

**T.C.**  
**BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ORÇUN DEMİRÖZ**

**BOLU, TEMMUZ - 2019**

**T.C.**  
**BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ORÇUN DEMİRÖZ**

**BOLU, TEMMUZ - 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Orçun DEMİRÖZ** tarafından hazırlanan “**TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZİ**” adlı tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 18.07.2019 tarihinde savunularak **Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü** Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

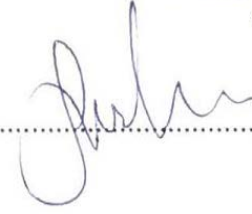
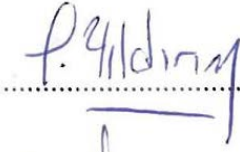
### Jüri Üyeleri

Danışman  
Prof. Dr. Murat PAKDİL  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye  
Doç. Dr. Gürcan YILDIRIM  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DAL  
Sakarya Üniversitesi

### İmza



Mezuniyet tarihi: ...../...../2019

Prof. Dr. Ömer ÖZYURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Aileme,**



## ETİK BEYAN

Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

1. Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  2. Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  3. Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  4. Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  5. Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Orçun DEMİRÖZ

## ÖZET

**TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZİ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ORÇUN DEMİRÖZ**  
**BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MURAT PAKDİL)**

**BOLU, TEMMUZ - 2019**

Bu çalışmada fiber malzemesi cam-elyaf, matris malzemesi ise epoksi olan bir ucu ankastre diğer ucu serbest 8 katmanlı ve farklı dizilim açlarına sahip 9 adet U profil kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerin deneysel ortamda doğal frekansları ölçülmüş ardından deney numunesi Ansys programında modellenerek titreşim analizi yapılmıştır. Simetrik ve antisimetrik dizilişe sahip kirişlere ait doğal frekanslar analiz edilmiş ve tabaka açılarının doğal frekansa etkileri araştırılmıştır. Ansys programı ile elde edilen dikey yöndeki doğal frekans değerleri ile deneysel ölçümlerden elde edilenler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sayısal ve deneysel sonuçlara ait verilerin birbirleriyle tutarlı olduğu görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Tabakalı Kompozit Kiriş, Titreşim Analizi, Doğal Frekans, Sonlu Elemanlar Metodu

## **ABSTRACT**

**VIBRATION ANALYSIS OF THE LAMINATED COMPOSITES BEAM  
MSC THESIS  
ORÇUN DEMİRÖZ  
BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF  
NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
(SUPERVISOR: PROF. DR. MURAT PAKDİL)**

**BOLU, JULY 2019**

In this study, 9 pieces laminated composite U profile beam which fixed from one end and has 8 layer with different array angle were produced with fiber glass and epoxy. The natural frequencies of these beams were measured in experimental environment and then the samples were modeled in Ansys finite element method to performed vibration analysis. The naturel frequencies in the vertical direction obtained by the Ansys program were compared with obtained from experimental measurements. As a result, it was seen that the data of the numerical and experimental results were consistent with each other.

**KEYWORDS:** Laminated Composited Beam, Vibration Analysis, Naturel Frequency, Finite element method

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	V
ABSTRACT .....	VI
İÇİNDEKİLER .....	VII
ŞEKİL LİSTESİ.....	X
ÇİZELGE LİSTESİ.....	XII
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ .....	XIII
TEŞEKKÜR .....	XIV
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KOMPOZİT MALZEMELER .....</b>	<b>2</b>
2.1 Kompozit Malzemelerin Tanıtımı .....	2
2.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	4
2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	6
2.3.1 Kompozitlerin Matris Malzemelerine Göre Sınıflandırılması.....	6
2.3.1.1 Metal Matrisli Kompozitler.....	8
2.3.1.2 Polimer Matrisli (Plastik) Kompozitler.....	8
2.3.1.2.1 Termoplastikler.....	9
2.3.1.2.2 Termoset plastikler .....	9
2.3.1.2.3 Epoksi reçineler .....	10
2.3.1.2.4 Polyester reçineler.....	10
2.3.1.2.5 Vinilester reçineler.....	10
2.3.1.2.6 Fenolik reçineler .....	11
2.3.1.3 Plastik-Plastik Yapılı Kompozit Malzemeler.....	11
2.3.1.4 Plastik-Metal Fiber Yapılı Kompozitler.....	11
2.3.1.5 Plastik-Cam Elyaf Yapılı Kompozitler .....	12
2.3.1.6 Plastik-Köpük Yapılı Kompozitler .....	12
2.3.1.7 Seramik Matrisli Kompozitler.....	12
2.3.2 Kompozitlerin Takviye Elemanlarına Göre Sınıflandırılması.....	13
2.3.2.1 Elyafli Kompozitler.....	14
2.3.2.1.1 Elyaf Çeşitleri .....	16
2.3.2.1.1.1. Cam Elyaf .....	16
2.3.2.1.1.2. Karbon Elyaf (Grafit).....	17
2.3.2.1.1.3. Aramid Elyaf (Kevlar).....	18
2.3.3 Parçacıklı Kompozitler .....	18
2.3.3.1 Karma (Hibrid) Kompozitler.....	19
2.3.4 Tabakalı (Lamina) Kompozit Malzemeler .....	19
2.3.5 Tabakalı Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	20
2.3.5.1 Kullanılan Malzeme Türüne Göre Tabakalı Kompozitler .....	21
2.3.5.1.1 Metal tabakalı kompozit malzemeler.....	21
2.3.5.1.2 Cam tabakalı kompozit malzemeler .....	22
2.3.5.1.3 Plastik esaslı tabakalı kompozit malzemeler .....	22



2.3.5.1.4	Ahşap tabakalı kompozit malzemeler.....	23
2.3.5.2	Dizilimine Göre Tabakalı Kompozitler .....	23
2.3.5.2.1	Simetrik Tabakalar.....	23
2.3.5.2.2	Antisimetrik Tabakalar .....	24
2.3.6	Tabakalı Kompozitlerin İsimlendirmesi .....	25
2.4	Kompozit Malzemelerin İmalat Yöntemlerine Göre Sınıflandırması	26
2.4.1	Elle yatırma yöntemi.....	27
2.4.2	Püskürtme Yöntemi .....	27
2.4.3	Torba Kalıplama (vakumlama) Yöntemi.....	28
2.4.4	Elyaf Sarma Yöntemi.....	29
2.4.5	Prepreg (Otoklav) Kalıplama Yöntemi.....	29
2.4.6	Reçine Transfer Metodu (RTM).....	30
2.4.7	Profil Çekme Yöntemi (Pultrüzyon).....	31
<b>3.</b>	<b>TİTREŞİM.....</b>	<b>32</b>
3.1	Titreşim .....	32
3.1.1	Periyodik Titreşim Hareketi.....	33
3.1.1.1	Basit Harmonik Titreşim Hareketi.....	33
3.1.2	Random Titreşim Hareketi.....	37
3.1.3	Rezonans.....	38
3.1.4	Titreşimin Ölçülmesi .....	38
3.1.4.1	Titreşim Transdüserleri .....	38
3.1.5	Titreşim Analizi .....	39
3.1.5.1	Zaman-Alanı Analizi.....	40
3.1.5.2	Frekans-Alanı Analizi .....	40
3.2	Modal Analiz .....	43
3.3	Tabakalı Kompozit Kirişlerde Titreşim Analizi.....	45
<b>4.</b>	<b>MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>47</b>
4.1	Deney Esnasında Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar.....	48
4.1.1	İvmeölçer .....	48
4.1.2	Darbe Çekici .....	49
4.1.3	Sinyal Şartlandırıcı .....	49
4.1.4	Sinyal Analiz Yazılımı.....	50
4.2	Titreşim verisi alma ve U Profil Kirişin Doğal Frekans Tespiti .....	51
4.3	DeneySEL Sonuçların Sonlu Elemanlar Analizi ile Doğrulanması.....	53
4.3.1	CAD (Computer Aided Design-Bilgisayar Destekli Tasarım) modelinin oluşturulması .....	54
4.3.2	Tabakaların ve fiber diziliş açılarının Ansys’de tanımlanması ...	54
4.3.3	Malzeme özelliklerinin tanımlanması.....	55
4.3.4	Yapının küçük parçalara ayrılması (Meshing).....	56
4.3.5	Sınır şartlarının girilmesi .....	58
4.3.6	Sonuçların görüntülenmesi .....	59
4.3.7	Titreşim analizinin gerçekleştirilmesi.....	60
<b>5.</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>63</b>
5.1	8 Katmanlı U Profil Kompozit Kirişlerde Titreşim Analizi Ölçüm Sonuçları.....	63
5.1.1	Simetrik Dizilişe Sahip 8 Katmanlı U Profil Kompozit Kirişlerin Titreşim Analizi .....	64
5.1.2	Simetrik Olmayan (Antisimetrik) Dizilişe Sahip 8 Katmanlı U Profil Kompozit Kirişlerde Titreşim Analizi.....	65

<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>67</b>
<b>7. KAYNAKLAR.....</b>	<b>68</b>
<b>8. ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>77</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2.1. Malzemelere ait özgül mukavemet değerlerinin zamanla değişimi (Baba, 2013) .....	3
Şekil 2.2. Kompozit Malzeme (Erdoğan, 2017) .....	4
Şekil 2.3. Kompozitlerin Matris ve Takviye Elemanlarına Göre Gruplandırılması (Aydın, 2018).....	6
Şekil 2.4. Kompozit malzemelerin matris elemanlarına göre sınıflandırılması (Yanen, 2016).....	7
Şekil 2.5. Termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin kıyaslanması (Ömercikoğlu, 2009) .....	9
Şekil 2.6. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması (Atlıhan, 2010) .....	13
Şekil 2.7. Çekme dayanımının elyaf yönelimine göre değişimi (Kurtuluş, 2016) .....	15
Şekil 2.8. Kompozitlerin elyaf formları ve yönlenmeleri (Kurtuluş, 2016) ....	16
Şekil 2.9. Piyasada sıkça kullanılan dokuma çeşitleri (Ömercikoğlu, 2009)....	18
Şekil 2.10. Tabakalı kompozit plakalarda matris ve fiber yapıların görünümü (Haşim, 2014).....	20
Şekil 2.11. Takviye lif kullanıma göre tabaka türleri (Kaçar, 2009) .....	20
Şekil 2.12. Bimetalik malzeme (Kılıç, 2006) .....	22
Şekil 2.13. Ahşap Tabakalı Kompozitler (Kılıç, 2006) .....	23
Şekil 2.14. İzotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Darıcık, 2011).....	24
Şekil 2.15. Ortotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Darıcık, 2011).....	24
Şekil 2.16. Antisimetrik Tabakalar (Darıcık, 2011) .....	25
Şekil 2.17. Farklı lif oryantasyonlarına sahip tabakalardan oluşan kiriş yapısı (Kaçar, 2009).....	25
Şekil 2.18. $[45_3 / 0_4 / 90_2 / 60]$ şeklinde dizilmiş plağın gösterimi (Özakıncı, 2006).....	26
Şekil 2.19. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri (İpek, 2015).....	26
Şekil 2.20. Elle yatırma yöntemi (İmak, 2015).....	27
Şekil 2.21. Püskürtme metodu (Koruvatan, 2008).....	28
Şekil 2.22. Torba Kalıplama Yöntemi (Atlıhan, 2010) .....	28
Şekil 2.23. Elyaf Sarma Yöntemi (Yanen, 2016) .....	29
Şekil 2.24. Otoklav Üretim Şekli (Demirel, 2007) .....	30
Şekil 2.25. Reçine Transfer Metodu (Gülнар, 2016) .....	30
Şekil 2.26. Profil Çekme Yöntemi (Kılıç, 2006) .....	31
Şekil 3.1. Titreşim Sistemi (Çay, 2006).....	32
Şekil 3.2. Harmonik Titreşim ve Parametrelerin Gösterimi (Bilge,2015).....	33
Şekil 3.3. Titreşim Grafiği (Bilge,2015).....	35
Şekil 3.4. Genlik-Frekans Grafiği (Karadayı,2011).....	35
Şekil 3.5. Yer değiştirme, hız ve ivme arasındaki ilişki (Bilge, 2015).....	36
Şekil 3.6. Logaritmik ve lineer ölçekli frekans spektrumlarının karşılaştırılması .....	37
Şekil 3.7. Titreşim Ölçüm Zinciri (Çay, 2006).....	38

Şekil 3.8. Transdüserlerin çalışma aralığı (Bilge, 2015) .....	39
Şekil 3.9. Genlik-zaman grafiği (Bilge, 2015).....	40
Şekil 3.10. Genlik-frekans grafiği (Bilge,2015) .....	40
Şekil 3.11. FFT Dönüşümü (Baykara, 2009).....	41
Şekil 3.12. Karmaşık dalga formu (Karahan,2005) .....	42
Şekil 3.13. Filtreden geçirilmiş titreşim sinyalleri (Karahan,2005).....	42
Şekil 3.14. Titreşim sinyallerinin zarfı (Karahan,2005) .....	42
Şekil 3.15. Zarf Spektrumu (Karahan,2005).....	43
Şekil 3.16. Deneysel Modal Analizde Ölçüm Yöntemi (Bayraktar ve Türker, 2005).....	44
Şekil 3.17. Etki ve Tepki fonksiyonlarının zaman ortamından frekans ortamına dönüştürülmesi (Bayraktar ve Türker,2005) .....	44
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan 8 tabakalı U profil tabakalı kompozit kirişler	47
Şekil 4.2. U Profil altına monte edilen ivmeölçer.....	48
Şekil 4.3. Titreşim ölçümünde kullanılan Brüel&Kjaer marka darbe çekici....	49
Şekil 4.4. Brüel Kjaer PHOTON+ sinyal şartlandırıcı .....	50
Şekil 4.5. Kullanılan sinyal analiz yazılımından bir görüntü.....	51
Şekil 4.6. Bir ucundan ankastre edilmiş 8 tabakalı kompozit U profil kiriş.....	51
Şekil 4.7. İvmeölçer'in U profil kiriş üzerindeki konumu.....	52
Şekil 4.8. Darbe Çekici'nin U Profil Kiriş üzerine uygulanması .....	52
Şekil 4.9. Sonuçların Photon programı üzerinden okunması.....	53
Şekil 4.10. U Profil Kiriş'in CAD modelinin oluşturulması .....	54
Şekil 4.11. Tabaka özelliklerinin belirlenmesi .....	55
Şekil 4.12. Fiber diziliş açılarının tanımlanması .....	55
Şekil 4.13. Cam-elyaf epoksi kompozit malzemenin teknik özelliklerinin Ansy'de tanımlanması.....	56
Şekil 4.14. Yapının Mesh özelliklerinin belirlenmesi .....	57
Şekil 4.15. U profil kirişin Mesh işlemi yapılmış durumu .....	57
Şekil 4.16. Ansys'te "Fixed Support" sabitleyici tanımlama .....	58
Şekil 4.17. U profil kirişin sabitlendiği yüzey .....	59
Şekil 4.18. Ansys'de mod sayısı ve frekans aralığını belirleme .....	59
Şekil 4.19. Ansys'de sonuçların görüntülenmesi.....	60
Şekil 4.20. U Profil'in $[0^0]_8$ fiber dizilişinde birinci mod (eğilme) görünümü ..	60
Şekil 4.21. U Profil'in $[0^0]_8$ fiber ikinci mod (burulma) görünümü.....	61
Şekil 4.22. U Profil'in $[0^0]_8$ fiber üçüncü mod görünümü .....	61
Şekil 4.23. U Profil'in $[0^0]_8$ fiber dördüncü mod görünümü.....	61
Şekil 4.24. U Profil'in $[0^0]_8$ fiber beşinci mod görünümü .....	62
Şekil 5.1. Tabaka dizilimlerinin doğal frekansa etkisi.....	66

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1.</b> Bazı kompozit ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikler bakımından karşılaştırılması (Baba, 2013).....	2
<b>Çizelge 2.2.</b> Kompozit malzemelerin kullanım alanlarına göre örnekler (Topal, .....	7
<b>Çizelge 2.3.</b> Bazı matris malzemelerinin özellikleri (Şahin, 2008) .....	11
<b>Çizelge 2.4.</b> Matrislerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Aydın, 2018) .....	13
<b>Çizelge 2.5.</b> Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri (Şahin, 2008).17	
<b>Çizelge 4.1.</b> Cam-elyaf epoksi kompozit malzemenin teknik özellikleri .....	47
<b>Çizelge 5.1.</b> $[0^0]_8$ fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri.....	63
<b>Çizelge 5.2.</b> $[90^0]_8$ fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri.....	63
<b>Çizelge 5.3.</b> $[0^0/0^0/30^0/30^0]_s$ simetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri .....	64
<b>Çizelge 5.4.</b> $[0^0/0^0/45^0/45^0]_s$ simetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri.....	64
<b>Çizelge 5.5.</b> $[0^0/0^0/60^0/60^0]_s$ simetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri .....	64
<b>Çizelge 5.6.</b> $[0^0/0^0/90^0/90^0]_s$ simetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri .....	65
<b>Çizelge 5.7.</b> $[0^0_2/45^0_2/0^0_2/45^0_2]$ antisimetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri .....	65
<b>Çizelge 5.8.</b> $[0^0_2/60^0_2/0^0_2/60^0_2]$ antisimetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri .....	65
<b>Çizelge 5.9.</b> $[0^0_2/90^0_2/0^0_2/90^0_2]$ antisimetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri .....	66
<b>Çizelge 5.10.</b> Tabakalı kompozit U profillerin fiber açıları (tabaka dizilimleri) .....	66

## KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

<b>FFT</b>	: Fast Fourier Transform
<b>FRF</b>	: Frequency Response Function
<b>SEM</b>	: Sonlu Elemanlar Metodu
<b>RMS</b>	: Kök Değeri
<b>RPM</b>	: Revolution Per Minute



## TEŞEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca ve bu çalışmamın hazırlanma sürecinde her türlü yardımda bulunarak yol gösteren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Murat PAKDİL'e en derin Őükran ve minnetimi sunarım



## 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk değerlerine sahip oldukları için günümüzde uzay sanayii, havacılık, nükleer ve petrol endüstrileri gibi önemli alanlarda tercih sebebi olmuşlardır. Genellikle bu alanlarda tercih edilen kompozit malzemeler kiriş, kabuk ve plak şeklindedir. Bu yapıların farklı zorlama koşulları altında dinamik ve statik davranışlarının belirlenebilmesi, güvenli bir mühendislik tasarımı yapabilmek açısından çok önemlidir. (Özakıncı, 2006).

Kompozit malzemeler bu avantajlarına karşın yapısal bütünlüklerine önemli şekilde etkiyen kusur ve hasarlara da açıktırlar. Özellikle tabakalı kompozit yapılarda tabakalar arası zayıf mukavemet görülmesi ve buna bağlı oluşan hasarlar tabakalar arası kırılmalara sebep olabilirler. Bu tür hasarları önleyebilmek için malzemenin hasara uğramasına yol açan rezonans durumunu engelleyebilmek çok önemlidir. Rezonans durumunu önleyebilmek için malzemenin doğal frekansını bilmek ve doğal frekansı elde edebilecek şekilde fiber açılarını değiştirebilmek gereklidir. Bu çalışma deneysel ve sayısal olarak doğal frekansları bulunan tabakalı kompozit malzemede tabaka dizilim açılarının doğal frekansa etkisinin görülmesi sağlanmıştır.



## 2. KOMPOZİT MALZEMELER

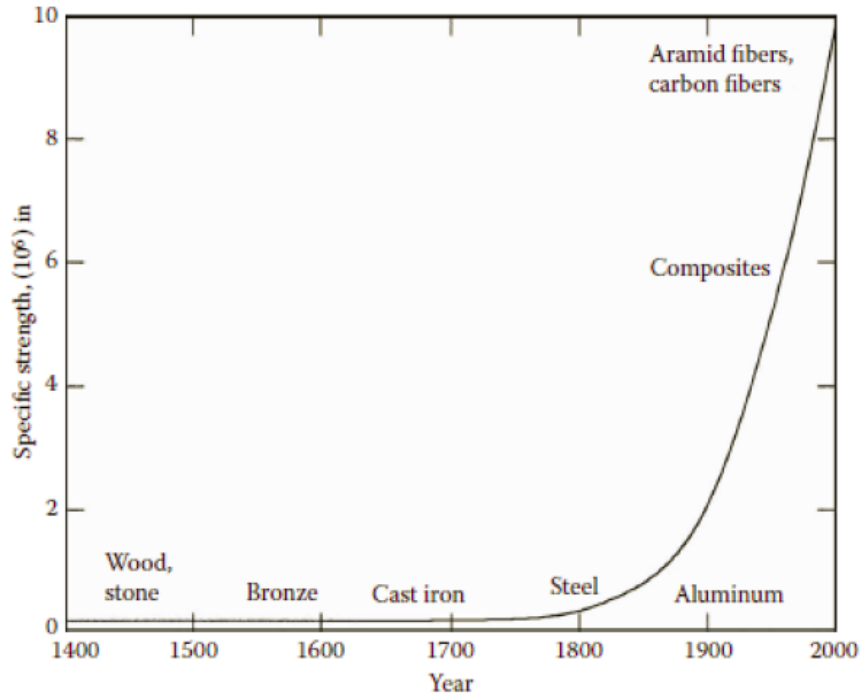
### 2.1 Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

Malzemeleri genel olarak seramikler, metaller ve organik malzemeler olarak 3 ana grupta toplamamız mümkündür. Bu 3 ana gruptan her birinin birbirlerine karşı birçok dezavantajı ve üstünlüğü bulunmaktadır (Alar, 2002). Metaller yüksek ısı ve mukavemete dayanıklı olmalarına karşın yüksek yoğunluğa sahip oldukları için ağırdırlar. Plastikler yoğunluklarının düşük olması sebebi ile hafif olmalarına karşın yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıklarında yapısal bütünlüklerini kaybederler. Seramikler ise, hafif ve mukavemetleri yüksek olsa da gevrek oldukları için kolayca kırılırlar (Atlıhan, 2010). Farklı malzemelerin üstün özelliklerinden faydalanabilmek amacıyla iki veya daha çok, aynı ya da farklı gruplardaki malzemelerin uygun olan özelliklerinin yeni bir malzemede toplanabilmesi için makro düzeyde birleştirilme ile oluşturulan performansı arttırılmış yeni malzemelere ise kompozit denir (Çolak, 2008).

**Çizelge 2.1.** Bazı kompozit ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikler bakımından karşılaştırılması (Baba, 2013)

MALZEME	Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Çekme Dayanımı MPa	Elastiklik Modülü Gpa	Özgül Çekme Dayanımı $\sigma_c / \rho$	Özgül Elastik Modülü E/ $\rho$
Alaşımız Çelik	7,9	459	203	58	26
Alüminyum	2,8	84	71	30	25
Al Alaşımı 2024	2,9	247	69	88	25
Pirinç	8,5	320	97	38	11
Ahşap (Kayın)	0,7	110	13	157	19
Kemik	1,8	138	26	75	14
Bor Epoksi KM	1,8	1600	224	889	124
Karbon Epoksi	1,6	1260	218	788	136
Kevlar Epoksi	1,4	1400	77	1000	55
Cam Epoksi	1,8	1400	56	824	33

Kompozit malzemeleri mekanik özellikleri bakımından geleneksel malzemeler ile kıyasladığımızda özgül elastisite modülünün ve özgül çekme dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 2.1’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



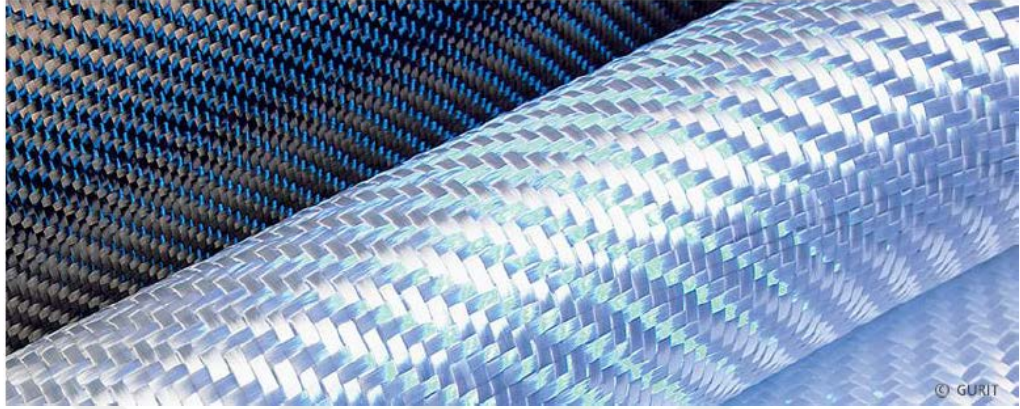
**Şekil 2.1.** Malzemelere ait özgül mukavemet değerlerinin zamanla değişimi (Baba, 2013)

Kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç özellikle II. Dünya Savaşı sonrasında havacılık sektöründeki gelişmelere istinaden ortaya çıkmıştır. Kullanımda ihtiyaç duyulan malzemelerin çok yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olunmasının beklenmesi mevcut olarak kullanımda olan klasik malzemelerin bu ihtiyaçları karşılamak açısından yetersiz kalması kompozit malzeme imalatının hızlanmasının ve yaygınlaşmasının önünü açmıştır (Aydın, 2018).

Kompozit malzemeler genel olarak uzay ve hava sanayii (uzay mekiği konstrüksiyonu ve roket tasarımı), petrol endüstrisi, nükleer, deniz ve kara taşımacılığı, elektronik ve elektroteknik alanı, spor malzemeleri, tıp gereçlerin, robotlar ve müzik aletleri gibi çok farklı alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımı ile hafiflik, estetik, elektrik ve ısıl iletkenlik, yorulma, mekanik ve aşınma dayanımı, rijitlik ve kırılma tokluğu gibi özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenmektedir (Gürlek, 2018).

Kompozit malzemelerin genel olarak aşağıda yazılı olan dört koşulu sağlaması istenir (Doğan, 2009).

- Üç boyutlu özellikteki farklı malzemelerin bir araya getirilmesi
- Kompoziti oluşturan fiber ve matris malzemelerinin bir bütün olarak davranması
- Hiçbir bileşenin tek başına sahip olmadığı özelliklerde olması
- İnsan yapımı bir malzeme olması



**Şekil 2.2.** Kompozit Malzeme (Erdoğan, 2017)

Kompozit malzemeler takviye malzeme ve matris malzeme birleşiminden oluşur. Takviye malzeme, kompozite özelliğini veren ana unsurları oluşturur. Matris kısım ise takviye malzemeyi sarar ve hacimsel yoğunluğun oluşmasını sağlar. Ayrıca yük altında kalan takviye malzemeyi bir arada tutar ve yükün takviye malzemeye homojen bir şekilde dağılmasına yardımcı olur. Bu sayede kompozit malzemede plastik deformasyonun meydana gelmesi durumunda takviye malzemede oluşabilecek herhangi bir hasarın diğer takviye malzemelere yayılmasını önler (Balcı, 2011).

## 2.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (Karaca, 2010; Kılıç, 2014; Eryiğit, 2006).

Avantajları;

- Yüksek mukavemet: Kompozit malzemelerin eğilme ve çekme mukavemetleri diğer metalik malzemelere göre daha yüksektir. İstenen yönde ve alanda gerekli mukavemetin verilmesi kolaydır.

- Yüksek sıcaklıklara dayanabilme kapasitesi: Düşük ısıl dirençlere sahip olan malzemelerden oluşturulmuş olan bir kompozit malzeme gerektiğinde yüksek sıcaklık koşulları altında çalışmaya imkân verebilmektedir.
- Korozyon ve Kimyasal Etkilere Karşı Direnç: Kompozit malzemeler korozyona ve kimyevi maddelere karşı dirençlidirler. Bu sebeple korozyona karşı direnç gerektiren deniz araçları yapımında ve kimyasal maddelere karşı direnç isteyen endüstriyel alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir.
- Elektriksel özellikler: Uygun malzemelerin bir araya getirilmesi ile üstün elektriksel özellikler gösterebilirler. Böylece gerektiğinde ister iletken ister yalıtkan olarak kullanılabilirler.
- Düşük ağırlık: Kompozit malzemeler ile özellikle ağırlık kriterinin önem kazandığı alanlarda ağırlıktan tasarrufa gidilebilmesine imkân tanıyarak hafif ve ucuz ürünler elde edilebilmesini sağlar.
- Şekillendirilebilme: Kompozit malzemeler kompleks parçaların tek bir işlem ile kalıplanabilmesine imkân tanımaktadır.

#### Dezavantajları;

- Kompozit malzemelerin üretimi zor ve maliyeti yüksektir
- Kompozit malzemeler nem emerler. Bu sebeple boyutsal istikrarları etkilenir.
- Kompozit malzemelerin diğer malzemeler gibi geri dönüşü yoktur.
- Kompozit malzemelerin diğer malzemeler ile kıyasladığımızda kırılma uzamaları azdır.
- Kompozit malzemelerin sıcaklık direnci matris malzemelerine bağlıdır.
- Aynı kompozit malzemeler için farklı mukavemet değerleri ölçülebilir.
- Kompozit malzemeler farklı yönlerde farklı özellikler gösterirler.
- Kompozit malzeme içlerinde bulunan hava kabarcıkları malzemenin gösterdiği yorulma davranışlarını negatif yönde etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilecek birçok operasyon lif yapısında değişime yol açabileceğinden bu malzemelerde hassas imalat pek mümkün değildir.

## 2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması üç ayrı şekilde yapılabilir.

- 1) Matris malzeme türlerine göre
- 2) Takviye elemanlarına göre
- 3) Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerine göre



Şekil 2.3. Kompozitlerin Matris ve Takviye Elemanlarına Göre Gruplandırılması (Aydın, 2018)

### 2.3.1 Kompozitlerin Matris Malzemelerine Göre Sınıflandırılması

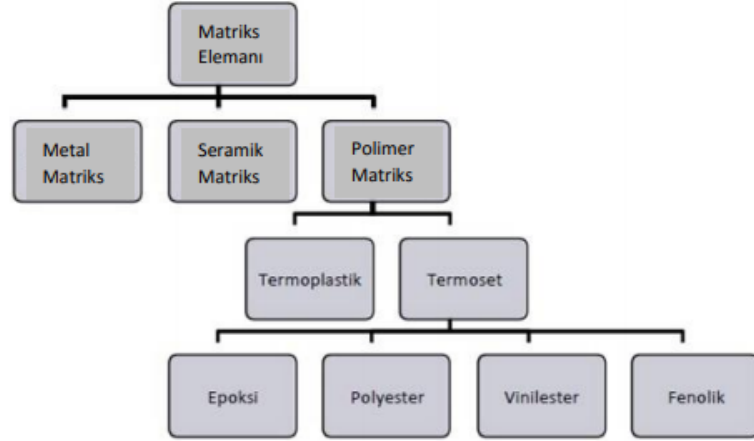
Kompozit malzemelerde matris olarak çok çeşitli malzemeler kullanılmakla birlikte genel olarak bunlar; metaller, hafif metaller, seramikler ve plastiklerdir. Matrisler; elyafları çevresel faktörlerden gelebilecek etkilere karşı korumak, elyafları bir arada tutulabilmek ve gelen yükü elyaflara homojen olarak dağıtmak şeklinde üç temel fonksiyona sahiptir. Matris ilk aşamada viskozitesi düşük özellikte seyrederken sonrasında elyafları sarabilecek katı form yapısına rahatlıkla geçebilmelidir (Kara, 2006).

**Çizelge 2.2.** Kompozit malzemelerin kullanım alanlarına göre örnekler  
(Topal, 2008)

Uygulama Konusu	Malzeme	Uygulama Örneği
<b>Mekanik İşlevler</b>		
Yüksek dayanım, hafiflik	Polimer bazlı kompozitler (matriks:epoksi reçine, florokarbon mühendislik plastikleri. Takviye: karbon, boron, aramid seramik lifler)	Uzay-havacılık, otomotiv, demiryolu, gemi-inşa, betonarme onarım ve takviye, spor malzemeleri
<b>Isıl İşlevler</b>		
Isıl dayanım, yüksek dayanım	Metal bazlı kompozitler (matriks:alüminyum, bakır, titan nikel takviye: seramik, boron metal lifler)	Nükleer reaktör, gaz türbini, uçak, ısı değiştiriciler.
	Seramik bazlı kompozitler (matriks:alumina, silikon, nitrürler takviye: seramik, metal lif)	Nükleer reaktör, gaz türbini, uçak, roket nozulu.

Kompozit malzemeler içerisinde yer alan matris malzemelerine göre üç ayrı grupta sınıflandırılabilir;

- 1) Metal Matrisli Kompozitler
- 2) Polimer Matrisli Kompozitler
- 3) Seramik Matrisli Kompozitler



**Şekil 2.4.** Kompozit malzemelerin matris elemanlarına göre sınıflandırılması  
(Yanen, 2016)

### **2.3.1.1 Metal Matrisli Kompozitler**

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde takviye elemanı olarak sürekli fiberler, süreksiz (kısa) fiberler ve partiküller kullanılmaktadır. Matris (genelde metal alaşımı) ve takviye malzemesi (genel olarak metaller arası bileşik olarak oksit, karbür veya nitrür) olmak üzere genelde iki bileşenden meydana gelmektedirler. Yüksek elastiklik, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve tekrar üretilebilirlik gibi diğer kompozit malzemelere karşı önemli avantajları mevcuttur (Karaca, 2010).

### **2.3.1.2 Polimer Matrisli (Plastik) Kompozitler**

Plastikler oksijen (O), klor (Cl), karbon (C), silisyum (Si), azot (N) hidrojen (H), flor (F) ve kükürt (S) elementlerinin bileşiminden oluşur. Bu elementlerin bir araya gelmesi ile polimer dediğimiz çok büyük moleküller meydana gelir. Bağlayıcı malzeme olarak polimer kompozitlerde en çok polyester ve epoksi kullanılır. Plastik malzemeler genel olarak reçine diye adlandırılır. Elyaf takviyeli karma malzemelerde matris olarak kullanılmakta olan plastik reçineler termoset ve termoplastikler olarak ikiye ayrılır. Kompozit malzeme imalatında en çok kullanılan reçineler ise termosetlerdir. Termosetler kullanılarak gelişmiş mekanik özelliklere sahip olması istenen malzemeler kolaylıkla üretilebilir. Termosetler içinde en çok polyesterler, epoksi reçineler, fenolik reçineler ve silikonlar kullanılır. Eğer malzemedeki yüksek mukavemet değerleri elde edilmek isteniyorsa, epoksi reçineler tercih edilir (Genç, 2011; Kılıç, 2014).

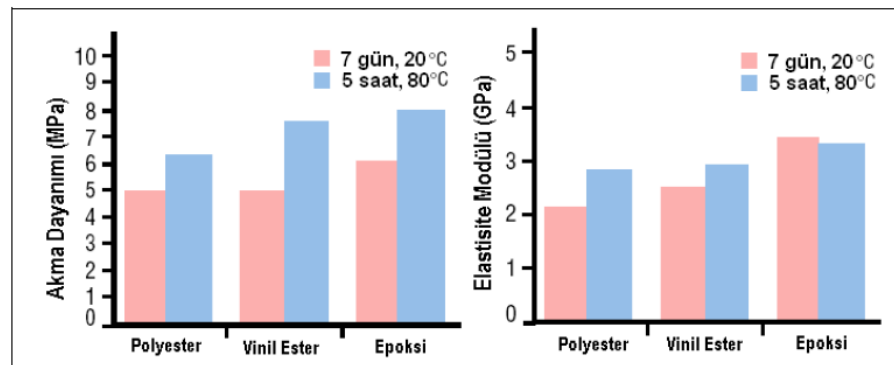
Sürekli fiberler ile kullanılan polimer matrisler termosetler ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılmaktadır. En önemli olanları sürekli fiberler ile takviye edilen polyester ve epoksi reçine matrislerdir. Polimerlerde takviye malzemesi olarak cam, bor ve karbon fiber tercih edilir (Karaca, 2010).

### 2.3.1.2.1 Termoplastikler

Lineer zincirli molekül yapısına sahiptirler ve moleküller arası zayıf bağlara sahiptirler. Eklenme polimerizasyonu ile oluşturulurlar. Bu sebeple rijit özellik göstermezler. Sıcaklıkla beraber yumuşayıp, soğuyunca tekrar sertleşen, oda sıcaklığı koşullarında yüksek viskoziteye sahip plastiklerdir. Termoset plastikler ile kıyaslandıklarında fiber ve matris arası bağın kurulabilmesi daha zordur. Bu grupta yer alan plastiklere örnek olarak asetol reçineler, akrilikler, polyamidler, PVC gibi vinil esaslı plastikler ve fluorokarbon esaslı plastikler gösterilebilir.

### 2.3.1.2.2 Termoset plastikler

Termoset plastikler sıvı formdadırlar ve en sıklıkla tercih edilen matris malzemeleridir. Sertlik ve sağlamlık kazanabilmeler için ısıtılıp kimyasal tepkimelere alınır. Fenolik ve epoksi reçineler, silikon ve polyester gibi polimerler takviye malzemesi olarak elyaf tercih edilen kompozitlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Metin, 2008). Yoğuşma polerizasyonu ile oluşup üç boyutlu ağ şeklinde molekül yapısına sahiptirler. Üretimleri sırasında yapılan polimerizasyonun geri dönüş imkânı olmadığından ısıtılarak tekrar yumuşatılması ve şekillendirilmesi mümkün değildir (Kıratlı, 2012).



Şekil 2.5. Termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin kıyaslanması (Ömercikoğlu, 2009)



### **2.3.1.2.3 Epoksi reçineler**

Geniş bir yelpazede en yaygın kullanım alanına sahip reçinelerdir. Yüksek performans değerleri elde edebilmek için farklı şekillerde formülize edilip diğer epoksi reçineler ile harmanlanabilirler. Epoksi reçineler, yapılarında iki ya da ikiden fazla sayıda epoksit bileşenlerini bulundurur. Genelde üstün performans gerektiren ve yüksek maliyetli kritik yerlerde kullanılır. Sertleşme sırasında polyesterlere göre daha düşük çekme özelliği gösterirler (Koruvatan, 2008).

### **2.3.1.2.4 Polyester reçineler**

Polyesterler difonksiyonel asit ve polihidrik alkollerin polimerizasyonu ile oluşan makromolekül yapılarıdır. Polyester reçineler doymuş ve doymamış olarak ikiye ayrılan polyesterlerde doymamış polyester grubuna dahildir. Polyester reçineler düşük maliyetli olmaları ve spesifik alanlarda kullanılabilmesi için yeterli fiziksel özelliklere sahip olmaları nedeni ile çok sayıda endüstriyel ve ticari uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Polyester reçinelerin viskoziteleri kolaylıkla ayarlanabilir ve hızlandırıcı ya da ısı benzeri bir katalizör ile kürlenerek katı ve sert bir form elde ederler (Gümölcine, 2014).

### **2.3.1.2.5 Vinilester reçineler**

Molekül yapıları polyester reçineler ile benzer olmasına karşın molekül yapılarından kaynaklı daha esnek, dayanıklı, mukavim ve korozyona karşı dirençlidirler. Bu nedenle, statik ve dinamik yük dayanımının kritik olduğu yapı sektöründe ve yüksek performans gerektiren sürat ve yarış teknelerinde cam elyaf takviyesi ile kullanılırlar (Örs, 2014; Yöney, 2007).

### 2.3.1.2.6 Fenolik reçineler

Fenolikler kondensasyon reaksiyonu sırasında sertleşen termoset reçinelerdir. Yüksek sıcaklık direnci göstermeleri en büyük avantajlarıdır. Mekanik özelliklerinin diğer reçinelere göre düşük olması ise dezavantajları olarak gösterilebilir. Fren aksamları ve farklı birçok endüstriyel alanda kendilerine geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır (Koruvatan, 2008).

**Çizelge 2.3.** Bazı matris malzemelerinin özellikleri (Şahin, 2008)

Özellikler	Epoksi			Polyester	Fenolik
	Oda Sıc. Kürlenmiş	Yük. Sıc. Kürlenmiş	Gelişmiş		
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1.1-1.3	1.2-1.4	1.3	1.2	1.2-1.3
Elastisite modülü (GPa)	2-3	2.5-3.0	3.5	2-3	5-11
Çekme mukavemeti (MPa)	50-70	70-90	60	50-60	50-60
Kop. Uzaması (%)	2-6	2-5	2	2-3	1.2
Maks. İşlem sıcaklığı (°C)	70-100	100-180	180	60-80	100-125

### 2.3.1.3 Plastik-Plastik Yapılı Kompozit Malzemeler

Bu tür malzemelerde plastik fiber malzemesi olarak kullanılırsa yük taşıma açısından üstün özellik gösterirken, matris malzemesi olarak tercih edilmesi durumunda esneklik ve darbe emicilik gibi özellikler göstermektedir. Plastik-Plastik Kompozitler, termoplastikler ve termoset plastikler olarak gruplandırılır (Oral, 2018).

### 2.3.1.4 Plastik-Metal Fiber Yapılı Kompozitler

Metal fiber takviye malzemeli plastik kompozitler mekanik özellikleri çok yüksek ve oldukça hafif olduklarından endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılırlar. Fiber malzemesi olarak kullanılan metallere örnek olarak bakır, bronz, alüminyum ve çelik gösterilebilir. Deformasyona karşı dayanımları iyi olduğu için takviye malzemesi olarak tercih edilmektedir. Aynı sebeple üretimleri de yüksek bir verimle gerçekleştirilmektedir (Oral, 2018).

### **2.3.1.5 Plastik-Cam Elyaf Yapılı Kompozitler**

Matris malzemesi olarak termoplastikler ve termoset plastikler, fiber malzemesi olarak ise cam lifler kullanılır. Cam liflerin, asbest, elyaf, metal, pamuk ipliği ve sentetik gibi malzemeler yerine kullanılmasının sebebi mekanik ve fiziksel özelliklerinin daha iyi olmasıdır. Cam elyaf malzemelerin yük taşıma kapasitelerinin yüksek olmasına karşın camdan dolayı kırılğan bir yapıya sahip olmaları sebebiyle dirençleri düşüktür (Oral, 2018).

### **2.3.1.6 Plastik-Köpük Yapılı Kompozitler**

Fiber malzemesi olarak plastik, matris malzemesi olarak ise köpük kullanılan büyük kısmı sentetik olarak imal edilen son derece hafif maddelerdir. Hücre yapılarına bağlı olarak sert, kırılğan, yumuşak veya elastik gibi çeşitli özelliklere sahip olabilirler (Oral, 2018).

### **2.3.1.7 Seramik Matrisli Kompozitler**

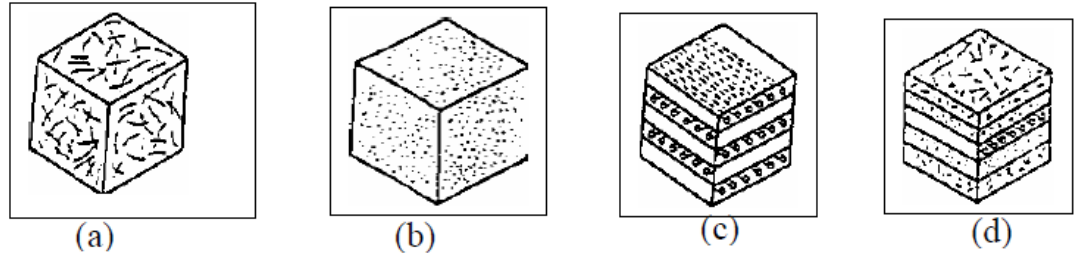
Gevrek bir yapıya sahip olan seramiklerde çentik ve mikro yapısal kusurlar sıklıkla görülür. Bu nedenle, çekme dayanımları düşük ve basma dayanımları yüksektir. Seramik malzemeler ile çok ince çaplı elyaflar kullanarak daha dayanıklı kompozitler üretilebilmektedir. Bu malzemeler kayma dirençleri yüksek olduğu için plastik şekil vermeden gevrek tarzda kırılmaya müsaittirler. Yüksek sıcaklıkta çalışan disk, piston gibi parçaların imalatında kullanılırlar (Karaca, 2010; Aydın, 2018).

**Çizelge 2.4.** Matrislerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Aydın, 2018)

	Metal	Seramik	Plastik
<b>Fiziksel Özellik</b>			
Yoğunluk	Yüksek	Orta	Düşük
Elektriksel Direnç	Çok Düşük	Çok Yüksek	Yüksek
Termal İletkenlik	Çok Yüksek	Çok Düşük	Düşük
Dayanıklılık	Orta-Çok Yüksek	Çok Yüksek	Düşük-Orta
<b>Mekanik Özellik</b>			
Gerilme Direnci	Yüksek	Düşük	Düşük-Orta
Sertlik	Yüksek	Çok Yüksek	Düşük-Orta

### 2.3.2 Kompozitlerin Takviye Elemanlarına Göre Sınıflandırılması

Kompozit Malzemeleri takviye elemanlarına göre dört ana başlık altında genel hatlarıyla sınıflandırmak mümkündür.



**Şekil 2.6.** Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması (Atlıhan, 2010)

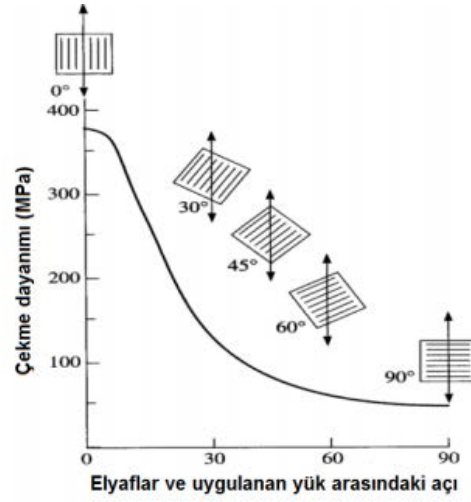
- Elyafli Kompozitler
- Parçacıklı Kompozitler
- Tabakalı Kompozitler
- Karma Kompozitler

### 2.3.2.1 Elyafli Kompozitler

Elyafli Kompozitler, elyafların matris bir yapıya ilave edilmesi ile oluşurlar. Bu sayede malzemenin yorulma dayanımı, çekme dayanımı ve özgül dayanımı artmaktadır. Matris malzemeleri numune üstüne gelen yükü elyaflara ileterek numuneye yumuşaklık ve tokluk özelliği kazandırmış olur. Böylece, elyaflar kompozit içinde belirlenen doğrultularda kolaylıkla yerleştirilebilir ve elyafların doğrultu açıları değiştirilebilir. Bu sayede anizotropi adı verilen özellikle çekme/basma şeklideki yüklemelere karşı farklı doğrultularda farklı yanıtlar verilmesi sağlanır. Yerleştirilen elyafların doğrultusu çekme eksenine yönünde ise en yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Çekme eksenine dik doğrultuda ise en düşük mukavemet değerleri elde edilmiş olur. Burada elyaflarda uzunluk/çap oranının artması ile matris tarafından elyaflara iletilen yüklerin arttığı da görülmektedir (Atlıhan, 2010; Aydın, 2018). Yaygın olarak kullanılan elyaf takviyeleri; Glass Fiberler, Karbon Fiberler, Bor Fiber, Yapay Organik Fiberlerdir (İpek, 2015).

Elyaf yapılarının iyi birer mühendislik ürünü olarak kullanılmalılarının üç temel sebebi mevcuttur (Oral, 2018).

1. Mikro yapılarında yer alan taneciklerin küçük olması sebebi ile düşük çapta üretilibilmeleri,
2. Elastisite modüllerinin yüksek olması,
3. Uzunluk/çap oranının büyümesi sonucu malzeme üzerine etkiyen kuvvetin, matris malzeme aracılığı ile düzgün yük iletiminin sağlanması.

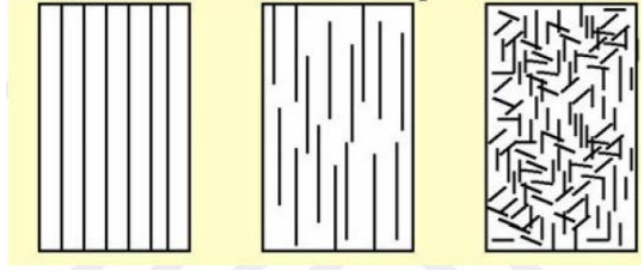


**Şekil 2.7.** Çekme dayanımının elyaf yönelimine göre değişimi (Kurtuluş, 2016)

Kompozit malzeme içerisinde yer alan elyaf miktarının artması ile genelde mekanik mukavemet artmaktadır. Ancak, elyaf oranı belirli bir sınır değeri aştıktan sonra söz konusu mukavemet azalmaya başlar. Bunun nedeni, elyaf artışının kompozit yapıda yer alan polimer miktarını oransal olarak azaltması ve matrisin asıl işlevi olan elyafları bir arada tutma vasfını gerçekleştirememesidir (Kurtuluş, 2016).

Kompozit yapının dayanımını etkileyen bir diğer önemli faktör kompozit içindeki elyaf kalınlığıdır. İnce elyaf ile üretilen kompozitlerde matris ile elyafın temas yüzeyi daha geniştir. Bu özellik polimer-elyaf etkileşiminin artmasına ve kompozit malzemedeki yük aktarımının kolaylaşmasını sağlamaktadır. Bu sebeple, ince elyaflar ile takviye edilen kompozitler daha mukavemettir (Kurtuluş, 2016).

Kompozit malzeme içinde yer alan elyaflara ait fiziksel biçimler, oluşacak yeni malzemenin özellikleri açısından önemlidir. Bu elyafları kırılmış kısa elyaflar, sürekli elyaflar ve yönlendirilmiş kısa elyaflar olarak gruplandırmak mümkündür. Sürekli elyaflar yapısal uygulamalarda tercih edilirken, süreksiz yönlendirilmiş elyaflar, yapısal olmayan uygulamalarda kullanılır (Kurtuluş, 2016).



**Şekil 2.8.** Kompozitlerin elyaf formları ve yönlenmeleri (Kurtuluş, 2016)

### 2.3.2.1.1 Elyaf Çeşitleri

En çok kullanılan takviye elyaf malzemeleri karbon, aramid ve cam elyaflardır. Kullanılan elyaf çapları genellikle 5µm ile 20µm arasında yer almaktadır.

Takviye elemanlarında en çok kullanılan elyaflar;

- Aramid Elyaf (Kevlar)
- Karbon Elyaf (Grafit)
- Cam Elyaf

#### 2.3.2.1.1.1. Cam Elyaf

Cam elyaflar yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip oldukları için kompozitlerde takviye malzemesi olarak en çok kullanılan malzemelerdir. Cam elyafın esasını silis-kum meydana getirir de, alüminyum, sodyum, bor, kalsiyum ve demir gibi elementlerin oksitleri de belirli oranlarda bulunur (Karaca, 2010). Kompozit malzemelerde kullanılmak üzere sürekli elyaflar şeklinde üretilirler (Kara, 2006).

Cam elyaflar plastik kullanılması tercih edilen işlerde ucuz oldukları ve birim ağırlık başına düşen dayanımları ideal olduğu için tercih edilirler. Çekme mukavemetleri çok yüksek olmasına karşın uzun süreli yüklemeler sonucunda bozulmalar meydana gelebilmektedir. Birçok matriks malzemesi ile kullanılmalarına karşın asıl kullanım alanları cam takviyeli plastiklerdir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde cam elyaf takviye miktarı arttıkça kompozit malzeme dayanımı da

dođru orantılı olarak artmaktadır. Cam elyafları elik ile karřılařtırdığımızda ısıl dayanımlarının dūřuk, kimyasal dayanımlarının ise yūksek olduđu gōrūlūr. İlk zamanlarda cam elyaf üretiminde alkali cam tercih edilse de zamanla ūstūn mekanik ve elektriksel özellikler gōsterdiđi keřfedilen E-cam ve sonrasında da S-cam kullanımına geçilmiřtir (Aydın, 2018; Yalçın EB, 2012).

Cam elyafların bazı özellikleri (Karaca, 2010);

- Çekme mukavemetleri ve ađırlık/mukavemet oranları çeliđe kıyasla yūksektir.
- Yanmaz özelliğe olmalarına karşın ısıl dirençlerinin dūřuk olması sebebi ile yūksek sıcaklığa maruz kaldıklarında yumuşama gōsterirler.
- Kimyasal malzemeler ile temas ve tepkimelere karşı direnç gōsterirler.
- Elektrik iletim özelliği gōstermedikleri için elektrik yalıtımı gereken yerlerde kullanımları tercih edilir.

**Çizelge 2.5.** Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri (şahin, 2008)

Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Özgūl ađırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastisite modūlū (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti (MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
İsil genleşme katsayısı (mm/ <sup>o</sup> Cx10 <sup>-6</sup> )	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuřama sıcaklığı ( <sup>o</sup> C)	727.0	749.0	841.0	970.0

### 2.3.2.1.1.2. Karbon Elyaf (Grafit)

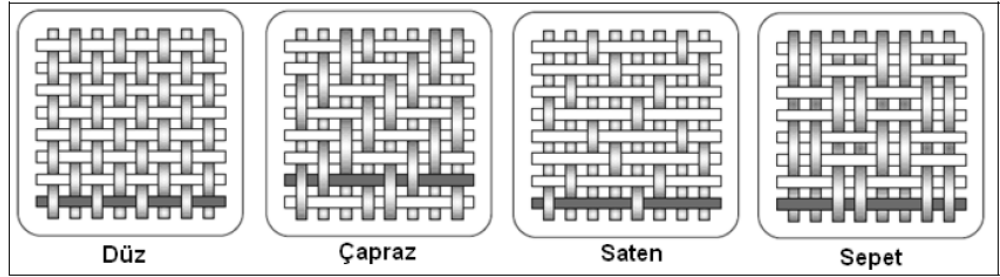
Karbon Elyaf (Grafit), Poliakrionitril ve Zift kullanılarak elde edilmektedir. PAN tabanlı karbonlar zift tabanlılara gōre daha sađlam ve hafif özelliktedirler. Zift tabanlı karbonların mekanik özellikleri daha kōtūdūr. Bu nedenle, daha yaygın olarak kullanılan PAN tabanlı karbonlar sırasıyla oksidasyon, karbonizasyon, yūzey iyileřtirme ve son olarak karbonlama iřlemlerinden geçirilerek epoksi reçine ile kaplanarak hazır hale getirilir (Aydın, 2018). Maliyetleri yūksek olmasına karřın, çok yūksek çekme dayanımı ve elastisite modūlū deđerlerine sahip oldukları için özellikle



havacılık sanayiinde ve spor araç gereçlerinin imalatında tercih edilir (Ömercikoğlu, 2009).

### 2.3.2.1.1.3. Aramid Elyaf (Kevlar)

Aromatik poliamidler olarak da adlandırılan Aramid elyaflar, yapısında yer alan aromatiklerin oluşturdukları halka zincirleri ile katılıklarını arttırmaları. Bu katılık sayesinde elyafların kolaylıkla erimemesine yardımcı olur. Üretim sırasında katı polimer moleküllerinin lif eksenine paralel olarak yönlendirilmesi ile de malzemenin yüksek özellikler göstermesi sağlanır (Aydın, 2018). Darbe dayanımı diğer elyaf türlerine göre çok yüksek olduğundan kurşun geçirmez yapıların imalatında ve balistik uygulamalarda sıkça kullanılır. Eğer kompozit malzeme yatay ve dikey yönlü elyafların yine elyaflar yardımı ile birbirlerine bağlandığı dokuma kumaş yapısına sahipse farklı birçok özelliklere sahiptirler (Ömercikoğlu, 2009).



Şekil 2.9. Piyasada sıkça kullanılan dokuma çeşitleri (Ömercikoğlu, 2009)

### 2.3.3 Parçacıklı Kompozitler

Matris içinde yer alan başka malzemelerin parçacıklı yapılarda bulunması ile oluşmaktadır. Parçacıkların matris içinde homojen şekilde dağılması koşulunda izotrop malzeme elde edilir (Atlıhan, 2010). Liflerden farklı olarak belirli bir yönelime sahip değildirler. Genellikle dolgu malzemesi olarak matrisin sıcaklık altında davranışı, aşınma direnci ve katılık gibi özelliklerini iyileştirmek için ve maliyeti düşürmek için kullanılırlar (Kaçar, 2009).

### **2.3.3.1 Karma (Hibrid) Kompozitler**

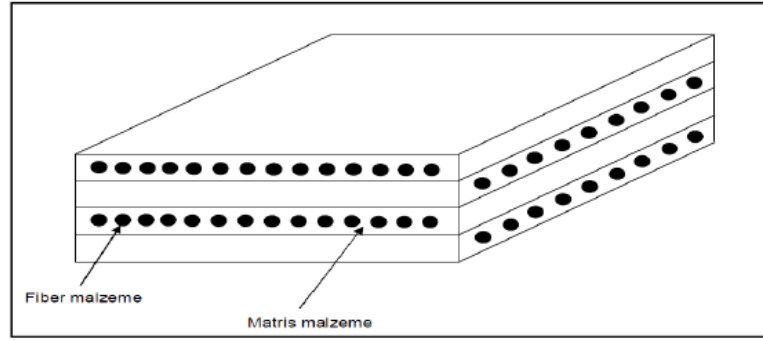
Karma (Hibrid) Kompozitler, kompozit yapı içerisinde bulunmakta olan takviye elemanlarının iki ya da daha fazla sayıda farklı malzemeden oluşması ile elde edilir (İpek, 2015). Mühendislikte kullanılmakta olan karma malzemelerin büyük çoğunluğu takviye edilerek özellikleri iyileştirilmiş malzemelerdir (Kılıç, 2014).

### **2.3.4 Tabakalı (Lamina) Kompozit Malzemeler**

Bükülmüş ya da düz yapıdaki fiberlerin matris bir yapı içinde düzenlenmiş haline tabaka denir. Fiberler güçlendirici ya da yük taşıyıcı elemanlar olarak matrisler ise yük dağılımını ve iletimini sağlayan elemanlar olarak görev alırlar (Eryiğit, 2006). Tabakalı Kompozit Malzemeler birbirlerine bağlı en az iki farklı malzeme katmanından oluşmaktadır (Alar, 2002). Katmanların üretim sonucunda ince yapıya sahip olması nedeni ile tek başlarına kullanımları zordur (İpek, 2015). Tabakaların, belirli bir doğrultuda istenen sağlamlığın ve malzeme kalınlığının elde edilebilmesi için üst üste dizilip aynı matris ile yapıştırılması ile elde edilirler (Darıcık, 2011).

Tabakalar, tek yönlü elyaflar, farklı elyaf takviyeli tabakalar ve rastgele yönlü elyaflardan oluşabilmektedir. Tabakalı kompozit oluşturulmasındaki amaç esas malzemelerin doğrultularını istenilen şekilde ayarlayarak kompozitin maruz kalacağı yüklere uyum sağlayabileceği şekilde dayanım ve rijitlik açısından avantaj sağlamaktır (Kıratlı 2012).

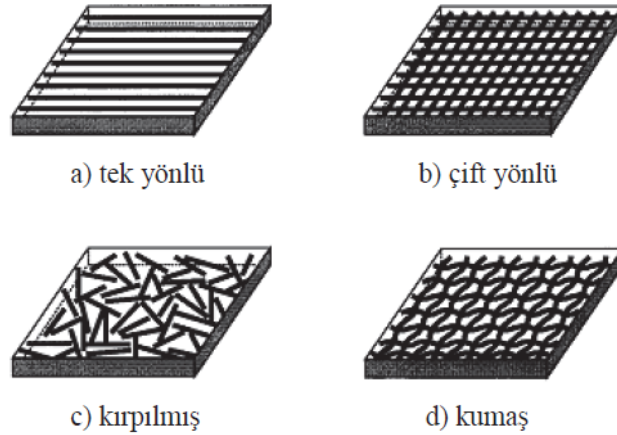
Tabakalı Kompozit Malzemeler, üretimlerinin ucuz olması, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gibi avantajlara sahiptir. Bu nedenle, geleneksel malzemelere oranla kullanım oranları yüksektir (İpek, 2015).



**Şekil 2.10.** Tabakalı kompozit plakalarda matris ve fiber yapıların görünümü (Haşim, 2014)

### 2.3.5 Tabakalı Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Tabakalı kompozit malzemeler sürekli veya süreksiz takviye malzemeleri olan lifler ile oluşturulan ince yapıya sahip tabaka, katman veya plak olarak isimlendirilen yapıların bir araya gelmesi ile elde edilirler (İpek, 2015). Tabakalar takviye lif doğrultusuna ve türüne göre tek yönlü, iki yönlü, örgü ve süreksiz liflerden oluşabilir (Kaçar, 2009).



**Şekil 2.11.** Takviye lif kullanıma göre tabaka türleri (Kaçar, 2009)

Tabakalı Kompozitler üretimde kullanılan malzeme türlerine göre;

- Farklı malzemelerden oluşan tabakalı kompozitler
- Tek tür malzemedenden oluşan tabakalı kompozitler

olarak iki grup altında toplamak mümkündür.

### **2.3.5.1 Kullanılan Malzeme Türüne Göre Tabakalı Kompozitler**

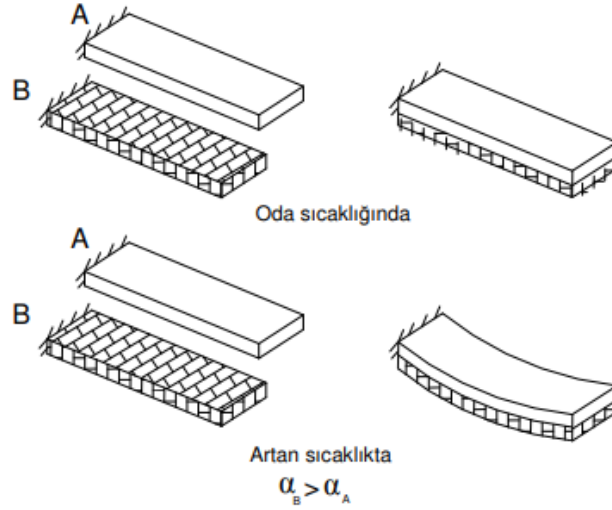
Her çeşit malzeme ile tabakalı kompozit üretmek mümkündür. Kullanılan her malzemenin olumlu özelliklerinden faydalanabilecek şekilde malzeme seçiminde bulunarak tabakalı kompozit üretebilmek asıl amaçtır.

Tabakalı Kompozitleri kullanılan malzemelere göre de dört ana başlık altında sıralayabiliriz.

- Metal Tabakalı Kompozit Malzemeler
- Cam Tabakalı Kompozit Malzemeler
- Plastik Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler
- Ahşap Tabakalı Kompozit Malzemeler

#### **2.3.5.1.1 Metal tabakalı kompozit malzemeler**

Bileşenleri farklı olan iki metalin yapıştırıcı vasıtası ile birleştirilmesiyle üretilen tabakalı kompozitlerdir (Tarih, 2015). En yaygın örnekleri ısıl genleşme katsayıları farklılık gösteren bimetallerdir. Sıcaklık seviyesinde meydana gelebilecek herhangi bir değişimde metallerin farklı miktarlarda uzamasından yararlanarak termometre, termostat ve termik şalter gibi ekipmanlar üretilmektedir. Bir başka örnek olarak da elektrik iletiminde tercih edilen bakır ile kaplı alüminyum teller gösterilebilir. Bakır teller pahalı ve ağır olmasına karşın ısınma sorunları yoktur ve kolayca bağlantı yapılabilirler. Alüminyum teller ise ucuz ve hafif olmalarına karşın bağlantı edilebilmeleri daha zordur. Alüminyum tel bakır ile kaplama yapıldığında kısa sürede ısınmayan ucuz ve hafif bir ürün elde edilmiş olur (Kılıç, 2006).



Şekil 2.12. Bimetalik malzeme (Kılıç, 2006)

### 2.3.5.1.2 Cam tabakalı kompozit malzemeler

Camların kırılma gibi zayıf yönlerini gidermek amacıyla iki cam arasında polivinilbütural (PVB) tabaka konularak çeşitli işlemlerle birleştirilmesidir. PVB, elastik bir malzeme olmasının yanı sıra kırılmaya da dayanıklıdır. PVB normalde plastik bir film halinde ve yarı saydam özelliindedir. Uygulama sırasında sıcaklık ile beraber daha da saydamlaşmakta ve çevresinde yer alan cam tabaka yüzeylerine yapışmaktadır. Böylece iki tarafında da cam olan ve ortasında PVB tabakası bulunan tabakalı kompozit üretilmektedir (Tarih, 2015).

### 2.3.5.1.3 Plastik esaslı tabakalı kompozit malzemeler

Çeşitli plastik malzeme katmanları birleştirilerek farklı özelliklere sahip tabakalı kompozit malzeme üretilebilir. Bu tabakalı kompozit malzemeler özellikle iç mekân uygulamalarında, mobilya üretimi, mutfak ve banyo düzenlemelerinde yaygın olarak kullanılır (Tarih, 2015).

#### 2.3.5.1.4 Ahşap tabakalı kompozit malzemeler

Doğal ve yapay ahşap elemanlarının yan yana yapıştırılmaları yada çeşitli tekniklerle birleştirilmeleri veya her iki yüzeyin kaplama tabakası ile kaplanması yoluyla üretilirler. Bu malzemeler, iki yüzeyinde kaplama katmanları ve ortada taşıyıcı katmandan oluşan üç tabakalı kompozit sistem olarak kabul edilir (Tarih, 2015).



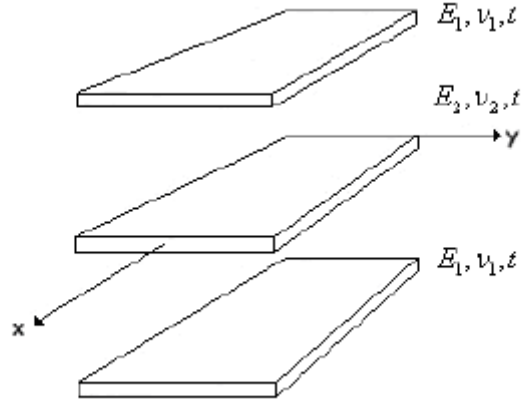
Şekil 2.13. Ahşap Tabakalı Kompozitler (Kılıç, 2006)

#### 2.3.5.2 Dizilimine Göre Tabakalı Kompozitler

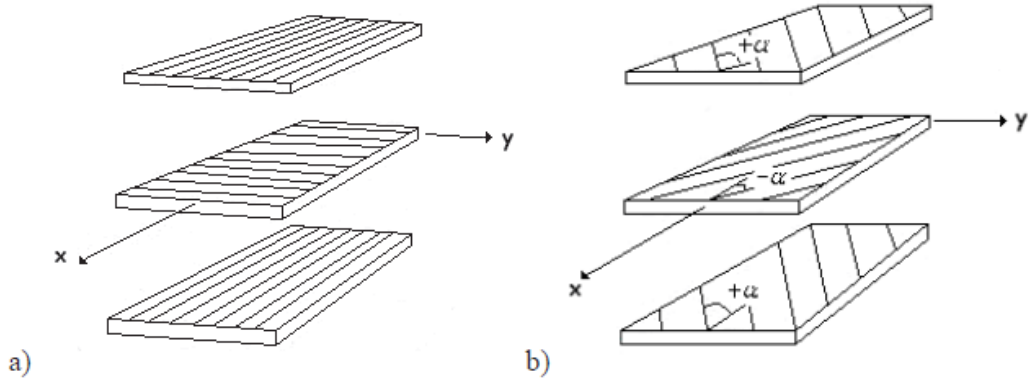
Tabakalı Kompozitler dizilimlerine göre simetrik ve anti simetrik olmak üzere ikiye ayrılır.

##### 2.3.5.2.1 Simetrik Tabakalar

Tabakalar; orta yüzeyden itibaren materyal ve geometrik özellikler açısından simetrik yerleştirilmiş durumdadır. Simetrik Tabakalar kendi içinde de İzotropik Tabakalardan Oluşan Simetrik Tabakalı Kompozit ve Ortotropik Tabakalardan Oluşan Simetrik Tabakalı Kompozitler olarak ayrılır. Bu iki ayrımın arasındaki temel fark Şekil 2.14. ve Şekil 2.15.'de görülmektedir (Darıcık, 2011).



**Şekil 2.14.** İzotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Darıcık, 2011)

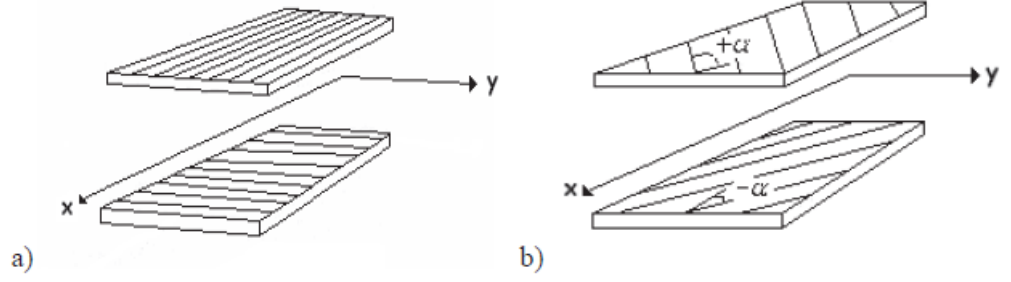


**Şekil 2.15.** Ortotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Darıcık, 2011)

### 2.3.5.2.2 Antisimetrik Tabakalar

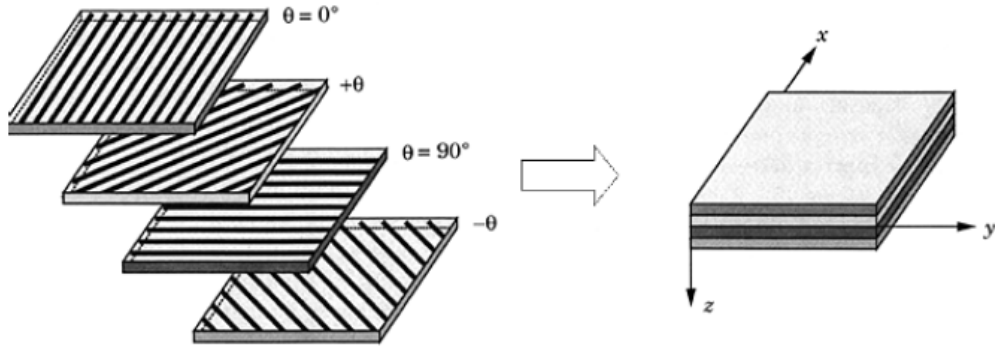
Antisimetrik tabakalar genel olarak farklı dizayn ihtiyaçlarına cevap verebilmek amacıyla kullanılır. Tabakalardaki orta düzlemin aşağısına ve yukarısına göre malzeme ve tabaka kalınlıkları aynı, tabakaların yönlenimi (oryantasyonu) birbirine zıtsa bu yapı antisimetrik tabaka özelliği gösterir (Yağcı 2007).

Antisimetrik tabaka, çapraz katlı ve açılı katlı olabilmektedir. Çapraz katlı tabakalar  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  açı aralıklarında uzanan, çift sayıda ve üst üste konulmuş ortotropik yapıdaki ince tabakalar topluluğudur. Açılı katlı tabaka ise, koordinat eksenine  $-\alpha$  derece açılıya sahip özdeş ve eşit kalınlıkta tabakalardan meydana gelir (Yağcı, 2007).



**Şekil 2.16.** Antisimetrik Tabakalar (Darıcık, 2011)

Farklı oryantasyon açılarında bir araya getirilen tabakalar, tabakalı kompozit kirişleri oluşturur.



**Şekil 2.17.** Farklı lif oryantasyonlarına sahip tabakalardan oluşan kiriş yapısı (Kaçar, 2009)

### 2.3.6 Tabakalı Kompozitlerin İsimlendirmesi

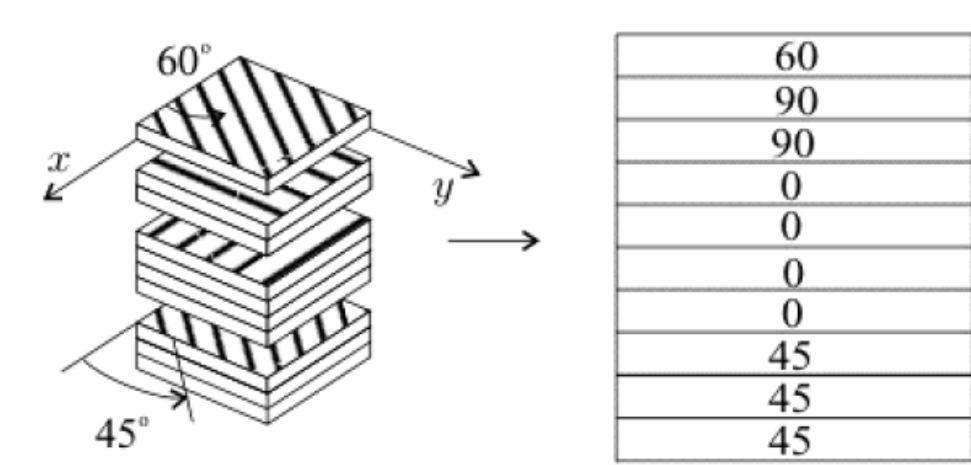
Katmanlı kompozitlerde her bir katmanın yerleşim açısı bir notasyona baz alınarak isimlendirilir. Lif yönü yerleşim açısı herhangi bir katman için  $0^{\circ}$  olarak kabul edildikten sonra diğer katmanlar da saat yönünde (+) , tersi yönünde (-) açılarla belirtilerek yerleştirilir. Tabakalı yapıdaki tabakaların açılarını tanımlamak için parantez dışına tabaka sayısını gösteren T indisi konur (Kaçar, 2009).

$$[90^{\circ}]_4, [0^{\circ}]_2$$

Eğer tabakalı yapı orta düzlemine göre simetrikse, orta düzleme kadar olan açılar listelenerek simetriyi ifade etmesi için S indisi konur.



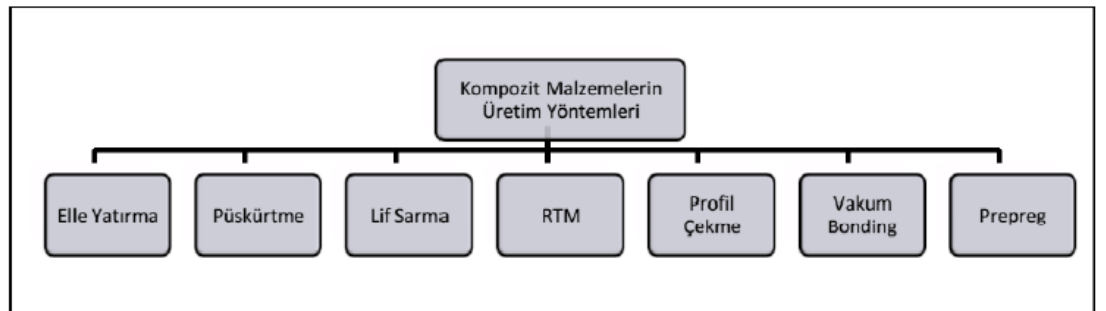
$[0^\circ/0^\circ/30^\circ/30^\circ]_s$



**Şekil 2.18.**  $[45_3/0_4/90_2/60]$  şeklindedizilmiş plağın gösterimi (Özakıncı, 2006)

## 2.4 Kompozit Malzemelerin İmalat Yöntemlerine Göre Sınıflandırması

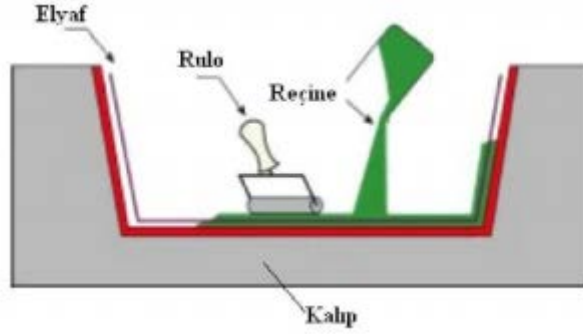
Kompozit malzemelerin üretiminde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunların en önemlileri el yatırma, torba kalıplama, püskürtme, elyaf sarma, savurma (santrifüj) kalıplama ve profil çekme yöntemleridir (Atlıhan, 2010).



**Şekil 2.19.** Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri (İpek, 2015)

### 2.4.1 Elle yatırma yöntemi

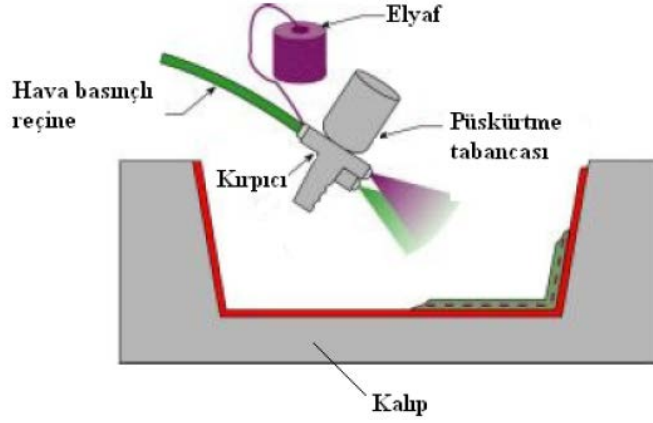
Mevcut olarak kullanılan en basit yöntemlerden biridir. Kullanılacak reçinenin özelliği dikkate alınarak reçinenin sertleşme süresini düşürmek için katalizör ve hızlandırıcı ilave edilir. Uygulama yapılacak kalıp üzerine elyaflar konarak rulo ya da fırça yardımı ile reçine kumaşa sürülür. Proseste reçine elyafa çok iyi bir şekilde nüfuz edebilmelidir. Ardından düzgün bir yüzey elde edilebilmesi için kalıp preslenir ve oda sıcaklığında bırakılarak sertleşmesi beklenir (Baba, 2013; Atlıhan, 2010). Fenolik reçineler ve vinil ester dışında epoksi ve polyester de tercih edilebilmektedir (İmak, 2015). Kırılmamış fiberlerin kullanımı ile püskürtme yöntemine kıyasla daha üstün mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Mimari kalıpların imalatında, tekne ve rüzgâr panellerinde kullanılabilir. (Ömercikoğlu, 2009).



Şekil 2.20. Elle yatırma yöntemi (İmak, 2015)

### 2.4.2 Püskürtme Yöntemi

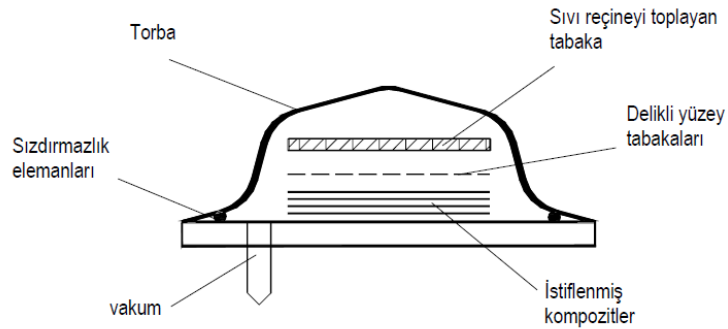
Püskürtme Yöntemi elle yatırma metodunun makineleşmiş haline benzer ve daha kolaydır. Püskürtme sprej aparatına sürekli olarak gelen fiber burada kırılıp emilen reçine ile püskürtme tabancası yardımıyla parça kalıbına püskürtülür ve malzeme oluşturulur (Baba, 2013; İpek, 2015).



**Şekil 2.21.** Püskürtme metodu (Koruvatan, 2008)

### 2.4.3 Torba Kalıplama (vakumlama) Yöntemi

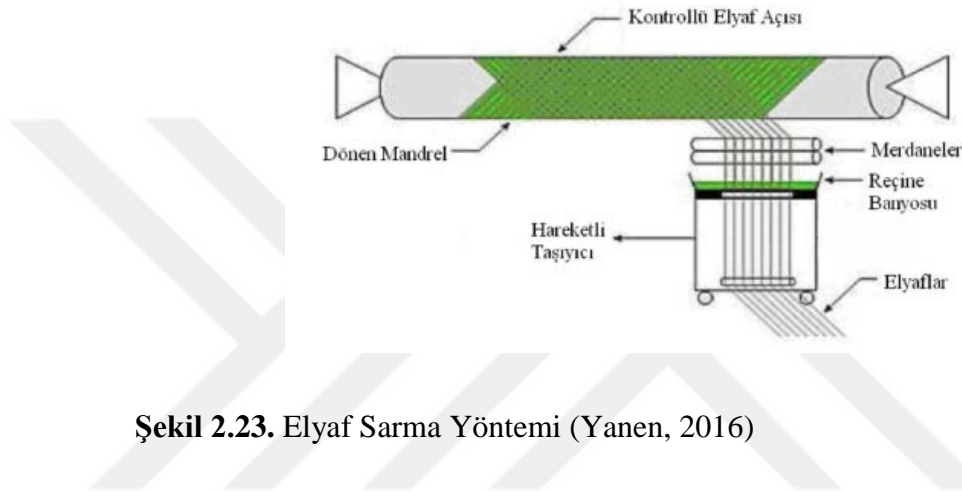
Bir naylon ya da torba yardımı ile yaratılan vakumlanmış ortamda reçinenin ilerletilmesi prensibine dayanır. Reçinenin kumaş tarafından emilimi ve elyaf üzerindeki dağılımı her bölgede aynı olduğu için kompozit malzemede yüzey kalitesini artırır. Ayrıca tüm katmanlar içine nüfuz edebilen reçine sayesinde yapı içindeki hava kabarcıklarının olmadığı bir yapı ile yüksek mukavemetli kompozitler elde edilebilmektedir. Bu uygulama sayesinde fazla reçine kompozit yapı dışına alınarak elyaf/reçine oranı artırılabilir (Atlıhan, 2010; Baba, 2013; Yanen, 2016). Elle yatırma ile karşılaştırıldığında kalite ve mekanik özellikleri yüksek parçaların imaline olanak verir. Genellikle araba ve tekne parçalarının üretiminde tercih edilir (Ömercikoğlu, 2009).



**Şekil 2.22.** Torba Kalıplama Yöntemi (Atlıhan, 2010)

#### 2.4.4 Elyaf Sarma Yöntemi

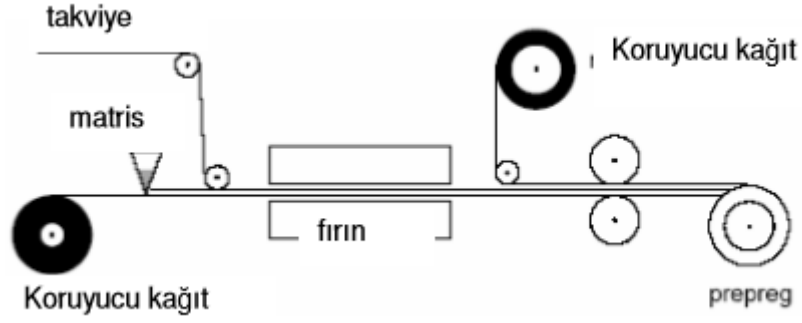
Elyaf sarma yöntemi, reçine ile ıslatılan sürekli elyaf liflerinin dönen farklı şablonlardaki miller üzerine reçineli elyafların sarılması ile gerçekleştirilir. Reçine olarak vinilester, fenolikler, polyester ve epoksiler kullanılır. Farklı açılara sahip sürekli liflerin kalıba sarılması sonucu çeşitli mekanik özelliklere sahip ürünlerin eldesi mümkün olur. Bu yöntem ile borular, araba şaftları ve dairesel basınç tankları üretilmektedir (Baba, 2013; Yanen, 2016).



Şekil 2.23. Elyaf Sarma Yöntemi (Yanen, 2016)

#### 2.4.5 Prepreg (Otoklav) Kalıplama Yöntemi

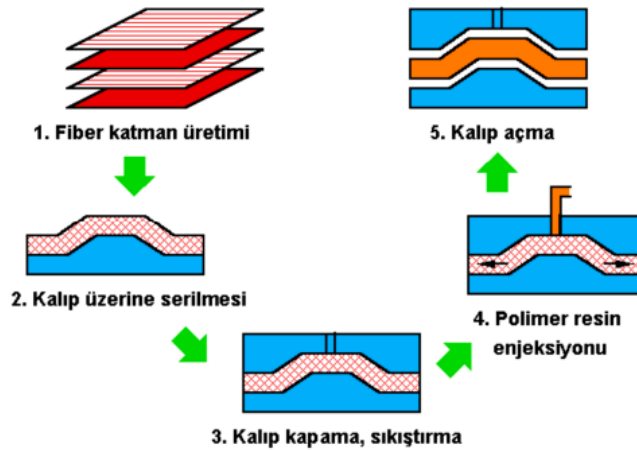
Vakumlama yöntemine çok benzer özellikte olan bu proses yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında kürlleme işlemi sayesinde boşluksuz ve çok yoğun bir kalıplama yapılmasını sağlar. Dayanım/ağırlık oranı yüksek malzemeler üretmek için füze, uçak ve uzay aracı gibi yüksek teknoloji kullanılan alanlarda tercih edilir (Yanen, 2016).



Şekil 2.24. Otoklav Üretim Şekli (Demirel, 2007)

#### 2.4.6 Reçine Transfer Metodu (RTM)

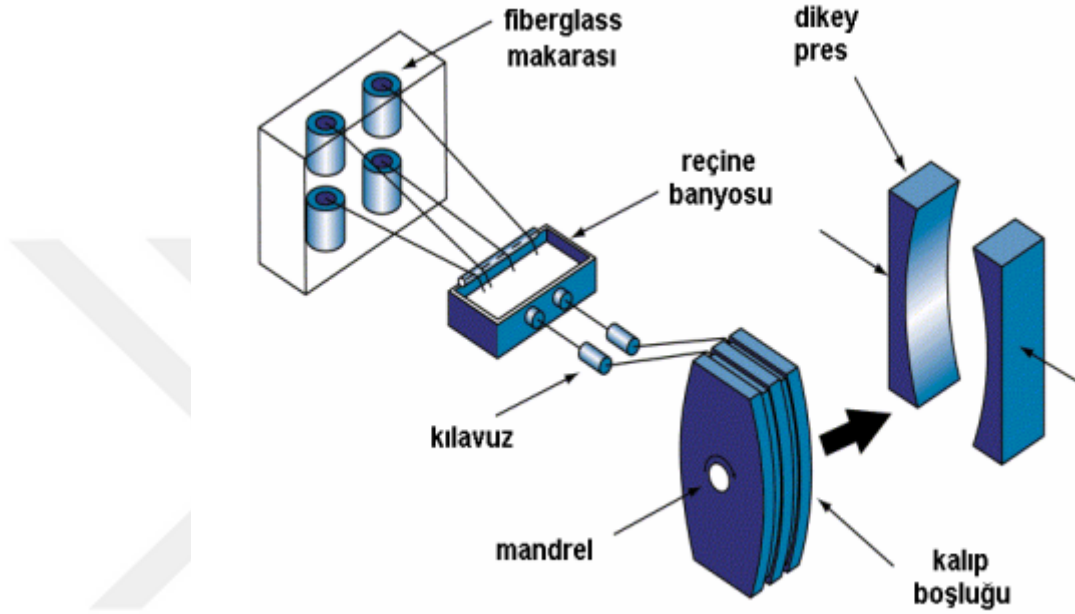
Yüzey alanı büyük materyallerin kalıp işleminde püskürtme ve elle yatırma yöntemleri yetersiz kaldığı için reçine transfer metodu geliştirilmiştir. Erkek ve dişi olarak iki ayrı kalıbın kullanıldığı bu yöntemde iki yüzü de düzgün ürünler elde edilebilmektedir. Reçine basıncı düşük pompa vasıtası ile kalıba aktarılırken vakum uygulanarak reçinenin kalıp içinde yayılmasının sağlanması sayesinde üretim kalitesi oldukça yüksektir. Enjeksiyon işleminde hava boşluğunun oluşmaması ve kompleks bir konstrüksiyon yapısı gerektirmemesi üretim prosesinde büyük avantaj sağlamaktadır (Daban, 2016).



Şekil 2.25. Reçine Transfer Metodu (Gülner, 2016)

#### 2.4.7 Profil Çekme Yöntemi (Pultrüzyon)

Profil çekme yönteminde sürekli fiber malzemeler reçine ile ıslatılmış ve önceden ısıtılmış metal rulolardan geçirilir. Sonrasında çubuk ya da boru şeklini alması amacıyla uygun kalıplara alınıp üzerlerine basınç uygulanıp şekillendirilirler. Bu sayede reçinenin katılaşması sağlanır (İpek, 2015; Oral, 2018).

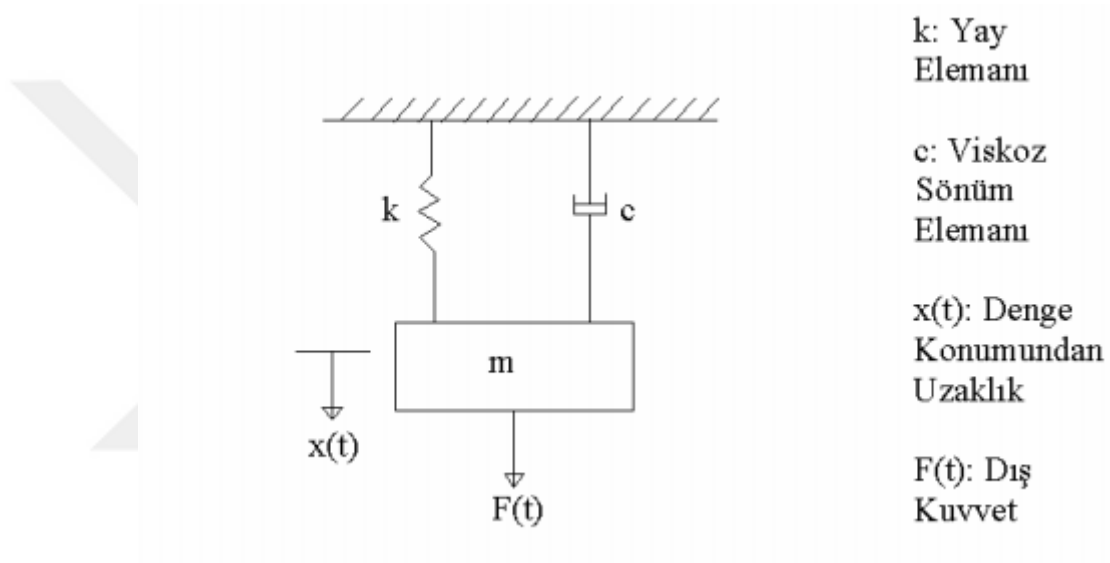


Şekil 2.26 Profil Çekme Yöntemi (Kılıç, 2006)

### 3. TİTREŞİM

#### 3.1 Titreşim

Herhangi bir kütlenin bir referans eksenine göre hareket ettiğinde mevcut pozisyonundan farklı genlik ve periyotlarla geçerek tekrarladığı yer değiştirmelere titreşim denir. Titreşim hareketi bir çevrim şeklinde tekrarlı ve sürekli bir hareket (Karadayı,2011). Basit bir titreşim sistemi Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Titreşim Sistemi (Çay, 2006)

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere basit bir titreşim sisteminde yay potansiyel enerji, kütle ise kinetik enerji depolamaktadır. Kinetik enerji ile potansiyel enerji arasında meydana gelen enerji dönüşümü ile titreşim meydana gelir. Salınım hareketi süresince yapıdan enerji olarak hareketi yavaşlatan ve ardından durduran elemana sönümleyici denir (Bilge,2015).

Titreşim genel olarak random (gelişigüzel) ve periyodik titreşim hareketi olarak ikiye ayrılır. Random titreşim hareketi, zaman içinde tekrarlanabilme özelliğine sahip değil iken, periyodik titreşim hareketi belirli bir süre zarfında aynı veya farklı şekilde tekrarlanma özelliğine sahiptir (Çay,2006).

Titreşim hareketinin meydana geldiği doğrultu veya eksen sayısı serbestlik derecesi olarak ifade edilir. Titreşim hareketi bir çok eksen ve doğrultuda meydana gelebildiği için titreşim üç doğrusal eksen (x, y ve z) ve üç açısıl doğrultuda ( $r_x, r_y$  ve  $r_z$ ) ölçülmektedir (Çay,2006).

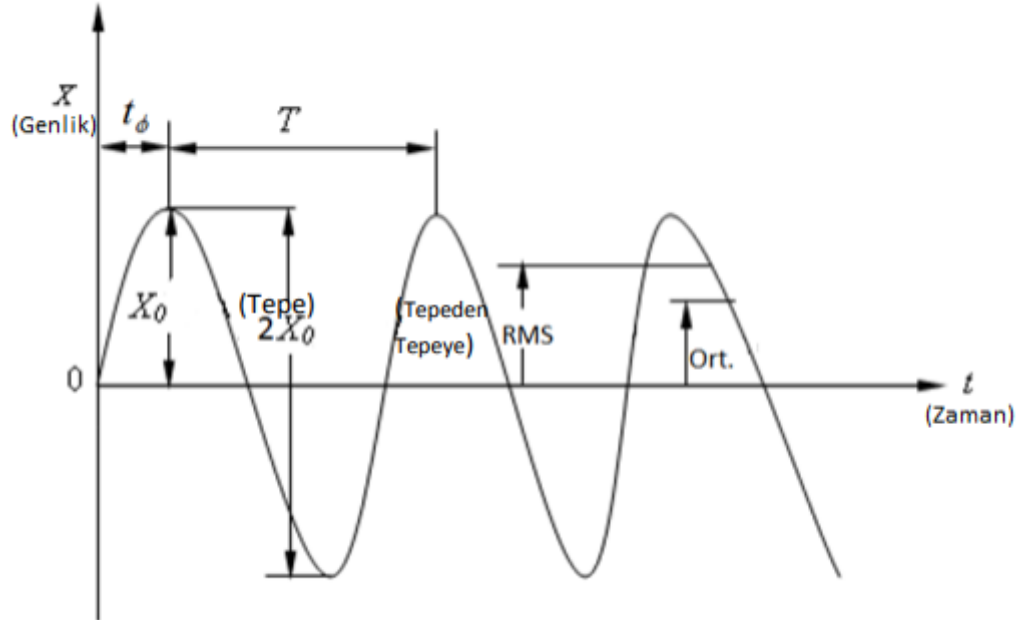
### 3.1.1 Periyodik Titreşim Hareketi

#### 3.1.1.1 Basit Harmonik Titreşim Hareketi

Sistemin hareketini tanımlayan parametrenin zamanın harmonik bir fonksiyonu olarak değiştiği titreşim hareketidir. Titreşim hareketinde titreşimi belirleyen başlıca parametreler periyot (T), frekans (f), açısal frekans ( $\omega$ ), faz ( $\phi$ ) ve yer değiştirme genliği (X)'dir.

$$X = \sin(\omega t)$$

Burada X deplasman,  $X_0$  ise en yüksek genlik değerini ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Harmonik Titreşim ve Parametrelerin Gösterimi (Bilge,2015)



**Periyot (T):** Titreşim hareketinin bir tam tekrarının gerçekleşme süresidir. Birimi saniyedir (Karahan,2005).

**Frekans (f):** Frekans iki farklı şekilde ifade edilebilmektedir. Bunlar;

- Titreşimin bir saniyelik zaman zarfı içindeki tekrarlanma miktarıdır. Birimi Hz'dir.
- Titreşimin bir dakikalık zaman zarfı içindeki tekrarlanma miktarıdır. Birimi RPM (Revolution Per Minute)'dir.

$$\text{Hz}=\text{RPM}/60$$

Periyot ile frekans arasında ki bağıntı ise şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$f = 1/T$$

**Açısal Frekans ( $\omega$ ):** Dönme hareketi yapan bir nesnenin birim zaman zarfında aldığı yolun radyan cinsinden gösterilen değeridir. Birimi rad/s'dir.  $\omega=2\pi f$  ile ifade edilmektedir (Karahan,2005).

**Faz ( $\phi$ ):** Referans ya da başlangıç noktası baz alındığında iki olaydan birinin diğerine göre ne kadar zaman önce ya da sonra meydana geldiğinin ölçüsüdür.

**Genlik:** Titreşim şiddetini tanımlar. Şekil 3.3'de görülebileceği üzere tepe noktası ile sıfır noktası arasındaki mesafedir. Genlik tepeler arası değer, tepe değer, ortalama, RMS ve Desibel Ölçeği ile ifade edilebilir. Genlik birimi ivme, hız veya yer değiştirme birimlerinden herhangi biri olabilir. Genlik değerleri kendi içlerinde de yaklaşık olarak birbirlerine dönüştürülebilir (Karadayı,2011).

$$\text{Ortalama} = 0.637 \times \text{Tepe}$$

$$\text{Ortalama} = 0.9 \times \text{RMS}$$

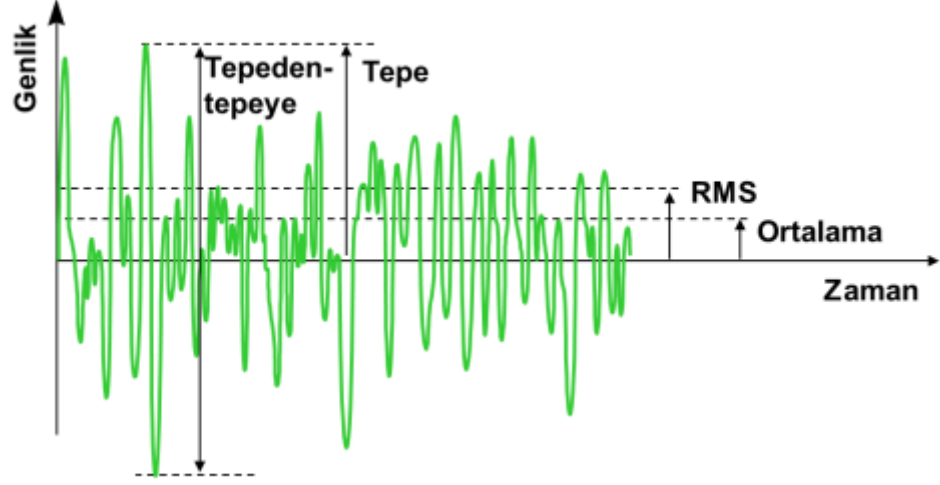
$$\text{Tepeden Tepeye} = 2 \times \text{Tepe}$$

$$\text{Tepe} = 1.414 \times \text{RMS}$$

$$\text{Tepe} = 1.57 \times \text{Ortalama}$$

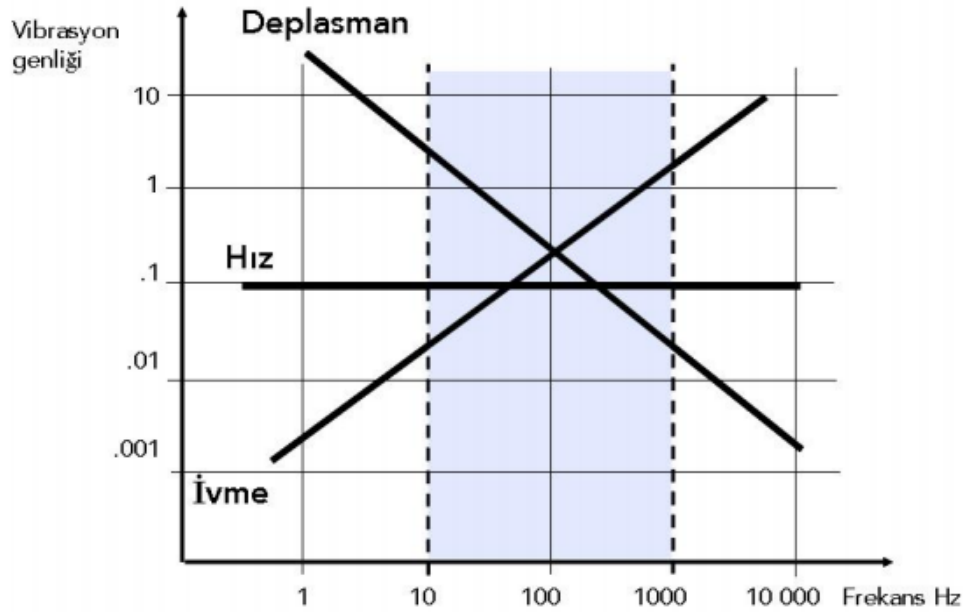
$$\text{RMS} = 0.707 \times \text{Tepe}$$

$$\text{RMS} = 1.11 \times \text{Ortalama}$$



**Şekil 3.3.** Titreşim Grafiği (Bilge,2015)

Titreşim ölçümü yapılırken hangi birimin kullanılacağına karar vermek çok önemlidir. Şekil 3.4'den yorumlanabileceği üzere deplasman ile ölçüm düşük devirli makinelerde, ivme ile ölçüm yüksek devirli makinelerde ve hız ise çoğu ölçümde de kullanılabilir şekilde daha geniş frekans aralıklarında tercih edilir.



**Şekil 3.4.** Genlik-Frekans Grafiği (Karadayı,2011)

**Tepe Değer ( $X_0$ ):** Sıfır noktası ile Tepe Noktası arasındaki titreşim sinyalinin maksimum değerini ifade eder.

**Tepeler Arası Değer ( $2X_0$ ):** Genlik zaman grafiğinde maksimum ve minimum tepe noktaları arasındaki mesafeyi ifade eder.

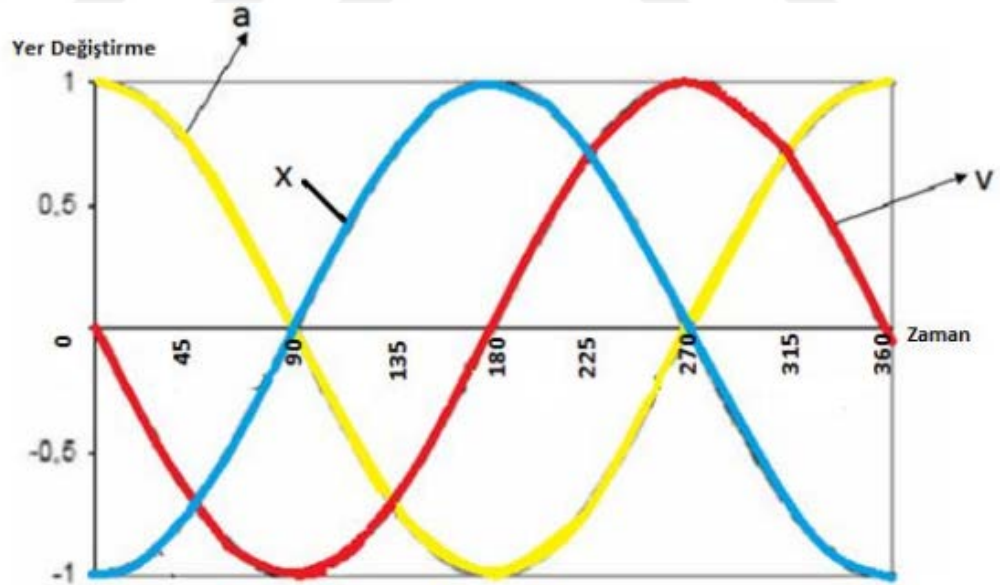
**Ortalama:** Titreşim sinyalinin belirli bir zaman aralığında aldığı değerlerin aritmetik ortalamasıdır.

**RMS (Root Mean Square):** Titreşim sinyalinin belirli bir zaman aralığında aldığı değerlerin karelerinin ortalamasının kareköküdür.

**Yer Değiştirme:** Kuvvet etkisi altındaki kütle için belirli bir referans noktası ya da sıfır noktasına göre kat ettiği yol veya yer değiştirme miktarıdır.

**Hız:** Kuvvet etkisindeki kütle için birim zaman zarfında aldığı yoldur.

**İvme:** Birim zamanda hızda meydana gelen değişimdir. Şekil 3.5’de görüldüğü üzere hız 90 derece, ivme ise 180 derece gecikme ile konumu takip etmektedir.



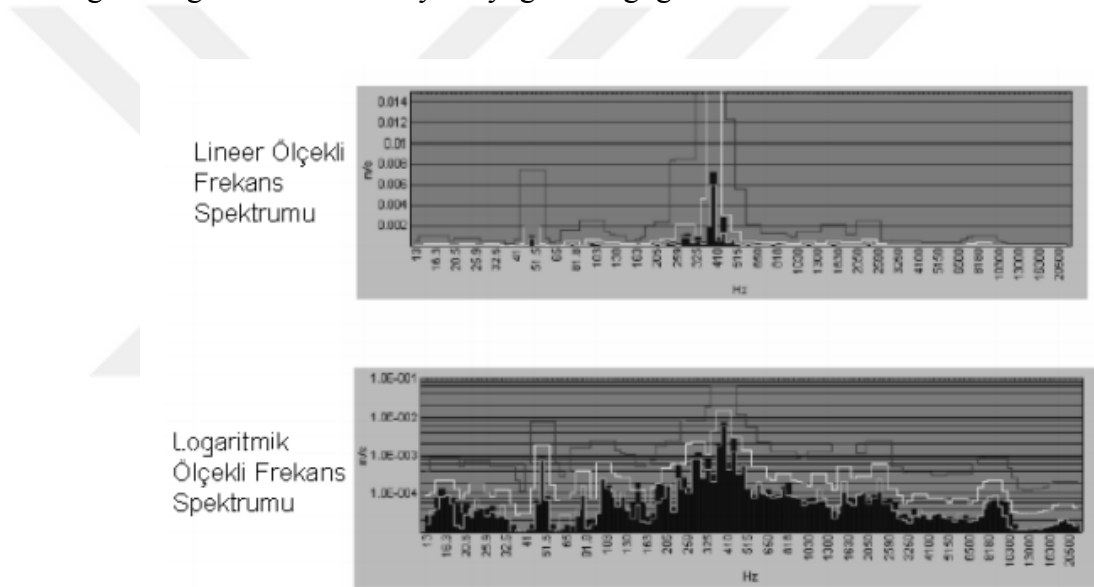
**Şekil 3.5.** Yer değiştirme, hız ve ivme arasındaki ilişki (Bilge, 2015)

**Desibel Ölçeği:** Titreşim ölçümünde kullanılan bir diğer ölçü birimi Desibel’dir. Bazı frekans değerlerindeki titreşimler diğerlerine göre binlerce kat fazla

olabilmektedir. Bu çapta geniş bir aralığı frekans spektrumunda tüm ayrıntıları ile çözümlenmek imkansızdır. Böyle bir durumda logaritmik ölçek kullanmak tercih edilebilir. Desibel, iki genlik oranının 10 tabanına göre logaritmasının 20 katı olarak tanımlanır (Karahana, 2005).

$$dB = 20 \log (x/)$$

Titreşim büyüklüğündeki 2 kat artış desibel ölçeğine 6 dB, 10 kat artış ise 20 db olarak yansır. Desibel ölçeğini kullanarak frekanslardaki artış miktarlarının genlik ölçeğine aynı şekilde aktarılması mümkün olur. Şekil 3.6’da logaritmik ve linner frekans spektrumları karşılaştırılmış ve logaritmik ölçeklide tepe noktalarının daha net görüldüğü ve daha fazla ayrıntıyı gösterdiği görülmektedir.



**Şekil 3.6.** Logaritmik ve lineer ölçekli frekans spektrumlarının karşılaştırılması

### 3.1.2 Random Titreşim Hareketi

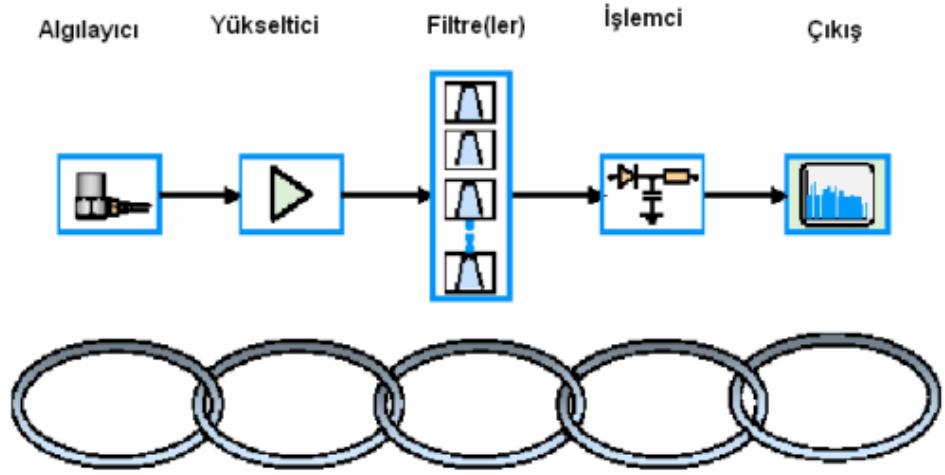
Zamana bağlı olarak tekrarlanmayan, faz ve genlik arasındaki bağıntıları gelişigüzel dağılım gösteren titreşimlerdir.

### 3.1.3 Rezonans

Uygulanan kuvvetin frekansı ile sisteme ait doğal frekans eşit ise kuvvet altında oluşan salınımların genliği artma eğilimi gösterir ve sistem bir noktadan sonra bulunduğu durumu koruyamaz hale gelir. Bu olaya rezonans denmektedir (Bilge, 2015).

### 3.1.4 Titreşimin Ölçülmesi

Titreşim ölçümlerinde genellikle ivme ölçer ile ivme ölçümü yapılır. Sistem sırasıyla algılayıcı, yükseltici, filtre ve çıkış elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 3.7. Titreşim Ölçüm Zinciri (Çay, 2006)

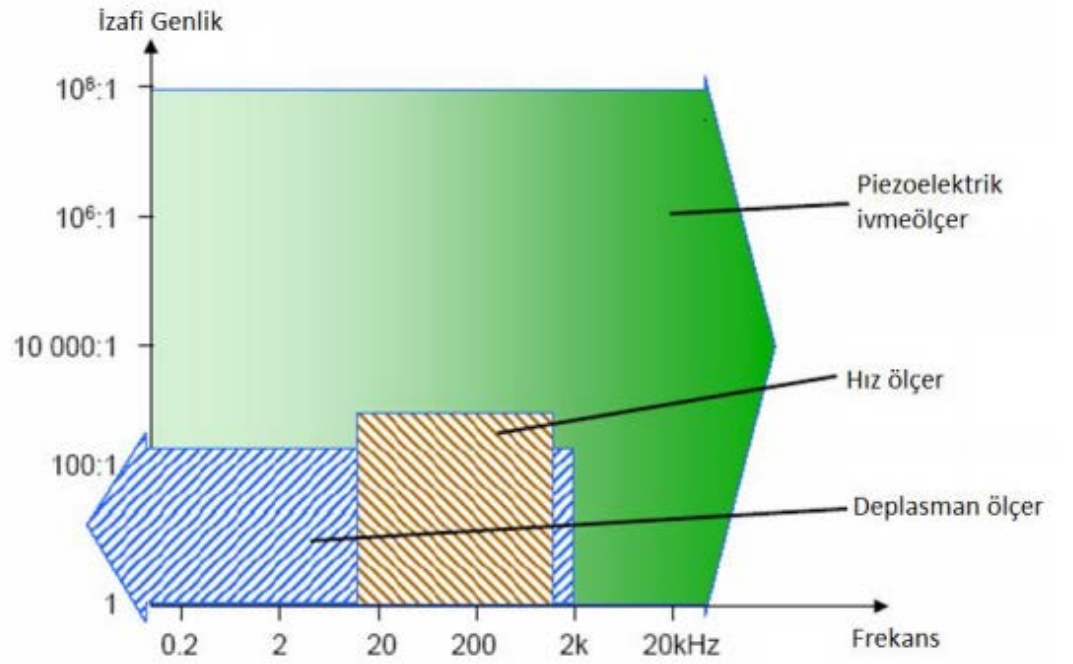
Algılayıcı vasıtasıyla temin edilen elektriksel sinyaller sırasıyla yükseltici ve sonrasında filtreden geçerek işlemciye ulaştırılır. İşlemci titreşimi ölçebilmek için gerekli yazılım ve donanımdan oluşur. İşlemcide çözümlenen veriler titreşim ölçüm cihazı ekranına yansıtılır ve yazdırılır (Çay, 2006).

#### 3.1.4.1 Titreşim Transdüserleri

Titreşim ölçümlerinde deplasman ve hız sensörleri de kullanılabilir olmasına karşın genel olarak ivme sensörlerinin kullanımı tercih edilir. Bunun nedeni, ivme

sensörlerinin çok geniş bir frekans aralığında kullanıma uygun olmaları ve geniş dinamik ölçüm sağlamalarıdır (Karahan, 2005).

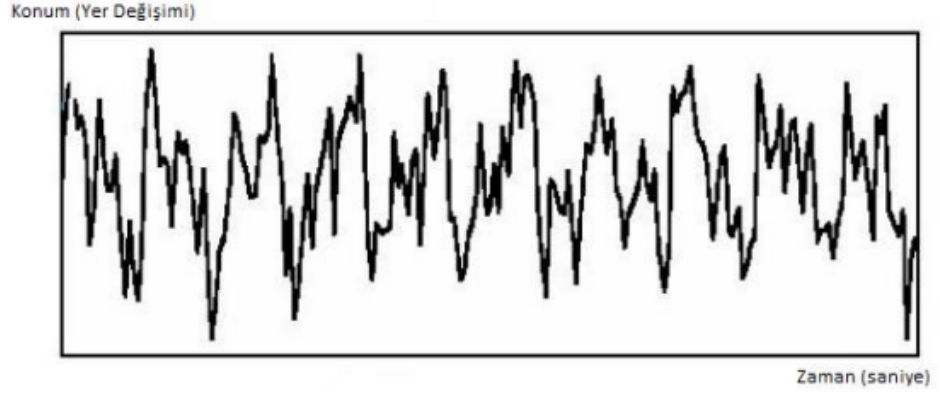
Mekanik sistemlerde büyük deplasmanlar küçük frekans değerlerinde oluşur. Bu sebeple, deplasman ölçümleri bize çok kısıtlı bilgi vermektedir. Yüksek frekans bantlarındaki değişimleri en iyi ivme ölçümleriyle yorumlamak mümkündür (Karahan, 2005).



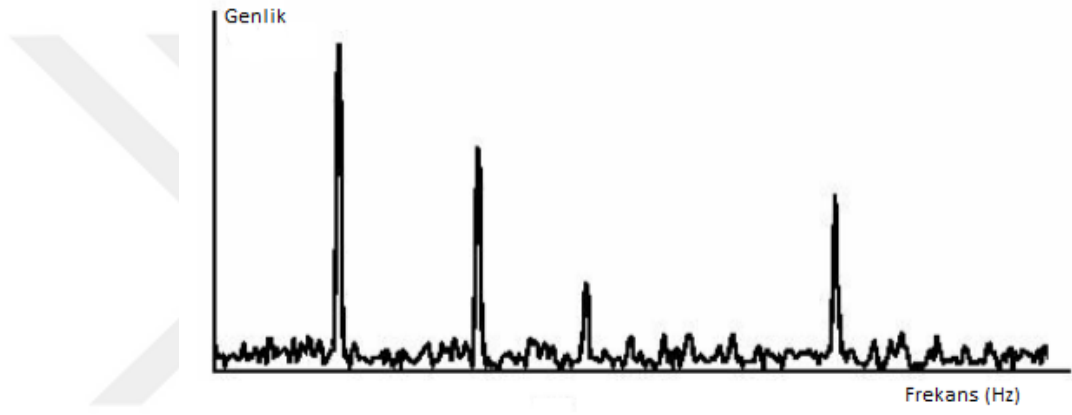
Şekil 3.8. Transdüserlerin çalışma aralığı (Bilge, 2015)

### 3.1.5 Titreşim Analizi

Bir yapının titreşim analizi frekans-alanı analizi ve zaman-alanı analizi ile iki farklı şekilde yapılabilir. Bir başka deyişle hız, ivme ve deplasman genlikleri hem frekans hem de zaman alanında gösterilebilir.



Şekil 3.9. Genlik-zaman grafiği (Bilge, 2015)



Şekil 3.10. Genlik-frekans grafiği (Bilge,2015)

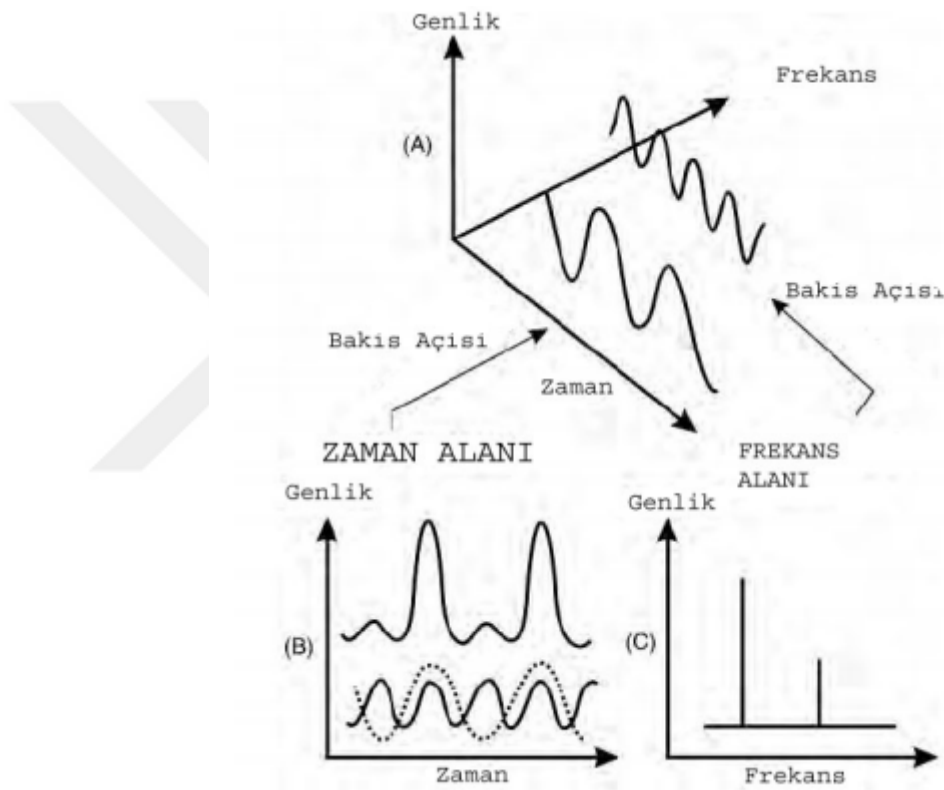
### 3.1.5.1 Zaman-Alanı Analizi

Dalga form sinyallerindeki tepe, ortalama, standart sapma, tepeden tepeye aralık gibi parametreleri içerir. Zaman alanı analizinde dalga formuna sahip verileri parametrik zaman modeline uyarlayarak bu modele uygun özellikleri çıkarmaktır (Bilge, 2015).

### 3.1.5.2 Frekans-Alanı Analizi

Genliğe ait değerlerin kosinüs ve sinüs dalga boyları ile gösterildiği alandır. Yapıya ait kesin frekansı tanımlayabilmek için kullanışlı olması sebebiyle zaman alanı analizine göre daha çok tercih edilir (Bilge, 2015).

**Frekans (Spektral) Analizi-Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT):** Yapılarda ölçümlenen titreşim değerleri her zaman analog (zaman alanında) biçimdedir. Söz konusu titreşim değerlerinin doğru ve kolay bir şekilde çözümlenebilmesi için Fourier analizi (FFT-Hızlı Fourier Dönüşümü) ile frekans alanına dönüştürülmeleri zorunludur. Şekil 3.11’de FFT dönüşümü gösterilmektedir (Baykara, 2009).



**Şekil 3.11.** FFT Dönüşümü (Baykara, 2009)

**Zaman Dalga Formu (Time Wave Form) Analizi:** Zaman dalga formları FFT dönüşümünün kullanılmasının uygun görülmediği yerlerde kısa bir zaman aralığını göstermek amacıyla kullanılır (Baykara, 2009).

**Zaman Dalga Formunun Frekanslara Ayrıştırılması:** Şekil 3.11’de gösterilen sinüs dalgaları yüzlerce farklı genlikteki sinüs dalgalarının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Her biri farklı frekansta olan bu sinüs dalgaları frekans



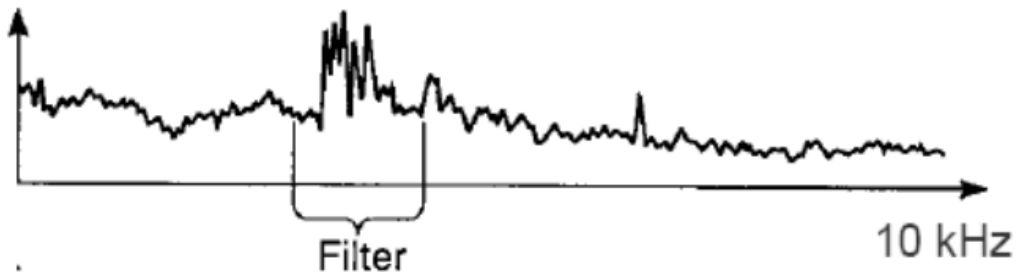
ekseninde ayrı ayrı görüntülenebilir ve böylece bu dalgalara ait frekans ve genlik değerleri bilinebilir (Karadayı, 2011).

Zaman dalga formunun değişik bir versiyonu olan Zarf Belirleme Tekniği ile de toplanan titreşim sinyallerini rezonans frekans bandı çevresindeki yüksek frekansları geçiren bir filtreden geçirerek eksen kaçıklığı, dengesizlik, mekanik gevşeklik gibi durumlardan kaynaklanan frekans sinyallerini ayıklayan bir metottur (Baykara, 2009).

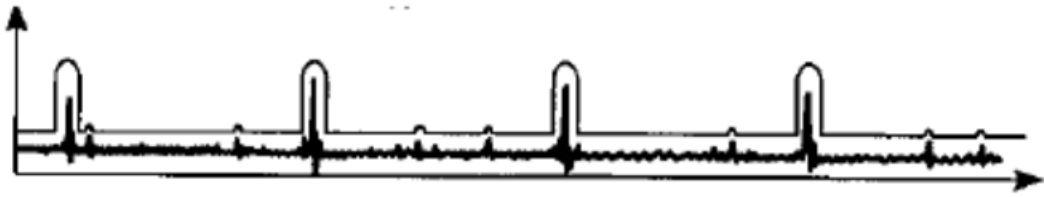
Öncelikle Şekil 3.12'deki karmaşık sinyaller yüksek frekansları geçiren bir filtreden geçirilerek Şekil 3.13'deki filtreden geçirilmiş titreşim sinyalleri elde edilir. Ardından elde edilen bu sinyallere zarf uygulanır ve Şekil 3.14'deki durum elde edilir. Son olarak, zarf uygulanan titreşim sinyalleri FFT işlemi uygulanarak spektrum elde edilir (Karahan, 2005).



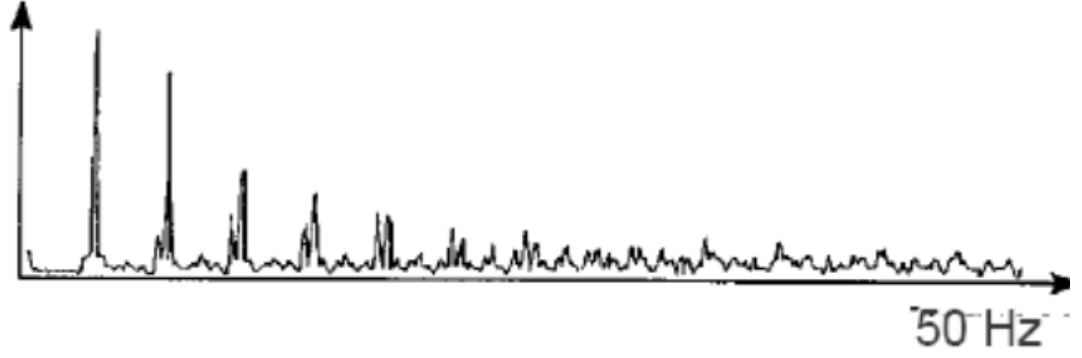
Şekil 3.12. Karmaşık dalga formu (Karahan,2005)



Şekil 3.13. Filtreden geçirilmiş titreşim sinyalleri (Karahan,2005)



Şekil 3.14. Titreşim sinyallerinin zarfı (Karahan,2005)



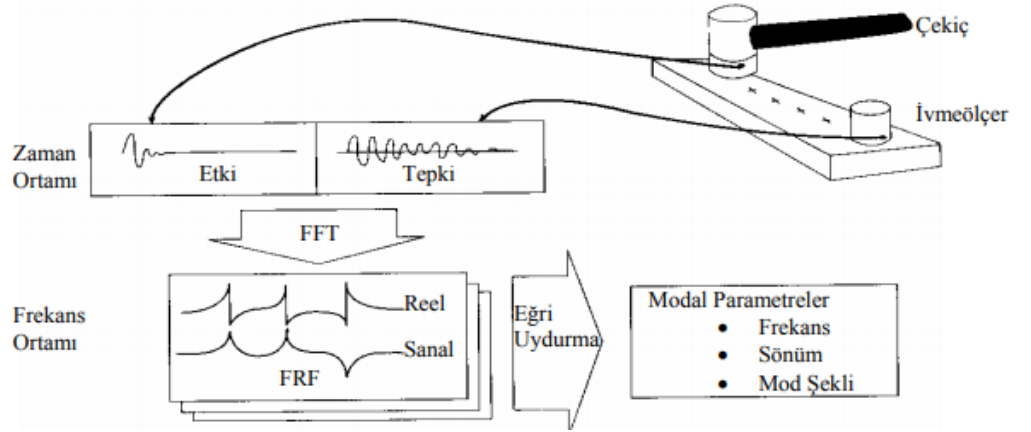
Şekil 3.15. Zarf Spektrumu (Karahana,2005)

### 3.2 Modal Analiz

Modal analiz; titreşen bir sistemin dinamik davranışını gösteren matematik modeli oluşturmak için ihtiyaç duyulan parametrelerin (doğal frekans, titreşim biçimi, iç sönüm gibi) belirlenmesi işlemidir.

Deneyel modal analiz yönteminde yapıya bilinen bir kuvvet uygulanmakta ve yapının bu kuvvete karşın verdiği tepki ölçülmektedir. Bu işlemde yapıyı uyarmak için çekiç, yapının verdiği tepkiyi ölçebilmek için ivmeölçer ve verileri okuyabilmek için bir sinyal analizör kullanılmaktadır (Bayraktar A ve Türker T, 2005).

Günümüzde en çok kullanılan modal test yöntemi olan “darbe çekici testi”, giriş ve çıkış noktalarındaki FRF (Frequency Response Function) hesaplanması yöntemiyle uygulanır. Giriş çekicinin uyguladığı kuvvet, çıkış ise algılayıcının kaydettiği titreşim (ivme)’dir.



**Şekil 3.16.** Deneysel Modal Analizde Ölçüm Yöntemi (Bayraktar ve Türker, 2005)

Şekil 3.16’da görüldüğü üzere sisteme uygulanmakta olan etki (impact) çekiç başlığına yerleştirilmiş olan bir kuvvetölçer yardımı ile zaman ortamında ölçülmektedir. Sistem, uygulanmakta olan bu kuvvet vasıtasıyla malzeme özelliklerine de bağlı olarak titreşim hareketi yapmaktadır. Sistemin bu etkiye karşın verdiği tepki (response) ise sisteme bağlanmış olan ivmeölçer ile yine aynı zaman ortamında ölçülmektedir. Ardından Fourier (FFT-Fast Fourier Transform) dönüşümü kullanılarak etki ve tepki fonksiyonları zaman ortamından frekans ortamına dönüştürülür. Yapının frekans davranış fonksiyonu (FRF-Frequency Response Function) Fourier dönüşümleri yapılan tepki fonksiyonunun etki fonksiyonuna bölünmesiyle bulunur. Frekans davranış fonksiyonu ile sistemin mod şekilleri, doğal frekansları ve sönüm oranları belirlenir. (Bayraktar ve Türker,2005).



**Şekil 3.17.** Etki ve Tepki fonksiyonlarının zaman ortamından frekans ortamına dönüştürülmesi (Bayraktar ve Türker,2005)

$$H_{\omega} = \frac{X_{\omega}}{F_{\omega}}$$

Burada;

$X_\omega$  : Frekans ortamındaki tepki fonksiyonunu

$F_\omega$  : Frekans ortamındaki etki fonksiyonunu

$H_\omega$  : Frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir.

### 3.3 Tabakalı Kompozit Kirişlerde Titreşim Analizi

Birçok mühendislik uygulamasında kompozit yapıların titreşim analizi önem kazanmaktadır. Özellikle motor veya makine aksamalarının mekanik dizaynında dinamik yükler sonucunda oluşan titreşimler de ayrı bir öneme sahiptir. Çalışma şartları ve kullanım yerlerine göre tabakalı kompozitlerde büyük genlikli titreşimler oldukça etkilidir. Çeki modülü/enine kayma modülü oranının yüksek olması nedeniyle, hem ince hem de kalın plaka ve çubuklarda ortaya çıkan enine kayma deformasyonları yüksek frekanslı titreşim analizleri için önemlidir. Yüksek dereceli kayma deformasyon teorileri tabakalı kompozit kirişler için yapılan titreşim analizlerinde önemli bir kullanım alanına sahiptir (Baltacı ve Sarıkanat, 2006).

Bir serbestlik dereceli sistemlerin titreşim davranışlarına göre çok serbestlik dereceli sistemlerin titreşim davranışı farklılık göstermektedir. Bunun için n tane doğal frekansa sahip diferansiyel denklem tanımlanarak N serbestlik derecesine sahip bir sistem çözümlenebilir. Bu sistemin çözümlenebilmesi özel ve homojen çözüm toplamlarıyla mümkündür. Homojen çözümde sisteme ait serbest titreşim özellikleri görülebilirken, özel çözümde, zorlanmış titreşim özellikleri görülmektedir. Homojen çözüm sonucunda ortaya çıkan sistemin doğal frekansları ile bu sistemin zorlanmış titreşim özelliklerinin belirlenmesi için özel çözümde kullanılmaktadır. Zorlanmış titreşim değerlerinin çözümlenebilmesi için en yaygın yöntem olarak modal analiz kullanılır (Baltacı ve Sarıkanat, 2006).

Tabakalı kompozit malzemelerin titreşim analizi konusunda yapılan çalışmaların çoğu çapraz-tabakalı kompozitler ile ilgilidir. Ancak, kompozit malzemelerin açılı-tabakalı diziliş durumunda yani değişik açılarda dizilişinde nasıl bir modal davranış göstereceği ve doğal frekansların nasıl etkileneceği yeteri kadar incelenmemiştir (Çevik M, 2007).

Genellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve stiffness/ağırlık oranı gibi üstün özelliklere sahip olmaları nedeniyle uzay, otomotiv, denizcilik ve inşaat gibi birçok alanda kullanılıp metallerin yerini almaya başlayan elyaf takviyeli kompozitlerde son 20-30 yıl içinde yapılan çalışmalarda ciddi bir artış meydana gelmiştir. Buna karşın bu malzemelerin kullanımlarının yaygınlaşması ile yeni problemler ortaya çıkmaktadır. Bu problemlerden en önemlisi kompozit malzemelerin titreşim davranışıdır (Çevik M, 2007).

Tasarım faaliyetlerinde istenmeyen titreşim davranışını kontrol altında tutmak, faydalı olması bakımından, önemlidir. Buna karşın, bir sistemde titreşimin ortaya çıkması genel olarak istenmemektedir. Çünkü, titreşim sırasında sistemde meydana gelebilecek aşırı miktardaki kuvvet ve yer değiştirmeler malzeme yorulması, aşınma, yüksek gerilme, gürültü ve enerji kaybına yol açabilir. Bu nedenle, titreşimin mümkün olduğunca azaltılması ya da ortadan kaldırılması önemlidir (Çalışkan M, 1993).

Fiziksel sistemler genel olarak zorlanmış veya serbest iki farklı şekilde titreşime sahiptirler. Eğer bir sistem dışarıdan bir kuvvete maruz kalmadan belirli başlangıç şartları altında titreşim gösteriyorsa, serbest titreşim meydana gelmektedir. Bu tarz bir sistem, sistemin doğal frekans değerlerinde titreşim hareketi gösterecektir ve sönümlenme yapabilecek bir eleman olmadığı için hareket devam edecektir. Her bir yapı serbestlik derecesi kadar doğal frekansa sahiptir. Tek serbestlik derecesine sahip yapılarda tek bir doğal frekans görülürken, bu çalışmada kullanılan kiriş gibi yayılı kütlelere sahip ve sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip yapılarda sonsuz doğal frekans vardır. Eğer dinamik bir kuvvet altında zorlamaya uğramış titreşimler yapan bir sistemin doğal frekansı zorlamanın frekans değerlerinden herhangi biri ile aynı değere sahip olursa, rezonans ortaya çıkar. Rezonans meydana geldiğinde yapının titreşim genliği de artmaya başlar (Çalışkan M, 1993).

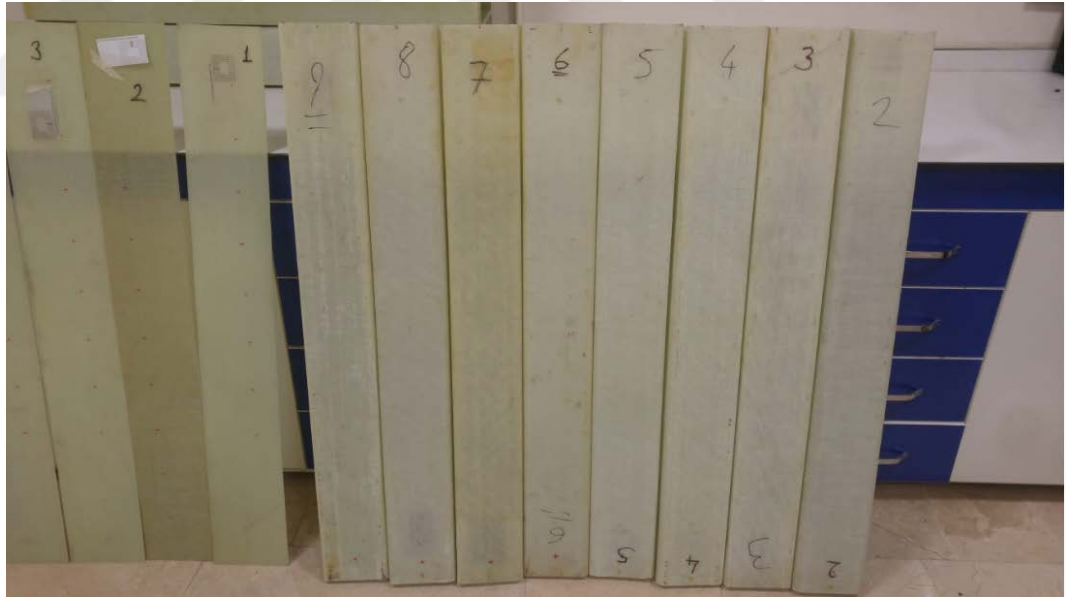
Yapılara ait dinamik davranışlar üç farklı şekilde belirlenebilmektedir. Bunlar deneysel yaklaşım, teorik analiz ve modal analiz yöntemleridir. Bu çalışmada deneysel olarak çekiç testi ile elde edilen titreşim frekansları, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen yapının titreşim analizi sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçları yorumlanmıştır.

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu deney çalışmasında, fiber malzemesi cam-elyaf, matris malzemesi ise epoksi olan 9 adet ve 8 tabakalı kompozit U profiller kullanılmıştır. Profiller 1100 mm uzunluğunda 140 mm yüksekliğinde, 280 mm genişliğinde ve 6 mm et kalınlığında olacak şekilde elle yatırma metoduyla üretilmiştir. Sınır şartı olarak kiriş bir ucundan ankastre olarak bağlanmıştır. Fiber diziliş açıları 8 tabakalı profillerde  $[0^0]_8$  ve  $[90^0]_8$ , simetrik dizilişe sahip olanlarda ( $[0^0/0^0/30^0/30^0]_s$ ,  $[0^0/0^0/45^0/45^0]_s$ ,  $[0^0/0^0/60^0/60^0]_s$  ve  $[0^0/0^0/90^0/90^0]_s$ ), simetrik olmayan dizilişe sahip olanlarda ise ( $[0^0_2/45^0_2/0^0_2/45^0_2]$ ,  $[0^0_2/60^0_2/0^0_2/60^0_2]$  ve  $[0^0_2/90^0_2/0^0_2/90^0_2]$ )'dir.

**Çizelge 4.1.** Cam-elyaf epoksi kompozit malzemenin teknik özellikleri

$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$G_{12}$ (MPa)	$\nu_{12}$	$X_t$ (MPa)	$Y_t$ (MPa)	$X_c$ (MPa)	$Y_c$ (MPa)	S (MPa)	$V_f$ (%)
36200	15400	6340	0.28	935	87	935	151	84	60



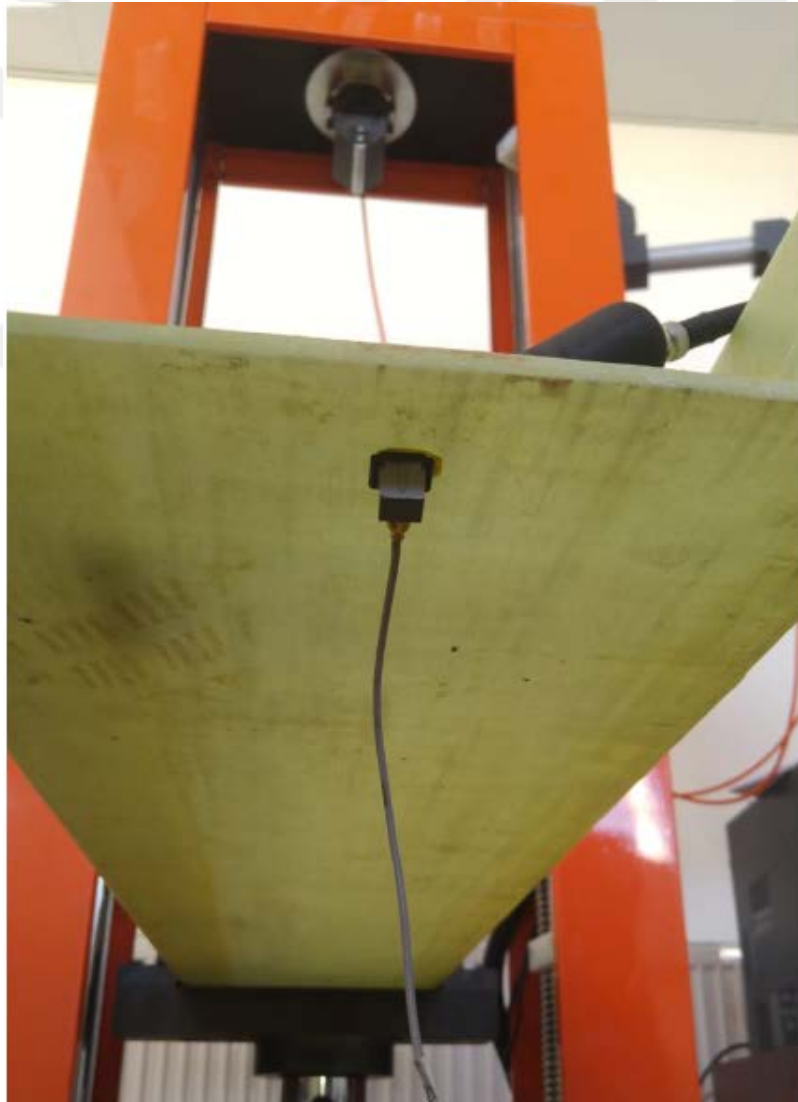
**Şekil 4.1.** Çalışmada kullanılan 8 tabakalı U profil tabakalı kompozit kirişler

#### 4.1 Deney Esnasında Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar

Tabakalı Kompozit U Profillerin ölçebilmek amacıyla darbe çekici, ivme ölçer, sinyal şartlandırıcı ve sinyal analiz yazılımı kullanılmıştır.

##### 4.1.1 İvmeölçer

100 mV/g hassasiyetine ve 0,3 Hz- 6 kHz frekans aralığına sahip olan Brüel&Kjaer marka ivmeölçer ile U profil kirişe uygulanan darbenin oluşturduğu titreşimler ölçülmüştür.



Şekil 4.2. U Profil altına monte edilen ivmeölçer

#### 4.1.2 Darbe Çekici

2.27 mv/N hassasiyetinde ve 2200 N maksimum kuvvete sahip olan Brüel&Kjaer marka darbe çekici vasıtasıyla U Profil kirişlere darbe uygulanmıştır.



Şekil 4.3. Titreşim ölçümünde kullanılan Brüel&Kjaer marka darbe çekici

#### 4.1.3 Sinyal Şartlandırıcı

Sinyal şartlandırıcı ile ivmeölçer ve darbe çekiciden toplanan veriler işlenmiştir. Toplanan sinyallerin filtrelenmesini, yükseltilmesini, dijital sinyallere dönüştürülmesini ve bilgisayara aktarımını sağlar.

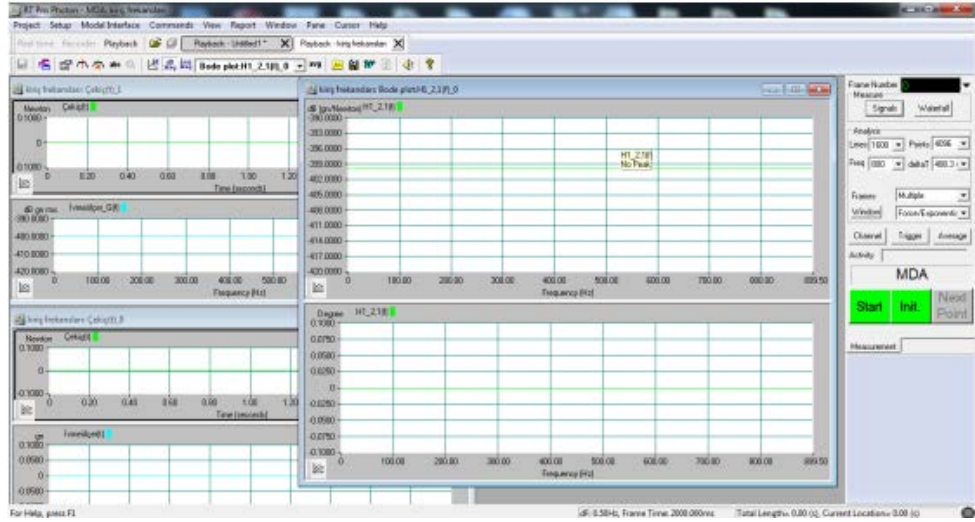




**Şekil 4.4.** Brüel Kjaer PHOTON+ sinyal şartlandırıcı

#### **4.1.4 Sinyal Analiz Yazılımı**

Sinyal şartlandırıcı yardımı ile gelen titreşim sinyallerinin analizini yapmak için kullanılan Brüel&Kjaer firmasının yazılımıdır. Sistem ve kullanıcı arasında oluşturduğu arayüz ile titreşim sinyallerinin kolaylıkla kullanıcı tarafından okunabilmesini sağlar. Bu sayede sisteme ait doğal frekans ve mod biçimlerini kolaylıkla elde edilmesini sağlar.



**Şekil 4.5.** Kullanılan sinyal analiz yazılımından bir görüntü

## 4.2 Titreşim verisi alma ve U Profil Kirişin Doğal Frekans Tespiti

Deneyisel modal analiz ölçümleri için Tabakalı Kompozit U Profil Kirişler yorulma cihazına aparatlar yardımıyla bir ucundan ankastre edilmiş ardından çekicinin vurulacağı ve ivmeölçerin bağlanacağı nokta belirlenmiştir. Ölçüm işlemi için ölçümün yapılması planlanan frekans aralığı 0-1400Hz frekans aralığında olacağı düşünülmüştür. Fourier dönüşümü daha önceden belirlenen frekans aralığı için sinyal analiz yazılımı tarafından otomatik olarak yapılmıştır.

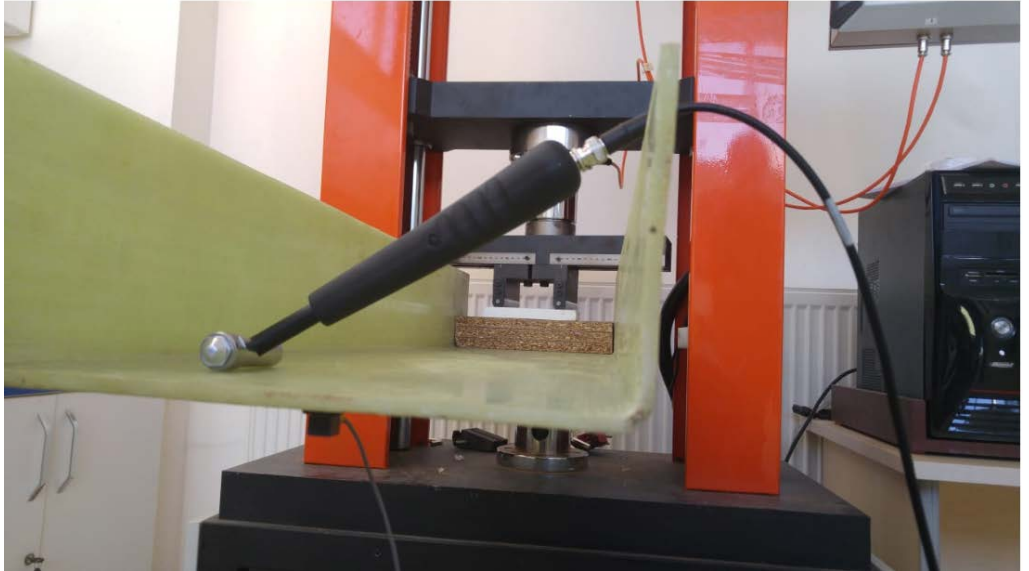


**Şekil 4.6.** Bir ucundan ankastre edilmiş 8 tabakalı kompozit U profil kiriş



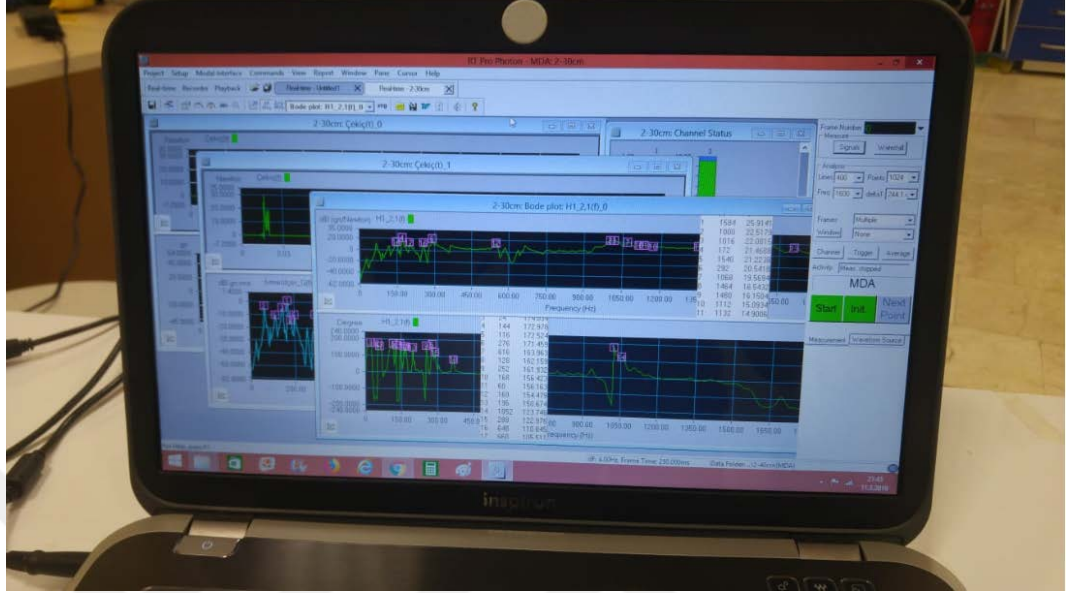
**Şekil 4.7.** İvmeölçer'in U profil kiriş üzerindeki konumu

Öncelikle ölçüm frekans bandını kontrol etmek amacıyla yapıya çekiçle birden çok defa vurulmuş, ivmeölçer ve kuvvetölçer hassasiyetleri belirlenmiştir. Ardından ölçüm işlemi için yapıya belirlenen yerden bir defa vurulmuş ve kiriş titreşimden çıkıp kararlı yapıya ulaşana dek bir süre beklenmiştir. Aynı işlem her bir kiriş için iki kere tekrarlanmıştır.



**Şekil 4.8.** Darbe Çekici'nin U Profil Kiriş üzerine uygulanması

Ölçüm işlemi tamamlandıktan sonra, her bir kiriş için cihaz ekranından yeterli şartları sağladığı görülen sisteme ait doğal frekanslar ve modal parametreler (mod şekilleri) çıkarılmıştır.



**Şekil 4.9.** Sonuçların Photon programı üzerinden okunması

### 4.3 Deneysel Sonuçların Sonlu Elemanlar Analizi ile Doğrulaması

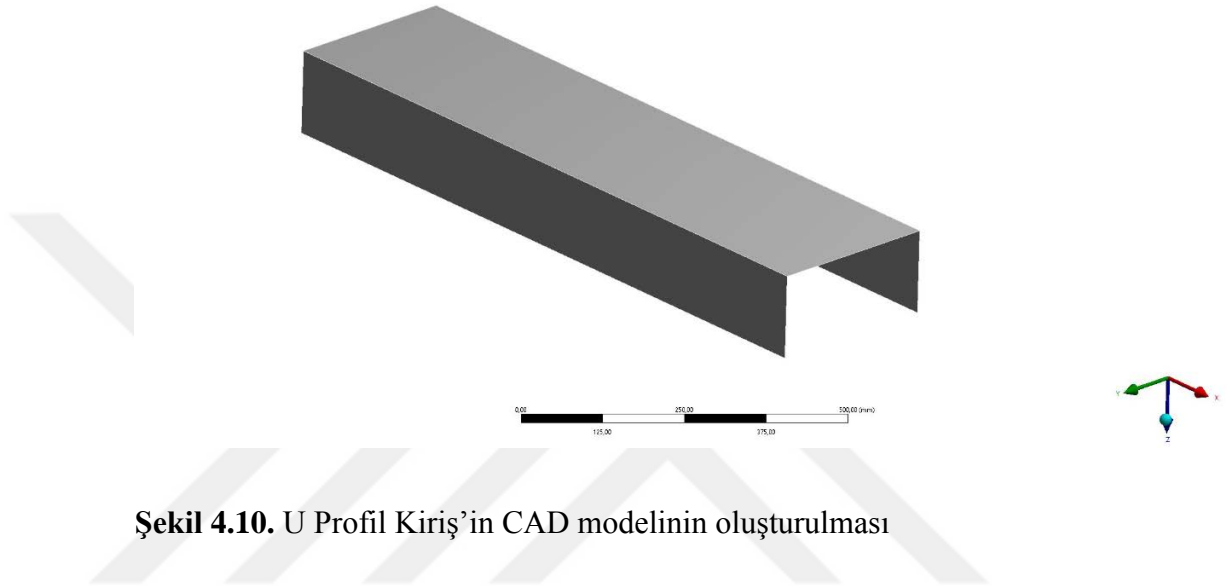
Oluşturulan modelin geçerliliğini ve deneysel sonuçların hassasiyetini doğrulamak için sonlu tanımlanan, her bir tabaka kalınlığı 0,75mm olan 8 tabakalı simetrik ve antisimetrik dizilime sahip U profil kompozit kirişler oluşturulmuş ve ANSYS ile titreşim analizleri yapılmıştır.

Bunun için sırasıyla;

- CAD (Computer Aided Design-Bilgisayar Destekli Tasarım) modelinin oluşturulması
- Malzeme özelliklerinin tanımlanması
- Yapının küçük parçalara ayrılması (Meshing)
- Sınır şartlarının girilmesi
- Titreşim analizinin gerçekleştirilmesi
- Sonuçların görüntülenmesi adımları takip edilmiştir.

### 4.3.1 CAD (Computer Aided Design-Bilgisayar Destekli Tasarım) modelinin oluşturulması

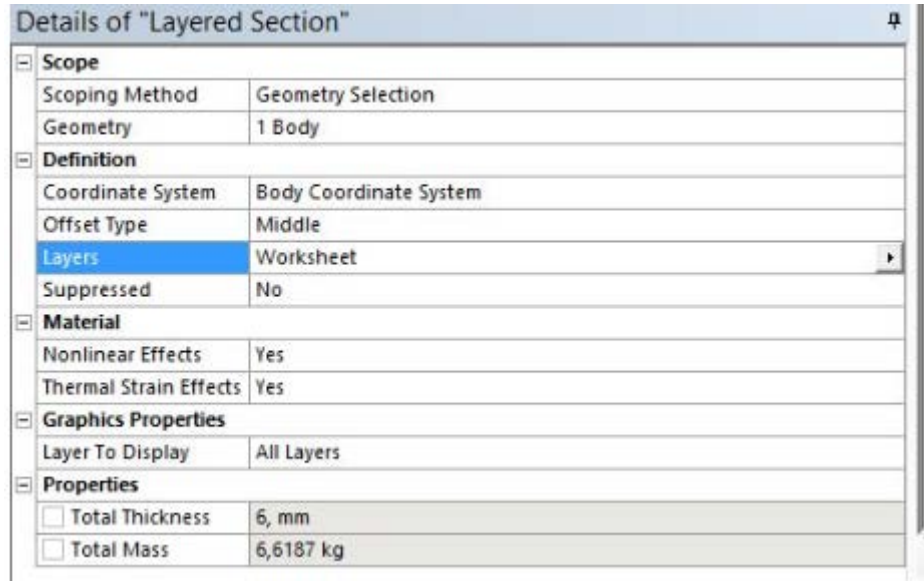
1100 mm uzunluğunda 140 mm yüksekliğinde, 280 mm genişliğinde ve 6 mm et kalınlığında U profil 8 tabakalı kompozit kirişin Sketching ve Modeling kısımlarından CAD modeli oluşturulmuştur.



Şekil 4.10. U Profil Kiriş'in CAD modelinin oluşturulması

### 4.3.2 Tabakaların ve fiber diziliş açılarının Ansys'de tanımlanması

İkinci olarak Model kısmında yer alan Layered Section penceresi açılmış ve oluşturulması istenen tabaka sayısı belirlenmiştir. Worksheet'e girilerek her bir tabakanın kalınlığı ve diziliş açısı atanmıştır.



**Şekil 4.11.** Tabaka özelliklerinin belirlenmesi

Layer	Material	Thickness (mm)	Angle (°)
(+Z)			
8	KOMPOZİT	0,75	45
7	KOMPOZİT	0,75	45
6	KOMPOZİT	0,75	0
5	KOMPOZİT	0,75	0
4	KOMPOZİT	0,75	45
3	KOMPOZİT	0,75	45
2	KOMPOZİT	0,75	0
1	KOMPOZİT	0,75	0
(-Z)			

**Şekil 4.12.** Fiber diziliş açılarının tanımlanması

### 4.3.3 Malzeme özelliklerinin tanımlanması

Cam-elyaf epoksi kompozit malzemenin teknik özellikleri Engineering Data penceresinden tanımlanmıştır. Bu aşamada yapılacak analiz için gerekli olan Density, Young's Modulus, Poisson's Ratio, Shear Modulus gibi özellikler girilir.

Properties of Outline Row 2: RCP0021			
A	B	C	
Property	Value	Unit	
Material Field Variables	Table		
Density	1830	kg m <sup>-3</sup>	
Orthotropic Elasticity			
Young's Modulus X direction	36200	MPa	
Young's Modulus Y direction	15400	MPa	
Young's Modulus Z direction	15400	MPa	
Poisson's Ratio XY	0.28		
Poisson's Ratio YZ	0.03		
Poisson's Ratio XZ	0.03		
Shear Modulus XY	6340	MPa	
Shear Modulus YZ	6340	MPa	
Shear Modulus XZ	6340	MPa	
Orthotropic Stress Limits			
Tensile X direction	5,35E+08	Pa	
Tensile Y direction	8,7E+07	Pa	
Tensile Z direction	8,7E+07	Pa	
Compressive X direction	-9,35E+08	Pa	
Compressive Y direction	-1,55E+08	Pa	
Compressive Z direction	-1,55E+08	Pa	
Shear XY	8,4E+07	Pa	
Shear YZ	8,4E+07	Pa	
Shear XZ	8,4E+07	Pa	

**Şekil 4.13.** Cam-elyaf epoksi kompozit malzemenin teknik özelliklerinin Ansy'de tanımlanması

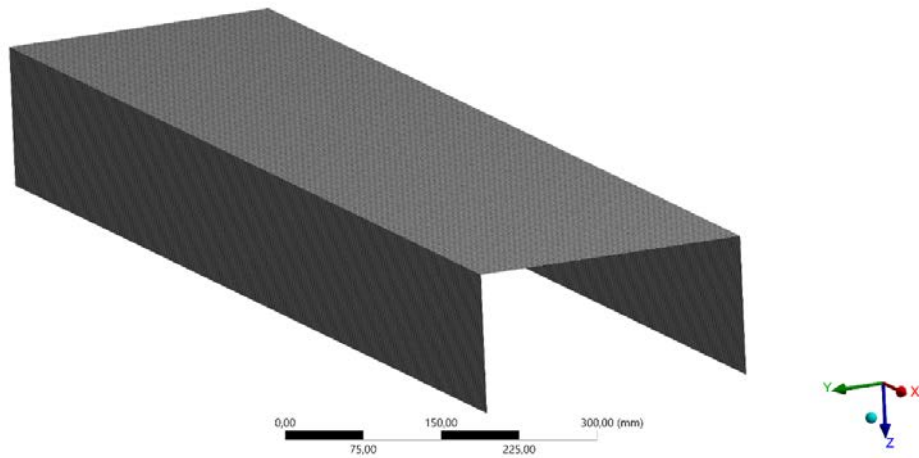
#### 4.3.4 Yapının küçük parçalara ayrılması (Meshing)

Yapının daha küçük fiziksel tanım aralıklarına (elemanlara) bölünmesi ile sonuçların yaklaşım doğruluğu artırılmıştır. Şekil 4.13'de uygulanan Mesh işleminin detay tablosu bulunmaktadır. Bu çalışmada mesh boyutu 3 mm olarak belirlenmiştir.

TABLE 6  
Model (B4) > Mesh

Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Body Color
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	3, mm
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	No
Growth Rate	Default (1,2)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default (1.5e-002 mm)
Capture Curvature	Yes
Curvature Min Size	Default (3.e-002 mm)
Curvature Normal Angle	Default (30,°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	1141,9 mm
Average Surface Area	2,0093e+005 mm²
Minimum Edge Length	137, mm
<b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	2
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Use Sheet Thickness for Pinch	No
Pinch Tolerance	Default (2.7e-002 mm)
Generate Pinch on Refresh	No
Sheet Loop Removal	No
<b>Statistics</b>	
Nodes	67709
Elements	67159

Şekil 4.14. Yapının Mesh özelliklerinin belirlenmesi

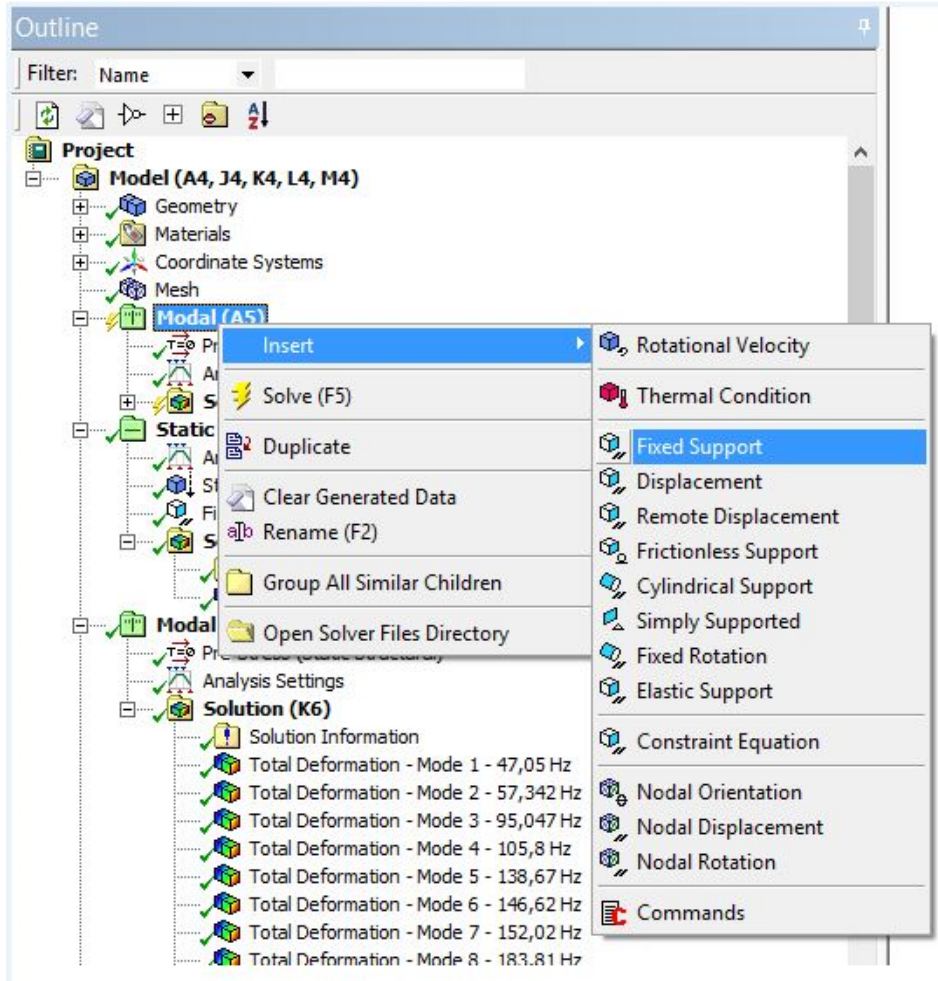


Şekil 4.15 U profil kirişin Mesh işlemi yapılmış durumu

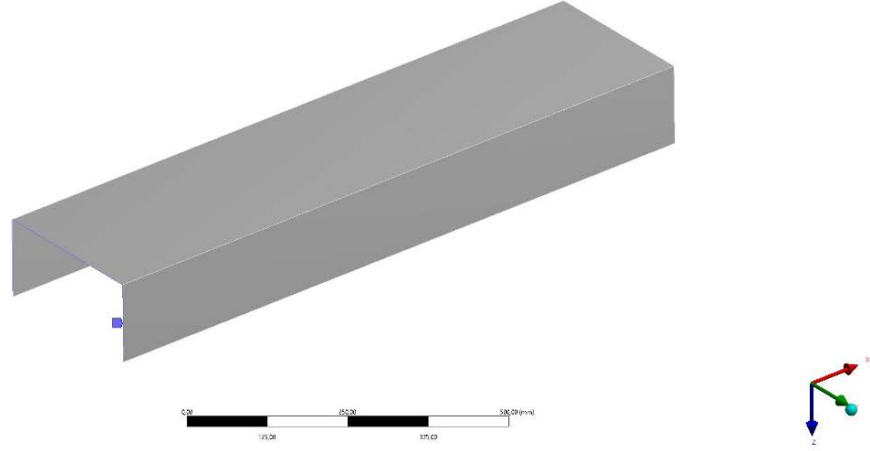


### 4.3.5 Sınır şartlarının girilmesi

Aşağıda modelin sınır şartları belirlenmiştir. “Static Structural” kısmına tıklandığında üstteki semeler açılır. Bu sekmelerden gerekli sınır şartları uygulanabilir. “Fixed Support” sekmesi seçilir. Sol alt köşede “Details of Fixed Support” penceresi açılır. Burdan “Geometry” bölümünden sabitlenecek yüzeyler seçilir. Bu çalışmada U Profil’in bir yüzü sabitlenerek ankastre kiriş üzerinde çalışma yapılmıştır.



Şekil 4.16. Ansys'te “Fixed Support” sabitleyici tanımlama



**Şekil 4.17.** U profil kirişin sabitlendiği yüzey

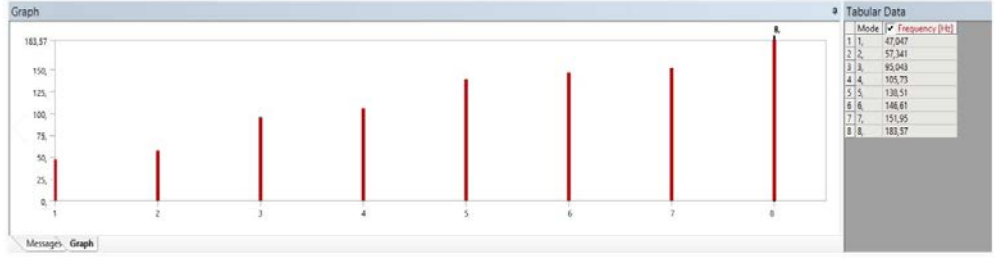
Modal analizde bulunulması istenen mod sayısı ve frekans aralığı “Details of Analysis Settings” kısmında tanımlanır. Bu çalışmada her bir kiriş için 0-1400 Hz aralığında 8 mod analiz yapılması istenmiştir.

Details of "Analysis Settings"	
Options	
Max Modes to Find	8
Limit Search to Range	Yes
Range Minimum	0, Hz
Range Maximum	1400, Hz
Solver Controls	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
Rotordynamics Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	

**Şekil 4.18.** Ansys’de mod sayısı ve frekans aralığını belirleme

### 4.3.6 Sonuçların görüntülenmesi

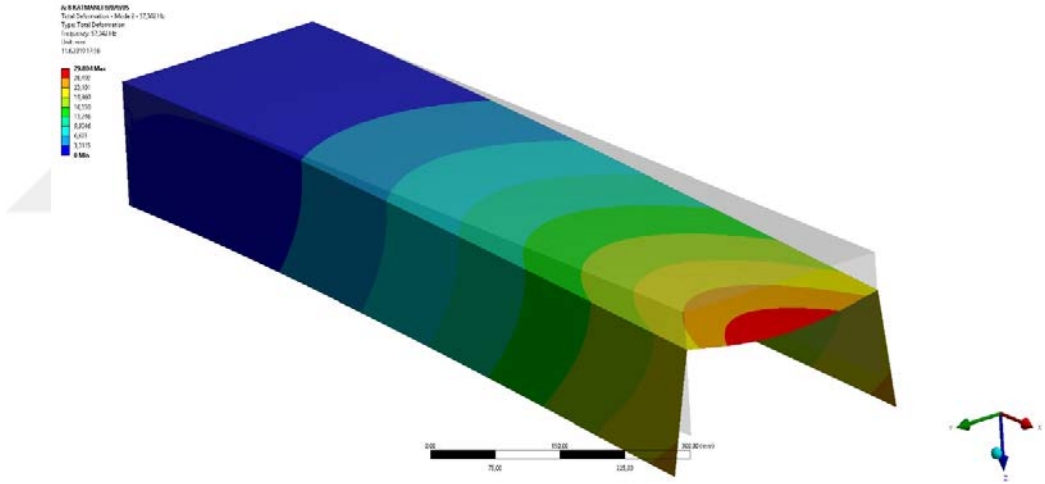
Çözüm yapıldıktan sonra “Graph” penceresinde sırayla sağ tuş – “Select All” – “Create Mode Shape Results” tıklanarak mod şekilleri “Solution” kısımdan görülebilir.



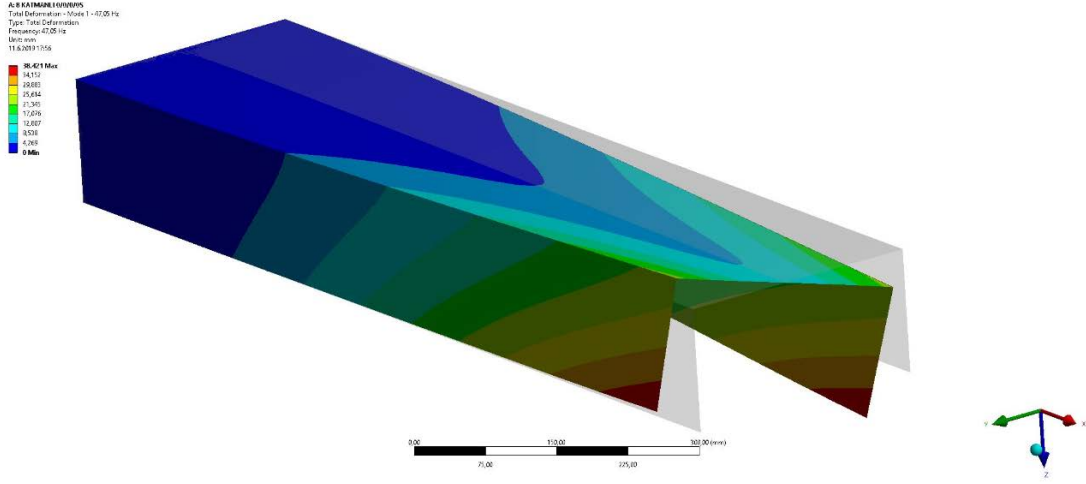
**Şekil 4.19.** Ansys’de sonuçların görüntülenmesi

#### 4.3.7 Titreşim analizinin gerçekleştirilmesi

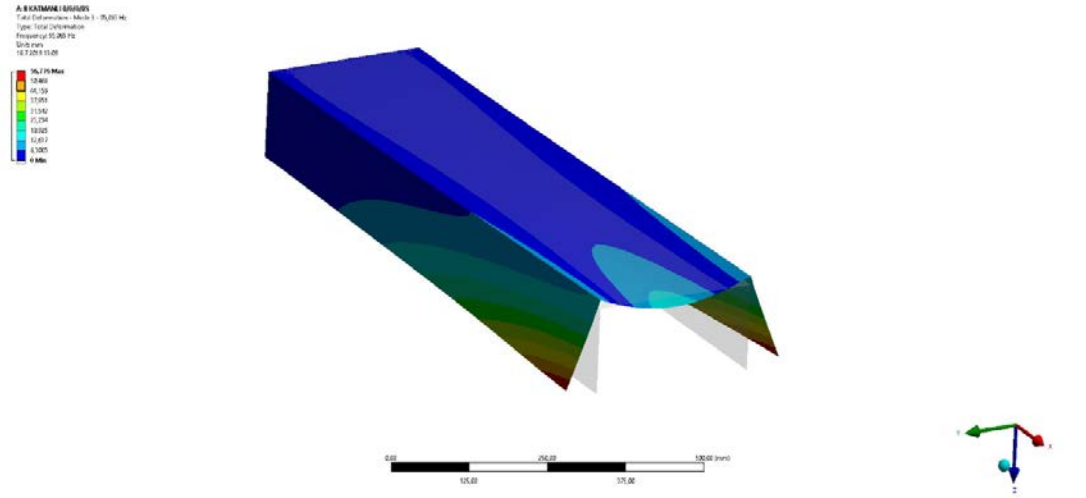
Yapılan çalışmada U Profil’in yapısından kaynaklanan frekanslar tespit edilmiştir. Şekil 4.19 ve 4.20’de örnek olarak Mod 1 (eğilme modu) ve Mod 2 (burulma modu) verilmiştir.



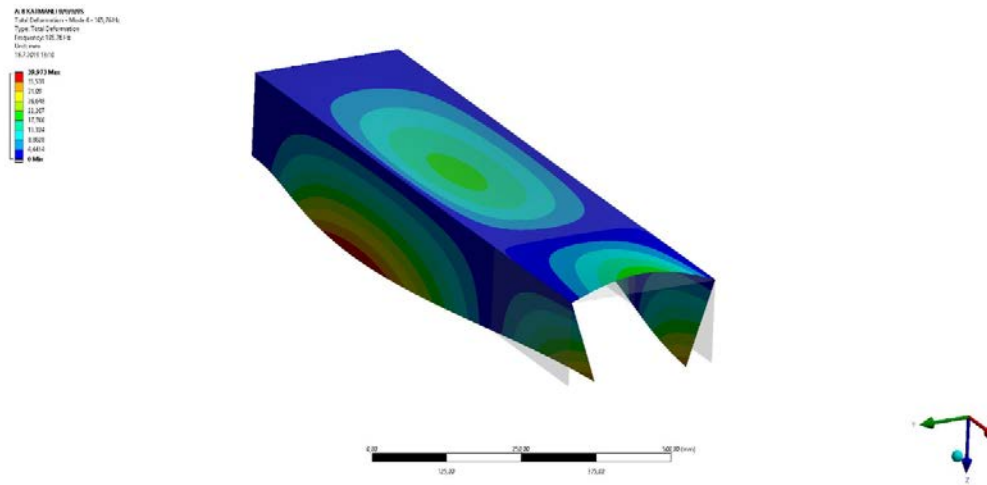
**Şekil 4.20.** U Profil’in  $[0^0]_8$  fiber dizilişinde birinci mod (eğilme) görüntümü



**Şekil 4.21.** U Profil'in  $[0^0]_8$  fiber ikinci mod (burulma) görünümü



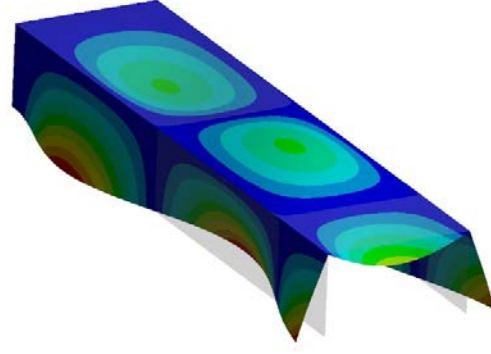
**Şekil 4.22.** U Profil'in  $[0^0]_8$  fiber üçüncü mod görünümü



**Şekil 4.23.** U Profil'in  $[0^0]_8$  fiber dördüncü mod görünümü

A. BILGİNİNİN İNCELEMESİ  
Type: Customization - Modül 1 - 08/2014  
Type: Etkin Değerlendirme  
Program: ANSYS  
Unit: mm  
0.0 20.0 40.0 60.0 80.0 100.0

Max Min  
20.451  
10.000  
15.000  
15.000  
10.000  
5.000  
0.000  
0.000



Şekil 4.24. U Profil'in  $[0^0]_8$  fiber beşinci mod görünümü

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Çizelge 4.1’de özellikleri verilen kompozit kirişlerin deneysel olarak dikey yöndeki ilk 5 mod için doğal frekansları elde edilmiş ve Ansys programında elde edilen dikey yöndeki nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

### 5.1 8 Katmanlı U Profil Kompozit Kirişlerde Titreşim Analizi Ölçüm Sonuçları

**Çizelge 5.1.**  $[0^0]_8$  fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans [Hz]		Fark %
	Deneysel	Nümerik	
1	49,44	47,05	4,83
2	63,54	57,342	9,75
3	146,5	146,72	-0,15
4	175,2	183,75	-4,88
5	217,5	216,61	0,40

**Çizelge 5.2.**  $[90^0]_8$  fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans [Hz]		Fark %
	Deneysel	Nümerik	
1	56,58	61,503	-8,70
2	96,31	93,155	3,27
3	154,7	158,41	-2,39
4	192,3	192,83	-0,27
5	228,1	233,91	-2,54

### 5.1.1 Simetrik Diziliş Sahip 8 Katmanlı U Profil Kompozit Kirişlerin Titreşim Analizi

**Çizelge 5.3.**  $[0^0/0^0/30^0/30^0]_s$  simetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans [Hz]		Fark %
	Deneysel	Nümerik	
1	45,04	47,342	-5,11
2	57,86	57,466	0,68
3	136,6	140,1	-2,56
4	161,5	151,85	5,97
5	196,3	187,35	4,55

**Çizelge 5.4.**  $[0^0/0^0/45^0/45^0]_s$  simetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans [Hz]		Fark %
	Deneysel	Nümerik	
1	48,700	48,863	-0,33
2	61,523	58,953	4,17
3	85,140	94,354	-10,8
4	145,500	140,63	3,34
5	175,8	184,35	-4,86

**Çizelge 5.5.**  $[0^0/0^0/60^0/60^0]_s$  simetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans [Hz]		Fark %
	Deneysel	Nümerik	
1	64,450	61,971	3,84
2	96,5	95,023	1,53
3	103,800	105,29	-1,43
4	150,500	151,27	-0,51
5	180,200	183,7	-1,94

**Çizelge 5.6.**  $[0^0/0^0/90^0/90^0]_s$  simetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans [Hz]		Fark %
	Deneysel	Nümerik	
1	70,5	67,203	4,67
2	93,57	97,249	-3,93
3	140,4	138,17	1,58
4	178,2	182,17	-2,22
5	227,2	223,14	1,78

### 5.1.2 Simetrik Olmayan (Antisimetrik) Diziliş Sahip 8 Katmanlı U Profil Kompozit Kirişlerde Titreşim Analizi

**Çizelge 5.7.**  $[0^0_2/45^0_2/0^0_2/45^0_2]$  antisimetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans [Hz]		Fark %
	Deneysel	Nümerik	
1	55,300	57,908	-4,71
2	158,2	148,07	6,40
3	199,200	198,07	0,56
4	220,3	227,07	-3,07
5	283,8	285,88	-0,73

**Çizelge 5.8.**  $[0^0_2/60^0_2/0^0_2/60^0_2]$  antisimetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans [Hz]		Fark %
	Deneysel	Nümerik	
1	47,973	52,015	-8,42
2	61,890	60,53	2,19
3	84,78	89,078	-5,06
4	109,900	102,15	7,05
5	141	141,86	-0,60

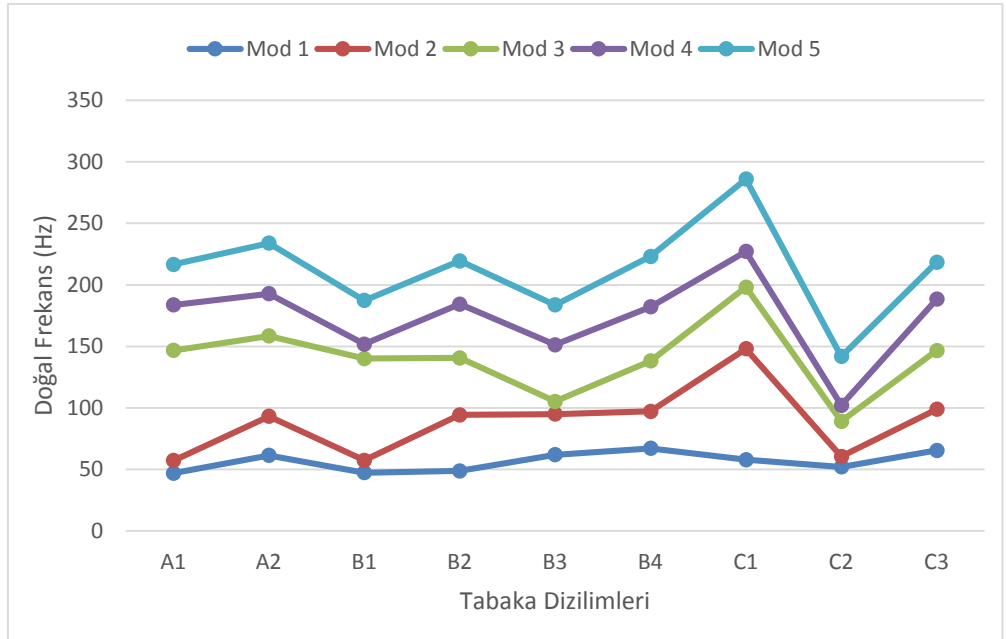


**Çizelge 5.9.**  $[0^0_2/90^0_2/0^0_2/90^0_2]$  antisimetrik fiber dizilişine sahip 8 katmanlı U profil tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerleri

Mod	Frekans [Hz]		Fark %
	DeneySEL	Nümerik	
1	64,09	65,447	-2,11
2	94,12	98,843	-5,01
3	150,7	146,65	2,68
4	181	188,38	-4,07
5	218,3	218,37	-0,03

**Çizelge 5.10.** Tabakalı kompozit U profillerin fiber açıları (tabaka dizilimleri)

KOD	Fiber Açları (Tabaka Dizilimleri)
A1	$[0^0]_8$
A2	$[90^0]_8$
B1	$[0^0/0^0/30^0/30^0]_s$
B2	$[0^0/0^0/45^0/45^0]_s$
B3	$[0^0/0^0/60^0/60^0]_s$
B4	$[0^0/0^0/90^0/90^0]_s$
C1	$[0^0_2/45^0_2/0^0_2/45^0_2]$
C2	$[0^0_2/60^0_2/0^0_2/60^0_2]$
C3	$[0^0_2/90^0_2/0^0_2/90^0_2]$



**Şekil 5.1.** Tabaka dizilimlerinin doğal frekansa etkisi

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada kompozit kirişlerin tabaka açılarının değişimi ile doğal frekansların nasıl değiştiği deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Oluşturulan modelin geçerliliğini doğrulamak amacıyla deney sonucunda bulunan sayısal değerler ile analiz sonuçları karşılaştırılmış ve maksimum hatanın %9,76, ortalama hatanın ise % 3,45 olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar ile yüksek doğrulukta uyumlu çıkan bu sonuçlar, tabakalı kompozit profillerde doğal frekansın belirlenmesinde uygulanan deneysel metod ve nümerik analiz sonuçlarının kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde tabaka diziliminin değişimi ile doğal frekansında değişebileceği ve böylece doğal frekansları bilinen bir kompozit kirişte takviye dizilim açılarının düzenlenmesi ile istenmeyen rezonans durumunun da engellenebileceği değerlendirilmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

- Akceylan İV (2009), Rijit Bir Zemin Üzerindeki Tabakalı Kompozit Levhanın Düşük Hızlı Darbe Hasarı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Alar G (2002), Tabakalı Kompozit Plaklarda Sonlu Eleman Yöntemiyle Elastik-Plastik Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Atlıhan G (2010), Süreksizlik Bölgesine Sahip Tabakalı Kompozit Kirişlerin Titreşim Analizi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Aydın F (2018), Tek Yönlü Hibrit CTP/AL Tabakalı Kompozitlerin Farklı R-Oranları İçin Yorulma Ömrünün Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Aydoğdu M (2003), Katmanlı Kompozit Dikdörtgen Plakların Burkulma ve Titreşim Analizi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Aydoğdu M (2005), “Vibration Analysis of Cross-ply Laminated Beams with General Boundary Conditions by Ritz Method”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(11): 1740-55.
- Aydoğdu M (2006), “Free Vibration Analysis of Angle-ply Laminated Beams with General Boundary Conditions”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(15): 1571-83.
- Baba AB (2013), Deleminasyonlu Tabakalı Kompozit Plakaların Burkulma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Balcı M (2011), Ters Titreşim Problemi Yöntemi İle Tabakalı Kompozit Plakların Fiziksel Özelliklerinin Tahmin Edilmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Baltacı A ve Sarıkanat A (2006) “Değişik Fiber Oryantasyonlarına Sahip Tabakalı Kompozit Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Titreşim Analizi”, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, (3) : 85-97.
- Banerjee JR (2001a), “Frequency Equation and Mode Shape Formula efor Composite Timoshenko Beams”, Composite Structures, 51: 381-88.
- Banerjee JR (2001b), “Explicit Analytical Expressions for Frequency Equation and Mode Shapes of Composite Beams”, International Journal of Solids and Structures”, 38: 2415-26.
- Baykara Vİ (2009), Titreşim Analizi ile Şanzımanlarda Arıza Teşhisi ve Kestirimci Bakım, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Bayraktar A ve Türker T (2005) “ Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile Düzlem Çerçevelerin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi”, Deprem Sempozyumu,23-25 Mart 2005, Kocaeli.
- Bhimaraddi A and Chandrashekhara K (1991), “Some Observations on the Modeling of Laminated Composite Beams with General Lay-ups”, Composite Structures, 19:371-80.
- Bilge H (2015), AISI 4140 Çeliğinde Yorulma Çatlak İlerlemesinin Sistemin Doğal Frekansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bolu.
- Bulut M, Erkiğ A ve Yeter E (2015), “Kevlar ve S-Camı ile Güçlendirilmiş Hibrit Kompozitlerin Titreşim Özelliklerinin Belirlenmesi”, XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, 24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Chakraborty A, Mahapatra DR and Gopalakrishan S (2002), “Finite Element Analysis of Free Vibratio and Wave Propagation in Asymmetric Composite Beams with Structure Discontinuties”, Composite Structures, 55:23-36.

Chandrasekhara K, Krishnamurthy K and Roy S (1990), “Free Vibration of Composite Beams Including Rotatory Inertia and Shear Deformation”, Composite Structure, 14: 269-79.

Çalışkan M (1993), Çok Serbestlik Dereceli Titreşim Sistemlerinin Modal Analizi ve Sayısal Çözümler, Yüksek Lisan Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Çay Cİ (2006), Tarım Traktörleri Sürücü Koltukları Titreşim Sönümlenme Elemanları Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çevik M (2007), Açılı-Tabakalı kompozit Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi, Proje No : 106M154

Çevik M (2007), “Basit Mesnetli Simetrik Çapraz ve Açılı Tabakalı Kompozit Kirişlerin Etkileşimli Serbest Titreşimleri”, XV. Ulusal Mekanik Kongresi, 03-07 Eylül 2007, Isparta.

Çolak A (2008), Ortasında Delik Bulunan Tabakalı Kompozit Plaklarda Elasto-Plastik Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Daban Y (2016), Kompozit Plakalarda Farklı Tabaka Sayısı, Farklı Yapı ve İstifleme Sırasına Bağlı Optimum Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Darıcık F (2011), Deleminasyon Hasarının Tabakalı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

Demirel A (2007), Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Doğan A (2009), Tabakalı Kompozit Plakların Ve Silindirik Sığ Kabukların Serbest Titreşim Analizi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Dong XJ, Meng G, Li HG and Ye L (2005), “Vibration Analysis of a Stepped Laminated Composite Timoshenko Beam”, Mechanics Research Communications, 32: 572-81.
- Erdoğan E (2017), Sonlu Elemanlar Metodu İle Tabakalı Kompozit Plakalarda Termal Elasto-Plastik Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Eryiğit E (2006), Tabakalı Kompozit Çubuklarda Yanal Yük Etkisi İle Oluşan Burkulma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Ezer O (2010), Sönümlü Takviye İle Güçlendirilmiş Katmanlı Kompozit Bir Plağın Anlık Basınç Yüğü Altındaki Dinamik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Genç MS (2005), Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Yönlü Tabakalı Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarında Hasar Oluşumu ve Gelişimi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Gençođlu M (2011), Tabakalı Kompozit Levhalarda Burkulma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Gülnar M (2016), Kompozit Plaka Üretim Prosesi Üzerine Çalışmalar ve Parametrelerin Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Gümölcine T (2014), İzofталık Polyester Reçine Matrisli Sürekli E-Camı ve Bazalt Fiber Destekli Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gürlek ME (2018), Tabakalı Kompozit Kirişlerin Sonlu Farklar Metodu İle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

Haşım KA (2014), Tabakalı Kompozit Plakların Doğrusal ve Geometrik Bakımdan Doğrusal Olmayan Hesabı İçin Yeni Bir Sonlu Eleman, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İpek G (2015), Tabakalı Kompozit Malzemelerin Burkulma Davranışına Çoklu Süreksizlik Bölgesinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

İmak A (2015), Tabakalı Hibrit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

İşikli Y (2012), Tabakalı Kompozit Plakların Kalıp Malzemesi Olarak En Uygun Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Kaçar A (2009), Katmanlı Kompozit Bir Plağın Piezoelektrik Yamalara Yardımıyla Titreşim Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kara M (2006), Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Karaca D (2010), Farklı Kalınlık ve Oryantasyon Yüzdelerindeki Tabakalı Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Davranışlarının Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Karadayı HM (2011), Titreşim Analizi ile Pompalarda Arıza Tespiti ve Kestirimci Bakım Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

- Karadayı S (2012), Düşük Hızlı Darbe Yüğü Altında Tabakalı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Karahan MF (2005), Titreşim Analizi ile Makinalarda Arıza Teşhisi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Khdeir AA and Reddy JN (1994), “Free Vibration of Cross-ply Laminated Beams with Arbitrary Boundary Conditions”, International Journal of Engineering Science, 32: 1971-80.
- Khdeir AA and Reddy JN (1997a), “An exact Solution for the Bending of Thin and Thick Cross-ply Laminated Beams”, Composite Structures, 37: 195-203.
- Khdeir AA and Reddy JN (1997b), “Free and Forced Vibration of Cross-ply Laminated Composite Shallow, Arches”, International Journal of Solids and Structures, 34: 1217-34.
- Kılıç E (2006), Kompozit Malzemeden Yapılan Yaprak Yayların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kılıç H (2014), Belirli Sıcaklık Ve Sürelerde Kürlenmiş Hibrid Tabakalı Kompozit Plakaların Titreşim Davranışının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Kıratlı S (2012), Darbe Hasarlı Tabakalı Kompozitlerin Burkulma ve Esneklik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Koruvatan A (2008), Farklı Kür Sıcaklığı Ve Sürelerine Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Kurtuluş C (2016), Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozitlerin Özelliklerine Poss Nanodolgununun Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yalova.



- Maiti DK and Sinha PK (1994), "Bending and Free Vibration Analysis of Shear Deformable Laminated Composite Beams by Finite Element Method", *Composite Structures*, 29: 421-31.
- Matsunaga H (2001), "Vibration and Buckling of Multilayered Composite Beams According to Higher Order Deformation Theories", *Journal of Sound and Vibration*, 246(1): 47-62.
- Metin M (2008), E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Mousavi SM (2014), Kompozit Levhada Düşük Hızlı Darbe Yüklerinin Parametrelere Bağlı Olarak Değişiminin Nümerik Yöntemle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Murthy MVVS, Mahapatra DR, Badarinarayana K and Gopalakrishnan S (2005), "A Refined Higher Order Finite Element for Asymmetric Composite Beams", *Composite Structures*, 67: 27-35.
- Oral N (2018), İçinde Deleminasyon Bulunduran Tabakalı Kompozitlerin Burkulma Davranışlarının Deneysel ve Nümerik Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Ömercikoğlu A (2009), Metal Katmanlar İçeren Hibrit Katmanlı Kompozit Plakların Anlık Basınç Yükü Altındaki Dinamik Cevabının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Önder AA (2012), Deleminasyon Hasarlı Tabakalı Kompozitlerin Titreşim Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Örs S (2014), Farklı Karbon Tekstilleriyle ve Reçinelerle Oluşturulan Karbon Kompozitlerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özakıncı M (2006), Tabakalı Kompozit Plakların Titreşim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Ramtekkar GS, Desai YM and Shah AH (2002), "Natural Vibrations of Laminated Composite Beams by Using Mixed Finite Element Modeling", *Journal of Sound and Vibration*, 257(4): 635-51.
- Rao MK, Desai YM and Chitnis MR (2001), "Free Vibrations of Laminated Beams Using Mixed Theory", *Composite Structures*, 52: 149-60.
- Satır N ( 2011), Çapraz Tabakalı Kompozit Dikdörtgen Plakların Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Singh MP and Abdelnaser AS (1992), "Random Response of Symmetric Cross-ply Composite Beams with Arbitrary Boundary Conditions, *AIAA Journal*, 30: 1081-8.
- Şahin M (2008), Burkulmaya Maruz Tabakalı Kompozit Plakların Deneysel Ve Nümerik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Tarih YS (2015), Üzerinde Çatlak Bulunan Tabakalı Kompozit Kirişlerin Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Taşkıran C (2010), Tabakalı Kompozit Levhaların Sıcaklığa Bağlı Düşük Enerjili Darbe Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Topal U (2008), Tabakalı Kompozit Dikdörtgen Plakların Değiştirilmiş Uygun Doğrultular Metodu'na Göre Optimizasyonu, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Topalak M (2012), Tabakalı Kompozit Levhalarda Cıvata ve Kör Perçinlerin Birleşmeye Olan Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

- Yağcı E (2007), Tabakalı Kompozit İnce Plakların Plak Düzlemine Dik Yükleme Etkisi Altındaki Eğilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yalçın EB (2012), Farklı Kumaş ve farklı Yöntemlerle Üretilmiş CTP Kompozitlerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yanen C (2016), Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yapıcı İ (2012), E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya/Hatay.
- Yıldırım V, Sancaktar E and Kırıl E (1999), “Free Vibration Analysis of Symmetric Cross-ply Laminated Composite Beams with the Help of the Transfer Matrix Approach”, Communications in Numerical Methods in Engineering, 15: 651-60.
- Yıldırım V and Kırıl E (2000), “Investigation of the Rotary Inertia and Shear Deformation Effects on the Out-of-plane Bending and Torsional Natural Frequencies of Laminated Beams”, Composite Structures, 49: 313-20.
- Yiğit KB (2010), Tabakalı Kompozit Malzemelerde Rijitlik Ve Dayanım Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Yöneş H (2007), El Yatırma Yöntemi İle Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yücedağ S (2007), Pim İle Birleştirilmiş Tabakalı Kompozit Plakalarda Eksenel Yük Altında Gerilme ve Yer Değiştirme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

## 8. ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Orçun Demiröz

**Doğum Yeri ve Tarihi** : Ankara 17/07/1989

**Lisans Üniversitesi** : Abant İzzet Baysal Üniversitesi

**Elektronik posta** : orcun81demiroz@gmail.com

**İletişim Adresi** : BMC Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş

**Yayın Listesi** : -

**Ödüller** : -