirik kompozit kabukların eğilme karakteristiği üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada sonlu elemanlar metodu kullanmış ve çalışmayı farklı sınır şartları için yapmışlardır. Yam ve ark. (2004), delaminasyon içeren tabakalı kompozitlerin nümerik analizini yapmışlardır. Doğal frekans, deplasman ve şekil değiştirmeleri farklı boyutlardaki delaminasyonlar için bulmuşlardır. Alnefaie (2009), delaminasyon içeren kompozit plakaların sonlu elemanlar modellemesi üzerine çalışmıştır. Üç boyutlu model kullanarak farklı delaminasyon boyutları için parametrelerin değişimini incelemiştir. Oh ve ark. (2005), yüksek mertebeden zigzag teorisine dayanan çok sayıda delaminasyona sahip kompozit plakların dinamik analizi üzerine çalışmışlardır. Çok sayıda delaminasyonlu kompozit plakların frekanslarını, mod şekillerini ve tepki sürelerini belirlemişlerdir. Ghoshal ve ark. (2006), kompozit yapılarda Fermi-Dirac dağıtım fonksiyonu ve hibrid hasar göstergesi ile delaminasyon modellemesi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada titreşim yaratabilecek yüklerde, ayrılmış ara yüzlerdeki açılıp kapanmalar sırasındaki deplasmanı ve gerilme alanlarını daha hızlı ve doğru modelleyebilmek için Fermi-Dirac dağıtım fonksiyonu kullanmışlardır.

Kütle ve elastisite şartlarını taşıyan mühendislik sistemleri izafi hareket yapabilirler. Eğer böyle bir sistemin hareketi verilen zaman aralığından sonra tekrarlanırsa, böyle bir hareket titreşim olarak tarif edilir. Genel halde titreşim istenmeyen ve lüzumsuz bir enerji halidir, çünkü mühendislik yapılarının zarar görmesine, gürültüye ve istenmeyen kuvvetlerin ortaya çıkmasına neden olur (Toprak,1977). Tabakalı kompozit malzemeler için titreşim göz önüne alınması gereken önemli bir konudur. Çünkü bu tür malzemelerin yapımı veya işletimi sırasında meydana gelen mikro ve makro boyuttaki süreksizlikler titreşim ile beraber büyüyebilir ve malzemenin mekanik özelliklerinin değişmesine sebep olabilir.

Delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit malzemelerin titreşim davranışı son yıllarda araştırmacılar tarafından üzerinde durulan bir konu olmuştur. Lee (2000), delaminasyonlu kompozit kirişlerin serbest titreşim analizini yapmıştır. Bu çalışmada tabaka teorisini kullanmıştır. Hareket denklemlerini Hamilton prensibinden türetmiştir ve problemi formüle etmek için bir sonlu eleman metodu geliştirmiştir. Bu çalışmasını aynı etkileri içeren (yönlenme, pozisyon, boyut, sayı, vb.) daha önceki çalışmalarla karşılaştırmış ve sonunda tabaka teorisinin delaminasyonlu kompozitlerin titreşim

analizine uygun olduğunu görmüştür. Zak ve ark. (2000), çok sayıda delaminasyonlu kiriş ve plakaların serbest titreşimini nümerik ve deneysel olarak araştırmıştır. Tabakalı kompozit plaka ve kirişlerdeki delaminasyonları tespit etmek için kullanılan tahribatsız muayene yönteminden olan titreşim-monitörleme tekniği birçok araştırmacının ilgi alanında olmasına karşın, yayınlanmış literatürde bu tür malzemelerin dinamik araştırmaları hakkında genişletilmiş bir araştırma olmamasından dolayı Zak ve ark. (2000) bu konu hakkında teorik modellemeler ve genişletilmiş deneysel bir çalışma yaparak, delaminasyondan kaynaklanan ilk üç eğilme doğal frekansındaki değişiklikleri belirlemişlerdir. Çalışmada gerçekçi modellemeye daha yakın olması açısından dört ankastre kiriş kullanılmıştır ve doğal frekanslar darbe test tekniğine dayalı bir ölçme sistemiyle belirlenmiştir.

Hu ve ark. (2002), orta kalınlıktaki delaminasyonlu kompozit plakaların titreşim cevabını analiz etmek için, plakanın alt ve üst yüzeylerinde sıfır transverse kayma gerilmesi koşulunu sağlayan ve basit bir yüksek mertebe plaka teorisine dayanan sonlu elemanlar modeli üzerine çalışmışlardır. C° tipi sonlu elemanlar modeli hazırlarken, yüksek mertebe plaka teorisindeki yüksek mertebeden türeyenleri yok etmek için deplasman bölgesinde iki yapay değişken tanımlanmıştır. Daha önceki araştırmalarda çalışılan çeşitli örnekler, sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu ve etkinliğini karşılaştırmak için kullanılmıştır. Ayrıca delaminasyonun kompozit tabakaların titreşim karakteristiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Özellikle delaminasyonun sebep olduğu ‘titreşim modunun eğriliği’ (örnek olarak: titreşim modunda ki sapmaların ikinci mertebeden diferansiyeli), muhtemel delaminasyon tanımlamasında kullanılmak üzere detaylı olarak çalışılmıştır. Ayrıca bu bilgileri kullanarak tabakalar arasındaki delaminasyonu tespit etmek için iki yaklaşım metodu incelenmiştir.

Lee ve ark. (2002), çok sayıda delaminasyona sahip eksenel basmaya maruz tabakalı kompozit kiriş-kolonların serbest titreşim analizi üzerine çalışmışlardır. Çok sayıda delaminasyonun doğal frekans üzerindeki etkilerini ve kiriş-kolonların elastik burkulma yükünü araştırmak için, genel kinematik süreklilik şartları çok sayıda delaminasyonun ucundaki sabit eğim ve kıvrım varsayımlarından türetilmiştir. Çok sayıda delaminasyonlu kiriş-kolonların karakteristik eşitlikleri, delaminasyonlu kiriş-kolon parçalara ayrılarak ve her bir kiriş-kolon parçasına süreklilik koşullarındaki tekrarlama bağıntıları uygulanarak elde edilmiştir. Yapılan modellerden elde edilen sonuçları doğrulamak için, izotropik tek delaminasyonlu kiriş-kolonların deneysel

sonuçları kullanılmıştır. Görülmüştür ki, çok sayıda delaminasyonun yeri, boyutu ve sayısı doğal frekansı ve elastik burkulma yükünü önemli ölçüde değiştirmektedir.

Luo ve ark. (2004), yapay delaminasyona sahip kompozit kirişlerin lineer olmayan titreşimi üzerine çalışmışlardır. Araştırmada transverse kaymayı da göz önüne almışlardır. Kirişlerdeki lineer olmayan titreşime, farklı pozisyonda ve büyüklükte delaminasyonların etkilerini incelemiş ve bu titreşimlerin genlik-frekans eğrileri elde edilmiştir. Yanal, boylamasına ve her iki tipi içeren çok sayıda delaminasyonlu kirişlerin titreşimi için analitik bir formülasyon önerilmiş ve bunun üzerinde çalışılmıştır. Çok sayıda delaminasyonlu kompozit kiriş için frekans eşitlikleri, global kiriş alt kirişlere ayrılarak, bu ayrı kirişlere süreklilik şartları uygulanarak elde edilmiştir. Deneyler tek bir delaminasyona sahip kiriş için yapılmış ve sonlu elemanlar modeli çok sayıda delaminasyonlu kiriş için hazırlanmıştır.

Della ve ark. (2004), iki delaminasyona sahip kirişlerin titreşimi üzerine çalışmıştır. Delaminasyonun yerine ve büyüklüğüne göre değişen kompleks titreşim davranışları gözlemlemişlerdir. Shu ve Della (2004,b), çok sayıda delaminasyonlu kirişlerin titreşimi üzerine analitik olarak çalışmışlardır. Delaminasyon boyutunun ve yerinin doğal frekansa ve mod şekillerine olan etkisini araştırmışlardır. İki ucu ankastre kirişlerin birincil frekansları uzun delaminasyonlardan önemli derecede etkilenirken, kısa delaminasyonlardan fazla etkilenmediği, ikincil frekansların ise her iki delaminasyondan önemli derecede etkilendiği gözlenmiştir. Bir ucu ankastre, diğer ucu serbest kirişlerin birincil ve ikincil frekansları ise, uzun delaminasyondan önemli derecede etkilenmektedir ve kısa delaminasyondan fazla etkilenmemektedir. Shu ve Della (2004,a), farklı yerlerinde iki adet delaminasyona sahip kompozit kirişlerin serbest titreşim analizini analitik olarak çalışmışlardır. Delaminasyonlu kiriş, birbirine bağlı yedi adet Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmiş ve sınır şartları ve süreklilik açısından tatmin edici bulunmuştur. Delaminasyon boyutunun ve konumunun mod şekillerine ve doğal frekansa etkisi araştırılmıştır. Della ve Shu (2005), başka bir çalışmada iki delaminasyona sahip kirişlerin titreşimini, analitik olarak çözümlenmişlerdir. Kiriş, delaminasyonların sınır olduğu birbirine bağlı beş kiriş olarak analiz edilmiştir ve klasik kiriş teorisi her kirişe uygulanmıştır. Titreşime özel yeni bir narinlik oranı tanımlanmıştır. Della ve Shu (2007), eğilmeye maruz iki delaminasyona sahip kirişlerin serbest titreşimini analitik olarak çalışmıştır. Delaminasyonlu kiriş, birbirine bağlı yedi adet Euler-Bernoulli kirişi olarak analiz edilmiştir. Delaminasyon

burkulmasında ve titreşiminde hem serbest modu hem de zorlanmış modu kullanmışlardır.

Della ve Shu (2009), aksenal basmaya maruz olan çok sayıda delaminasyonlu kirişlerin serbest titreşim analizini yapmışlardır. Euler-Bernoulli kiriş teorisi ile hem serbest mod, hem de serbest olmayan mod için delaminasyon burkulması ve titreşimi üzerine çalışmışlardır. Ayrıca çok sayıda delaminasyonlu kirişlerde aksenal basma yükünün titreşim karakteristiği üzerindeki etkilerini incelemek için parametrik bir çalışma yapmışlardır. Ramtekkar (2009), delaminasyon içeren tabakalı kirişlerin serbest titreşim analizi üzerine çalışmıştır. Bu çalışmasında daha önceden Ramtekkar, Desai ve Shah tarafından geliştirilen iki-boyutlu düzlem gerilme karışık sonlu eleman modeli ile çalışmıştır. Serbest-ara yüz modeli ve kontak-ara yüz modeli olmak üzere iki farklı tabakalı kiriş modelin serbest titreşim frekanslarının ve mod şekillerinin hesaplamaları üzerinde çalışarak, hem orta düzlemde, hem de orta düzlem dışındaki yerlerde bulunan delaminasyonları inceleyerek literatürdeki mevcut deneysel ve teorik verilerle karşılaştırmıştır.

Şu ana kadar yapılan çalışmalar tek veya iki delaminasyona sahip tabakalı kompozitlerin titreşim davranışı üzerinedir. Ayrıca bütün çalışmalar kompozit kirişlerle yapılmış, kompozit plaklarla ilgili sadece bir kaç araştırmanın olduğu görülmüştür. Bu tezde ise düşük hızlı darbe yüklemesi sonucunda çok sayıda şerit delaminasyon hasarı oluşmuş E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit plakların titreşimi üzerine çalışılmıştır. Nümerik çalışma için ANSYS ticari amaçlı sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. ANSYS'in doğrulaması için dört adet şerit delaminasyona sahip kompozit bir plağın doğal frekansı Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Titreşim Laboratuvarında deneysel olarak tespit edilmiş ve nümerik sonuçla kıyaslanmıştır. Ayrıca literatürde bulunan tek delaminasyonlu kompozitlerin analitik olarak bulunan doğal frekansları da ANSYS sonuçları ile karşılaştırılmıştır. ANSYS programının doğrulamasının ardından üç boyutlu solid elemanlar ve kontak elemanları kullanılarak delaminasyonlu kompozit plaklar modellenmiştir. Tek delaminasyon uzunluğunun ve derinliğinin doğal frekansa ve mod şekillerine etkisi belirlendikten sonra, sabit uzunluktaki delaminasyon sayısının (tek delaminasyondan 15 delaminasyona kadar) doğal frekansa etkisi bulunmuştur. Ardından darbe yüklemesi sonucunda kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyon oluşmuş kompozitler modellenmiştir. Yapılan literatür taraması sonucunda kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı kompozitler

üzerine hiçbir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu tezde kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarı oluşmuş kompozit plaklarda en büyük delaminasyon boyutunun ve küçük delaminasyon boyutlarının doğal frekansa etkisi araştırılmıştır. Ayrıca fiber oryantasyonunun ve sınır şartlarının doğal frekansa etkisi belirlenmiştir.

## 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Karbon elyafı plastikler, otomobil lastikleri ve sermetler bunlara örnek olarak gösterilebilir. Bir kompozit malzeme, genelde düşük modül ve dayanıma sahip reçine veya metalik matriks ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan tali faz olan takviye elemanından oluşmaktadır (Şahin, 2006). Ancak moleküler ve atomsal düzeyde birleştirilen malzemeler veya alaşımlar mikroskobik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar. Örnek; çelikteki krom ve vanadyum bir karışım oluşturur ve bir kompozit değildir. Çünkü yapı mikroskobik olarak homojendir. Fakat karbür uçlu takımlar, yumuşak kobalt metal matriks içine sert karbürlerin yerleştirilmesi ile parçacıklı bir kompoziti oluşturur (Şahin, 2006).

Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matriks malzemesinin bulunduğu bilinmektedir. Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, kılcal kristaller, kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matriksin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır (Şahin, 2006). Matriksin fonksiyonu ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için elyafları bir arada tutmak ve genellikle çok kırılğan ve gevrek olan elyafları dış etkenlere karşı korumaktır. Ayrıca plastiklik ve süneklik üstünlüğü ile elyaflarda kırılğan çatlakların yayılmasını önler. Plastik deformasyonlar ve çatlaklar varsa elyaflara paralel olarak yönlerini değiştirir (Şahin, 2006).

Uygulamada kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır (Ersoy, 2002). Bu özelliklerden başlıcaları,

- \* Mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı,
- \* Yorulma dayanımı, aşınma direnci,
- \* Korozyon direnci,
- \* Kırılma tokluğu,
- \* Yüksek sıcaklığa dayanıklılık,
- \* Isı iletkenliği veya ısı direnci,

- \* Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnç,
- \* Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,
- \* Rijitlik,
- \* Ağırlık,
- \* Görünüm,

ve benzeri zellikleri Şeklinde sıralanabilir. Ayrıca böylelikle dolaylı olarak malzemenin birim maliyeti de düŐürülebilmektedir (Ersoy, 2002).

Bu amaca yönelik olarak, kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden hemen hemen tamamı ilkel Şekilde de olsa baŐlangıĥtan beri kullanılan yöntemlerdir. Ancak, hepsinde de deđiŐmeyen temel ilke, bileşenlerin zayıf yönlerinin amaĥ doğrultusunda iyileŐtirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir (Ersoy, 2002).

## **2.1. Kompozit Malzemelerin nemi**

Mühendislikte yaygın olarak kullanılmakta olan ĥok farklı malzemeler mevcut olup bunlar; genelde metaller, plastikler, seramikler olmak üzere 3 gruba ayrılırlar. Bunların birbirlerine göre zayıf veya üstün yönleri vardır. Bu malzemelerin uygulama alanları dikkate alındığında bir malzemede aranan özelliklerden en önemlileri aşağıdaki özelliklerdir (Şahin, 2006);

- \* Akma dayanımı,
- \* Rijitlik (elastiklik modülü),
- \* Kırılma tokluğu (ĥatlak yayılmasına karşı dayanma direnci),
- \* Yoğunluk (birim hacim kütlesi),
- \* Yüksek sıcaklıklara dayanma direnci,

Metallerin, seramiklerin ve plastiklerin geliŐmesi dolayısıyla, bunların daha üstün ve daha ĥok ĥeŐitli özelliği bir arada toplayan malzeme olarak kompozit malzemelerin geliŐimi de ĥok hızlandırılmıştır. Havacılığında geliŐiminin hızlanması kompozit malzemeye havacılıkta en ĥok kullanılan malzeme durumuna getirmiŐtir. Havacılıkta özellikle hava-uzay yapı elemanlarında kullanılan kompozitler klasik tür karma malzemeden ayrıldığı iĥin bunlara “advanced composite materials” yani ileri kompozit

malzemeler denmiştir (<http://www.scribd.com/doc/80551602/Kompozit-Malzemeler-Ders-Notlar%C4%B1>).

Kompozit malzemeler birçok açıdan, düşük maliyette klasik malzemelere göre üstünlük göstermektedirler. Çok zor hizmet koşullarında klasik malzemenin yapamayacağı görevleri başarmaktadırlar. Kompozit malzemelerin en önemli üstünlükleri, ağırlıklarının çok azaltılabilmesine imkan tanınmasıdır. Kompozit yapı iç bileşenleri birbirlerine genelde kovalent bağla bağlı oldukları için çok yüksek dayanımlara erişebilmektedirler. Ağırlıktan kasıt ise, mukavemet/ağırlık oranıdır. Kompozit malzemelerde bu oran klasik malzemelere oranla çok yüksektir. İyapının bu özelliklerinden dolayı kompozit malzeme yüksek mukavemet, yüksek elastisite modüllerine, iyi derecede yorulma ve sürünme özelliklerine ve bunun gibi yapısal özelliklere sahiptirler. Tablo 2.1’de bazı özelliklere dair kıyaslamalar verilmiştir (<http://www.scribd.com/doc/80551602/Kompozit-Malzemeler-Ders-Notlar%C4%B1>)

Tablo 2.1 Konvansiyonel ve kompozit malzemelerin mekanik özellikleri  
(<http://www.scribd.com/doc/80551602/Kompozit-Malzemeler-Ders-Notlar%C4%B1>)

MALZEME	Yoğunluk $\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	Elastik Modül E(GPa)	Özgül E.Modül E/ $\rho$	Çekme Muk. $\sigma_c$ (GPa)	Özgül Çek.Muk. $\sigma_c/ \rho$	Maks.Şek. Değ. (%)	
<b>KONVANSİYONEL</b>	<b>ÇELİK (3140)</b>	7,90	200,0	25	1,85	0,24	11,00
	<b>ALÜMİNYUM ASG (6061) T6</b>	2,70	70,0	26	0,35	0,13	11,00
	<b>ALÜMİNYUM AU4G1(2024) T4</b>	2,80	73,0	26	0,29	0,21	11,00
	<b>ALÜMİNYUM A25G4(7075) T6</b>	2,80	76,0	27	0,45	0,16	11,00
	<b>TİTANYUM T6V</b>	4,40	119,0	27	1,14	0,26	14,00
<b>KOMPOZİT</b>	<b>BOR/EPOKSİ</b>	2,10	270,0 *	129 *	2,00 *	0,95 *	6,50 *
	<b>BOR/ ALÜMİNYUM</b>	2,70	225,0 **	83 *	1,25 *	0,46 *	10,00 *
	<b>GRAFİT/ EPOKSİ</b>	1,70	208,0 * 10,3 **	122 *	1,34 * 0,03 **	0,79 *	0,78 * 0,29 **
	<b>KARBON/ EPOKSİ</b>	1,50	142,0* 10,3 **	95 *	1,60 * 0,07 **	1,06 *	1,10 * 0,57 **
	<b>KEVLAR/ EPOKSİ</b>	1,35	80,0 * 5,5 *	59 *	1,38 * 0,03 **	1,02 *	1,70 * 0,57 **
	<b>CAM/EPOKSİ</b>	2,20	53,0 * 12,4 **	24 *	1,45 * 0,04 **	0,66 *	2,70 * 0,30 **
	<b>KARBON/ POLYESTER</b>	1,68	127,5 * 7,6**	76 *	1,52 * 0,04 **	0,9 *	1,20 * 0,53 **
	<b>KEVLAR/ POLYESTER</b>	1,40	76,0 * 5,5 **	54 *	1,20 * 0,02 **	0,86 *	1,60 * 0,40* *
	<b>CAM/ POLYESTER</b>	1,80	39,0 * 9,6 **	22 *	1,13 * 0,02 **	0,63 *	2,80 * 0,21 **

\* Elyaf lar yönünde

\*\* Elyaf lar a dik yönde

## 2.2. Kompozitlerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin birçok özelliklerinin metallerinkine göre çok farklılıklar göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin

özgül ağırlıklarının düşük oluşu, hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviye kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin dezavantajlarını ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların olumlu sonuçlanması halinde kompozit malzemeler, metalik malzemelerin yerini alabilecektir ([http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme\\_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf](http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf)).

Kompozit malzemelerin avantajları;

\* **Yüksek mukavemet:** Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemetleri, birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı, kompozitlere istenen yönde ve istenen bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedeki tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilebilir.

\* **Kolay şekillendirilebilme:** Büyük ve karışık parçalar, tek işlemlerle bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.

\* **Elektriksel özellikler:** Uygun malzemelerin seçilmesi ile çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji ve nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.

\* **Korozyona ve kimyasal etkilere karşı mukavemet:** Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilere zarar görmezler. Bu özellikleri nedeni ile kompozit malzemeler, kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörleri, tekne ve deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, bu yönü ile endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.

\* **Isıya ve ateşe dayanıklılık:** Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özellikleri, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak tanımaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.

\* **Kalıcı renklendirme:** Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.

\* **Titreşim sönümlenme:** Kompozit malzemelerde süneklik nedeni ile doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak büyümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır ([http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme\\_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf](http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf)).

Kompozitlerin dezavantajları ise;

\* Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz yönde etkiler.

\* Kompozit malzemeler, değişik doğrultularda değişik mekanik özellik gösterirler, bu nedenle kullanım yerine uygun doğrultuların seçilmemesi dezavantaj olarak kendini göstermektedir.

\* Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.

\* Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.

Görüldüğü gibi kompozit malzemeler bazı dezavantajlarına rağmen çelik ve alüminyum gibi metallere göre birçok avantaja sahiptir. Bu özellikler nedeni ile kompozitler, otomobil gövde ve tamponlarından deniz teknelerine, kimyasal madde depolama tanklarından karayolu tankerlerine, bina cephe ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar birçok sanayi kolunda problemleri çözümlenecek bir malzemedir ([http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme\\_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf](http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf)).

### **2.3. Modern Kompozit Malzemeler ve Sınıflandırılması**

Yeni geliştirilen bir malzemenin modern kompozit olarak adlandırılabilmesi için şu kriterleri taşıması gerekir (Şahin, 2006);

\* İnsan yapısı olmalı,

\* En az iki veya daha fazla, fiziksel ve mekanik özelliği ayrı olan malzemelerin birleştirilmesi ve farklı ara yüzeye sahip olmalı,

\* Herhangi tek bileşenle elde edilemeyen mekanik özelliklerin gerçekleştirilmesi,

\* Optimum özellikler elde etmek için bir malzemenin diğer malzeme içinde kontrollü şekilde dağıtılmasıyla karma bir malzeme oluşturulması,

\* Özellikler mükemmel olup kompoziti oluşturan elemanların en iyi özelliklerinin bir arada toplanması gereklidir (Şahin, 2006).

Kompozit malzemeler kullanılan takviye elemanının şekline göre beş sınıfa ayrılabilir. Bunlar partikül takviyeli, fiber takviyeli, levhasal, tabakalı ve doldurulmuş kompozit malzemelerdir. Şekil 2.1’de kompozit malzemelerin takviye elemanının şekline göre sınıflandırılması örnek mikroyapı resimleri ile birlikte gösterilmiştir (Soy, 2009).

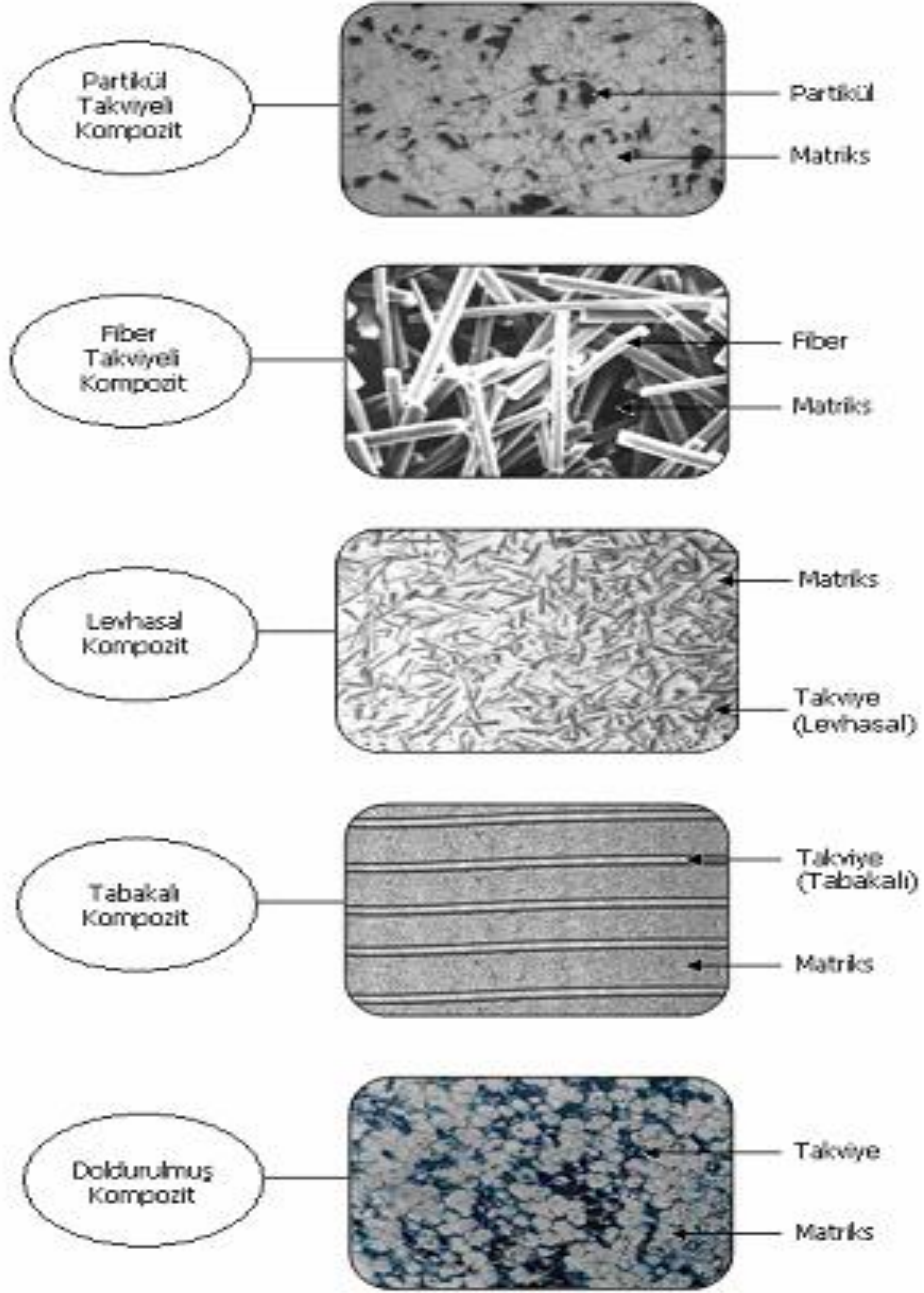
**Partikül takviyeli kompozitler:** Bu tip kompozitler, makroskobik veya mikroskobik partiküllerin matriks ile oluşturdukları malzemelerdir. Ortalama gömülen parçacık boyutu 1 mm’den büyük ve takviye hacim oranı genelde %50’den fazla kullanılmamaktadır.

**Fiber takviyeli kompozitler:** Bu tür malzemelerde, matriks kompozite gelen yükü fibere iletir, yükün çoğu fiber tarafından taşınır ve özellikleri anizotropiktir. Fiber formları; örgülü, şerit fitil veya tabakalar halinde yönlü olarak kullanılır.

**Levhasal kompozitler:** Matriks fazı içindeki levha şekilli takviye elemanlarından oluşan kompozitlerdir. Al-grafit sistemi levhalar; pullar, cam, mika ve metal olabilir. En çok bilinen metal levhalar AlB<sub>2</sub> ve Be levhalardır.

**Tabakalı kompozitler:** Bu tür kompozitler farklı bileşenli plakaların sandviç (üst üste) şeklinde birleştirilmesiyle elde edilir. Bu kompozitler, matriks içerisine rasgele yönelmiş, tek yönlü veya çift yönlü fiber takviyeli tabakalardan oluşmaktadır.

**Doldurulmuş kompozitler:** Sürekli bir iskelet yapıya sahip takviye malzemesi formunun matriks bir malzeme ile doldurulmasından üretilen kompozitlerdir. Matriks malzemesinin daha önceden hazırlanmış preform (köpük) yapıya basınçlı, basınçsız ya da döküm yoluyla emdirilmesi ile elde edilir (Soy, 2009).



Şekil 2.1 Kompozit malzeme türleri (Soy, 2009)

#### 2.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanı çok geniş boyutlara ulaşmıştır. Kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanları ve bu alanlarda sağlanan avantajlar şu şekilde sıralanabilir ([http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme\\_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf](http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf)):

**Şehircilik :** Bu alanda kompozitler, toplu konut yapımında, çevre güzelleştirme çalışmalarında (heykel, banklar, elektrik direkleri v.s.) kullanılmaktadır. Üreticinin çok sayıda standart ürünü kısa zamanda imal edebilmesi, montajdan tasarruf ve ucuz maliyet imkanları, kullanıcıya da yüksek izolasyon kapasitesi, hafiflik ve yüksek mekanik dayanım imkanları sağlamaktadır.

**Ev Aletleri :** Masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif ev eşyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde komple ve karışık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlamaktadır.

**Elektrik ve Elektronik Sanayi :** Kompozitler, başta elektriksel izolasyon olmak üzere her tür elektrik ve elektronik malzemenin yapımında kullanılmaktadır.

**Havacılık Sanayi :** Havacılık sanayisinde kompozitler, gün geçtikçe daha geniş bir uygulama alanına sahip olmaktadır. Planör gövdesi, uçak modelleri, uçak gövde ve iç dekorasyonu, helikopter parçaları ve uzay araçlarında başarıyla kullanılmaktadır. Daha hafif malzemeyle atmosfer şartlarına dayanım ve yüksek mukavemet sağlanmaktadır.

**Otomotiv Sanayi :** Bu alanda kompozitlerden oluşan başlıca ürünler; otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleridir.

**İş Makinaları :** İş makinalarının kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı azaltılabilmekte, tek parça üretim mümkün olmaktadır. Ayrıca elektrik izolasyon malzemelerinden de tasarruf sağlanmaktadır.

**İnşaat Sektörü :** Cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Tasarım esnek ve kolay olmakta, nakliye ve montajda büyük avantajlar sağlamaktadır. İzolasyon problemi çözülmekte ve bakım giderleri azalmaktadır.

**Tarım Sektörü :** Seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kompozitler özel bir öneme sahiptirler. Kompozit malzemelerden yapılan bu örnekler istenirse ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük yatırım ve kolay montaj gibi avantajlar sağlamaktadır ([http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf](http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf)).

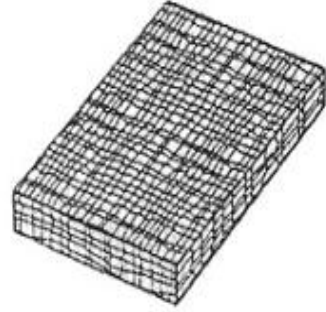
### 3. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ

#### 3.1. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Farklı uygulamalarda kullanmak için değişik yönlerdeki fiber takviyesine duyulan ihtiyaç Şekil 3.1 de gösterilen çeşitli tiplerde tabakalı kompozitlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Gibson, 1994).



a) Sürekli fiber takviyeli



b) Örgü fiber takviyeli



c) Kırpılmış fiber takviyeli



d) Hibrid kompozit

Şekil 3.1 Fiber takviyesine göre tabakalı kompozit türleri. a) Sürekli fiber takviyeli b) Örgü fiber takviyeli c) Kırpılmış fiber takviyeli d) Hibrid kompozit (Gibson, 1994)

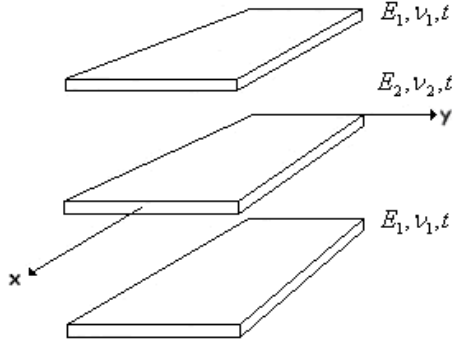
Sürekli fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde, fiber/matriks olarak süreklilik gösteren her bir bireysel tabakacık istenilen doğrultuda yönlendirilip birbiri üzerine yapıştırılarak tabakalı kompozit elde edilir. Bu tip kompozitler çok yaygın olarak kullanılsa da, potansiyel delaminasyon hasarı veya tabakacıkların birbirinden ayrılması hala oldukça önemli bir sorundur çünkü ara yüz mukavemeti matriks özelliklerine bağlıdır. Örgü fiber takviyeli tabakalı kompozitler ise belirgin tabakacıklara sahip olmakla beraber delaminasyon açısından hassas değildir. Ancak fiberlerin sürekli fiber takviyeli tabakalı kompozitlerdeki kadar düz ve sürekli olmadığından dolayı mukavemet ve sertliklerinden taviz verilmektedir. Kırpılmış fiber takviyeli tabakalı kompozitler, çok kısa boylu kesilmiş fiberlerin matriks içerisine rastgele dağıtılmasıyla meydana getirilir. Bu tip tabakalı kompozitler düşük imalat maliyetleri dolayısı ile büyük hacimli uygulamalarda oldukça sık olarak kullanılırlar, ancak mekanik özellikleri sürekli fiber takviyeli tabakalı kompozitlere göre oldukça zayıftır. Son olarak hibrid tabakalı kompozitler ise kırpılmış ve sürekli fiber takviyelerinin birlikte kullanılmasıyla veya cam/grafit gibi karışık fiber tiplerinin kullanılmasıyla oluşturulur (Gibson, 1994).

### 3.1.1. Simetrik tabakalar (Jones, 1998)

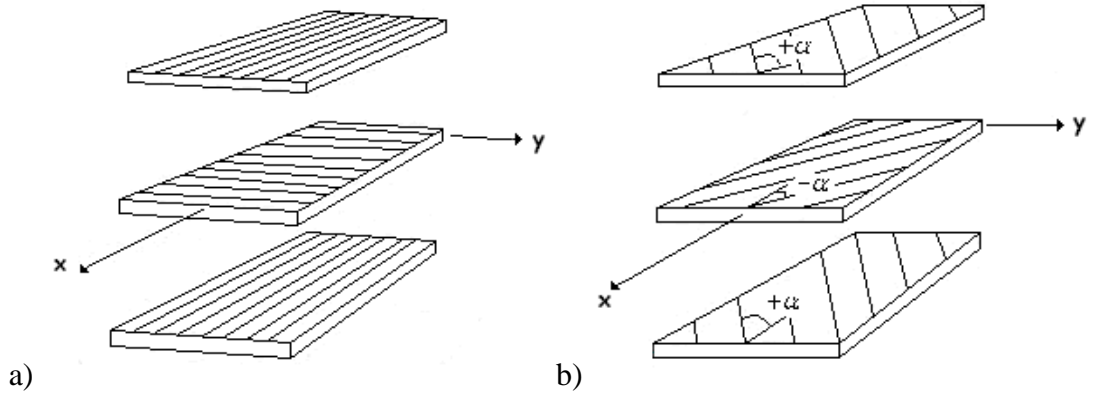
Tabakacıklar, orta yüzeyden itibaren materyal özellikleri ve geometrik bakımdan simetrik yerleştirilmişlerse bunlara *simetrik tabakalar* denir.

*İzotropik Tabakalardan Oluşan Simetrik Tabakalı Kompozit:* Şekil 3.2’de üç tane izotropik tabaka simetrik olarak yerleştirilmiştir. Burada değişik kalınlıklarda çok sayıda izotropik tabaka, orta yüzeye göre hem geometrik hem de materyal özellikleri bakımından simetrik şekilde yerleştirilmiştir.

*Ortotropik Tabakalardan Oluşan Simetrik Tabakalı Kompozit:* Ortotropik tabakalar, orta yüzeye göre simetrik olarak yerleştirilmiştir. Şekil 3.3 a)’da fiber takviye açıları  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $0^\circ$  olan üç tabakalı bir kompozit, Şekil 3.3 b)’de ise fiber takviye açıları  $+\alpha$ ,  $-\alpha$ ,  $+\alpha$  olan üç tabakalı kompozit görülmektedir.



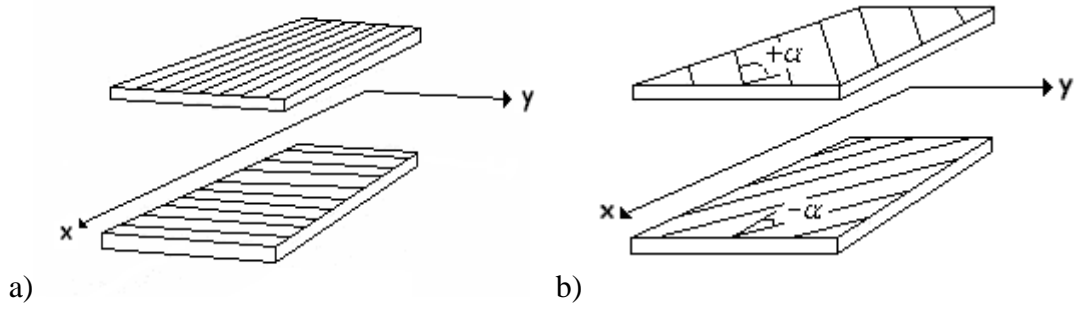
Şekil 3.2 İzotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998)



Şekil 3.3 Ortotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998)

### 3.1.2. Antisimetrik tabakalar (Jones, 1998)

Tabakalı kompozitlerin uygulanmasında dizayn ihtiyacını karşılamak için antisimetrik tabakalara ihtiyaç duyulur. Örneğin, bir tabakanın ısıya karşı koruyucu bir plaka görevi yapması istenirse antisimetrik tabaka seçilir. Çünkü ısı sadece bir taraftan gelecektir. Şekil 3.4 a'da antisimetrik olarak yerleştirilen, fiber takviye açıları  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  olan iki tabakalı bir kompozit, Şekil 3.4 b'de ise yine antisimetrik olarak yerleştirilen, fiber takviye açıları  $+\alpha$ ,  $-\alpha$  olan iki tabakalı bir kompozit görülmektedir.

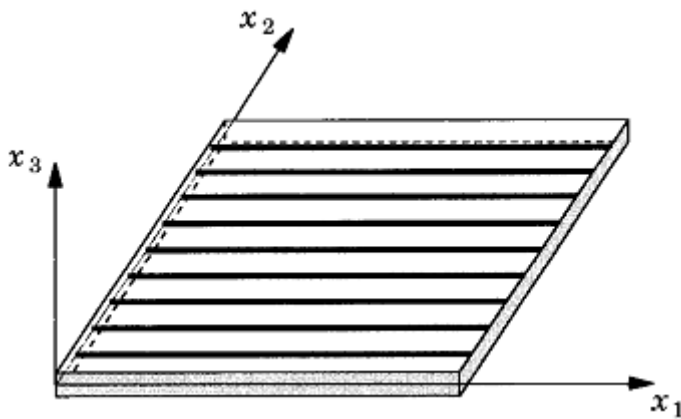


Şekil 3.4 Antisimetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998)

### 3.2. Ortotropik Malzemelerin Mekanik Davranışı

#### 3.2.1. Ortotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme – Şekil Değiştirme Bağıntısı (Jones, 1998)

Ortotropik malzemelerin rijitlik matrisi 9 bağımsız elemanla tanımlanır. Gerilme-şekil değiştirme bağıntısı Denklem 3.1’de ki gibi yazılır. Malzeme koordinat sistemi Şekil 3.5’de ki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.5 Tek yönlü fiber takviyeli bir tabakanın malzeme koordinat sistemi (Reddy, 2004)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.1]$$

$\sigma$  : Normal gerilme

$\tau$  : Kayma gerilmesi

$C$  : Rijitlik matrisi

$\varepsilon$  : Birim şekil değiştirme

$\gamma$  : Birim çarpılma açısı

Ortotropik malzemeler için şekil değiştirme-gerilme bağıntısı ise şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.2]$$

S elastiklik matrisi ortotropik malzemeler için Denklem [3.3]'de ki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.3]$$

Bahsedilen 9 bağımsız değişken eleman ise  $E_1, E_2, E_3$  elastisite modülleri,  $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$  Poisson oranları,  $G_{12}, G_{23}, G_{13}$  kayma modülleridir. Şekil 3.5’da görülen tek yönlü fiber takviyeli tabaka için düzlem gerilme hali şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma_3 = 0, \tau_{23} = 0, \tau_{31} = 0 \quad [3.4]$$

Düzlem gerilme hali için  $\varepsilon_3, \gamma_{23}$  ve  $\gamma_{31}$  ise Denklem [3.2]’den şu şekilde bulunur.

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &= S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 \\ \gamma_{23} = \gamma_{31} &= 0 \end{aligned} \quad [3.5]$$

Sonuçta Denklem [3.2] düzlem gerilme hali için aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.6]$$

Denklem [3.6]’da ki şekil değiştirme-gerilme bağıntısı, gerilme-şekil değiştirme bağıntısını elde etmek için tersine çevrilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.7]$$

Burada  $Q_{ij}$ , indirgenmiş rijitlik olarak adlandırılır.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12} \quad [3.8]$$

Gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ve şekil değiştirme-gerilme bağıntısı, sadece kendi düzleminde kuvvetlere maruz kalan tabakalar için temel denklemlerdir (Jones, 1998).

### 3.2.2. Ortotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme Halinde Gerilme - Şekil Değişirme Dönüşümü (Reddy, 2004)

Ortotropik malzemenin asal malzeme ekseninde gerilme hali için gerilme-şekil değişirme bağıntıları yukarıda verildi. Bu hal özel bir durum olup genelde malzeme asal eksen doğrultularından farklı eksenlerde gerilmelere maruz kalır. Bu eksenler asal gerilme eksenlerinden ( $\theta$ ) açısı kadar dönmüş olan doğrultularda olabilirler (Şekil 3.6).

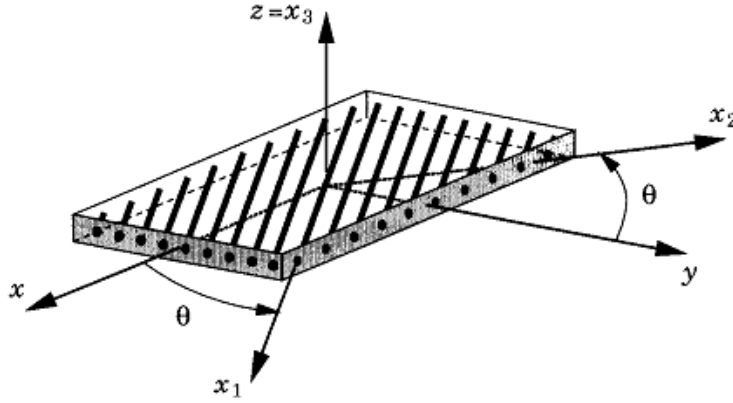
Asal malzeme doğrultuları 1 ve 2 eksenleri ile tanımlanan ortotropik kompozit malzemenin üzerine uygulanmakta olan gerilmeler x-y eksenleri doğrultusunda olduğunda, malzemenin elemanter mekaniğinden yararlanarak, dönüşüm denklemlerinin yazılması gerekir. Dönüşüm denklemi aşağıda verilmektedir.

$m = \cos\theta$  ve  $n = \sin\theta$  ve  $\theta$ , Şekil 3.6'den görüldüğü gibi  $x_1 - x$  eksenindeki açı olmak üzere;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.9]$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} \quad [3.10]$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad [3.11]$$



Şekil 3.6 Malzeme koordinat sistemi (Reddy, 2004)

Burada

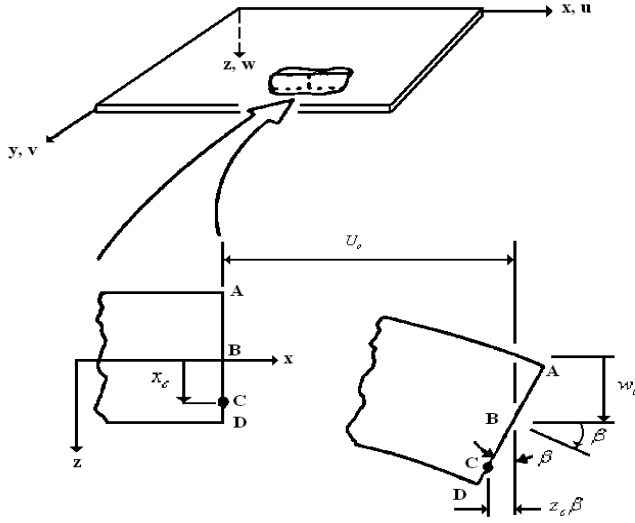
$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\
 \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\
 \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{12}(n^4 + m^4) \\
 \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})n^3m \\
 \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})n^3m + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\
 \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(n^4 + m^4)
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

$\bar{Q}_{ij}$  matrisinin üzerindeki çizgi,  $Q_{ij}$  indirgenmiş rijitliğinin yerine dönüştürülmüş indirgenmiş rijitliğin olduğunu gösterir.

### 3.2.3. Tabakalarda Gerilme - Şekil Değiştirme Davranışı (Jones, 1998)

Düzlem gerilmeye maruz bir ortotropik tabakalı kompozit malzemenin bir tabakacığı için asal malzeme koordinatlarındaki gerilme - şekil değiştirme bağıntıları denklem [3.7]'de verilmiştir. Denklem [3.11]'de ise keyfi koordinatlarda gerilme-şekil değiştirme bağıntıları verilmiştir. Hem Denklem [3.7] hem de Denklem [3.11], çok katmanlı bir tabakalı kompozitin k. tabakası için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı olarak düşünülebilir. Böylece Denklem [3.11] şu şekilde yazılabilir (Jones, 1998).

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \{\varepsilon\}_k \quad [3.13]$$



Şekil 3.7 Deforme olmamış ve deforme olmuş tabaka kenar elemanı (Jones, 1998)

Bir tabakanın yer değiştirmeleri Kirchoff - Love hipotezi ile bulunur. Tabakanın x, y, z yönlerindeki yer değiştirmeleri sırasıyla u, v, w olsun. Şekil 3.7'de tabakalı kompozit plakanın ABCD kenarı incelenmektedir. Tabaka deformasyona uğramadan önce ABCD düz bir çizgi halindedir. x ekseninden z kadar mesafede olan C noktası için;

$$u = u_0 - z_c \beta \quad [3.14]$$

Kalınlık boyunca herhangi bir nokta için u, v yer değiştirmesi,

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad [3.15]$$

Birim şekil değiştirme-yer değiştirme bağıntıları şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad [3.16]$$

Böylece, Denklem [3.15]'te ki u ve v yer değiştirmelerini elde etmek için, şekil değiştirmeler,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}$$

veya

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad [3.17]$$

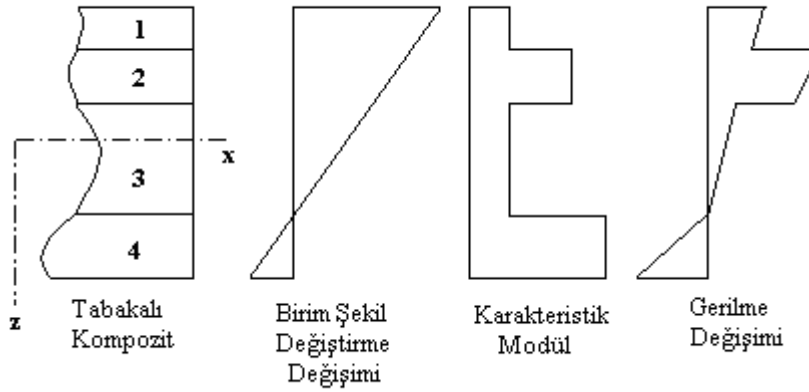
Burada, orta yüzeydeki şekil değiştirmeler ve orta yüzey eğriliği sırasıyla şu şekildedir:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \frac{2\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad [3.18]$$

Tabakalı bir kompozitin k. tabakasındaki gerilme hali aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \right\} \quad [3.19]$$

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi  $\bar{Q}_{ij}$  tabakalı kompozitin her bir tabakası için farklı olabilir. Bu nedenle tabaka kalınlığı doğrultusunda birim şekil değiştirme değişimi lineer olmasına rağmen, gerilme değişimi lineer değildir.



Şekil 3.8 Tabaka kalınlığı boyunca birim şekil değiştirme ve gerilme değişimi (Jones, 1998)

### 3.3. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Delaminasyon Hasarı

Kompozit malzemelerde birçok değişik hasar tipiyle karşılaşılmasına karşın, tabakalı kompozit malzemelerde en önemli hasar tipi delaminasyon hasarıdır. Bu hasar tipi tabakaların ara yüzeylerinin birbirinden ayrılmasıyla meydana gelir ve genellikle düşük hızlı darbe etkisiyle oluşur.

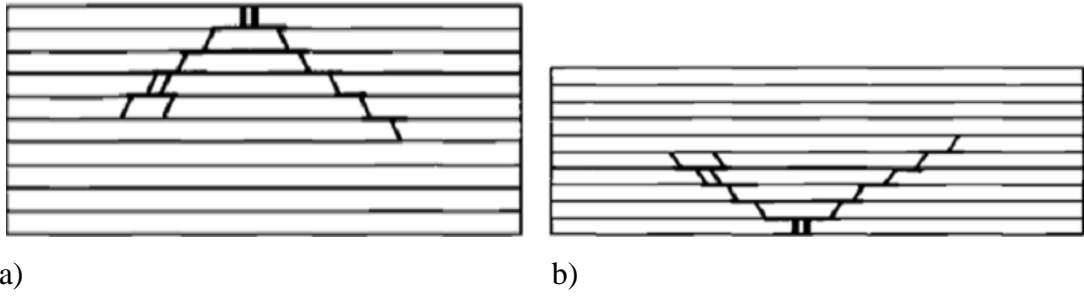
Fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri fiber yönünde oldukça yüksek olsa da, fiberlere dik yönde çok daha düşüktür. Transverse yönde (fiberlere dik yönde) gelen düşük şiddetli kuvvetler bile malzemenin hasar görmesine neden olur.

Polimer matriksli kompozit malzemeler düşük hızlı darbe sonucu meydana gelen iç hasara karşı oldukça hassastır. Birçok durumda bu hasar yüzeyde görünür değildir, ancak iç hasar malzemenin mukavemetini düşürdüğü ve servis ömrünü kısalttığı için oldukça önemlidir (Vaidya, 2011).

Yapılan çalışmalar ince ve kalın tabakalı kompozit malzemelerde delaminasyon hasarının oluşumunun farklı olduğunu göstermiştir. Kalın malzemelerde bu hasar, malzeme fazla esnek olmadığı için etkiyen nesne tarafındaki dış yüzey tabakalarında meydana gelmektedir (Şekil 3.9). Bu tabakalardaki hasar yüksek kontak gerilmesi

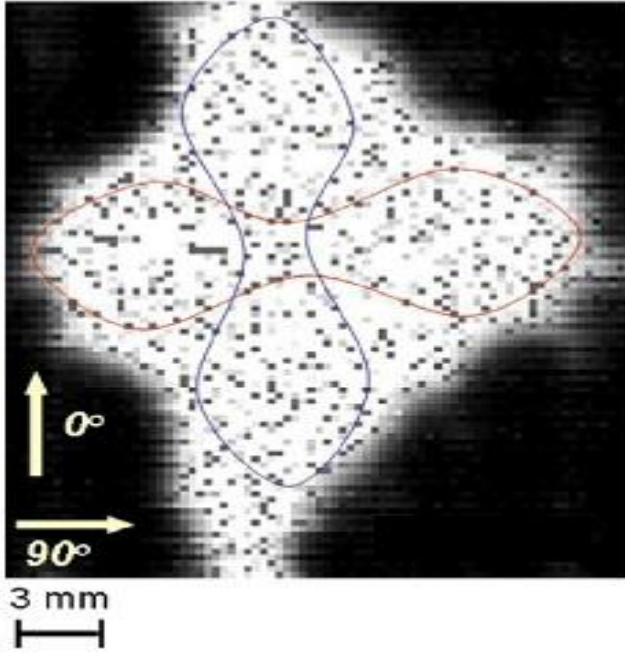
nedeniyle meydana gelir ve iç tabakalara doğru artarak devam eder. Delaminasyon oluştuğunda malzeme daha esnek bir karakter kazanır ve bu oluşum daha fazla hasar oluşturacak enerji kalmayana kadar devam eder. Kalın parçalardaki bu hasar tipi “Pine tree (çam ağacı)” olarak nitelendirilmiştir (Abrate, 1998). Bu ifade bu tezde “kalınlık doğrultusunda üçgen görünümlü delaminasyon” olarak tanımlanmıştır.

İnce malzemelerde ise bu hasar etkiyen nesne tarafının ters yönündeki dış tabakalarda meydana gelir çünkü malzeme daha esnektir ve bu hasarın nedeni yüksek eğilme gerilmesidir (Şekil 3.9). Delaminasyon oluştuğunda malzeme daha esnek bir karakter kazanır ve bu oluşum daha fazla hasar oluşturacak enerji kalmayana kadar devam eder. İnce parçalardaki bu hasar tipi ise “Reverse pine tree (ters çam ağacı)” olarak tanımlanmıştır (Abrate, 1998). Bu ifade ise bu tezde “kalınlık doğrultusunda ters üçgen görünümlü delaminasyon” olarak tanımlanmıştır.

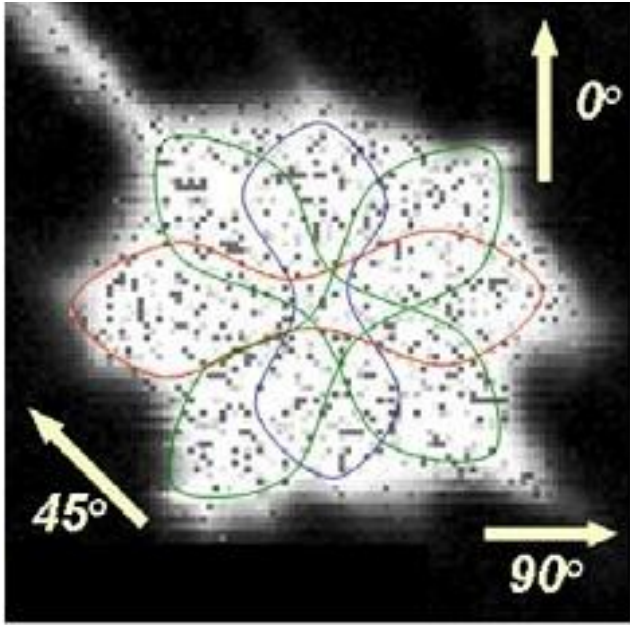


Şekil 3.9 a) Kalın ve b) ince malzemelerde delaminasyon hasarının oluşumu (Vaidya, 2011)

Bunun yanı sıra hasarlı tabakalar üzerinde “Ultrasonic C-Scan” tekniği ile yapılan incelemelerde, delaminasyonun fıstık şeklinde olduğu ve hangi tabakada oluştuysa o tabakanın fiber yönü doğrultusunda olduğu gözlemlenmiştir. Bu uygulamaya ait görüntüler Şekil 3.10-11’de görülmektedir. Şekil 3.10’da  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$  fiber oryantasyonuna sahip tabakalı kompozitte meydana gelen hasar görülürken, Şekil 3.11’de ise  $[+45^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}]_s$  fiber oryantasyonuna sahip tabakalı kompozitte ki delaminasyon hasarı görülmektedir. Fıstık şekillerinin, buldukları tabakalardaki fiberlerin yönleri doğrultusunda olduklarına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.10  $[0^\circ/90^\circ]_s$  fiber oryantasyonuna sahip kompozit malzemede delaminasyon hasarının görünümü (Tita, 2008)



Şekil 3.11  $[+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$  fiber oryantasyonuna sahip tabakalı kompozit malzemelerde delaminasyon hasarı görüntüsü (Tita, 2008)

## 4. MATERYAL VE METOD

### 4.1. Tabakalı Kompozit Malzeme ve Özellikleri

Nümerik çalışmada tabakalı E-cam lifi/epoksi kompozit malzeme kullanılmıştır. Mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için daha önce IZOREEL-İzmir firmasında üretimi yapılan kompozit plaklar ile ASTM standartlarına uygun olarak mekanik deneyler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir (Şahin, 2008). Tek yönlü fiber takviyeli katmanlardan oluşan kompozitin hacimsel fiber oranı %65’tir. Matriks malzeme olarak epoksi CY225 ve hızlandırıcı HY225, 100:80 kütle oranında karıştırılmış, 120 °C ve 0,2 MPa basınç altında 4 saat süre ile cure işlemine tabi tutulmuştur. Postcure işlemi aynı basınçta ve 100 °C de 2 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Ardından aynı basınçta oda sıcaklığına soğutulmuştur.

Tablo 4.1 E-cam lifi/epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri (Şahin, 2008)

Sembol	Değer	Özelliği
$V_f$	%65	Fiber hacimsel yüzdesi
$\rho$	1,27 gr/cm <sup>3</sup>	Yoğunluk
$E_1$	41250 MPa	1 yönünde elastisite modülü
$E_2$	9240 MPa	2 yönünde elastisite modülü
$G_{12}$	3380 MPa	Kayma modülü
$V_{12}$	0,26	Poisson oranı

Çapraz katlı, 16 tabakalı  $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$  fiber oryantasyonuna sahip malzeme ile titreşim analizleri yapılmıştır. Tabaka dizilimi Şekil 4.1’de görülmektedir. Tüm hasarlı ve hasarsız kompozit plakların boyutları ise Şekil 4.2’de verilmiştir. Dikdörtgen plakların kalınlıkları 3,6 mm’dir.

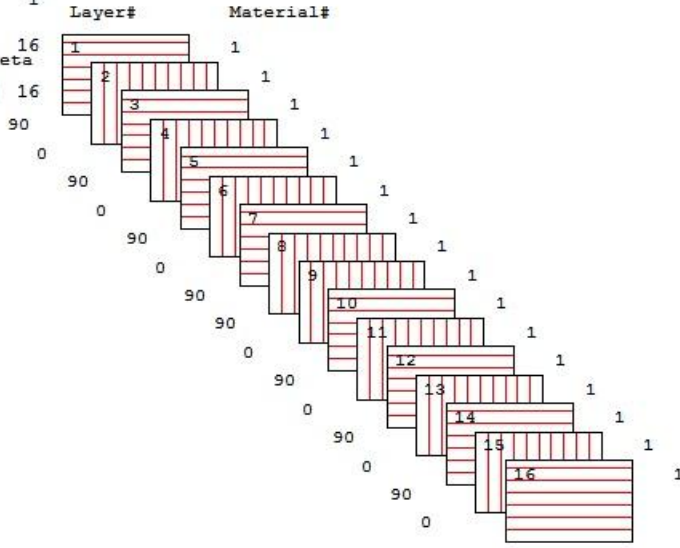
1

LAYER STACKING

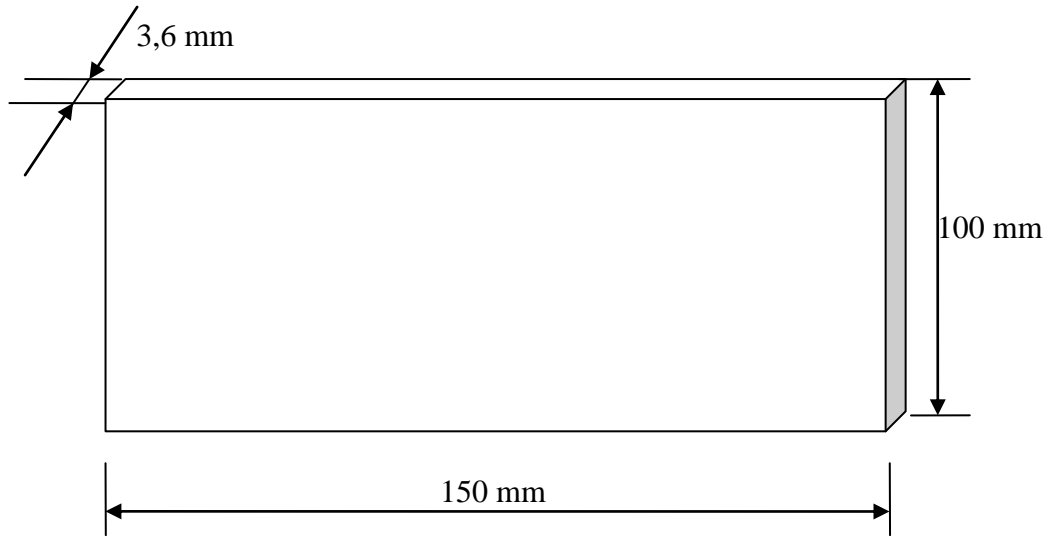
ELEM = 1  
TYPE = 1  
REAL = 1  
LAYERS :  
TOTAL = 16  
SHOWN : Theta  
FROM 1 TO 16

ANSYS

JAN 17 2012  
12:43:15



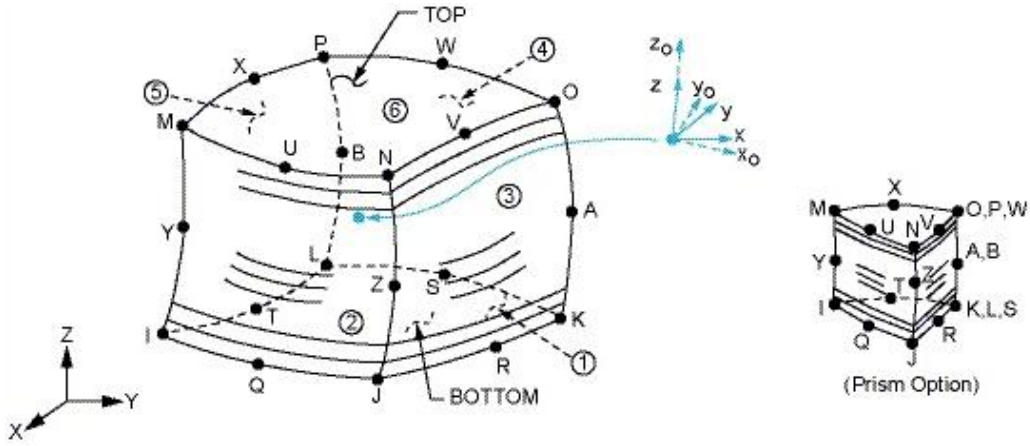
Şekil 4.1 Tabakaların dizilimi



Şekil 4.2 Kompozit plaka boyutları

#### 4.2. Nümerik Metod

Nümerik analiz için ANSYS 13.0 Academic Research Mechanical ticari amaçlı sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Üç boyutlu sonlu eleman analizinde 20 düğümlü tabakalı SOLID186 elemanı seçilmiştir (Şekil 4.3)

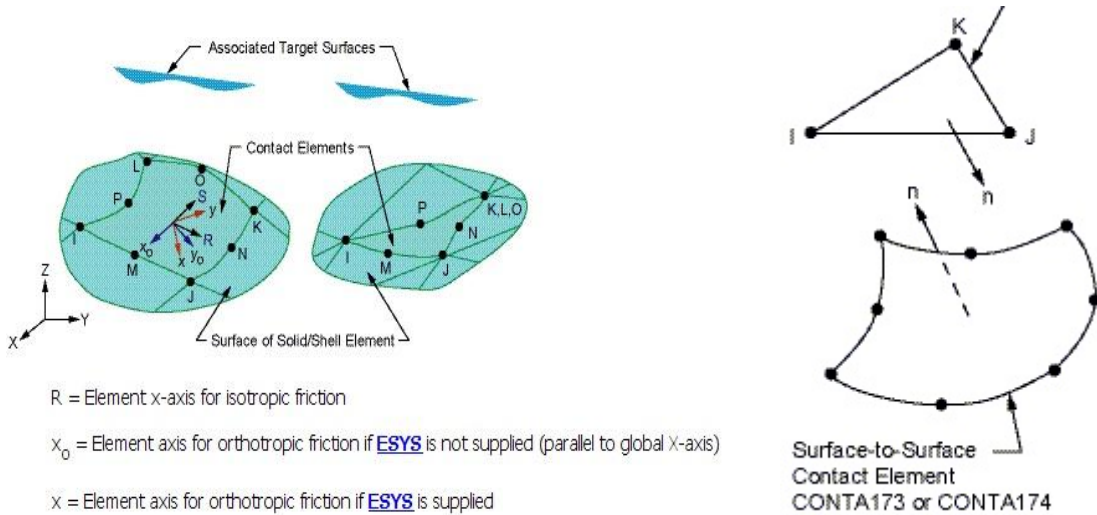


$x_0$  = Element x-axis if ESYS is not supplied.

$x$  = Element x-axis if ESYS is supplied.

Şekil 4.3 Tabakalı SOLID186 elemanı (ANSYS 13.0 Help, 2012)

Delaminasyon hasarlı kompozit malzemeyi ANSYS’de modellemek için her bir katman ayrı ayrı çizilmiş ve yapıştırılmıştır. Sadece delaminasyon hasarı olan bölümler yapıştırılmamıştır ve kontak elemanları kullanılarak hasar simule edilmiştir. Hasarlı bölgede yüzeyden yüzeye kontak yapılırken CONTA174 ve TARGET 170 elemanları kullanılmıştır (Şekil 4.4). Brick elemanlarla oluşturulan sonlu elemanlar modeli ise Şekil 4.5’de görülmektedir.

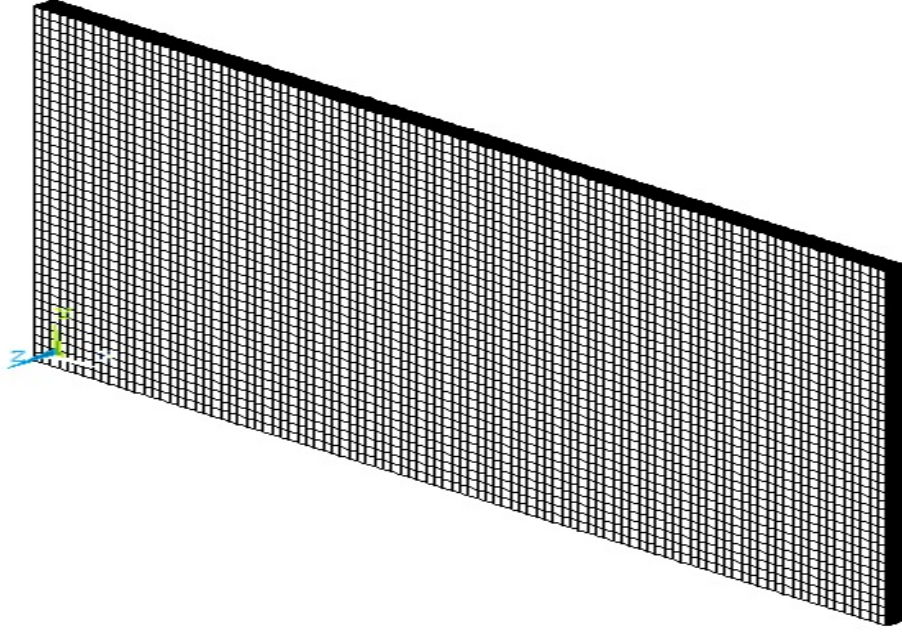


$R$  = Element x-axis for isotropic friction

$x_0$  = Element axis for orthotropic friction if **ESYS** is not supplied (parallel to global X-axis)

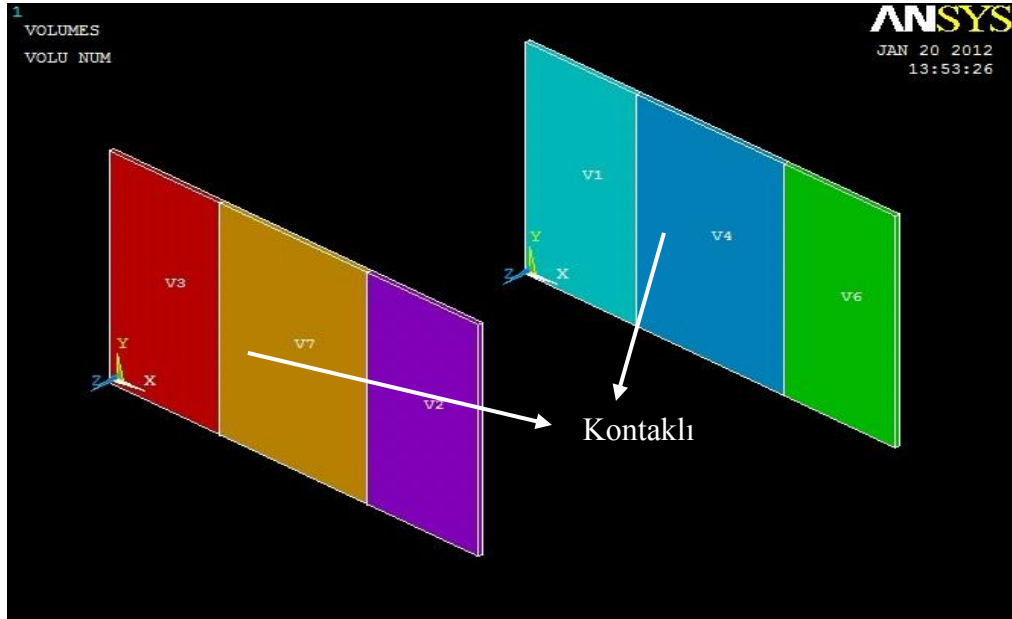
$x$  = Element axis for orthotropic friction if **ESYS** is supplied

Şekil 4.4 CONTA174 ve TARGE170 elemanları ( ANSYS 13.0 Help, 2012)



Şekil 4.5 Sonlu elemanlar modeli

İki tabakacık arasındaki yapışmayan yüzey, yani delaminasyon, Şekil 4.6'da olduğu gibi modellenmiştir. Her bir katman üç hacme ayrılmış ve genişlik boyunca devam eden şerit hasarı modellemek için 1 ve 3 nolu hacimler ile 2 ve 6 nolu hacimler yüz yüze yapıştırılırken, 4 ve 7 nolu hacimler yapıştırılmamıştır. Ardından 4 nolu hacmin ön yüzü ile 7 nolu hacmin arka yüzeyi arasında yüzeyden yüzeye kontak oluşturulmuştur.



Şekil 4.6 Delaminasyon hasarının modellenmesi

Delaminasyon hasarı modellenirken kontaklı ve kontaklız modeller oluşturulmuş ve birinci moddaki doğal frekans sonuçları literatürdeki analitik çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Örneğin tek delaminasyon hasarı için elde edilen kontaklız model sonucu ile analitik sonuç arasındaki fark % 8, kontaklı model sonucu ile analitik sonuç arasındaki fark % 1'dir. Dört adet delaminasyonu olan kompozit plâğın deneysel sonucu ile kontaklız model sonucu arasındaki fark %33, kontaklı model sonucu ile arasındaki fark ise %19,68'dir. Bu nedenle bu tezde yapılan tüm çalışmalarda delaminasyon hasarı modellenirken kontak eleman kullanılmıştır.

ANSYS'de titreşim analizi yapılırken Block Lanczos Mode Extraction metodu seçilmiştir. Tüm kompozit plakların ilk beş moddaki doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Bu tezde toplam 80 adet delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit plaka modeli oluşturulmuştur.

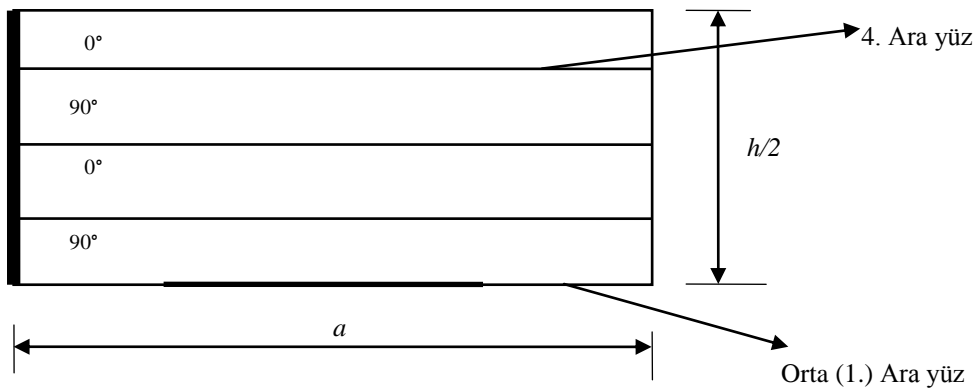
## 5. SONUÇLAR

### 5.1. ANSYS'in Doğrulaması

#### 5.1.1. ANSYS'in Literatürdeki Analitik Çalışmalarla Karşılaştırılması

Bu tezde, ANSYS paket programının doğruluğunu göstermek amacıyla, literatürdeki benzer çalışmalar araştırılmış, bu çalışmalardaki modeller ANSYS ile yeniden oluşturulup doğal frekans değerleri elde edilmiş ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda G. S. Ramtekkar (2009)'ın çalışması ANSYS'de modellenmiştir. Tek taraftan ankastre olarak mesnetlenmiş, tek delaminasyon hasarına sahip, fiber oryantasyonu  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{2s}$  olan 8 tabakalı kompozit malzemenin doğal frekansı, kalınlık boyunca farklı delaminasyon konumları için elde edilmiştir. Ramtekkar'ın çalışmasında kullandığı model Şekil 5.1'de görülmektedir.

Modelin geometrik değerleri, uzunluğu  $a=127$  mm, genişliği  $b=12.7$  mm ve yüksekliği  $h=1.016$  mm olup, yapılan karşılaştırma için kullanılacak delaminasyon boyu 50.8 mm olarak seçilmiştir. Karşılaştırma yapılacak doğal frekans değerleri, delaminasyonun sırası ile 1. , 2. ve 3. ara yüzde olduğu durumlar için elde edilmiştir. Karşılaştırma dahilinde yazarın da referans aldığı çalışma tabloda belirtilmiştir. Elde edilen ANSYS sonuçları Tablo 5.1 – 5.3'de görülmektedir.



Şekil 5.1 G.S. Ramtekkar'ın delaminasyonlu tabakalı kompozit modeli (Ramtekkar, 2009)

Tablo 5.1 ANSYS ile elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması - 1. Ara yüz (Shen ve Grady, 1992), (Ramtekkar, 2009)

Mode No	Shen ve Grady (Deneysel)			Shen ve Grady (Analitik)		Ramtekkar		ANSYS	
	Deney 1 (Hz)	Deney 2 (Hz)	Deney 3 (Hz)	Kontaklı (Hz)	Kontaksız (Hz)	Kontaklı (Hz)	Kontaksız (Hz)	Kontaklı (Hz)	Kontaksız (Hz)
1	74,395	75,000	76,751	75,285	56,479	76,601	76,601	75,816	70,209
2	-	-	-	-	-	492,376	492,376	447,27	382,500

Tablo 5.2 ANSYS ile elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması - 2. Ara yüz (Shen ve Grady, 1992), (Ramtekkar, 2009)

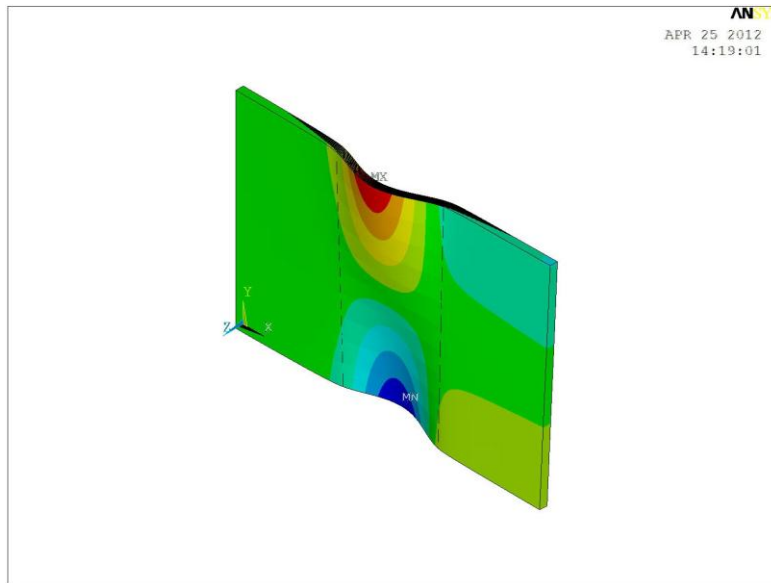
Mode No	Shen ve Grady (Deneysel)			Shen ve Grady (Analitik)		Ramtekkar		ANSYS	
	Deney 1 (Hz)	Deney 2 (Hz)	Deney 3 (Hz)	Kontaklı (Hz)	Kontaksız (Hz)	Kontaklı (Hz)	Kontaksız (Hz)	Kontaklı (Hz)	Kontaksız (Hz)
1	75,126	75,250	75,001	78,103	59,438	76,980	76,980	76,271	63,240
2	-	-	-	-	-	494,048	494,048	466,45	392,800

Tablo 5.3 ANSYS ile elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması - 3. Ara yüz (Shen ve Grady, 1992), (Ramtekkar, 2009)

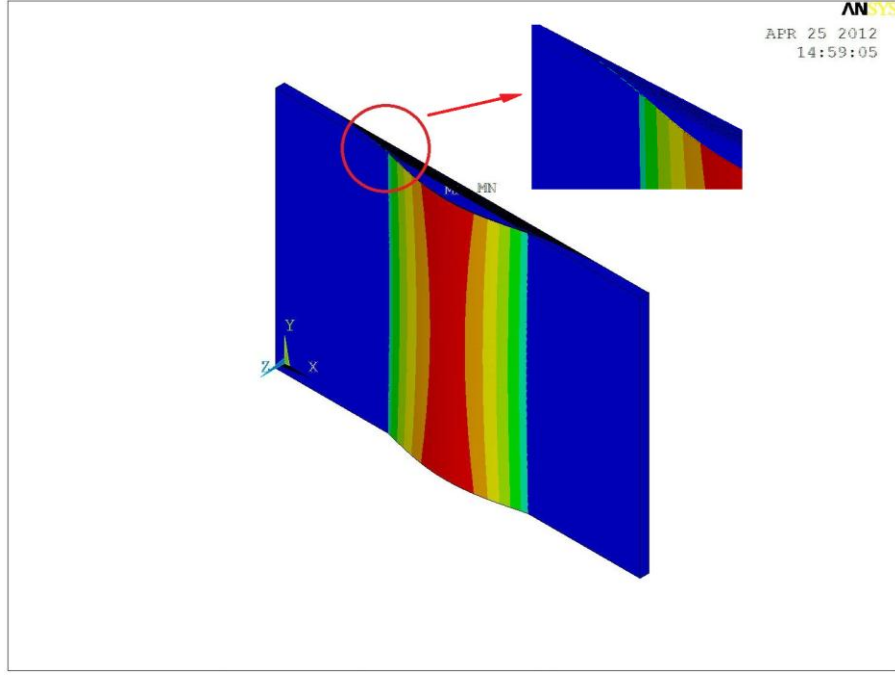
Mode No	Shen ve Grady (Deneysel)			Shen ve Grady (Analitik)		Ramtekkar		ANSYS	
	Deney 1 (Hz)	Deney 2 (Hz)	Deney 3 (Hz)	Kontaklı (Hz)	Kontaksız (Hz)	Kontaklı (Hz)	Kontaksız (Hz)	Kontaklı (Hz)	Kontaksız (Hz)
1	79,500	81,875	77,875	79,932	70,416	80,508	80,508	77,578	69,095
2	-	-	-	-	-	440,304	508,608	493,94	301,910

Tablodaki değerler ışığında, ANSYS paket programının verdiği doğal frekans değerlerinin, Ramtekkar ve referansının (Shen ve Grady) değerleri ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. Analitik değerler bazında 1. ara yüzde delaminasyon bulunan kontaklı numuneler için Shen ve Grady ile Ramtekkar'ın bulduğu değerler arasında 1,316 Hz'lik bir fark varken, bu çalışmada ANSYS programı ile aynı parametreler için elde edilen doğal frekans değeri ile Ramtekkar'ın değeri arasında 0,785 Hz'lik bir fark bulunmaktadır. Aynı Şekilde 2. ve 3. ara yüzlerdeki doğal frekans değerleri de oldukça yakın bulunmuştur. Bu değerler ANSYS paket programının güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

ANSYS ile yapılan çalışmalarda kontaklı değerlerin kontaklı değerlerden farklı çıkmasının nedeni ise Őöyle açıklanabilir, kontak eleman kullanılmadığı zaman delaminasyon hasarı ile birbirlerinden ayrılan tabakacıklar, sonlu eleman modelinde serbestçe hareket ederek birbirlerinin yerini işgal etmekte, birbirlerinin içerisinden geçmektedir. Bu nedenle kontak elemansız modele ait sonuçlar deneysel ve analitik sonuçlardan farklı çıkmaktadır. Bu yüzden tezin ileriki kısımlarında kontaklı modellere ait değerler ilk çalışmada fikir vermek açısından karşılaştırma olarak kullanılmış, diğer kısımlarda söz konusu edilmemiştir. Tabakaların birbiri içine geçmesi ile ilgili bir rnek Şekil 5.2'de görülmektedir. Şekilde delaminasyon hasarlı bir kompozit plaka için hem kontaklı hem de kontaklı mod Şekilleri görülmektedir.



a)



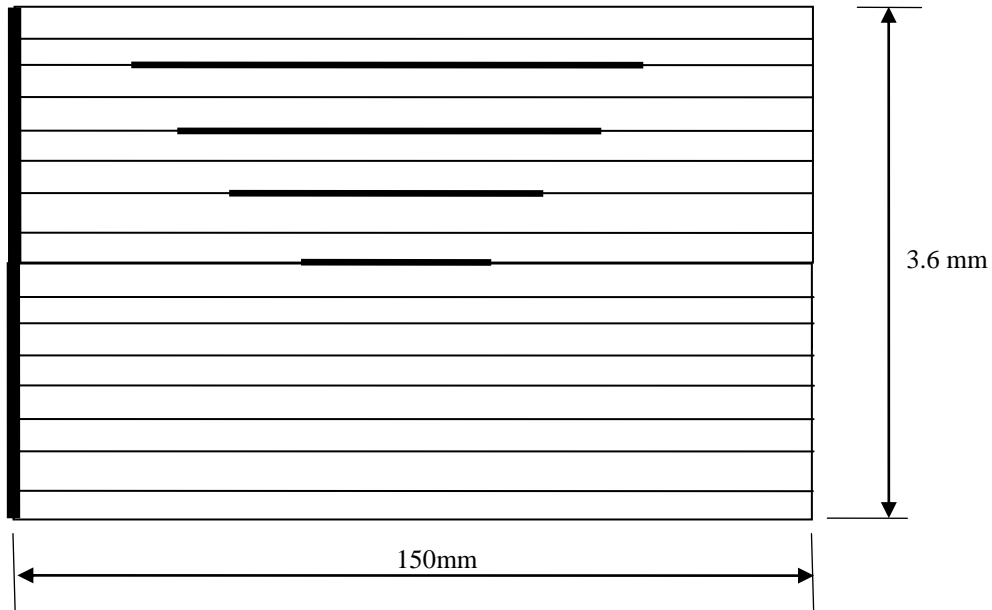
b)

Şekil 5.2 Kontaklı ve kontaksız modellerin karşılaştırılması. a) kontaklı model, b) kontaksız model

Şekil 5.2.a'da numunenin kontak elemanlı olmasından dolayı tabakalar arası bir yer değiştirme söz konusu değildir. Ancak Şekil 5.2.b'de en dıştaki tabakanın titreşim dolayısıyla diğer yüzeye geçtiği görülmektedir (overlap olayı).

### 5.1.2. ANSYS'in Deneysel Sonuçla Karşılaştırılması

Delaminasyon hasarlı kompozitlerin titreşim analizinde ANSYS'in doğruluğunu göstermek için deneysel çalışma ile de kıyaslama yapılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapmak için 4 adet delaminasyon hasarı olan, 16 tabakalı, fiber oryantasyonu  $[+45^{\circ}/+45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}]_s$  olan ve Tablo 4.1 de verilen malzeme özelliklerine sahip yapay delaminasyon hasarlı bir tabakalı kompozit model oluşturulmuştur. Fiber oryantasyonundaki “/” işareti delaminasyonların olduğu ara yüzleri göstermektedir. Kompozit plaka boyutları 150x100 mm'dir. En büyük delaminasyon uzunluğu 60 mm olup en dış ara yüzde bulunmaktadır. Diğer delaminasyonların boyları ise  $b=6$  mm kısılma ölçüsü olmak üzere  $2b$  kadar kısalarak devam etmektedir. Böylece delaminasyon uzunlukları 60 mm, 48 mm, 36 mm ve 24 mm olarak meydana getirilmiştir. İmalat esnasında katmanlar arasına teflon filmler yerleştirilerek yapay delaminasyon hasarı oluşturulmuştur. Şekil 5.3'de bu çalışma için oluşturulan model görülmektedir.

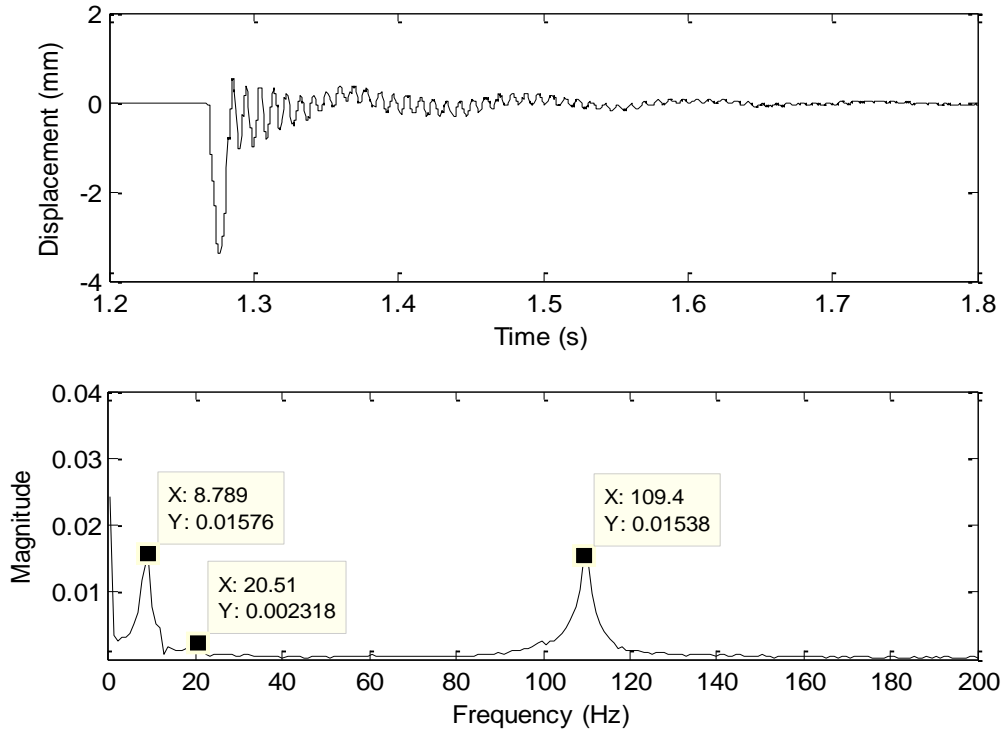


Şekil 5.3 ANSYS in deneysel karşılaştırılması için kullanılan 4 adet şerit delaminasyon hasarı olan kompozit plaka

Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Titreşim Laboratuvarı'nda "lazer tekniği ile doğal titreşim ölçümü" sonucunda elde edilen doğal frekans değeri Şekil 5.4 de görülmektedir. Aynı model için ANSYS'de elde edilen doğal frekans değeri ise Tablo 5.4 de verilmiştir.

Tablo 5.4 ANSYS ile deneysel sonucun karşılaştırılması

ANSYS Mod 1-Frekans (Hz)	Deneysel Sonuç Mod 1-Frekans (Hz)
136,22	109,4



Şekil 5.4 Deneysel doğal frekans ölçüm sonuçları

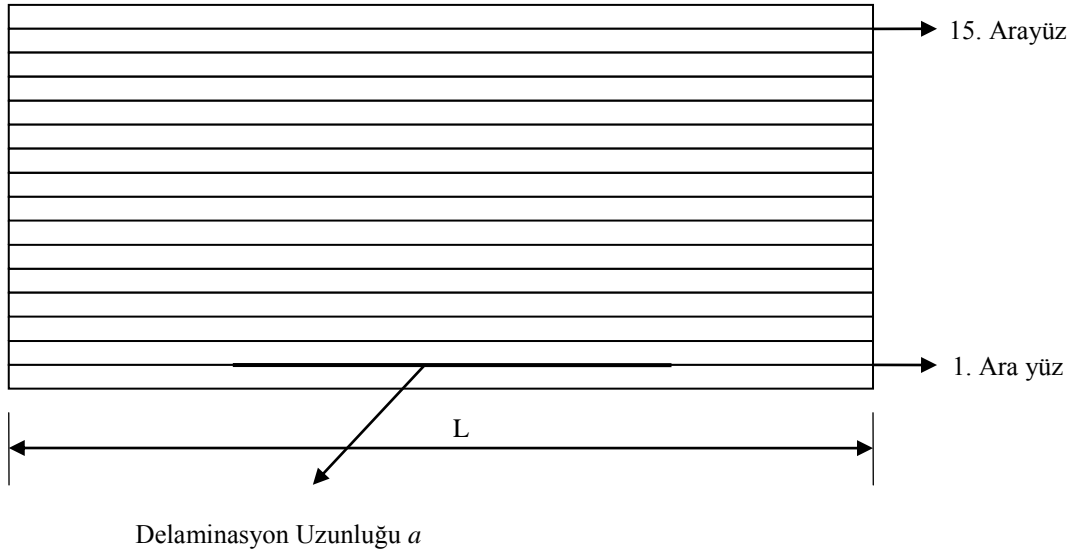
Birinci mod doğal frekans için elde edilen ANSYS sonucu ve deneysel sonuç arasındaki fark 26.82 Hz dir. Bu da iki yöntem arasında %19.68'lik bir hata oluşturmaktadır. Yapılan deneysel hatalardan dolayı farkın bu kadar büyük çıktığı düşünülmektedir. Kompozit numune el yatırma metodu ile imal edilirken yapay delaminasyon hasarını oluşturmak için katmanlar arasına teflon film yerleştirilmiştir. Lifler üzerine merdane ile epoksi sürülürken teflon filmler bir miktar sağa sola doğru kaymıştır. Ayrıca ankastre sınır şartı teorideki gibi uygulanmamış olabilir. Bu nedenle

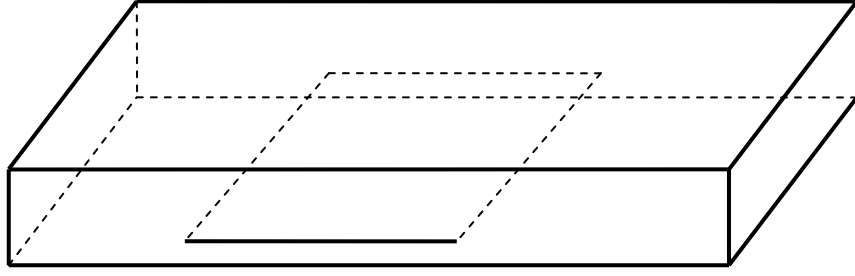
farkın ideal deney şartlarında çok daha az olacağı düşünülmektedir ve ANSYS paket programı doğal frekans hesaplamalarında delaminasyon hasarını simüle etmek için kullanılabilir.

## 5.2. Parametreler

### 5.2.1. Delaminasyon Uzunluğunun Doğal Frekansa Etkisi

Tek yönlü lif takviyeli çapraz katlı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemede tek delaminasyon uzunluğunun doğal frekansa etkisini incelemek için delaminasyon uzunluğu  $a$  değiştirilmiştir. Çizgisel düşük hızlı darbe ile oluşan tek delaminasyonun plağın eğilmesi sonucunda en alt katmanda oluştuğu göz önüne alınmıştır. Çapraz katlı, 16 tabakalı  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{4s}$  fiber oryantasyonuna sahip malzeme ile titreşim analizleri yapılmıştır. Tek delaminasyon, 16 katlı ve 15 ara yüze sahip 150x100 mm boyutlarındaki plağın 1. ara yüzüne yerleştirilmiştir (Şekil 5.5). 150 mm'lik uzunluğun tam ortasına yerleştirilen şerit delaminasyon uzunluğu  $a$ 'nın plak boyu  $L$ 'ye oranı Tablo 5.5'deki gibi seçilmiştir. Bu çalışma için 9 model oluşturulmuştur.





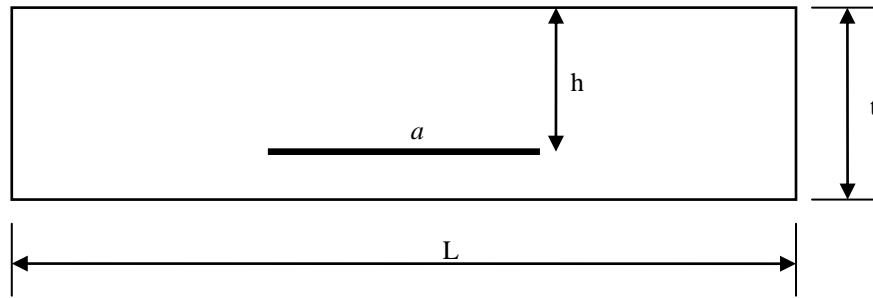
Şekil 5.5 Tek şerit delaminasyon hasarının kompozit plaktaki konumu

Tablo 5.5 Tek delaminasyon uzunluğu  $a$ 'nın plak boyu  $L$ 'ye oranı

$a$ (mm)	15	30	45	60	75	90	105	120	135
$a/L$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

### 5.2.2. Tek Delaminasyon Konumunun Doğal Frekansa Etkisi

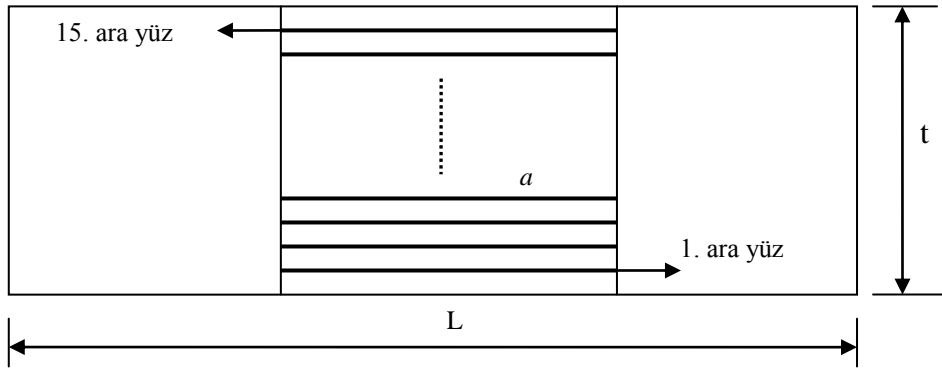
Tek şerit delaminasyon konumunun kalınlık doğrultusundaki yerinin doğal frekansa etkisini incelemek için, delaminasyon uzunluğu  $a$  60 mm olarak sabit alınmıştır. Bu seçim,  $a$  uzunluğunun ne çok büyük ne de çok küçük olmaması için ortalarda olan bir değer seçilerek tamamen keyfi olarak yapılmıştır. Birinci ara yüzden 15. ara yüze kadar tek delaminasyonun yeri değiştirilmiş ve simetriden dolayı 8 model oluşturulmuştur. Çapraz katlı, 16 tabakalı  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{4s}$  fiber oryantasyonuna sahip malzeme kullanılmıştır.



Şekil 5.6 Tek delaminasyonun kalınlık doğrultusundaki yeri

### 5.2.3. Eşit Boydaki Delaminasyon Sayısının Doğal Frekansa Etkisi

Bu çalışmada eşit uzunluğa sahip delaminasyon sayısı en alt ara yüzden başlayarak artırılmış ve kompozit plakanın tüm ara yüzlerinde delaminasyon hasarı olana kadar devam edilmiştir. Delaminasyon uzunluğu  $a$  60 mm olarak sabit alınmıştır. Tabakalar arasında oluşan delaminasyon sayısının doğal frekansa etkisini incelemek için 15 model oluşturulmuştur. Çapraz katlı, 16 tabakalı  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{4s}$  fiber oryantasyonuna sahip malzeme kullanılmıştır.

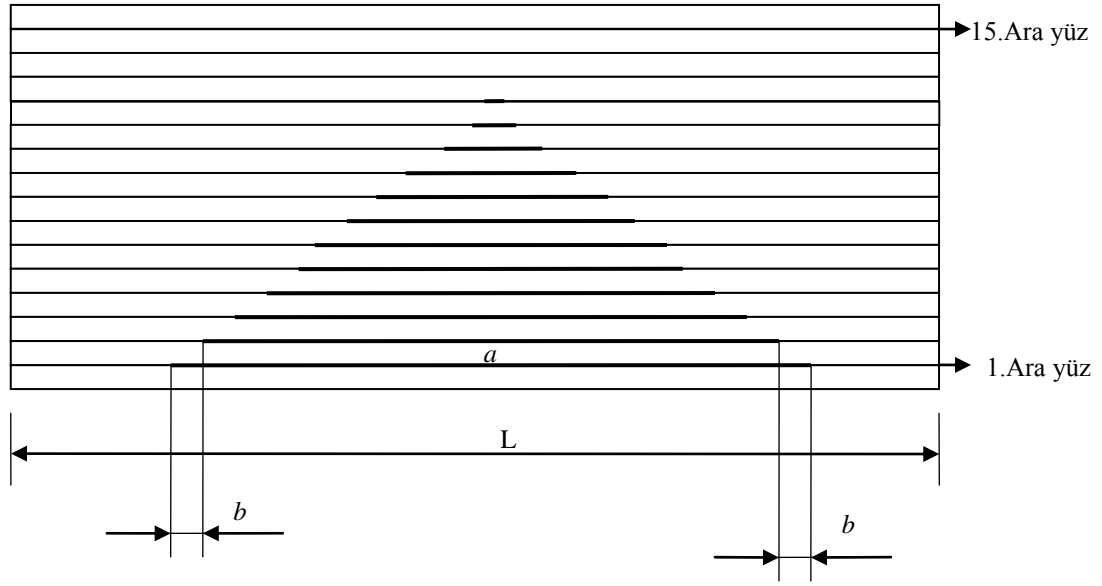


Şekil 5.7 Çok sayıda eşit boyda şerit delaminasyon

### 5.2.4. Kalınlık Doğrultusunda Üçgen Görünümlü Delaminasyon - En Büyük Delaminasyon Uzunluğunun Doğal Frekansa Etkisi

Düşük hızlı darbe yükü ile tabakalı kompozit malzemede kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarının büyüklüğünü ve şeklini, kalınlık doğrultusundaki görünümünü çarpan cismin şekli, rijitliği, darbe enerjisi, darbe hızı, darbe kütlesi, kompozit plakanın sınır şartları, kalınlığı ve fiber takviye açıları belirlemektedir. Bu çalışmada düşük hızlı ve çizgisel darbe yükü nedeni oluşan genişlik boyunca devam eden şerit şeklinde ve kalınlık doğrultusunda bakıldığında üçgen görünümlü delaminasyonun titreşim analizi yapılmıştır. En büyük delaminasyon uzunluğu  $a$ 'dır ve en büyük delaminasyon en alttaki ara yüze yerleştirilmiştir. Delaminasyon hasarı üst yüzeye doğru gittikçe azalmaktadır ve azalma miktarı  $2b$

kadardır (Şekil 5.8). Bu çalışmada çok sayıda delaminasyona sahip tabakalı kompozitde en büyük delaminasyon uzunluğu  $a$ 'nın doğal frekansa etkisi incelenmiştir. Küçük delaminasyonların uzunluğunu belirleyen  $b$  boyutu sabit ve 2 mm olarak seçilmiştir.  $a/L$  oranı 0,1'den 0,9'a kadar değiştirilerek 9 ayrı model oluşturulmuştur. Her bir modelde 15 ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları Tablo 5.6'da verilmiştir. Çapraz katlı, 16 tabakalı  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{4s}$  fiber oryantasyonuna sahip malzeme kullanılmıştır.



Şekil 5.8 Kalınlık doğrultusunda üçgen delaminasyon hasarı

Tablo 5.6 Kalınlık doğrultusunda üçgen delaminasyon hasarı için her bir ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları

$a/L$	$a$	$b$	Delaminasyon Uzunlukları (mm)																
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
0,1	15	2	15	11	7	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,2	30	2	30	26	22	18	14	10	6	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3	45	2	45	41	37	33	29	25	21	17	13	9	5	1	-	-	-	-	-
0,4	60	2	60	56	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	4	4
0,5	75	2	75	71	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19	19	19
0,6	90	2	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34	34	34
0,7	105	2	105	101	97	93	89	85	81	77	73	69	65	61	57	53	49	49	49
0,8	120	2	120	116	112	108	104	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	64	64
0,9	135	2	135	131	127	123	119	115	111	107	103	99	95	91	87	83	79	79	79

### **5.2.5. Kalınlık Doğrultusunda Üçgen Görünümlü Delaminasyon - Küçük Delaminasyonların Uzunluğunu Belirleyen $b$ Boyutunun Doğal Frekansa Etkisi**

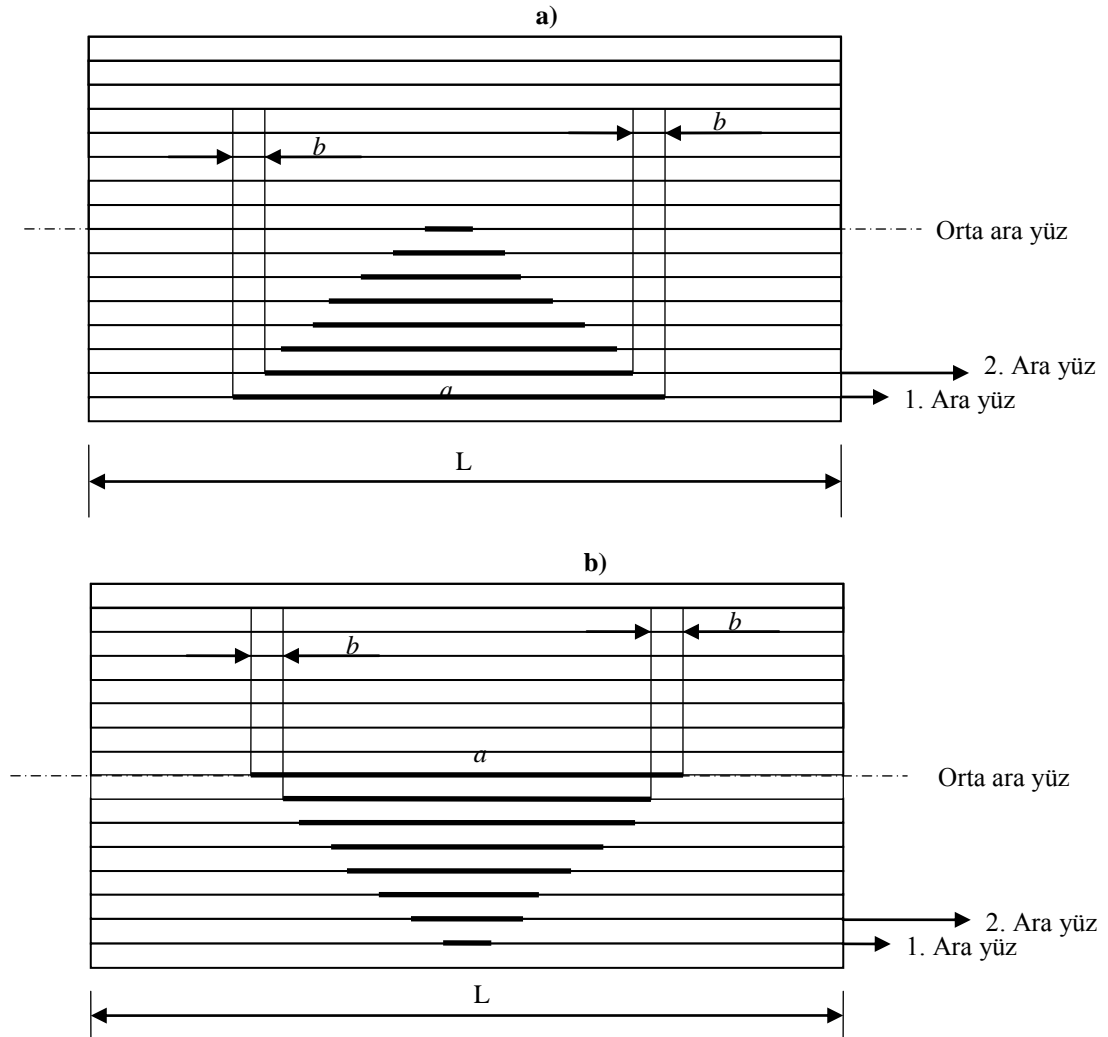
Düşük hızlı darbe yükü nedeniyle oluşan kalınlık doğrultusunda üçgen görünümlü delaminasyonda küçük delaminasyonların uzunluğu  $b$  parametresi ile belirlenmektedir. Üçgen formu oluşturulurken her bir delaminasyon bir önceki delaminasyondan  $2b$  kadar kısa alınmıştır. En büyük delaminasyon uzunluğu  $a$  90 mm olarak sabit tutulmuştur.  $b$  değeri 1 mm'den 10 mm'ye kadar değiştirilerek toplam 10 model oluşturulmuştur. Seçilen her bir  $b$  değerine karşılık 15 ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları Tablo 5.7'de görülmektedir. Çapraz katlı, 16 tabakalı  $[0^0/90^0]_{4s}$  fiber oryantasyonuna sahip malzeme kullanılmıştır.

Tablo 5.7 Delaminasyon uzunluklarını belirleyen  $b$  ' nin değişimine bağlı olarak her ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları  
( $\alpha=90$  mm)

$b$	Delaminasyon Uzunlukları (mm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Ara yüz numarası														
1	90	88	86	84	82	80	78	76	74	72	70	68	66	64	62
2	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54	50	46	42	38	34
3	90	84	78	72	66	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6
4	90	82	74	66	58	50	42	34	26	18	10	2	0	0	0
5	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	0	0	0	0	0
6	90	78	66	54	42	30	18	6	0	0	0	0	0	0	0
7	90	76	62	48	34	20	6	0	0	0	0	0	0	0	0
8	90	74	58	42	26	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	90	72	54	36	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	90	70	50	30	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 5.2.6. Orta Ara Yüze Kadar, Kalınlık Doğrultusunda Üçgen ve Ters Üçgen Görünümlü Delaminasyonların Doğal Frekansa Etkisinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada ise düşük hızlı darbe yükü ile oluşan iki farklı delaminasyon hasarı üzerine analiz yapılmıştır. Orta ara yüze kadar devam eden ve kalınlık doğrultusundan bakıldığında üçgen ve ters üçgen görünümlü olan delaminasyonlar karşılaştırılmıştır (Şekil 5.9). Küçük delaminasyon uzunluklarını belirleyen  $b$  2 mm olarak sabit tutulmuştur ve her iki tip delaminasyon için de en büyük delaminasyon uzunluğu  $a$  değiştirilmiştir. Üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonlar için her bir ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları Tablo 5.8 ve Tablo 5.9’da görülmektedir. Toplam 18 model oluşturulmuştur. Çapraz katlı, 16 tabakalı  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{4s}$  fiber oryantasyonuna sahip malzeme kullanılmıştır.



Şekil 5.9 a) Kalınlık doğrultusunda üçgen görünümlü delaminasyon, b) Kalınlık doğrultusunda ters üçgen görünümlü delaminasyon

Tablo 5.8 Orta ara yüzeye kadar kalınlık doğruıtusunda üçgen görünümlü delaminasyon için her bir ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları

<i>a/L</i>	<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	Delaminasyon Uzunlukları (mm)							
			Ara yüz Numarası							
			1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	15	2	15	11	7	3	0	0	0	0
0,2	30	2	30	26	22	18	14	10	6	2
0,3	45	2	45	41	37	33	29	25	21	17
0,4	60	2	60	56	52	48	44	40	36	32
0,5	75	2	75	71	67	63	59	55	51	47
0,6	90	2	90	86	82	78	74	70	66	62
0,7	105	2	105	101	97	93	89	85	81	77
0,8	120	2	120	116	112	108	104	100	96	92
0,9	135	2	135	131	127	123	119	115	111	107

Tablo 5.9 Orta ara yüzeye kadar kalınlık doğruıtusunda ters üçgen görünümlü delaminasyon için her bir ara yüzdeki delaminasyon uzunlukları

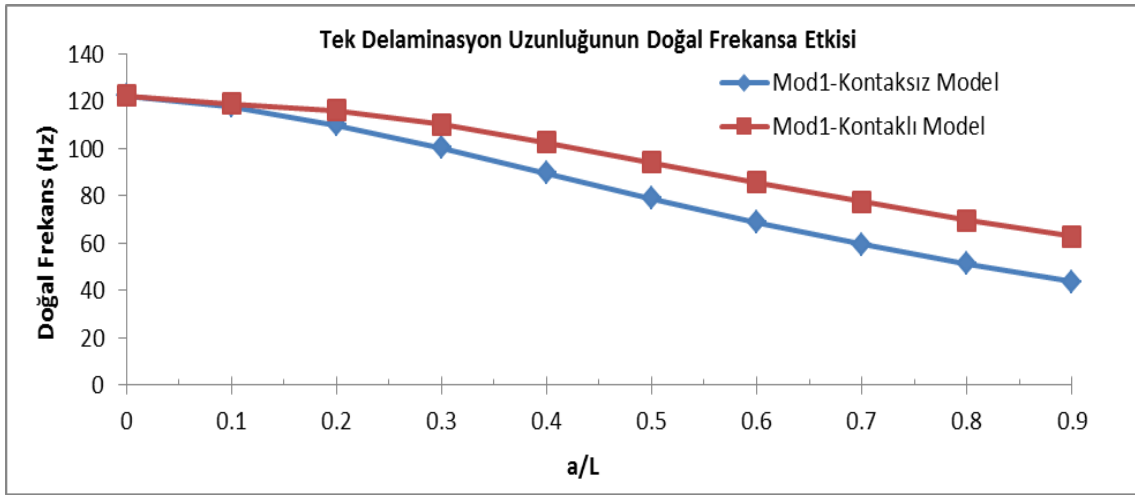
<i>a/L</i>	<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	Delaminasyon Uzunlukları (mm)							
			Ara yüz Numarası							
			8	7	6	5	4	3	2	1
0,1	15	2	15	11	7	3	0	0	0	0
0,2	30	2	30	26	22	18	14	10	6	2
0,3	45	2	45	41	37	33	29	25	21	17
0,4	60	2	60	56	52	48	44	40	36	32
0,5	75	2	75	71	67	63	59	55	51	47
0,6	90	2	90	86	82	78	74	70	66	62
0,7	105	2	105	101	97	93	89	85	81	77
0,8	120	2	120	116	112	108	104	100	96	92
0,9	135	2	135	131	127	123	119	115	111	107

### 5.2.7. Fiber Oryantasyonunun Delaminasyon Hasarlı Kompozit Plağın Doğal Frekansına Etkisi

Yapılan tüm çalışmalarda çapraz katlı ve 16 tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır. Bu çalışmada ise çapraz katlı kompozitler ile açılı katlı kompozitler karşılaştırılmıştır. Orta ara yüzeye kadar üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyona sahip kompozit plaklar için fiber oryantasyon açıları  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{4s}$ ,  $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]_{4s}$ ,  $[+30^{\circ}/-60^{\circ}]_{4s}$ ,  $[90^{\circ}/0^{\circ}]_{4s}$ ,  $[-45^{\circ}/+45^{\circ}]_{4s}$ ,  $[-60^{\circ}/+30^{\circ}]_{4s}$  olarak seçilmiştir. Bu çalışmada *a* 60 mm ve *b* 2 mm olarak sabit tutulmuştur.

### 5.3. Delaminasyon Uzunluğunun Doğal Frekansa Etkisi

Tek yönlü lif takviyeli çapraz katlı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemede tek delaminasyon uzunluğunun doğal frekansa etkisini incelemek için delaminasyon uzunluğu  $a$  değiştirilmiştir. Çizgisel düşük hızlı darbe ile oluşan tek delaminasyonun plağın eğilmesi sonucunda en alt katmanda olduğu göz önüne alınmıştır. Tek delaminasyon 16 katlı ve 15 ara yüze sahip 150x100 mm boyutlarındaki plağın 1. ara yüzüne yerleştirilmiştir (Şekil 5.5). Tek tarafı ankastre mesnetli, kontak elemanlı ve kontak elemanlı nümerik modelin birinci modda elde edilen doğal frekansları Şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.10 Tek delaminasyon uzunluğunun doğal frekansa etkisi (Tek tarafından ankastre mesnetli– kontaklı ve kontaklız model)

Tek delaminasyon hasarı için kontaklı ve kontaklız modellerden elde edilen sonuçlar arasında büyük bir fark görülmemiştir. Örneğin  $(a/L)=0,9$  için fark %30,39' tür. Elde edilen sonuçlara göre tek delaminasyon uzunluğu arttıkça doğal frekans azalmaktadır. Hasarsız numune ile 15 mm delaminasyon uzunluğuna sahip  $(a/L=0,1)$  numunenin doğal frekansı arasındaki fark kontaklız numune için 4,58 Hz, kontaklı numune için ise 3,36 Hz'dir. Çok küçük bir delaminasyonun doğal frekansı pek fazla etkilemediği söylenebilir. Delaminasyon uzunluğu arttığında, örneğin 135 mm olduğunda  $(a/L=0,9)$  doğal frekanslar arasındaki fark kontaklı numune için %48,55, kontaklız numune için %64,19'dur. Tablo 5.10'da ilk 5 mod için elde edilen doğal frekans değerleri kontaklı ve kontaklız elemanlar için verilmiştir.

Tablo 5.10 a) Tek ankastre mesnetli kontaklı, b) Tek ankastre mesnetli kontaklı numunelere ait ilk 5 mod doğal frekans değerleri

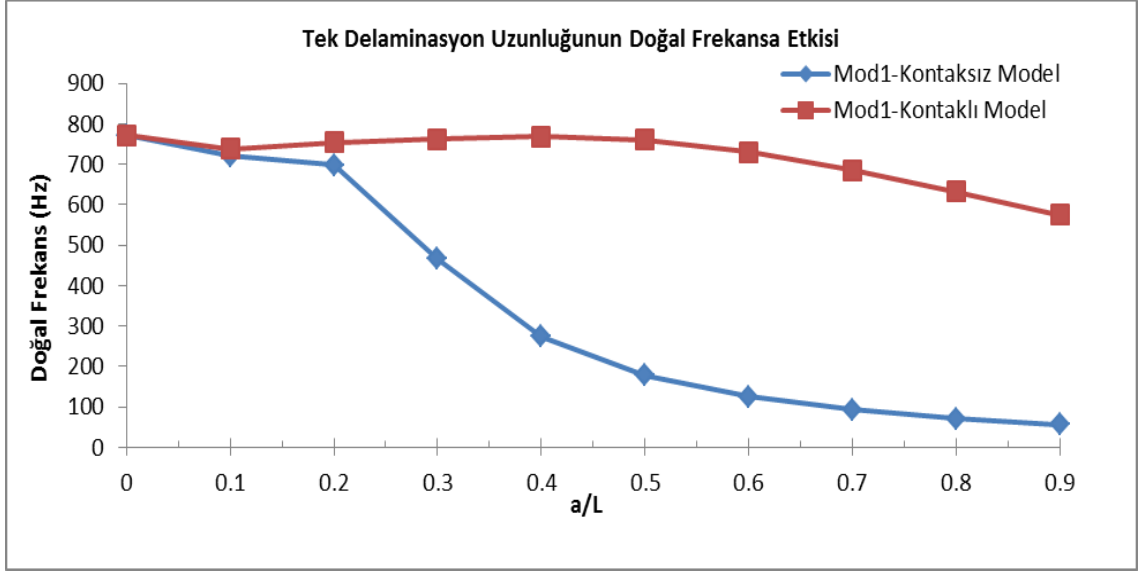
a)

Frekans (Hz)	a/L									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>Mod 1</b>	122,46	117,88	109,97	100,3	89,613	78,937	68,843	59,616	51,28	43,852
<b>Mod 2</b>	268,21	264,68	264,95	260,66	253,8	173,52	123,79	93,649	74,241	61,226
<b>Mod 3</b>	762,09	667,17	639,14	434,9	262,07	185,34	132,56	100,3	78,944	64,121
<b>Mod 4</b>	1016,4	951,56	840,68	472,77	279,52	227,89	173,38	141,34	120,64	106,85
<b>Mod 5</b>	1616	1620,2	1131,1	541,17	327,05	245,2	234,9	223,95	212,69	168,59

b)

Frekans (Hz)	a/L									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>Mod 1</b>	122,46	119,1	116,13	110,19	102,63	94,307	85,643	77,462	69,823	62,998
<b>Mod 2</b>	268,21	265,12	265,49	261,77	255,5	247,06	236,65	225,27	213,31	201,49
<b>Mod 3</b>	762,09	710,33	732,52	746,2	757,84	741,94	694,43	633,67	572,07	515,47
<b>Mod 4</b>	1016,4	981,47	979,38	984,51	996,88	996,57	964,73	910,93	849,46	789,31
<b>Mod 5</b>	1616	1622,2	1608,8	1585,4	1503,5	1492,1	1528,2	1582,5	1574,3	1563,4

Aynı kompozit plağın iki tarafı da ankastre mesnetlenmesi durumunda da doğal frekansları bulunmuştur. Sonuçlar Şekil 5.11’de görülmektedir. Numunenin iki taraftan mesnetlenmesi durumunda kontaklı ve kontaklız elemanlar arasındaki doğal frekans farkı büyümüştür. Örneğin (a/L=0,5) için fark %76,47’tür. Tezin bundan sonraki çalışmalarında bütün modeller sadece kontak elemanla oluşturulmuştur. Tek yerine çift ankastre mesnetlenmesi durumunda doğal frekanslar yaklaşık olarak 6 kat artmıştır. Çift ankastre mesnet durumunda hasarsız numune ile 15 mm delaminasyon uzunluğuna sahip (a/L=0,1) numunenin doğal frekansı arasındaki fark kontaklız numunede 52,56 Hz, kontaklı numunede 33,6 Hz iken, 135 mm delaminasyon uzunluğuna sahip numunenin doğal frekansı arasındaki fark kontaklız numunede 715,926 Hz, kontaklı numunede 197,67 Hz’dir. Çift ankastre mesnet durumunda tek delaminasyon uzunluğunun doğal frekansı pek fazla etkilemediği görülmüştür.



Şekil 5.11 Tek delaminasyon uzunluğunun doğal frekansa etkisi (İki taraftan ankastre mesnetli-kontaklı ve kontaksız model)

Tablo 5.11’de de tek delaminasyon hasarı içeren çift ankastre mesnetli kontaklı ve kontaksız numuneler için ilk 5 mod doğal frekans değerleri görülmektedir. Mod sayısı arttıkça doğal frekanslarda iniş çıkışların olduğu görülmektedir.

Tablo 5.11 a) Çift ankastre mesnetli kontaksız, b) Çift ankastre mesnetli kontaklı numunelere ait ilk 5 mod doğal frekans değerleri

a)

Frekans (Hz)	a/L									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>Mod 1</b>	772,66	720,1	698,01	465,86	274,24	178,82	125,43	92,858	71,481	56,734
<b>Mod 2</b>	881,93	838,38	803,57	487,05	286,51	189,23	134,92	101,89	80,139	65,121
<b>Mod 3</b>	1942,9	1919,8	1135,7	541,98	327,63	228,37	173,83	141,77	121,09	107,34
<b>Mod 4</b>	2104,5	2019,4	1152,7	617,53	406,22	313	263,22	235,91	214,78	169,89
<b>Mod 5</b>	2256,3	2172,4	1177,1	741,01	542,46	460,31	380,78	280,33	218,65	181,03

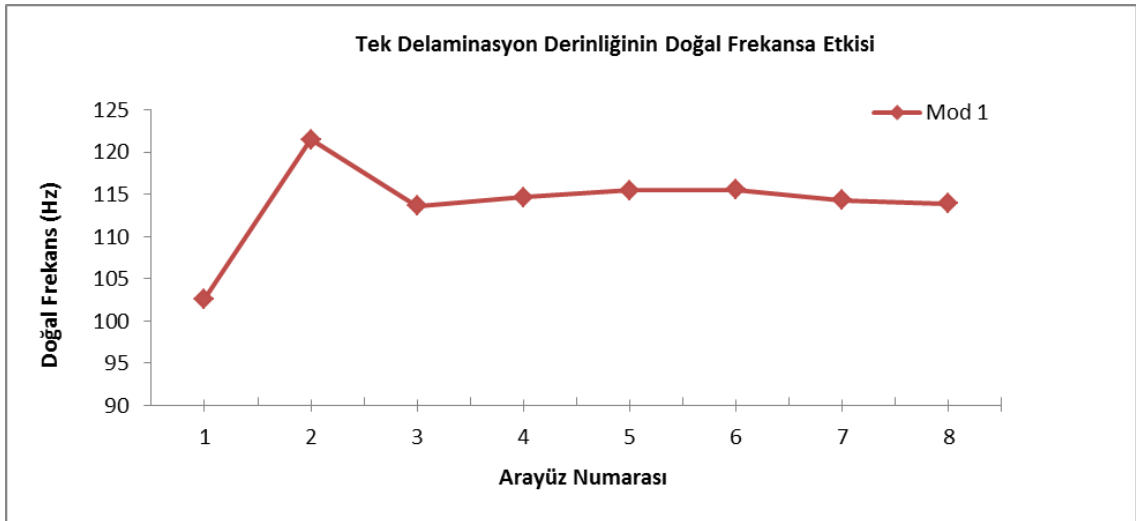
b)

Frekans (Hz)	a/L									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>Mod 1</b>	772,66	739,06	754,92	762,93	768,68	760,23	731,17	686,18	632,06	574,99
<b>Mod 2</b>	881,93	853,68	866,79	871,03	872,29	863,34	839,59	803,58	758,42	707,96
<b>Mod 3</b>	1942,9	1933,6	1916,3	1770,5	1693	1723,7	1831,9	1853,6	1832,7	1718,1
<b>Mod 4</b>	2104,5	2027,1	1935	1915,3	1889,9	1887,3	1871,5	1908,2	1859,5	1807,7
<b>Mod 5</b>	2256,3	2180,9	2089,3	1954,4	1901,7	1917,1	2002,3	2058	2013,5	1888

#### 5.4. Tek Delaminasyon Konumunun Doğal Frekansa Etkisi

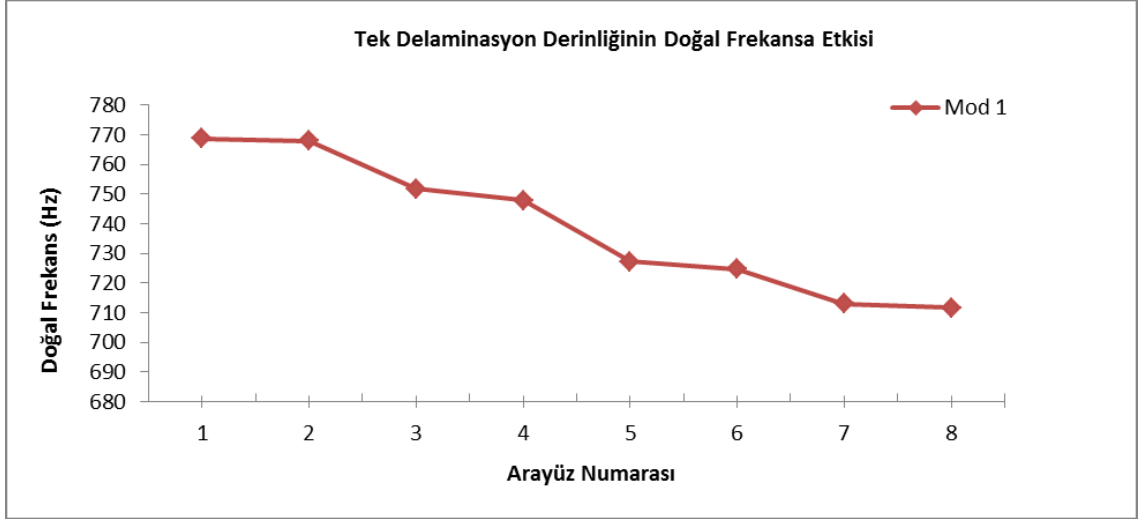
Tek şerit delaminasyon konumunun kalınlık doğrultusundaki yerinin doğal frekansa etkisini incelemek için, delaminasyon uzunluğu  $a$  60 mm olarak sabit alınmıştır. Bu seçim,  $a$  uzunluğunun ne çok büyük ne de çok küçük olmaması için ortalarda olan bir değer seçilerek tamamen keyfi olarak yapılmıştır.

Delaminasyon yerinin doğal frekansa etkisi tek ankastre mesnetli model için Şekil 5.12'de, çift ankastre mesnetli model için Şekil 5.13'de görülmektedir. Tek ankastre mesnetli model için delaminasyon orta ara yüze yaklaştıkça doğal frekans değerleri artmaktadır. Tek ankastre mesnetli modelde sadece 2. ara yüzde belirgin bir sapma vardır. 3. ara yüzden 8. ara yüze kadar pek fazla farkın olmadığı görülmektedir. Kontaklı numuneye ait ilk 5 mod doğal frekans değerleri Tablo 5.12'de görülmektedir.



Şekil 5.12 Tek delaminasyon derinliğinin doğal frekansa etkisi (Tek ankastre mesnetli model)

Oysaki çift ankastre mesnetli kompozit plağın sonuçlarına bakılırsa, delaminasyon en dış ara yüzden orta ara yüze doğru ilerledikçe doğal frekans azalmaktadır. İlk mod için en dış ara yüzle orta yüzey arasındaki doğal frekanslar arasındaki fark %7,42'dir.



Şekil 5.13 Tek delaminasyon derinliğinin doğal frekansa etkisi (Çift ankastre mesnetli model)

Çift ankastre mesnetli kontaklı tabakalı kompozit malzeme için ilk 5 mod doğal frekans değerleri Tablo 5.13’de verilmiştir.

Tablo 5.12 Tek ankastre kontaklı numunenin delaminasyon derinliği için ilk 5 mod doğal frekans değerleri

Frekans (Hz)	Arayüz Numarası							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Mod 1</b>	102,630	121,500	113,650	114,660	115,510	115,530	114,340	113,950
<b>Mod 2</b>	255,500	263,140	245,880	241,530	237,640	234,960	232,550	231,940
<b>Mod 3</b>	757,840	757,130	725,860	720,500	693,840	693,970	688,260	691,080
<b>Mod 4</b>	996,880	998,800	978,890	968,800	941,360	933,390	914,170	909,600
<b>Mod 5</b>	1503,50	1537,60	1486,40	1433,20	1404,30	1351,70	1323,40	1310,30

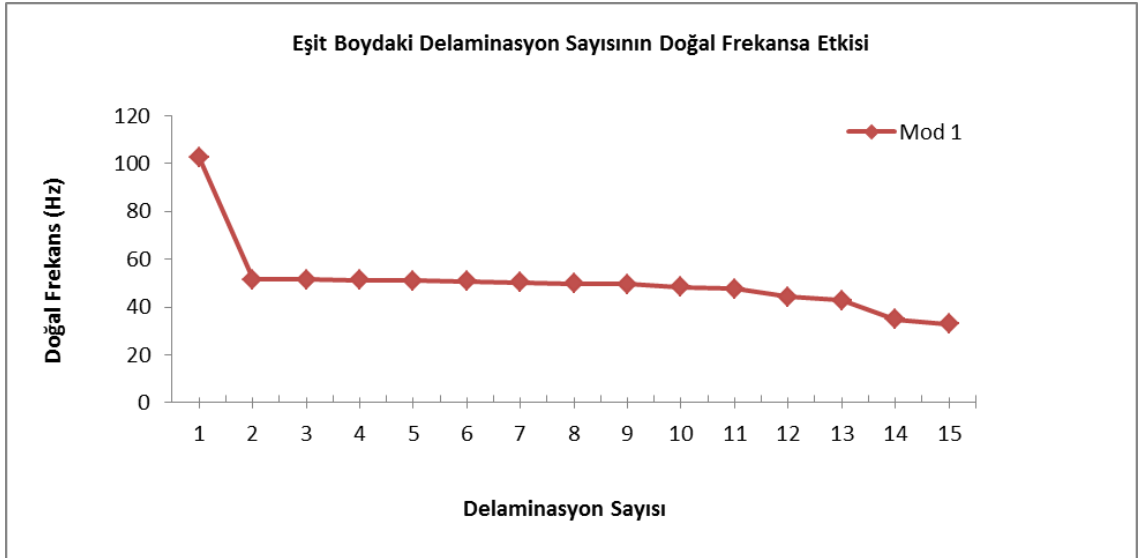
Tablo 5.13 Çift ankastre mesnetli kontaklı numunenin delaminasyon derinliği için ilk 5 mod doğal frekans değerleri

Frekans (Hz)	Arayüz Numarası							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Mod 1</b>	768,680	767,860	751,790	747,780	727,130	724,730	713,000	711,610
<b>Mod 2</b>	872,290	869,010	849,730	841,820	819,270	813,530	800,000	797,860
<b>Mod 3</b>	1693,000	1769,400	1595,600	1581,800	1497,100	1471,400	1412,700	1403,400
<b>Mod 4</b>	1889,900	1943,900	1719,200	1599,300	1551,000	1481,900	1442,400	1429,800
<b>Mod 5</b>	1901,700	2084,200	1761,800	1732,700	1641,600	1617,000	1548,300	1537,700

## 5.5. Eşit Boydaki Delaminasyon Sayısının Doğal Frekansa Etkisi

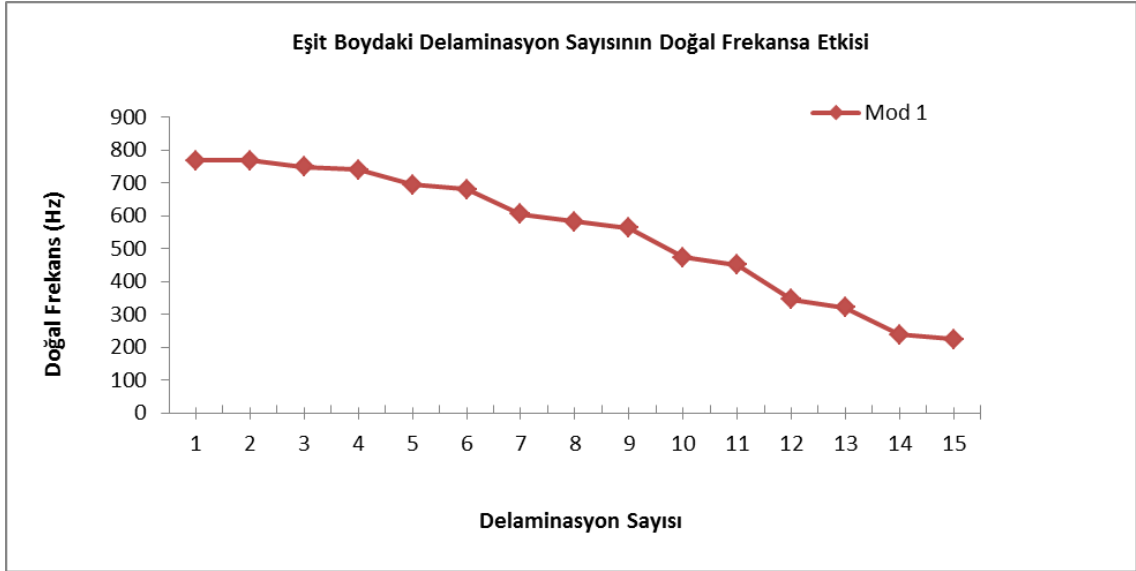
Bu çalışmada eşit uzunluğa sahip delaminasyon sayısı en alt ara yüzden başlayarak artırılmış ve kompozit plakanın tüm ara yüzlerinde delaminasyon hasarı olana kadar devam edilmiştir. Delaminasyon uzunluğu  $a$  60 mm olarak sabit alınmıştır.

Tek ve çift ankastre mesnetli kompozit plaklarda eşit boydaki delaminasyon sayısının doğal frekansa etkisi Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de görülmektedir. Yapılan nümerik çalışmaya göre tek ankastre mesnetli kompozit plakta delaminasyon sayısı 1 den 2 ye çıktığında doğal frekansta %49,85’lik büyük bir azalma meydana gelmektedir. Bu sayı 2 den 15 e kadar arttırıldığında doğal frekanslar arasında belirgin bir fark görülmemektedir. Bu çalışma için tek ankastre mesnetli kompozit plağa ait ilk 5 mod doğal frekans değerleri Tablo 5.14’de görülmektedir. Kompozit plakta tek bir delaminasyon olması durumu ile bütün ara yüzlerde hasar olması durumu karşılaştırıldığında ilk mod için doğal frekansta %67,89’luk bir fark vardır.



Şekil 5.14 Eşit boydaki delaminasyon sayısının doğal frekansa etkisi (Tek ankastre mesnetli)

Oysaki çift ankastre mesnetli kompozit plakta delaminasyon sayısı arttıkça doğal frekans azalmaktadır. Delaminasyon 2. ara yüze yerleştirildiğinde tek ankastre mesnetli modelde olduğu gibi bir sapma görülmemektedir. Bunun nedeni, çift ankastre mesnetlenen yapının, fazla bağlı olması nedeniyle daha kararlı olması söylenebilir.



Şekil 5.15 Eşit boydaki delaminasyon sayısının doğal frekansa etkisi (Çift ankastre mesnetli)

Tablo 5.15, çift ankastre mesnetli kompozit plağa ait, delaminasyon sayısının doğal frekansa etkisini ilk 5 mod için göstermektedir. İki taraftan ankastre mesnetli kompozit plakta tek bir delaminasyon olması durumu ile bütün ara yüzlerde hasar olması durumu karşılaştırıldığında ilk mod için doğal frekansta %70,82'lik fark vardır.

Tablo 5.14 Tek ankastre mesnetli kompozit plak için artan delaminasyon sayısına bağlı olarak ilk 5 mod doğal frekans değerleri

Frekans (Hz)	Delaminasyon Sayısı														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Mod 1</b>	102,630	51,466	51,445	51,296	51,087	50,901	50,251	49,930	49,639	48,278	47,727	44,182	42,719	34,842	32,945
<b>Mod 2</b>	255,500	220,800	205,320	189,850	174,960	161,360	149,570	140,360	134,150	130,920	130,520	131,010	133,020	130,470	130,550
<b>Mod 3</b>	757,840	606,180	616,120	613,020	584,500	574,710	514,710	496,030	482,540	419,770	403,770	332,000	313,980	249,380	236,940
<b>Mod 4</b>	996,880	872,790	854,170	848,250	817,370	809,890	743,820	703,660	669,930	559,260	521,440	400,840	366,050	277,570	261,630
<b>Mod 5</b>	1503,50	988,910	959,790	940,480	873,110	845,100	772,450	762,510	754,250	710,180	677,730	514,290	422,340	312,090	286,130

Tablo 5.15 Çift ankastre mesnetli kompozit plak için artan delaminasyon sayısına bağlı olarak ilk 5 mod doğal frekans değerleri

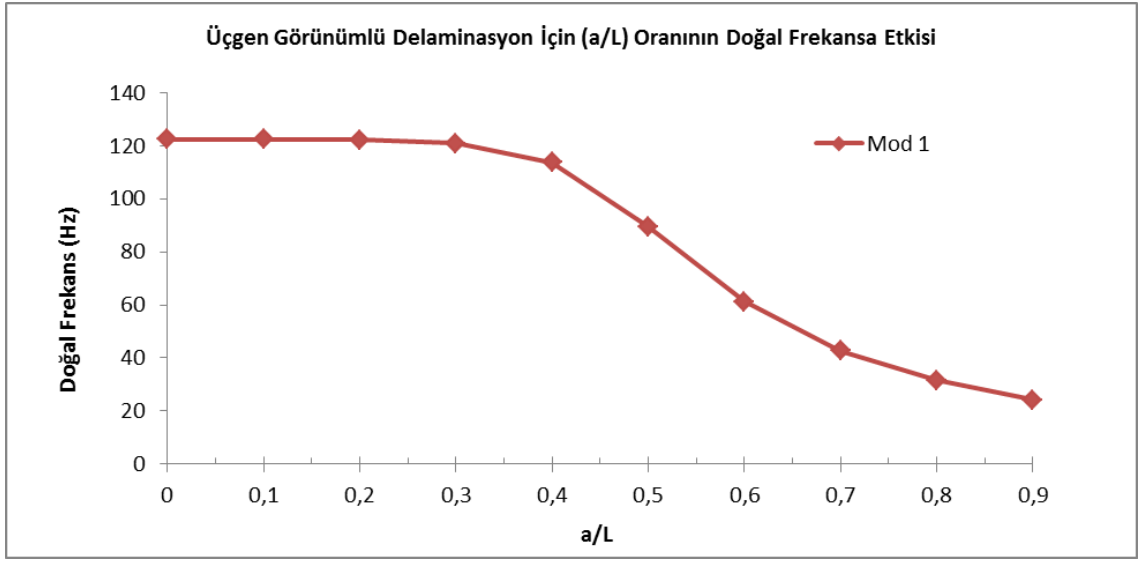
Frekans (Hz)	Delaminasyon Sayısı														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Mod 1</b>	768,680	767,850	748,540	740,920	694,910	681,490	604,670	582,070	563,820	473,410	450,440	345,600	321,200	238,100	224,270
<b>Mod 2</b>	872,290	865,800	844,550	832,510	784,960	765,430	685,530	654,050	626,400	525,300	491,300	374,090	340,490	250,710	234,420
<b>Mod 3</b>	1693,00	1006,30	1004,30	1004,20	1000,60	999,590	988,580	984,060	972,650	810,780	686,060	518,160	425,660	313,430	287,230
<b>Mod 4</b>	1889,90	1392,80	1353,00	1319,50	1281,80	1253,40	1211,20	1107,10	979,700	945,460	931,990	826,260	601,070	470,570	425,820
<b>Mod 5</b>	1901,70	1755,00	1706,10	1570,20	1492,10	1359,90	1240,10	1185,20	1163,40	1102,10	1055,70	841,200	786,740	608,500	574,290

## 5.6. Kalınlık Doğrultusunda Üçgen Görünümlü Delaminasyon - En Büyük Delaminasyon Uzunluğunun Doğal Frekansa Etkisi

Bu çalışmada düşük hızlı ve çizgisel darbe yükü nedeni oluşan genişlik boyunca devam eden şerit şeklinde ve kalınlık doğrultusunda bakıldığında üçgen görünümlü delaminasyonun titreşim analizi yapılmıştır.

En büyük delaminasyon uzunluğu  $a$ 'dır ve en büyük delaminasyon en alttaki ara yüze yerleştirilmiştir. Delaminasyon hasarı üst yüzeye doğru gittikçe azalmaktadır ve azalma miktarı  $2b$  kadardır (Şekil 5.8). Bu çalışmada çok sayıda farklı boyutlarda delaminasyona sahip tabakalı kompozitde en büyük delaminasyon uzunluğu  $a$ 'nın doğal frekansa etkisi incelenmiştir.

Kalınlık doğrultusunda üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, tek ve çift ankastre mesnetli kompozit plaklarda dış yüzeye yakın en büyük delaminasyon uzunluğu  $a$ 'nın doğal frekansa etkisi Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de görülmektedir. Yapılan literatür taraması sonucunda kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarına sahip kompozit plakların kritik burkulma yükü üzerine çalışmalar mevcut olup doğal frekansları üzerine çalışan çok az kişinin olduğu görülmüştür. Tek delaminasyonda olduğu gibi üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı kompozit plaklarda delaminasyon uzunluğu arttıkça doğal frekans azalmaktadır. Tek tarafından ankastre mesnetli modelde, hasarsız numune ile 15 mm delaminasyon uzunluğuna sahip ( $a/L=0,1$ ) numunenin doğal frekansı arasındaki fark yalnızca 0,02 Hz dir. Delaminasyon uzunluğu arttığında, örneğin 135 mm olduğunda ( $a/L=0,9$ ) doğal frekanslar arasındaki 1. mod için fark %80,25'dir.



Şekil 5.16 Tek ankastre mesnetli kompozit plakta, üçgen görünümlü delaminasyon için (a/L) oranının doğal frekansa etkisi

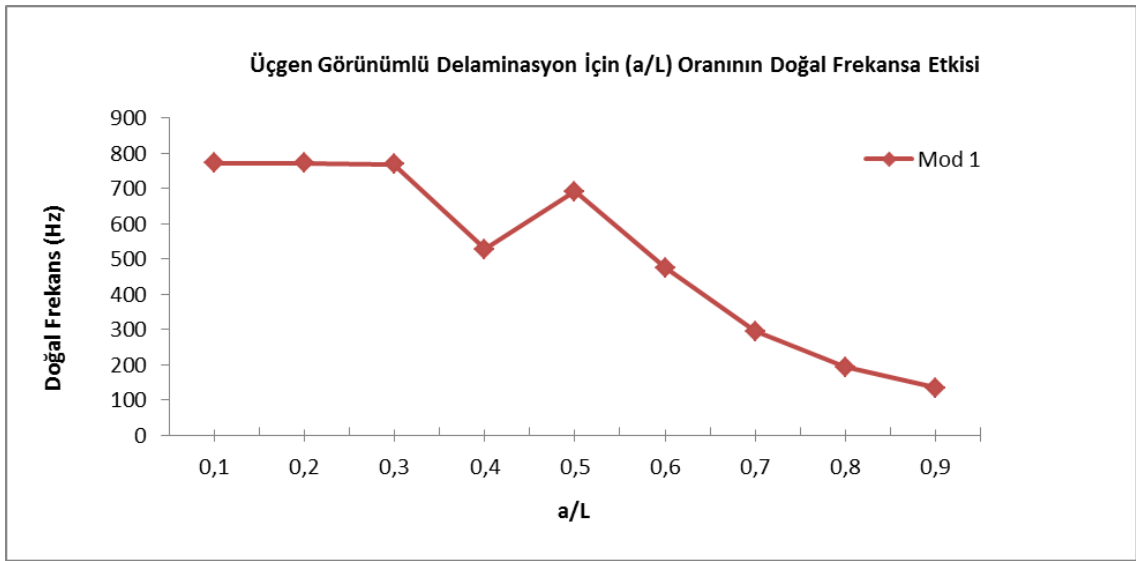
Tablo 5.16 Tek ankastre mesnetlenmiş kompozit plakta üçgen görünümlü delaminasyon için (a/L) oranının doğal frekansa etkisi (ilk 5 mod)

Frekans (Hz)	a/L									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>Mod 1</b>	122,46	122,44	122,21	120,93	113,80	89,49	61,19	42,76	31,54	24,19
<b>Mod 2</b>	268,21	268,94	266,36	259,75	233,33	179,95	138,16	112,87	95,00	80,56
<b>Mod 3</b>	762,09	761,65	761,22	758,25	529,77	582,75	474,93	318,54	214,78	153,25
<b>Mod 4</b>	1016,40	1017,70	1012,40	1001,70	545,76	734,93	535,85	337,40	231,53	171,92
<b>Mod 5</b>	1616,00	1635,90	1591,70	1522,30	603,17	803,21	540,36	347,07	247,67	194,11

Tablo 5.17 Çift ankastre mesnetlenmiş kompozit plakta üçgen görünümlü delaminasyon için (a/L) oranının doğal frekansa etkisi (ilk 5 mod)

Frekans (Hz)	a/L								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>Mod 1</b>	772,170	771,890	769,830	528,310	692,940	475,250	295,850	193,920	134,100
<b>Mod 2</b>	882,260	879,160	871,800	542,840	748,370	491,220	304,360	201,540	141,650
<b>Mod 3</b>	1958,800	1877,000	1729,000	603,200	755,230	555,220	348,930	248,890	195,030
<b>Mod 4</b>	2095,700	2025,400	1731,300	751,340	856,260	673,490	473,530	389,390	346,650
<b>Mod 5</b>	2248,500	2170,200	1859,300	761,640	996,630	676,890	600,300	468,340	348,770

Aynı sonuçlar iki tarafından ankastre mesnetli kompozit plakta da bulunmakla beraber ( $a/L=0,5$ ) teki doğal frekans değerinde bir sıçrama görülmektedir. Tek tarafından mesnetli kompozit plakta ( $a/L=0,4$ ) den ( $a/L=0,5$ ) e geçildiğinde grafiğin eğimde bir artışın olduğu görülmektedir. Nispeten küçük delaminasyon hasarlarında (15-45 mm ) doğal frekansta fazla bir değişme olmamasına rağmen bu değerlerden sonra hızla azalmaktadır.



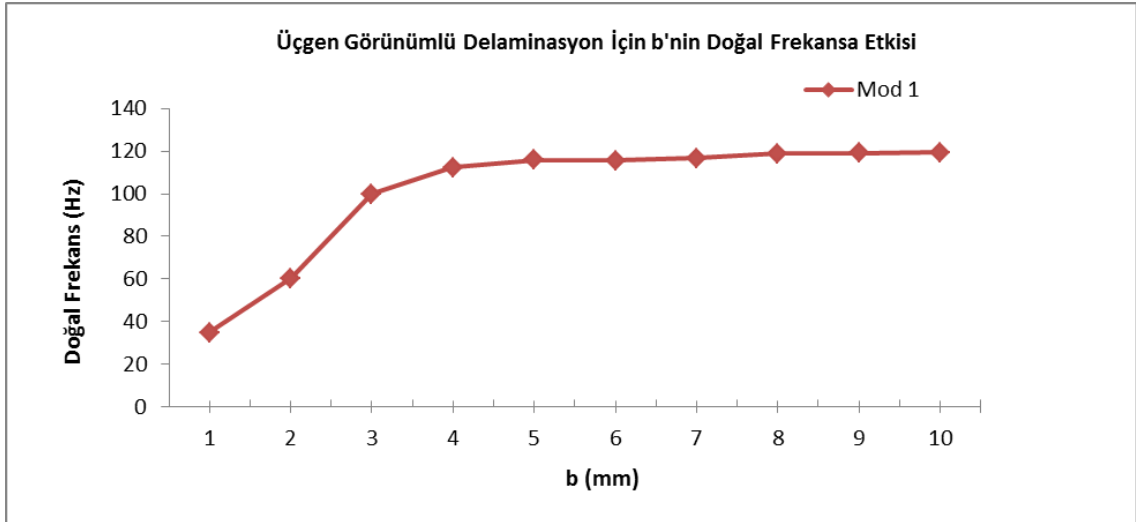
Şekil 5.17 Çift ankastre mesnetli kompozit plakta, üçgen görünümlü delaminasyon için ( $a/L$ ) oranının doğal frekansa etkisi

Bu çalışma ile ilgili olarak çift ankastre mesnetlenmiş kompozit plağın doğal frekans değerleri ise Tablo 5.17’de verilmiştir.

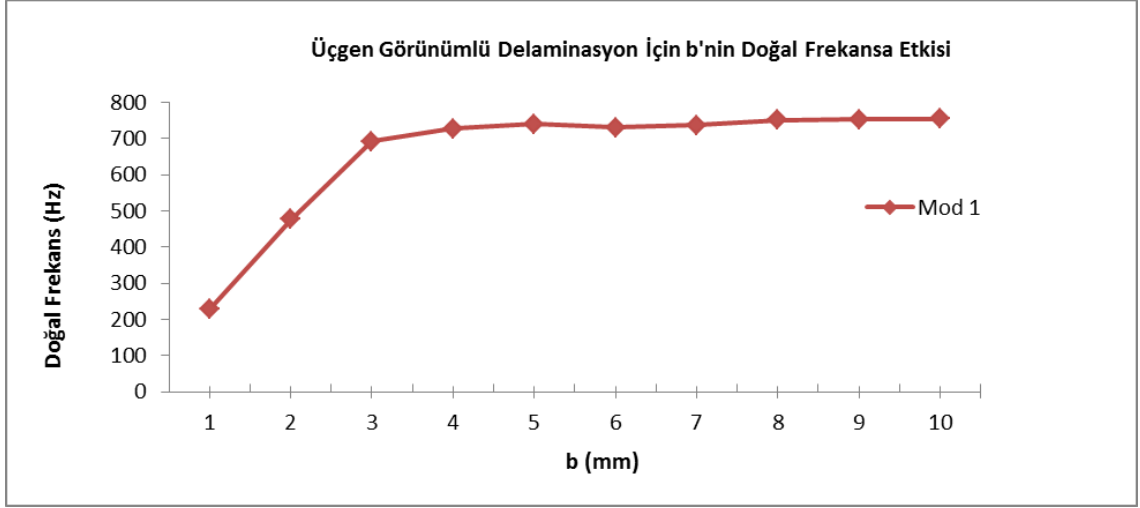
## 5.7. Kalınlık Doğrultusunda Üçgen Görünümlü Delaminasyon - Küçük Delaminasyonların Uzunluğunu Belirleyen $b$ Boyutunun Doğal Frekansa Etkisi

Düşük hızlı darbe yükü nedeniyle oluşan kalınlık doğrultusunda üçgen görünümlü delaminasyonda küçük delaminasyonların uzunluğu  $b$  parametresi ile belirlenmektedir. Üçgen formu oluşturulurken her bir delaminasyon bir önceki delaminasyondan  $2b$  kadar kısa alınmıştır. En büyük delaminasyon uzunluğu  $a$  90 mm olarak sabit tutulmuştur.  $b$  değeri 1 mm'den 10 mm'ye kadar değiştirilmiştir.

Küçük delaminasyonların uzunluğunu belirleyen  $b$ 'nin doğal frekansa etkisi tek ve çift ankastre mesnetli kompozit plaklar için Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da görülmektedir. Nümerik sonuçlara göre  $b=1$  mm ile  $b=3$  mm değerleri arasında doğal frekansta büyük bir artış meydana gelirken  $b=3$  mm den sonra önemli bir artış oluşmamıştır. Çünkü  $b$  değeri arttıkça delaminasyon alanı azalmaktadır ve Tablo 5.7'ye göre  $b=3$  mm ye kadar tüm arayüzlerde (15 ara yüz) delaminasyon hasarı varken,  $b=3$  mm den sonra ara yüzlerdeki delaminasyon sayısı gittikçe azalmıştır ve en son  $b=10$  mm de sadece 5 ara yüz de hasar görülmüştür. Bu nedenle Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da  $b=3$  mm den sonra doğal frekanslarda fazla bir değişim görülmemektedir.



Şekil 5.18 Tek ankastre mesnetli kompozit plakta üçgen görünümlü delaminasyon için  $b$ 'nin doğal frekansa etkisi



Şekil 5.19 Çift ankastre mesnetli kompozit plakta üçgen görünümlü delaminasyon için  $b$ 'nin doğal frekansa etkisi

Tablo 5.18'de ise  $b$  nin farklı değerleri için, tek ve çift ankastre mesnetli tabakalı kompozit malzemelerin ilk 5 mod doğal frekans değerleri verilmiştir.

Tablo 5.18 Üçgen görünümlü delaminasyon için  $b$ 'nin doğal frekansa etkisi a) Tek tarafından ankastre mesnetli plak için b) iki tarafından ankastre mesnetli plak için

a)

Frekans (Hz)	b (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Mod 1</b>	35,000	60,371	99,991	112,290	115,740	115,590	116,710	118,790	119,240	119,440
<b>Mod 2</b>	112,570	137,970	195,980	228,240	239,610	241,270	245,220	251,690	253,650	254,680
<b>Mod 3</b>	249,320	478,400	660,010	715,740	730,860	712,080	720,140	742,620	744,150	745,030
<b>Mod 4</b>	267,120	535,940	819,580	909,240	935,120	927,110	939,060	962,340	966,870	969,820
<b>Mod 5</b>	281,940	537,850	838,590	1171,000	1291,400	1342,100	1386,100	1425,400	1446,900	1463,700

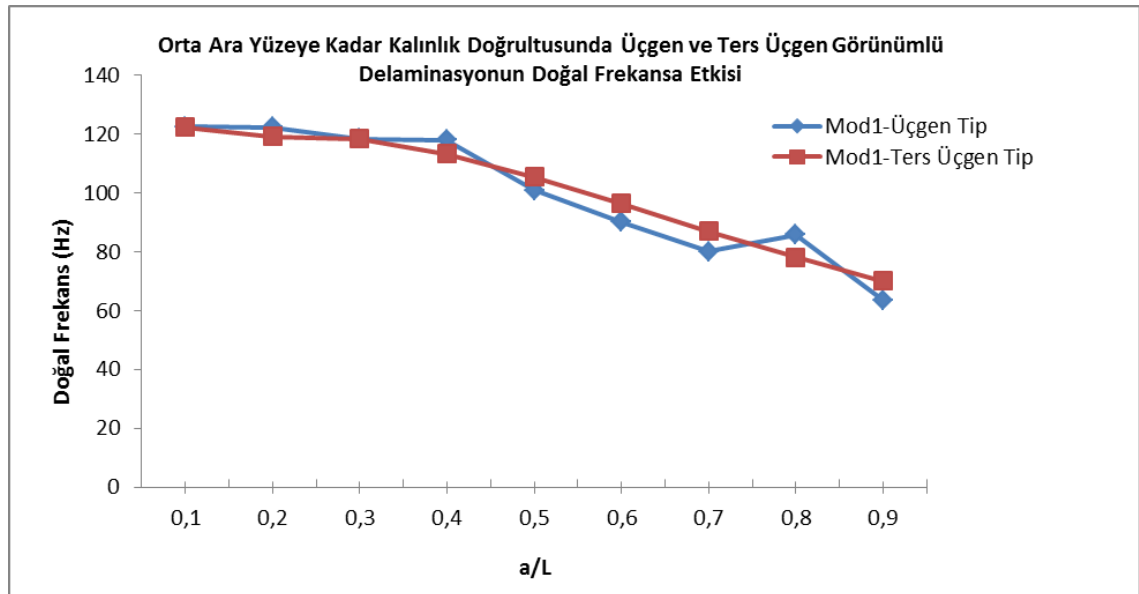
b)

Frekans (Hz)	b (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Mod 1</b>	228,020	476,320	692,450	727,270	740,170	730,640	736,420	751,230	752,670	753,620
<b>Mod 2</b>	236,200	491,650	747,580	797,040	817,150	813,690	822,520	838,520	842,010	844,340
<b>Mod 3</b>	282,570	553,470	904,050	1258,000	1395,900	1447,800	1515,300	1580,300	1612,500	1638,200
<b>Mod 4</b>	416,640	669,860	994,610	1264,800	1432,500	1462,500	1522,500	1688,200	1742,700	1763,000
<b>Mod 5</b>	556,010	676,700	1040,400	1367,500	1551,000	1570,000	1644,100	1819,100	1876,300	1898,000

## 5.8. Orta Ara Yüzeye Kadar, Kalınlık Doğrultusunda Üçgen ve Ters Üçgen Görünümlü Delaminasyonların Doğal Frekansa Etkisinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada orta ara yüzeye kadar devam eden ve kalınlık doğrultusundan bakıldığında üçgen ve ters üçgen görünümlü olan delaminasyonlar karşılaştırılmıştır. Küçük delaminasyon uzunluklarını belirleyen  $b$  2 mm olarak sabit tutulmuştur ve her iki tip delaminasyon için de en büyük delaminasyon uzunluğu  $a$  değiştirilmiştir.

Orta ara yüzeye kadar, kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonların doğal frekansa etkisi Şekil 5.20’de karşılaştırılmıştır. Kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarında  $a/L=0,4$ ’e kadar doğal frekansta önemli bir değişim görülmediği söylenebilir. En büyük fark ise  $a/L=0,8$ ’de görülüp, üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonların doğal frekansları arasındaki fark yaklaşık olarak %9 civarındadır. Kompozit plağın iki tarafından ankastre mesnetlenmesi durumunda da aynı sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.20 Orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonun doğal frekansa etkisi – tek tarafından ankastre mesnetli

Tek ankastre mesnetli modellemeler için ilk 5 mod doğal frekans değerleri Tablo 5.19 (a) ve (b) de gösterilmiştir.

Tablo 5.19 Tek tarafından ankastre mesnetli model için orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonun doğal frekansa etkisi

a) Üçgen tip

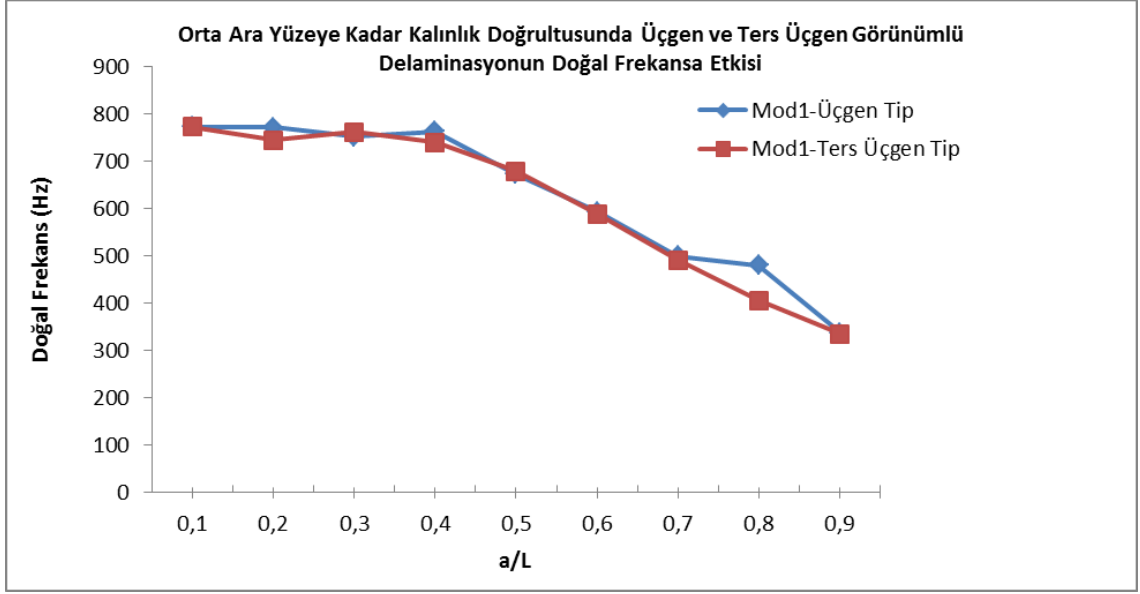
b) Ters üçgen tip

a)

Frekans (Hz)	a/L								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>Mod 1</b>	122,440	122,210	118,280	117,990	100,970	90,157	80,015	85,839	63,558
<b>Mod 2</b>	268,940	266,360	256,680	247,110	212,660	189,100	169,130	165,780	138,840
<b>Mod 3</b>	761,650	761,220	738,090	750,880	676,350	605,880	521,100	512,490	375,670
<b>Mod 4</b>	1017,700	1012,400	970,800	977,700	815,830	713,580	612,270	615,050	460,410
<b>Mod 5</b>	1635,900	1591,700	1516,500	1372,400	998,560	942,170	895,040	832,950	753,940

b)

Frekans (Hz)	a/L								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>Mod 1</b>	122,340	119,200	118,390	113,180	105,420	96,338	86,931	78,093	69,997
<b>Mod 2</b>	266,500	254,410	248,950	230,690	208,850	187,530	168,110	151,340	136,430
<b>Mod 3</b>	761,920	720,470	748,180	726,460	672,440	599,930	520,950	449,000	387,100
<b>Mod 4</b>	1013,300	971,190	980,980	932,980	842,030	731,330	627,160	542,960	477,230
<b>Mod 5</b>	1603,100	1528,500	1408,000	1175,700	1058,400	940,690	845,300	778,420	728,050



Şekil 5.21 Orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonun doğal frekansa etkisi – iki tarafından ankastre mesnetli

Tablo 5.20 a) ve b) de ise yine kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyona sahip çift ankastre mesnetlenmiş tabakalı kompozit modelin doğal frekans değerleri görülmektedir.

Tablo 5.20 İki tarafından ankastre mesnetli model için orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonun doğal frekansa etkisi

a) Üçgen tip

b) Ters üçgen tip

a)

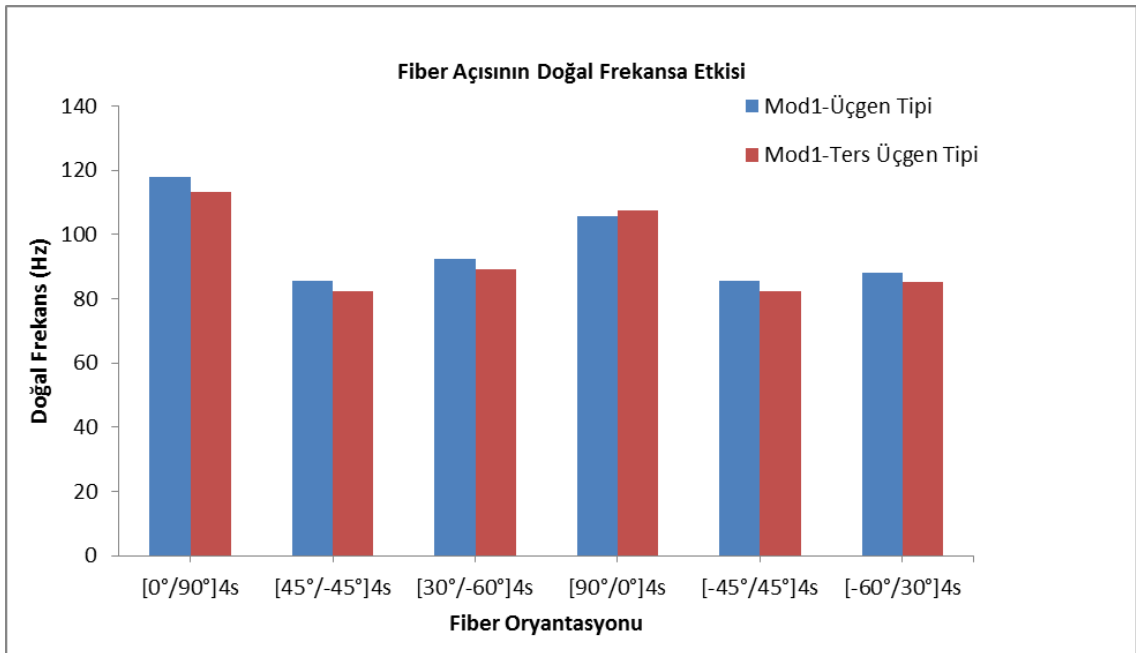
Frekans (Hz)	a/L								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>Mod 1</b>	772,170	771,890	751,780	763,070	673,020	593,030	499,720	480,350	338,350
<b>Mod 2</b>	882,260	879,160	855,560	853,350	750,640	655,690	554,190	521,290	389,430
<b>Mod 3</b>	1958,800	1877,000	1650,300	1430,700	1146,300	1051,800	925,760	873,010	784,170
<b>Mod 4</b>	2095,700	2025,400	1711,300	1518,200	1236,300	1138,000	1156,800	1117,600	977,850
<b>Mod 5</b>	2248,500	2170,200	1774,200	1552,500	1276,100	1261,300	1259,600	1199,100	1042,400

b)

Frekans (Hz)	a/L								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
<b>Mod 1</b>	772,060	744,930	761,700	739,530	678,790	588,540	491,470	405,930	334,890
<b>Mod 2</b>	879,750	851,760	856,500	817,090	736,720	633,980	532,810	447,070	376,610
<b>Mod 3</b>	1910,100	1666,100	1461,300	1260,200	1127,700	981,790	882,460	814,570	765,080
<b>Mod 4</b>	2049,700	1739,300	1568,600	1332,400	1184,600	1167,500	1130,800	1031,700	893,130
<b>Mod 5</b>	2195,000	1786,500	1584,500	1383,100	1302,800	1271,600	1213,800	1099,400	954,820

## 5.9. Fiber Oryantasyonunun Delaminasyon Hasarlı Kompozit Plağın Doğal Frekansına Etkisi

Şu ana kadar yapılan tüm çalışmalarda çapraz katlı yani  $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$  fiber oryantasyonuna sahip kompozit plaklar kullanılmıştır. Fiber oryantasyonunun doğal frekansa etkisini incelemek için bu çalışmada delaminasyon uzunluğu  $a$  60 mm ve kılma uzunluğu  $b$  2 mm değerlerine sahip olan orta yüzeye kadar çok katlı delaminasyona sahip, üçgen ve ters üçgen tipinde tabakalı kompozit numunede fiberlerin dizilimi  $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$ ,  $[+45^\circ/-45^\circ]_{4s}$ ,  $[+30^\circ/-60^\circ]_{4s}$ ,  $[90^\circ/0^\circ]_{4s}$ ,  $[-45^\circ/+45^\circ]_{4s}$ ,  $[-60^\circ/+30^\circ]_{4s}$  şeklinde değiştirilerek ilk 5 mod için doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmaya ait veriler Şekil 5.22 ve Tablo 5.21’de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre en büyük doğal frekans  $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$  için, en küçük doğal frekans,  $[+45^\circ/-45^\circ]_{4s}$  ve  $[-45^\circ/+45^\circ]_{4s}$  için bulunmuştur. Fiberler açılı olarak yerleştirildiğinde doğal frekans azalmaktadır.



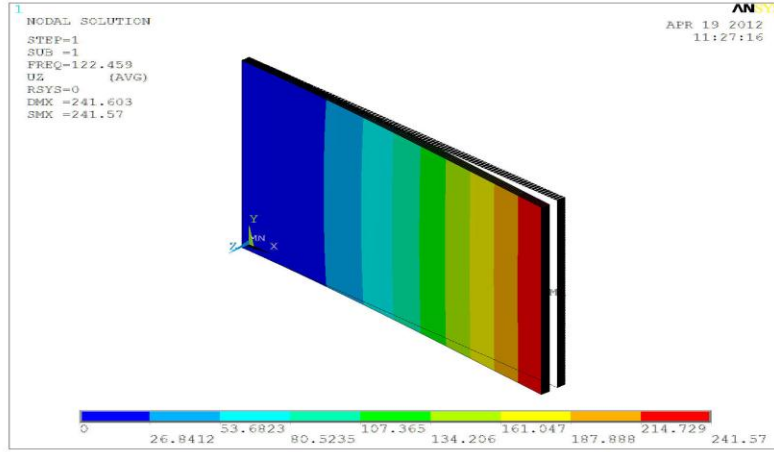
Şekil 5.22 Fiber oryantasyonunun delaminasyon hasarlı tabakalı kompozitin doğal frekansına etkisi – tek tarafından ankastre mesnetli model için

Tablo 5.21 Fiber oryantasyonunun delaminasyon hasarlı tabakalı kompozitin doğal frekansına etkisi – tek tarafından ankastre mesnetli model için

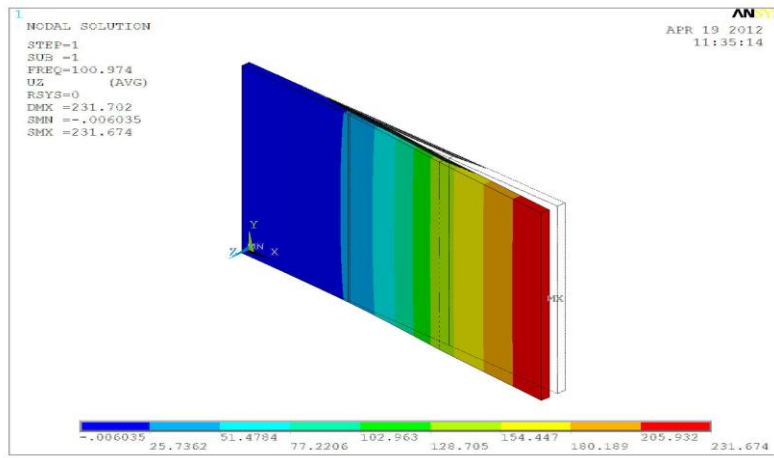
Frekans (Hz)	$[0^\circ/90^\circ]_{4s}$	$[45^\circ/-45^\circ]_{4s}$	$[30^\circ/-60^\circ]_{4s}$	$[90^\circ/0^\circ]_{4s}$	$[-45^\circ/45^\circ]_{4s}$	$[-60^\circ/30^\circ]_{4s}$
<b>Mod 1-Üçgen Tip</b>	117,990	85,434	92,587	105,780	85,434	88,054
<b>Mod 1-Ters Üçgen Tip</b>	113,180	82,524	89,328	107,410	82,524	85,162

### 5.10. Mod Şekillerinin Karşılaştırılması

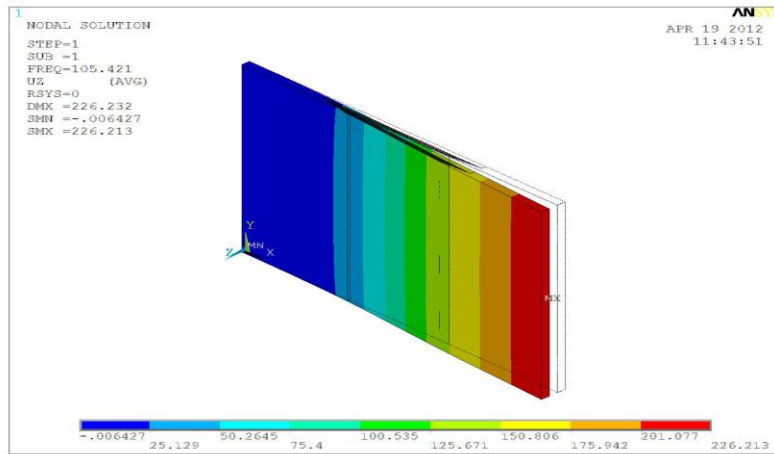
Hasarsız, kalınlık doğrultusunda üçgen görünümlü ve ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı ve tek tarafından ankastre mesnetli kompozit plakların ilk 5 mod için mod şekilleri Şekil 5.23 – 27’de görülmektedir. Mod şekilleri  $(a/L)=0,5$  için verilmiştir. 1. mod şekillerine bakıldığında her üç plakda ilk mod eğilme modudur. Her üç plakada da 2. mod burulmadır. 3. mod her üç model için de eğilmedir. 4. mod hem eğilmenin hem de burulmanın olduğu karışık moddur ve hasarsız modelin deformasyonu hasarlılardan farklıdır. 5. mod ise hasarsız numunede eğilme şeklinde olurken, hasarlı numunelerde burkulma şeklindedir.



a)

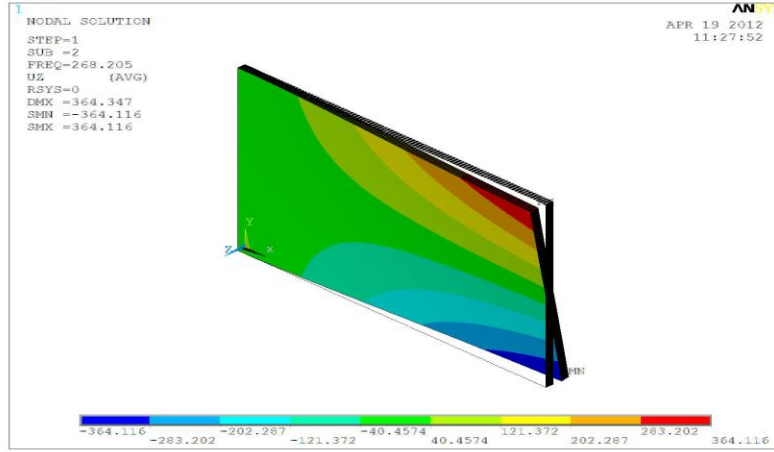


b)

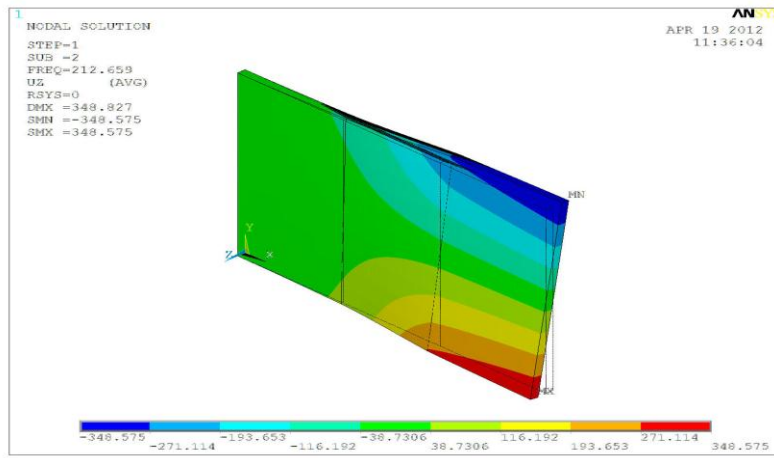


c)

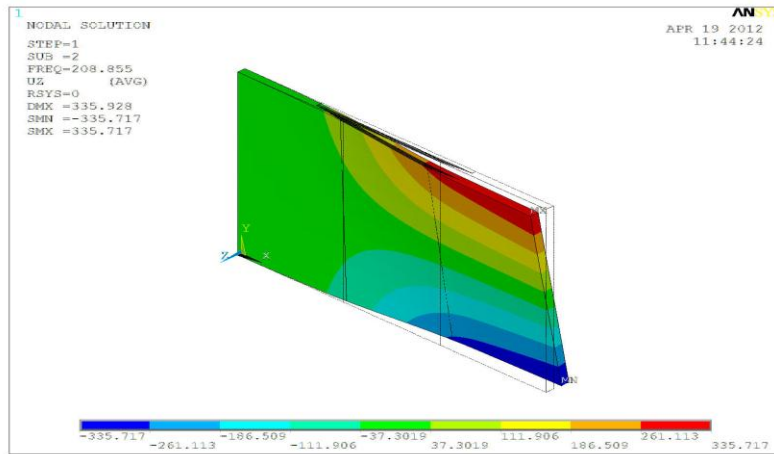
Şekil 5.23 a) Hasarsız, b) üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 1. mod şekilleri



a)

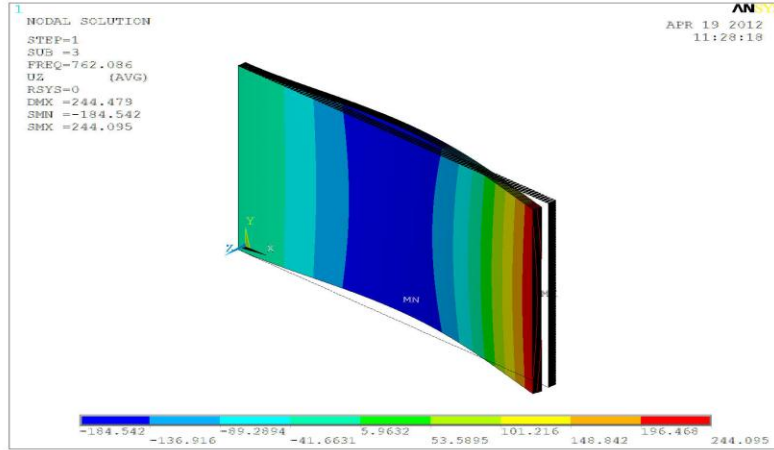


b)

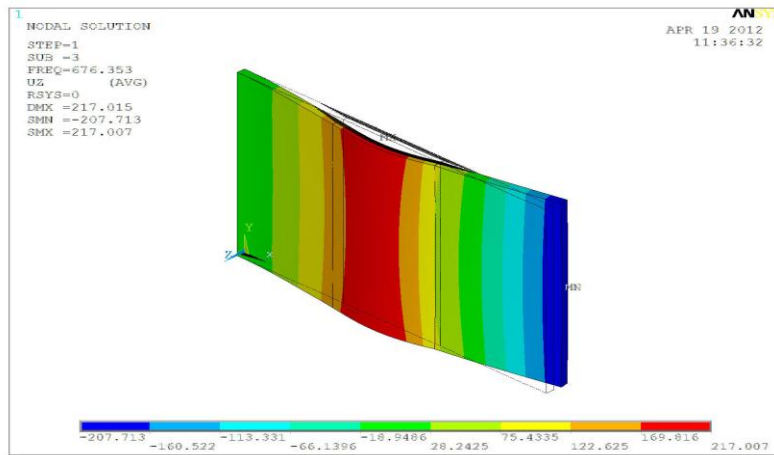


c)

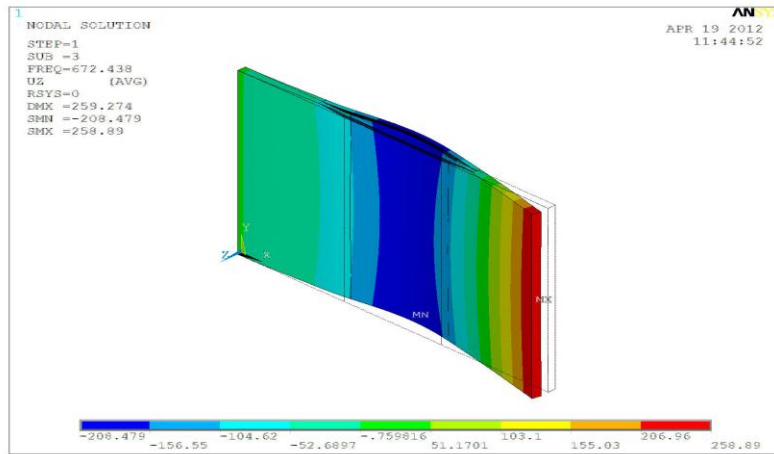
Şekil 5.24 a) Hasarsız, b) üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 2. mod şekilleri



a)

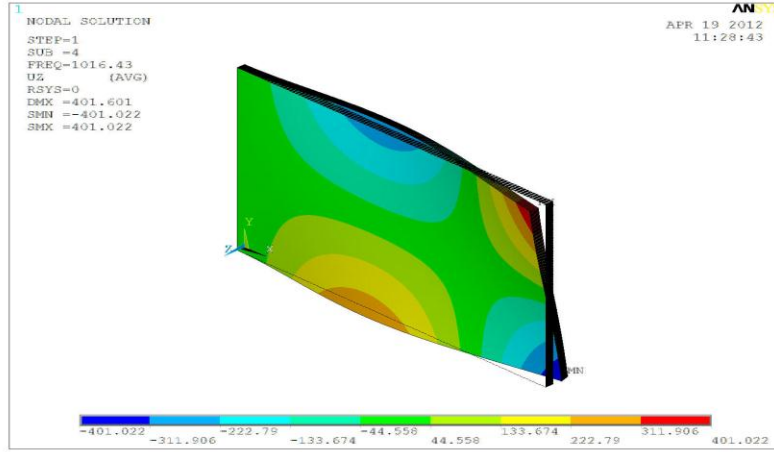


b)

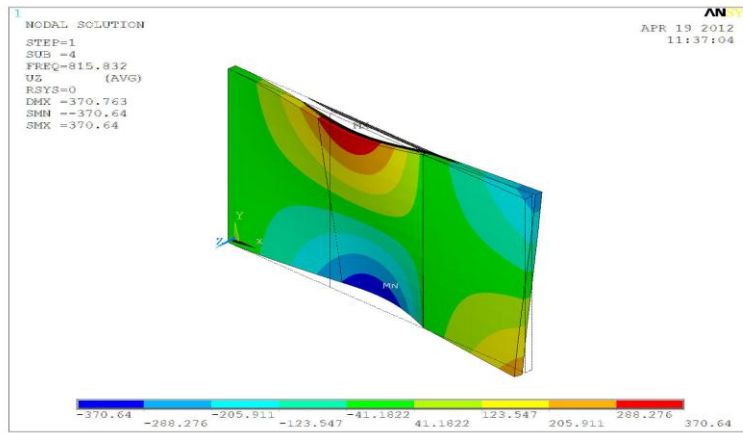


c)

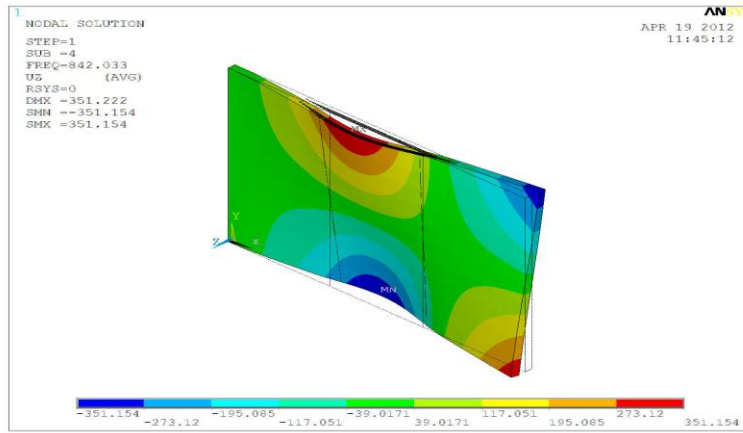
Şekil 5.25 a) Hasarsız, b) üçgen görümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 3. mod şekilleri



a)

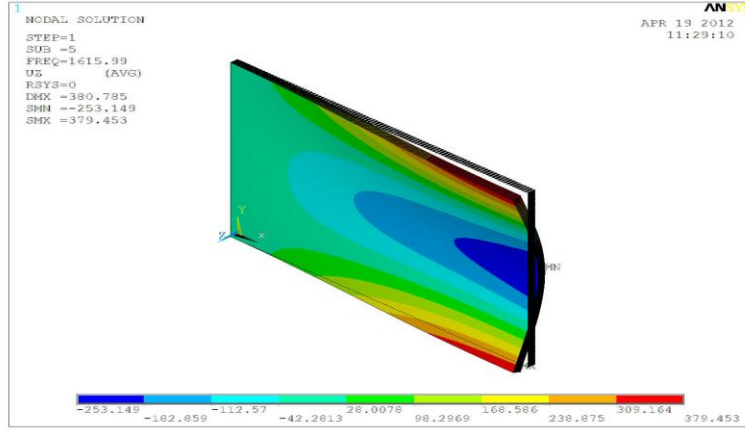


b)

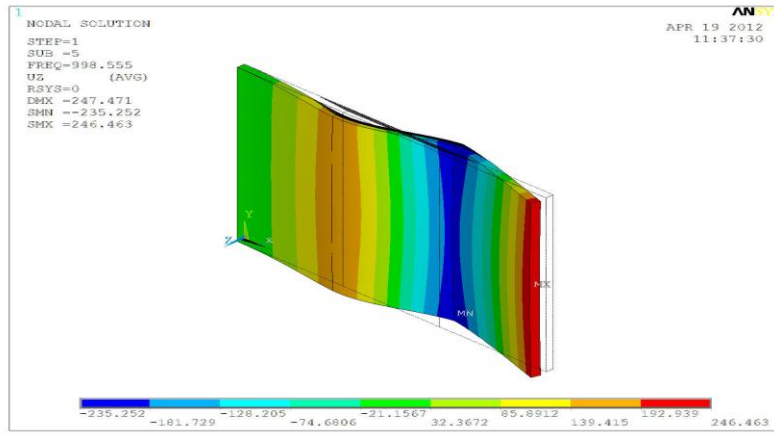


c)

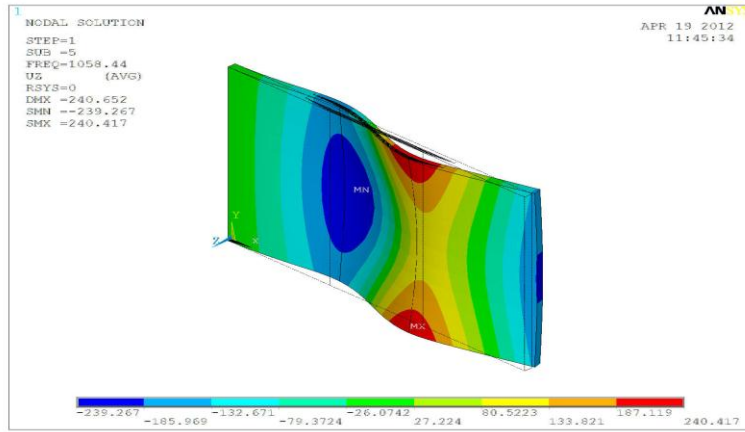
Şekil 5.26 a) Hasarsız, b) üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 4. mod şekilleri



a)



b)



c)

Şekil 5.27 a) Hasarsız, b) üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı, c) ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarlı tabakalı kompozit modellerin 5. mod şekilleri

## 6. YORUMLAR

Bu tezde, düşük hızlı darbe yüklemesi sonucunda çok sayıda şerit delaminasyon hasarı oluşmuş E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit plakların titreşimi üzerine çalışılmıştır. Nümerik çalışma için ANSYS ticari amaçlı sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır.

Tek delaminasyon uzunluğunun ve derinliğinin, sabit uzunluktaki delaminasyon sayısının (tek delaminasyondan 15 delaminasyona kadar) ve darbe yüklemesi sonucunda oluşan kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyonların doğal frekansa ve mod şekillerine etkisi belirlenmiştir. Ayrıca en büyük delaminasyon boyutunun, küçük delaminasyon boyutlarının ve fiber oryantasyonunun kompozit plağın doğal frekansı üzerine etkisi nümerik olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- ❖ En dış ara yüzde bulunan tek delaminasyonun uzunluğu arttıkça, tabakalı kompozit malzemenin doğal frekansı azalmaktadır.
- ❖ Kalınlık boyunca sabit uzunluğa sahip tek delaminasyon, dış ara yüzlerden orta ara yüzlere ilerledikçe malzemenin doğal frekansı azalma eğilimindedir.
- ❖ Tabaka ara yüzlerindeki eşit uzunluktaki delaminasyon sayısının artması tabakalı kompozit malzemenin doğal frekansını azaltmaktadır.
- ❖ En dış ara yüzde bulunan en uzun delaminasyonun sabit kısalma oranı ile diğer ara yüzlere devam etmesi sonucunda oluşan kalınlık doğrultusunda üçgen görünümlü delaminasyon hasarı, tabakalı kompozit malzemenin doğal frekans değerini düşürmektedir.
- ❖ Kalınlık doğrultusunda üçgen görünümlü delaminasyon hasarında her ara yüzdeki delaminasyon uzunluğunu belirleyen kısalma oranının artması kompozit malzemenin doğal frekansını artırmaktadır.
- ❖ Orta ara yüzeye kadar kalınlık doğrultusunda üçgen ve ters üçgen görünümlü delaminasyon hasarında kısalma oranı sabit tutulduğunda, en büyük delaminasyon uzunluğunun artması her iki tip hasarda da doğal frekansın düşmesine neden olmuştur.
- ❖ Fiber oryantasyonunun doğal frekans değerleri üzerindeki etkisine bakıldığında, en yüksek doğal frekans değeri  $[0^0/90^0]_{4s}$  şeklindeki dizilimde elde edilirken, en

küçük doğal frekans  $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]_{4s}$  ve  $[-45^{\circ}/+45^{\circ}]_{4s}$  dizilime sahip kompozit malzemede elde edilmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

- Abrate, S. (1998). *Impact on Composite Structures*, Cambridge University Press, London, 304p
- Acharyya, A.K., Chakravorty, D. ve Karmakar, A. (2009). Bending characteristics of delaminated composite cylindrical shells – A finite element approach, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 28, 965-978.
- Alnefaie, K. (2009). Finite element modelling of composite plates with internal delamination, *Composite Structures*, Vol. 90, 21-27
- ANSYS 13.0 Help, 2012
- Aslan, Z., Karakuzu, R. ve Sayman, O., (2002). Dynamic characteristics of laminated woven E-Glass–epoxy composite plates subjected to low-velocity heavy mass impact, *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, 2421-2441.
- Aslan, Z., Karakuzu, R. ve Okutan, B., (2003). The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading, *Composite Structures*, Vol. 59, 119-127.
- Della, C.N., Shu, D. ve MS Rao, P. (2004). Vibration of beams with two overlapping delaminations, *Composite Structures*, Vol. 66, 101-108.
- Della, C.N. ve Shu, D. (2005). Vibration of beams with double delaminations, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 282, 919-935.
- Della, C.N. ve Shu, D. (2007). Vibration of beams with two overlapping delaminations in prebuckled states, *Composites: Part B*, Vol. 38, 109-118.
- Della, C.N. ve Shu, D. (2009). Free vibration analysis of multiple delaminated beams under axial compressive load, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 28, 1365-1381.
- Ersoy, H.Y. (2002). *Kompozit Malzeme, Literatür Yayınları*, İstanbul, 277s
- Gao, F., Jiao, G. Ve Lu, Z. (2007). Mode II delamination and damage resistance of carbon/epoxy composite laminates interleaved with thermoplastic particles, *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, 111-123.
- Ghoshal, A., Kim, S.H., Kim, J., Choi, S.B., Prosser, W.H. ve Tai, H. (2006). Modeling delamination in composite structures by incorporating the Fermi–Dirac distribution function and hybrid damage indicators, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 42, 715-725.

- Gibson, R.F. (1994). Principles of Composite Material Mechanics, Department of Mechanical Engineering Wayne State University, Detroit, Michigan, 504p
- Guan, Z. ve Yang, C. (2002). Low-velocity impact and damage process of composite laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, 851-871.
- Hu, N., Fukunaga, H., Kameyama, M., Aramaki, Y. ve Chang, F.K. (2002). Vibration analysis of delaminated composite beams and plates using a higher-order finite element, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, 1479-1503.
- Jones, R.M. (1998). *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, PA, 538p
- Khalili, S.M.R., Shokuhfar, A., Ashenai Ghasemi, F. ve Malekzadeh, K. (2007). Dynamic response of smart hybrid composite plate subjected to low-velocity impact, *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, 2347-2370.
- Lee, J. (2000). Free vibration analysis of delaminated composite beams, *Computers and Structures*, Vol. 74, 121-129.
- Lee, S., Park, T. ve Voyiadjis, G.Z. (2002). Free vibration analysis of axially compressed laminated composite beam-columns with multiple delaminations, *Composites: Part B*, Vol. 33, 605-6017.
- Lee, Y.J. ve Huang, C.H. (2003). Ultimate strength and failure process of composite laminated plates subjected to low-velocity impact, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 22, 1059-1081.
- Luo, S.N., Fu Y.M. ve Cao Z.Y. (2004). Non-linear vibration of composite beams with an arbitrary delamination, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 271, 535-545.
- Oh, J., Cho, M. ve Kim, J.S. (2005). Dynamic analysis of composite plate with multiple delaminations based on higher-order zigzag theory, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, 6122-6140.
- Parhi, P.K., Bhattacharyya, S.K. ve Sinha, P.K. (2000). Finite element dynamic analysis of laminated composite plates with multiple delaminations, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 19, 863-882.
- Ramtekkar, G.S. (2009). Free vibration analysis of delaminated beams using mixed finite element model, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 328, 428-440.
- Reddy, J.N. (2004). *Mechanics of Laminate Composite Plates and Shells Theory and Analysis*. CRC Press, Florida, 821p
- Shen, M.H.H. ve Grady, J.E. (1992). Free vibrations of delaminated beams, *AIAA Journal*, Vol. 30 (5), 1361–1370

- Shu, D. ve Della, C.N. (2004,a). Free vibration analysis of composite beams with two non-overlapping delaminations, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, 509-526
- Shu, D. ve Della, C.N. (2004,b). Vibrations of multiple delaminated beams, *Composite Structures*, Vol. 64, 467-47.
- Soy, U. (2009). *Kompozit Malzemeler*, SAÜ Teknoloji Fakültesi Fotokopi Merkezi, Sakarya, 7s
- Şahin, Y. (2006). *Kompozit Malzemelere Giriş*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 424s
- Şahin, M. (2008). *Burkulmaya Maruz Tabakalı Kompozit Plakların Deneysel ve Nümerik Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- Tita, V., Carvalho, J. ve Vandepitte, D. (2008). Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches, *Composite Structures*, Vol. 83, 413-428
- Toprak, T. (1977). *Mekanik Titreşimler*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 319s.
- URL1:<http://www.scribd.com/doc/80551602/Kompozit-Malzemeler-Ders-Notlar%C4%B1>
- URL2:[http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme\\_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf](http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf)
- Uyaner, M. ve Kara, M. (2007). Dynamic response of laminated composites subjected to low-velocity impact, *Journal of Composite Materials*, 41, 2877-2896.
- Vaidya, U. K. (2011). Impact response of laminated and sandwich composites, *CISM Courses nad Lectures*, Vol. 526, 97-191
- Yam, L.H., Wei, Z., Cheng, L. ve Wong, W.O. (2004). Numerical analysis of multi-layer composite plates with internal delamination, *Computers and Structures*, Vol. 82, 627-637
- Zak, A., Krawczuk M. ve Ostachowicz, W. (2000). Numerical and experimental investigation of free vibration of multilayer delaminated composite beams and plates, *Computational Mechanics*, Vol. 26, 309-315.

## 8. ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel bilgiler

<b>Adı Soyadı</b>	Asım Anıl ÖNDER
<b>Doğum Yeri ve Tarihi</b>	Sivas, 15/06/1985
<b>Medeni Hali</b>	Bekar
<b>Yabancı Dil</b>	İngilizce
<b>İletişim Adresi</b>	Mevlana Cad. Nasuhoğlu Apt. A Blok. No: 29/14 Sivas
<b>E-posta Adresi</b>	asimonder85@gmail.com

### Eğitim ve Akademik Durumu

<b>Lise</b>	Cumhuriyet Anadolu Lisesi, 2003
<b>Lisans</b>	Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 2007

### İş Tecrübesi

Araştırma Görevlisi, Anadolu Üniversitesi  
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine  
Mühendisliği Bölümü, 2012.