

**T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BELİRLİ SICAKLIK VE SÜRELERDE KÜRLenen HİBRİD TABAKALI
KOMPOZİT PLAKALARIN TİTREŞİM DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

Harun KILIÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

2014

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
DİYARBAKIR

Harun KILIÇ tarafından yapılan “Belirli Sıcaklık Ve Sürelerde Kürlenmiş Hibrid Tabakalı Kompozit Plakaların Titreşim Davranışının Araştırılması” konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Halil GÖRGÜN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tamer ÖZBEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YARDIMEDEN

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 25/02/2014

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../.../.....

Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamın yapılmasında her tŸrlŸ yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımnda bana daima yol gŸsteren engin bilgi ve tecrŸbelerinden yararlandığım değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Tamer ÖZBEN hocama teŐekkŸrlerimi sunarım.

Tez alışmalarım Öncesinde verdiği titreşim dersi ve deneyler esnasında sağladığı destekten dolayı MŸhendislik FakŸltesi Dekan Yardımcısı Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet YARDIMEDEN hocama ve hiç bir zaman bana yardımını esirgemen Araştırma GŸrevlisi Sayın Mesut HŸSEYİNOĐLU'A çok teŐekkŸr ederim.

Dicle Őniversitesi Makine MŸhendisliđi BŸlŸmŸ Őđretim elemanlarına desteklerinden dolayı teŐekkŸrlerimi sunarım.

Son olarak her zaman yanımda olan ve bana her tŸrlŸ fedakârlığı gŸsteren sevgili eŐim Seher ve ocuklarım Emre ile Melih'e sonsuz sevgi ve ŐŸkranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
ÇİZELGE LİSTESİ	IX
ŞEKİL LİSTESİ	X
KISALTMA VE SİMGELER	XI
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER	5
3.1. Kompozitlerin Kullanım Alanları.....	11
3.2. Matris Malzemeleri.....	14
3.2.1. Plastik Matris Malzemeleri.....	15
3.2.1.1. Termoset Plastikler.....	17
3.2.1.2. Termoplastik Plastikler.....	24
3.2.2. Metal Matris Malzemeleri.....	28
3.2.3. Seramik Matris Malzemeleri	28
3.3. Elyaf Türleri.....	29
3.3.1. Cam Elyafı.....	30
3.3.1.1. Cam Elyaf Üretimi.....	33
3.3.2. Karbon Elyafı.....	37
3.3.2.1. Karbon Elyaf Üretimi.....	40
3.3.3. Bor Elyafı.....	42

3.3.4.	Aramid Elyafı.....	43
4.	KOMPOZİTLERİN MEKANİĞİ.....	44
4.1.	Gerilme ve Gerinim İlişkisi.....	48
4.1.1.	Anizotrop Malzemeler.....	49
4.1.2.	Monoklinik Malzemeler.....	51
4.1.3.	Ortotropik Malzemeler.....	52
4.1.4.	Travers İzotropik Malzemeler.....	57
4.1.5.	İzotropik Malzemeler.....	58
4.2.	Düzlem Gerilme Durumu.....	58
4.3.	Mekanik Davranışın Yöne Bağlı Değişimi.....	60
4.4.	Çok Sayıda Tabakadan Oluşan Kompozitler.....	62
4.5.	Çok Tabakalı Kompozitlerin Rijitlik Matrisleri.....	63
5.	TİTREŞİM VE ANALİZİ.....	68
5.1.	Titreşimin Sınıflandırılması.....	73
5.2.	Titreşim Analizi.....	74
6.	MATERYAL VE METOD.....	75
6.1.	Tabakalı Kompozitlerin Titreşim Analizi.....	75
6.2.	Deneyde Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Bulunması...	78
6.3.	Titreşim Deneyinin Yapılması.....	82
6.2.	Deneyde Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Bulunması...	78
7.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	84
7.1.	Kompozit Levhaların Cebirsel Olarak Doğal Frekanslarının Bulunması.	84
7.2.	Titreşim Analizi Deney Sonuçları.....	86
7.2.1	Cam/epoksi Levhanın Titreşim Analizi Deney Sonuçları.....	87
7.2.2	Karbon/epoksi Levhanın Titreşim Analizi Deney Sonuçları.....	88
7.2.3	H1 Levhanın Titreşim Analizi Deney Sonuçları.....	90
7.2.4	H2 Levhanın Titreşim Analizi Deney Sonuçları.....	91

7.2.5	H3 Levhanın Titreşim Analizi Deney Sonuçları.....	93
7.2.6	H4 Levhanın Titreşim Analizi Deney Sonuçları.....	94
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER	97
9.	KAYNAKLAR	98
	ÖZGEÇMİŞ.....	101

ÖZET

BELİRLİ SICAKLIK VE SÜRELERDE KÜRLENEN HİBRİD TABAKALI KOMPOZİT PLAKALARIN TİTREŞİM DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harun KILIÇ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2014

Bu çalışmada, düzlem gerilme durumunda olduğu kabul edilen simetrik katmanlı dikdörtgen ortotropik; cam/epoksi, karbon/epoksi ve 4 farklı elyaf yönlendirme açısına sahip cam-karbon/epoksi hibrid kompozit plakaların titreşim davranışları incelenerek plakaların doğal frekansları, önce Rayleigh–Ritz metodu kullanılarak cebirsel olarak hesaplanmış daha sonra titreşim analiz deneyi ile bulunarak mukayese yapılmıştır.

Deneyel ve cebrik sonuçlar arasında ortalama %5 civarında bir sapma olduğu görülmüş. Bu da deney şartlarından, malzeme özelliklerinin saptamasında bazı kabullere dayanan klasik laminasyon teorisinden ve üretilen malzemelerin tam homojen olmamasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Doğal frekanslara malzemeler açısından bakıldığında aynı modlarda karbon/epoksi' nin, cam/epoksi ve cam-karbon/epoksi malzemelerine nazaran doğal frekansının 2 katına yakın derecede yüksek olduğu görülür. Bunun temel sebebi cam göre daha rijit olan karbon elyafının daha yüksek bir elastik matrisi oluşturması ve bunun da daha yüksek titreşim frekanslarını üretmesidir.

Elyaf takviye açısının titreşim davranışına olan etkiyi gözlemek adına cam-karbon/epoksi'den oluşan hibrid malzemedeki oluşan kompozit plakalar, dokuma elyaf açıları 0° , 15° , 30° ve 45° olacak şekilde imal edilmiş titreşim davranışları incelenmiştir. Dokuma kumaş elyaf kullanıldığından çok bariz bir değişim olmamakla beraber en fazla değişim 30° takviye açısında görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı Hibrid Kompozitler; Doğal Frekans, Kompozitlerde Titreşim Analizi, Cam-epoksi kompozitler, Karbon-epoksi Kompozitler

ABSTRACT

RESEARCH ON VIBRATION BEHAVIOR OF HYBRID LAMINATED
COMPOSITE PLATES WHICH CURED AT CERTAIN TEMPRATURE AND TIME

MASTER THESIS

Harun KILIÇ

DICLE UNIVERSITY

INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT

2014

In this study, symmetrical laminated rectangle orthotropic that is being considered in plane tension; glass/epoxy, carbon/epoxy and carbon/epoxy hybrid composite plates with 4 different fiber directivity angle are investigated by means of their vibration behavior and their natural frequencies are studied with using Rayleigh–Ritz method algebraically and after that this result is compared with vibration analyses experiments.

It is figured out that there is an average 5% deviation between algebraic results and experimental results. It is believed this deviation is the result of experimental conditions, classical lamination theory assumptions that is used to determine material properties and non-homogeneous conditions of produced material.

It is concluded that the natural frequencies by means of materials, for the same methods, carbon/epoxy's natural frequency is approximately twice compared with glass-carbon/epoxy materials. Main reason of this is carbon fiber which is more rigid than glass produces a higher elastic matrix and this creates a higher vibration frequencies.

In order to see the effects of fiber support angles to the vibration behaviors, hybrid composite plates made of glass-carbon/epoxy are manufactured with 0° , 15° , 30° ve 45° degrees fabric fiber and their vibration behaviors are investigated. Because of using fiber as fabric material, there is not much change occurred and the biggest change seen with 30o degree support angle.

Key Words: Hybrid Laminated Composites, Natural Frequency, Vibration Analysis on Composites, Glass-epoxy Composites, Carbon-epoxy Composites,

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>		<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1.	Metal, seramik ve plastik malzemelerin bazı özelliklerinin karşılaştırılması	5
Çizelge 3.2.	Bazı karma ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikleri	11
Çizelge 3.3.	Karma malzeme matrisi olarak kullanılan bazı reçinelerin özellikleri	24
Çizelge 3.4.	Bazı elyaf türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması	30
Çizelge 3.5.	Cam elyaf çeşitlerinin özellikleri	31
Çizelge 3.6.	Karbon ve Grafit elyaflarının karşılaştırılması	37
Çizelge 4.1.	Ortotropik malzemenin gevşeklik matris elemanları	53
Çizelge 4.2.	Ortotropik malzemenin gevşeklik matris elemanları	54
Çizelge 4.3.	Mühendislik sabitlerine göre gevşeklik matris elemanları	55
Çizelge 6.1.	α_1 ve α_4 katsayılarının yaklaşık değerleri	76
Çizelge 6.2.	α_3 ve α_5 katsayılarının yaklaşık değerleri	77
Çizelge 6.3.	Karma malzeme bileşenlerinin mekanik özellikleri	79
Çizelge 6.4.	Deneyde kullanılan karma malzemelerin mekanik özellikleri	79
Çizelge 7.1.	Cebirsel olarak hesaplanan doğal frekanslar	84
Çizelge 7.2.	Cam/epoksi levhanın doğal frekanslarının cebirsel ve deneysel karşılaştırılması	87
Çizelge 7.3.	Karbon/epoksi levhanın doğal frekanslarının cebirsel ve deneysel karşılaştırılması	89
Çizelge 7.4.	Cam-karbon/epoksi [0/0/]4s dizilimli levhanın doğal frekanslarının cebirsel ve deneysel karşılaştırılması	90
Çizelge 7.5.	Cam-karbon/epoksi [0/15/15/0] dizilimli levhanın doğal frekanslarının cebirsel ve deneysel karşılaştırılması	92
Çizelge 7.6.	Cam-karbon/epoksi [0/30/30/0] dizilimli levhanın doğal frekanslarının cebirsel ve deneysel karşılaştırılması	93
Çizelge 7.7.	Cam-karbon/epoksi [0/45/45/0] dizilimli levhanın doğal frekanslarının cebirsel ve deneysel karşılaştırılması	95

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1.	Kompozitlerin sınıflandırılması	8
Şekil 3.2.	Kompozit malzeme bileşenleri	11
Şekil 3.3.	Havacılık sektöründe kullanılan malzemelerin yıllara göre oranları	12
Şekil 3.4.	Ester bağlayıcı alkolün organik asitle tepkimesi	18
Şekil 3.5.	Çapraz bağlı polyesterin elde edilmesi reaksiyonu	19
Şekil 3.6.	Epoksi reçinenin kimyasal yapısı	22
Şekil 3.7.	Epoksi reçinenin çapraz bağ oluşturma tepkimesi	22
Şekil 3.8.	Karbon liflerinin yıllara göre üretim miktarları	38
Şekil 3.9.	Karbon liflerinin alanlara göre kullanım miktarları	38
Şekil 3.10.	Poliakrilnitril liflerinden karbon lif üretimi	40
Şekil 3.11.	Taş kömürü Katranı ve ziftten karbon lif üretimi	41
Şekil 3.12.	Farklı elyaf malzemelerin ve epoksi matrisin gerilme-uzama diyagramı	43
Şekil 4.1.	Çok tabakalı bir kompozitin oluşumu	43
Şekil 4.2.	Bileşenlerin bir yapıyı oluşturma aşamaları	45
Şekil 4.3.	Sürekli elyaf ve tek doğrultuda düzenlemiş kompozit	46
Şekil 4.4.	Karma malzemenin eş gerilme hali	47
Şekil 4.5.	Genel ve yerel koordinatlarda gerilmelerin gösterimi	48
Şekil 4.6.	Anizotrop malzeme	48
Şekil 4.7.	Monoklinik kompozit malzeme	51
Şekil 4.8.	Üç simetri eksenli kompozit malzeme	52
Şekil 4.9.	Transvers izotropi kompozit malzeme	56
Şekil 4.10.	Düzlem gerilme durumunda gerilmeler	58
Şekil 4.11.	x, y, z laminatın , x_1, y_1, z_1 bir tabakanın koordinat sistemi ve dönme açısı	61

Şekil 4.12.	$[45^0_3/0^0_4/90^0_2/60^0]$ şeklinde dizilmiş plağın gösterimi	62
Şekil 4.13.	Simetrik dizilmiş plağın gösterimi	63
Şekil 4.14.	Koordinat sistemi ve orta düzlem	63
Şekil 4.15.	Plağın x-y düzleminde yer değiştirmesi	64
Şekil 4.16.	Referans düzlemine etkiyen iç kuvvetler, momentler ve kayma kuvvetleri	64
Şekil 4.17.	Tabakaların referans düzlemine olan mesafeleri	65
Şekil 4.18.	[A], [B] ve [D] matris elemanlarının mekanik davranışı	66
Şekil 4.19.	[A] matris elemanlarının ortotropik $[(0,90)_n]_s$ plakada açığa göre değişimi	67
Şekil 5.1.	Kütle- yay sistemi	68
Şekil 5.2.	Basit harmonik harekette konum, hız ve ivme arasındaki ilişki	70
Şekil 5.3.	Serbestlik derecesi farklı olan benzer sistemler	71
Şekil 5.4.	Ankastre giriş (sonsuz serbestlik dereceli)	72
Şekil 6.1.	Çok tabakalı kompozit dikdörtgen levha	75
Şekil 6.2.	Cam/epoksi kompozit dikdörtgen levha	78
Şekil 6.3.	Karbon/epoksi kompozit dikdörtgen levha	78
Şekil 6.4.	Cam+karbon/epoksi kompozit dikdörtgen levha	78
Şekil 6.5.	Şematik deney düzeneği	81
Şekil 6.6.	Deneyde kullanılan levhalar ve titreşim aletleri	82
Şekil 6.7.	Titreşim analizi deney düzeneği	82
Şekil 6.8.	Titreşim analizinin frekans cevabı	83
Şekil 7.1.	Farklı kompozitlerin cebrik olarak hesaplanan doğal frekansları	85
Şekil 7.2.	Cam/epoksi kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	86
Şekil 7.3.	Cam/epoksi kompozit plakanın 500 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	87

Şekil 7.4.	Karbon/epoksi kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	88
Şekil 7.5.	Karbon/epoksi kompozit plakanın 500 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	88
Şekil 7.6.	Cam- karbon/epoksi [0/0] _{4s} dizilimli kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	89
Şekil 7.7.	Cam- karbon/epoksi [0/0] _{4s} dizilimli kompozit plakanın 500 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	90
Şekil 7.8.	Cam- karbon/epoksi [0/15/15/0] _s dizilimli kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	91
Şekil 7.9.	Cam- karbon/epoksi [0/15/15/0] _s dizilimli kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	91
Şekil 7.10.	Cam- karbon/epoksi [0/30/30/0] _s dizilimli kompozit plakanın 300 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	92
Şekil 7.11.	Cam- karbon/epoksi [0/30/30/0] _s dizilimli kompozit plakanın 500 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	93
Şekil 7.12.	Cam- karbon/epoksi [0/45/45/0] _s dizilimli kompozit plakanın 300 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	94
Şekil 7.13.	Cam- karbon/epoksi [0/45/45/0] _s dizilimli kompozit plakanın 300 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu	94

KISALTMA VE SİMGELER

u, v, w	: x, y, z yönlerindeki yer deęiřtirmeler
u_1, u_2, u_3	: x_1, x_2, x_3 yönlerindeki yer deęiřtirmeler
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: x, y, z koordinat sistemindeki normal gerilmeler
$\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$: x, y, z koordinat sistemindeki kayma gerilmeleri
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: x_1, x_2, x_3 koordinat sistemindeki normal gerilmeler
$\tau_{23}, \tau_{13}, \tau_{12}$: x_1, x_2, x_3 koordinat sistemindeki kayma gerilmeleri
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$: x, y, z koordinat sistemindeki normal genlemeler
$\gamma_{23}, \gamma_{13}, \gamma_{12}$: x, y, z koordinat sistemindeki kayma genlemeleri
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$: x_1, x_2, x_3 koordinat sistemindeki normal genlemeler
$\gamma_{23}, \gamma_{13}, \gamma_{12}$: x_1, x_2, x_3 koordinat sistemindeki kayma genlemeleri
$[\bar{C}], \bar{C}_{ij}$: x, y, z koordinat sistemindeki üç boyutlu katılık matrisi
$[C], C_{ij}$: x_1, x_2, x_3 koordinat sistemindeki üç boyutlu katılık matrisi
$[\bar{S}], \bar{S}_{ij}$: x, y, z koordinat sistemindeki üç boyutlu esneklik matrisi
$[S], S_{ij}$: x_1, x_2, x_3 koordinat sistemindeki üç boyutlu esneklik matrisi
E_1, E_2, E_3	: x_1, x_2, x_3 koordinat sistemindeki elastisite modülleri
G_{23}, G_{13}, G_{12}	: x_1, x_2, x_3 koordinat sistemindeki kayma modülleri
ν_{12}	: Poisson oranı
θ	: Elyaf yönlenme açısı
ω	: Dairesel frekans
f	: Frekans (Hz)
A_{ij}	: Yapının genleşme rijitliği
B_{ij}	: Yapının bağlantı rijitliği
D_{ij}	: Yapının eğilme rijitliği

1. GİRİŞ

Mühendislikte kullanılan malzemeler genellikle metaller, seramikler ve polimer malzemelerdir. Bu üç grubun birbirlerine göre üstün olan özellikleri vardır, ancak bunlar arasında metaller, üstün bazı özelliklerinden, tasarım ve uygulama aşamasında hata riskinin en az olması nedeni ile kullanım alanları daha yaygındır. Ancak özellikle uzay ve hava endüstrisinde gerekli teknolojik özelliklere sahip malzemelerden en önemlilerinden biri olan kompozit malzemeler de araştırmalara değer mekanik özellikler sergilemektedir.

Mukavemet/ağırlık, mukavemet/yoğunluk gibi spesifik oranlarının klasik malzemelere göre çok daha yüksek olması kompozit malzemelerin otomotiv endüstrisinde de kullanılmasına yol açmıştır. Teknolojinin hızlı gelişmesinin getirdiği kaçınılmaz sonuçlardan biri olarak bu alanlarda kullanılan malzemelerin ihtiyaca cevap verebilmesi, makine ve malzeme mühendislerinin araştırmalarını hızlandırmasına neden olmuştur.

Plastik malzemeler son 25-30 yıl içerisinde önemli gelişmeler göstererek günlük yaşantımızda ve endüstrinin hemen her dalında kullanılan malzemeler haline gelmişlerdir. Kompozit malzeme tasarımında genel prensipleri ve amaçları çerçevesinde, plastiklerin yararlı özelliklerini kazanmak, zayıf özelliklerini geliştirmek için diğer yapı bileşenleri ile birleştirilerek kullanılmaları günümüz malzeme teknolojisinin hedefleri arasındadır.

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini tespit ederken geliştirilen yaklaşımlar ve hesaplamalar, onu oluşturan malzeme bileşenlerinin mekanik özellikleri ile ilgilidir. Fakat bazı kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinden ve kullanılan takviye elemanlarının fiziksel, kimyasal özellikleri ile yapı içerisindeki süreklilikleri ve dağılımına göre farklı yaklaşımlar geliştirmek zorunda kalınmaktadır.

Kompozit malzeme sınıflandırmasında geniş uygulama sahasına sahip tabakalı kompozit malzemeler, aynı veya farklı özelliklere sahip birden çok plakanın farklı yöntemler kullanılarak birleştirilmesi ile elde edilirler. Üretimin büyük bir kısmı boyutlarından biri diğer ikisine oranla çok daha küçük olan levha şeklindedir. Çeşitli tabakaların birbirlerine bağlanması ile üretilen tabakalı kompozitler, yapısal nitelikleri bakımından diğer kompozit malzeme türlerinden farklılık göstermektedirler. Diğer kompozit malzeme türlerinde, taneli kompozitlerde veyaliflerle donatılı kompozitlerde

yapılan sürekli faz veya matriks ve faz gibi niteleme ve ayrımlar, tabakalı malzeme için aynı anlamda genelde kullanılmamaktadır. Tabakalı kompozit malzemeler, çeşitli farklılıklar gösteren tabakaların bir araya getirilmesi ile üretilmektedir. Bu farklılık mukavemet, ısı iletimi, gözeneklilik, ağırlık gibi çok yönlü de olabilmektedir.

Kompozitin üretiminde kullanılacak malzemenin seçimi hedeflenen özelliklere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Isıl direncin önemli olduğu hallerde ısı iletkenliği düşük yalıtım özelliği olan malzeme tabakalarının sisteme eklenmesi, hafif ama spesifik mukavemet değeri yüksek malzemeler üretebilmek için termoplastiklerin içerisine çelik teller vb. fiberler yerleştirilebilir. Tabakalı kompozit malzemeler metal, cam, ahşap ve polimer esaslı olmak üzere farklı matriks malzemelerine sahip olarak üretilmektedir.

Polimer esaslı kompozit malzemeler “Formica” patent isimli lamine ürün en tanınmış tabakalı kompozit malzemelerdendir. Plastik esaslı tabakalı kompozit malzemeler, farklı taşıyıcı tabakalarla birlikte günümüzde çok düşük performanslı uygulamalardan, farklı takviyelerle yüksek performanslı uygulama alanlarında kullanılacak düzeye ulaşabilmektedir. Havacılık, deniz, otomotiv ve raylı taşımacılıkta koruyucu kaplama malzemesi olarak da kompozit plaklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda sıklıkla yapı içerisinde delik, çentik ve çatlak oluşumu gibi süreksizliklerle karşılaşmak mümkün olmaktadır. Böyle malzemelerin yük altındaki davranışlarının mühendislik hesaplarını yapmak, uygulama açısından önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada çok tabakalı kompozit malzemelerin titreşim davranışı incelenerek doğal frekanslar cebri ve deneysel bulunarak mukayese edilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Günümüzde birçok teknolojik uygulamalarda yer alan kompozit malzemeler, aslında binlerce yıldan beri kullanılmaktadır. Ok yayı yapılırken üst a üste konulan, özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar karma bir malzeme oluştururlar. Kompozit malzemelerin bilinçli olarak ele alınması ve bilimsel yaklaşımlarla yeni malzemelerin geliştirilmesi ancak 1940'lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanımı ile başlamıştır. Önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeni ile bu amaç için kullanılabilir en uygun malzemedir. Bugün uçak endüstrisinde %30'a varan oranlarda kullanılan kompozit malzemelere örnek olarak, çeşitli polimerler içerisine gömülmüş karbon lifleri, alüminyum içerisine dizilmiş boron lifleri veya 1000 °C üzerindeki sıcaklıklarda çalışan nikel-alüminyum alışımlı içerisinden oluşturulmuş nikel-niobyum levhaları ile kuvvetlendirilen malzemeler gösterilebilir (Özben 2005).

(Eruslu 2008)'nin belirttiği gibi kompozit malzemelerin elastik sabitlerin bulunmasında karışımlar kuralı bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Christensen ve Malls (1972), bu tekniği kullanarak elastik sabitleri bulmuştur. Bu yaklaşıma göre özellikleri bilinen bileşenler karışımlar kuralına göre karıştırılarak tüm malzemenin özellikleri saptanmaktadır. Karışımlar kuralı fazlar arasında sabit gerilme-genleme dağılımı olduğu kabulüne dayanır. Gerçekte gerilme-genleme değerleri fazlar arasında sabit dağılmaz. Bu yaklaşımda mikroskobik olup elyafların geometrik özellikleri ve elyaflar arası etkileşim de ihmal edilmektedir. Karışımlar kuralı elastik sabitlerin belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır. Sürekli ve basit geometriye iki fazlı yapılarda efektif modüllerin tespiti oldukça kolay olduğu halde takviyelerin karmaşık şekle sahip ve süreksiz olduğu durumlarda geometrik parametrelerin hesaba katılması zor olmaktadır.

Kompozit katmanlı plakların değişik sınır şartları altındaki statik ve dinamik davranışı konusunda pek çok araştırma yapılmıştır. Kompozit dik katmanlı plakların kapalı çözümlerle basit destekli durumda dinamik analizinin yapıldığı ilk çalışmalar klasik plak teorisine (KPT) dayanmaktadır (Whithney ve Leissa, 1969, Jones, 1973).

Değişik sınır koşullarındaki plakların burkulma ve titreşim davranışını incelemek amacıyla Ritz metodu, sonlu elemanlar metodu gibi yaklaşık metotlar

kullanılmıştır. Dickinson ve Blasio, (1986), Baharlou ve Leissa, (1987), Leissa ve Narita, (1989) Ritz yöntemini kullanarak kompozit plakların burkulma ve titreşim problemlerini değişik sınır koşullarında incelemiştir. Jensen ve Crawley, (1985) ankastre plakların titreşimini Ritz ve sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak ve deneysel olarak ele almıştır.

Tek bir tabakanın düzlem içi özellikleri kalınlık boyunca integre edilerek çok tabakalı yapının genişleme A_{ij} , eğilme D_{ij} ve bağlantı rijitlikleri B_{ij} hesaplanır (Gibson 1994).

Çok tabakalı bir kompozitin genişleme rijitlikleri doğru bir şekilde hesaplanmasına rağmen eğilme rijitliklerinde özellikle az sayıda tabakaya sahip yapılarda kabul edilemez hatalar vermektedir. Karbon elyafı ve polimer matrisli dokumalı kompozitlerle yapılan deneylere göre (Yee ve Pellegrino, 2005). KLT ile hesaplanmış eğilme rijitlikleri ve birim uzama değerleri çok büyük farklar göstermektedir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Malzemeler genellikle metaller, seramikler ve organik malzemeler olmak üzere üç ana gruba ayrılır (Arıkan 1990). Bu üç grubun birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Metal, seramik ve plastik malzemelerin bazı özelliklerinin karşılaştırılması

Malzeme Grubu	Yoğunluk	Dayanım	Tokluk	Isıl Kararlılık	Bıçimlendirme	Birleştirme
METALLER	orta yüksek	orta	iyi	orta	orta	orta
SERAMİKLER	düşük yüksek	yüksek	düşük	yüksek	kötü	kötü
PLASTİKLER	düşük	düşük	düşük	düşük	iyi	iyi

Bu üç ana grubun yanında aynı ya da farklı gruplardan iki ya da daha fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzemede toplamak, ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler, karma malzemeler (kompozitler) olarak adlandırılırlar. Atomsal veya molekül düzeyde birleştirilen malzemeler örneğin alaşımlar makroskopik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar.

Bir malzemede aynı anda bir çok özellik istenebilir. Fakat ne yazık ki malzemeler kendi başlarına istenen özelliklerin tümünü gösteremeyebilir. Yüksek performanslı bir malzemeye ihtiyaç duyulan bir alanda aynı anda sağlamlık, aşınma dayanımı, rijitlik, darbe dayanımı, hafiflik istenebilir. Ve bu özelliklerin sadece metallerle, sadece seramiklerle veya sadece polimerlerle elde edilmesi güçtür. Böyle bir durumda her biri belli bir özelliği ile iyi olan malzemeler kompozitin bir fazını oluşturacak şekilde bir araya getirilip üretilen kompozit denen karma malzemelere ihtiyaç vardır. Her bir fazın kompozitteki görevi farklıdır. Fazlar birbiri içinde çözünmeden bir araya gelmesi gerektiğinden aralarındaki ara yüzeyle fiziksel olarak belirlenebilir. Fazlar arasındaki ara yüzeyler ve her fazın özelliği kompozitte görünür.

Kompozit malzemelerin avantajı bileşenlerinin en iyi özelliklerini bir araya getirmesidir. Karma malzemelerin özelliklerin biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır:

- Dayanım
- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Kırılma tokluğu
- Yüksek sıcaklık özellikleri
- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenliği
- Akustik iletkenlik
- Rijitlik
- Ağırlık
- Titreşim söndürme
- Kolay şekil alabilme
- Fiyat avantajı
- Estetik görünüm

Avantajlarının yanında kompozitlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Yıldızhan 2008):

- Kompozit malzemelerin üretimi zor ve maliyetleri yüksektir.
- Kompozit malzemelerin sıcaklık direnci matris malzemelerine bağlıdır. Genelde matris malzemeler polimerlerdir. Ve bu malzemelerin sıcaklık dirençleri sınırlıdır.
- Kompozit malzemelerin kimyasal dirençleri matrislere bağlıdır. Ve bu matris malzemeler polimerlerdir. Bazı polimerlerin kimyasal dirençleri düşüktür.
- Kompozit malzemeler nem emerler. Bu da onların boyutsal istikrarını etkiler.
- Kompozitler geri dönüşümü olmayan malzemelerdir.
- Aynı kompozit malzeme için farklı mukavemet değerleri çıkabilir.

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.

Bu özelliklerin hepsi aynı anda iyileşmez zaten buna gerek de yoktur. Önemli olan söz konusu işlem için istenilen özelliği yakalayabilmektir. Bileşenlerinin özellikleri bilinen karma malzemenin bazı özellikleri bulunabilir (yoğunluk, elastik özellikler vb.). Bazı özellikler içinse bu mümkün değildir (yorulma dayanımı, tokluk vb.). Tasarımcı bu durumda emniyetli davranmak ve emniyet katsayılarını çok yüksek seçmek zorunda kalır ve karma malzeme kullanımı ekonomik olmaktan çıkabilir.

Günümüzde çok gelişmiş olan karma malzemeler aslında binlerce yıldan beri kullanılmaktadır. Örneğin çamur içine karıştırılan saman çöpleri ile yapılan kerpiç bir karma malzemedir. Kompozit malzemeye en güncel örneklerden biri de kâğıttır. Selüloz ve reçineden oluşan kâğıt, günümüzde yaşamımızın her alanında eşsiz bir kullanım aracı olarak insanlığın hizmetine sunulmuştur. Günümüzde en çok kullanılan diğer bir kompozit ise betondur, çimento ve kumdan meydana gelen matris malzemesi, çelik çubuklar ile desteklenir. Bir diğer tanınmış kompozit ise kerpiçtir. Çamur ve samanın karıştırılmasıyla oluşturulan bu malzeme oldukça eskiden beri bilinen belki de insanlık tarihinin en eski yapı malzemesidir ve halen Türkiye’de kırsal kesimde kullanılır (Yıldızhan 2008). Bazı ülkelerde, (Örn; Yemen’de) bu yapı malzemesinden çok katlı yüksek yapılar inşa edilir (Anonim,1994).

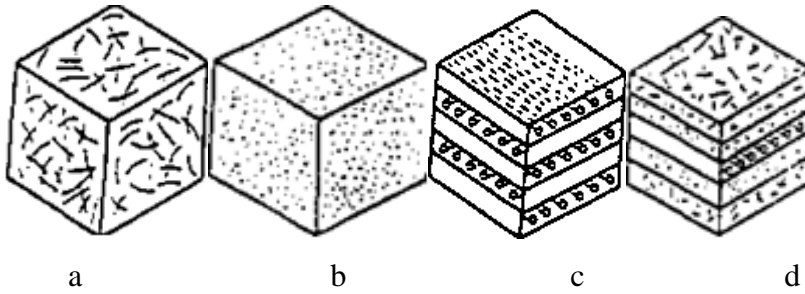
Karma malzemelerin bilinçli olarak ele alınması ve bilimsel yaklaşımlarla malzemelerin geliştirtmesi ancak 1940’lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanımı ile başlamıştır (Arıkan 1990). Önemli uygulamalar örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeniyle bu amaç için kullanılacak en uygun malzemedir. İlk CTP (cam takviyeli polyester) 1942’de yapılmış, ilk elyaf

sarma patenti ise 1946'da ABD'de alınmıştır. 1950'lerde ise uçak pervaneleri karma malzemedan yapılmaya başlanmıştır. Bugün uçak endüstrisinde %30'a varan oranlarda (Arıcasoy 2006) kullanılan kompozitlere örnek olarak çeşitli polimerler(plastikler) içerisine gömülmüş karbon lifleri, alüminyum içerisine dizilmiş boron lifleri veya 1000°C üzerindeki sıcaklıklarda çalışan ve nikel-alüminyum alaşımı içerisnde oluşturulmuş nikel-niobiyum levhaları ile kuvvetlendirilen malzemeler gösterilebilir. Bu üstün nitelikli karma malzemelerin yanında ucuzluğu ve elde edilmesi oldukça kolay olan cam elyaf-polyester (CTP) malzeme oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Karma malzeme oluşturma seçenekleri sonsuzdur; dolayısıyla bunları sınıflandırmak da oldukça güçtür. Burada sadece makine mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan türler üzerinde durulacaktır.

Sınıflandırma değişik açılardan yapılabilir. Örneğin biçimlerine göre yapılacak bir sınıflandırmada dört grup söz konusudur (Şekil 3.1.):

- a) Elyaflı kompozitler
- b) Parçacıklı kompozitler
- c) Tabakalı kompozitler
- d) Karma kompozitler



Şekil 3.1 Kompozitlerin sınıflandırılması (a:Elyaflı; b:Parçalı; c:Tabakalı d:Hibrit)

a) Elyaflı kompozitler:

Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her

iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir.

Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflarla temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

b) Parçacıklı kompozitler:

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılardır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısıl ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler.

c) Tabakalı kompozitler:

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf taviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler.

Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşımayarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli

d) Karma (Hibrid) kompozitler :

Aynı kompozit yapıda iki yada daha fazla elyaf çeşidinin bulunması olasıdır. Bu

tip kompozitlere hibrid kompozitler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyafdır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyafdır. Bu iki elyafın kompozit yapısında hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitden iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemetide kevlar elyafli kompozitden daha yüksek olmaktadır.

Mühendislikte kullanılan karma malzemelerin büyük çoğunluğu takviye edilerek özellikleri geliştirilmiş malzemelerdir.

Takviyelerin yapışı bakımından yapılacak sınıflandırma ise üç ayrı grup düşünülebilir (Arıkan 1990):

e) Elyaf takviyeli karma malzemeler:

Bunlarda matris kuvvetleri elyafa iletir. Kuvvet tümüyle elyaf tarafından taşınır. Elyafın genellikle yönlendirilerek kullanıldığı bu malzemelerde özellikler genelde anizotropiktir. Örnek olarak cam takviyeli plastikler verilebilir.

f) Küçük parçacıklarla dayanımı artırılmış malzemeler:

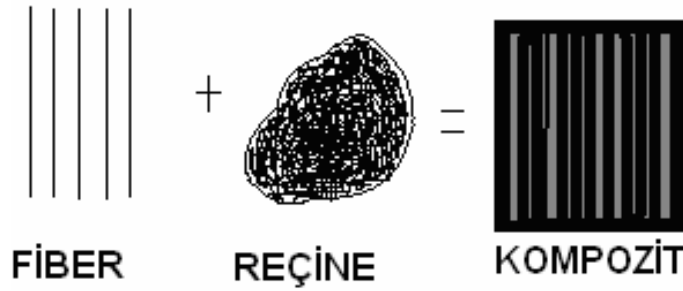
Kuvvetler matris tarafından taşınır. Küçük parçacıklar (0.01-0.1 μ m), metal malzemede dislokasyonların hareketini engelleyerek dayanımı artırırlar. Özellikler izotropiktir. Çökme sertleşmesi uygulanmış alüminyum alaşımı örnek olarak verilebilir.

g) İri parçacık takviyeli karma malzemeler:

Yükü matris ve elyaf birlikte taşırlar. Özellikler izotropiktir. Beton, sert metal uçlar bunlara örnektir.

Kompozitler, teknolojinin gelişimine bağlı olarak geleneksel bazı önemli malzemelerle yarış halindedir (Çizelge 3.2).

Kompozit malzemeler, şekil 3.2'de görüldüğü gibi matris ve takviye malzemesinden oluşurlar. Genellikle takviye (fiber) malzemesi; karbon, cam veya aramid olurken matris malzemesi ise epoksi reçine den oluşmaktadır (Mazumdar, 2002).



Şekil 3.2. Kompozit malzeme bileşenleri (Yıldızhan 2008)

Bu tez kapsamında makine mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan ve en gelişmiş karma malzeme türü olarak kabul edilen elyaf takviyeli kompozit malzemeler üzerinde durulacak ve bunların özellikleri, üretim yöntemleri, uygulama alanları, mekanik ve titreşim davranışları tanıtılacaktır.

Çizelge 3.2 Bazı karma ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikler bakımından karşılaştırılması (Aran 1990)

Malzeme	Yoğunluk g/cm ³	Çekme dayanımı MPa	Elastiklik modülü Gpa	Özgül çekme dayanımı σ/ρ	Özgül elastiklik modülü E/ ρ
Alaşımsız çelik	7.9	459	203	58	26
Alüminyum	2.8	84	71	30	25
Al alaşımı 2024	2.8	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	1.8	1600	224	889	124
Karbon(YM)-epoksi	1.6	1260	218	788	136
Karbon(YD)-epoksi	1.5	1650	140	1100	93
Kevlar-epoksi	1.4	1400	77	1000	55
S camı-epoksi	1.8	1400	56	824	33
E camı -epoksi	1.8	1150	42	639	23

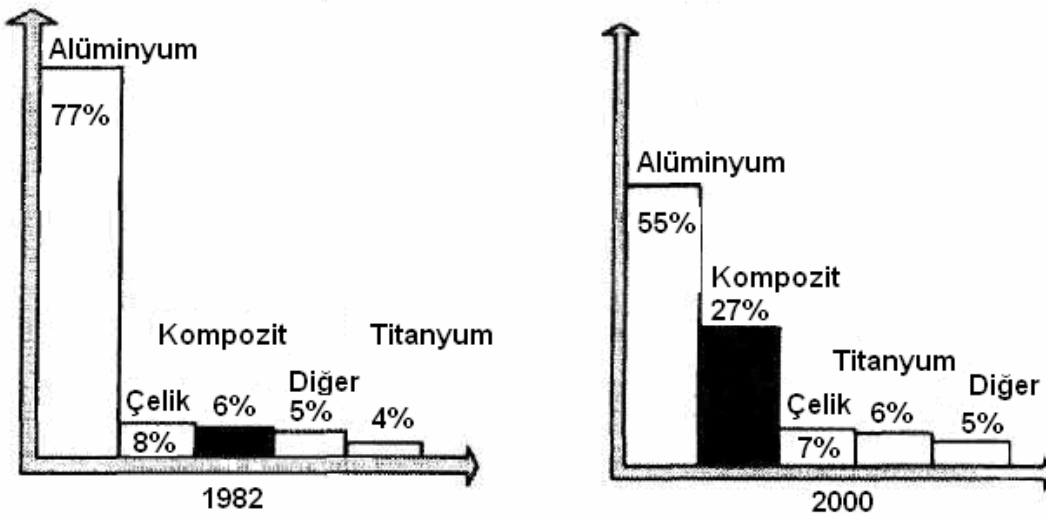
3.1. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanı çok geniş boyutlara ulaşmıştır. Kompozit malzemelerin olmadığı bir endüstri kolu bulmak zordur. Kompozit malzemeler birçok endüstri için tercih edilirler. Kompozit malzemelerin en geniş

kullanım alanı ulaşım endüstrisidir. Kompozit malzemelerin bu kadar geniş kullanma alanlarının sebebi hafifliğin yanında mukavemet özellikleri iyi olmasıdır. Kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanları ve bu alanlarda sağlanan avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

i) Havacılık Endüstrisi

Havacılık sanayisinde kompozitler, gün geçtikçe daha geniş bir uygulama alanına sahip olmaktadır. Planör gövdesi, uçak modelleri, uçak gövde ve iç dekorasyonu, helikopter parçaları ve uzay araçlarında başarıyla kullanılmaktadır. Daha hafif malzemeyle atmosfer şartlarına dayanım ve yüksek mukavemet sağlanmaktadır. Yıldızhan'ın (2008) belirttiğine göre uçak yapısı için malzeme seçiminde önemli bir kriter olan mekanik özelliğin yoğunluğa oranı ile ifade edilen, özgül mekanik özellik değerleri karşılaştırıldığında bor/epoksi ve karbon/epoksi kompozitlerin konvensiyonel malzemelerden önemli farklarla üstün olduğundan dolayı kompozit malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır (Kayrak, 1999). Şekil 3.1.1'de uçak sanayinde kullanılan malzemelerin yıllar göre kullanım oranları görülmektedir. Buna göre kompozit malzeme kullanımını yirmi yılda yaklaşık dört kat artmış buna karşılık alüminyum malzeme kullanımında %20'ye varan bir azalma söz konusudur. Bu gidişatın giderek kompozit malzeme yönünde değişeceği aşikârdır.



Şekil 3.3. Havacılık sektöründe kullanılan malzemelerin yıllara göre oranları (Gay ve ark. 2002)

ii) Otomotiv Endüstrisi

Otomotivde sektöründe yakıt olmasından dolayı kullanılan kompozitler hafifliğinden dolayı taşıt araçlarında yakıt tasarrufu sağlar. Kompozit malzemeyle tasarlanan bir araç gideceği yolu diğer malzemelerle tasarlanan araçlara göre daha az yakıt harcar. Bugün kompozit malzemeler otomotiv endüstrisinde çok geniş kullanım alanlarına sahiptirler, otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar, oto lastikleri spor arabalarda, yolcu otobüslerinde, kamyonlarda, uygulamalar vardır.

iii) İş Makinaları

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

iv) İnşaat Sektörü

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

v) Tarım Sektörü

Seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kompozitler özel bir öneme sahiptirler. Kompozit malzemelerden yapılan bu örnekler istenirse ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük yatırım ve kolay montaj gibi avantajlar sağlamaktadır.

vi) Deniz Sektörü

Kompozit malzemeler, korozyon direncinin iyi olması, hafifliği, yakıt tasarrufu sağlaması, daha hızlı hareket olanağı sağlaması ve daha konforlu olmasından dolayı deniz endüstrisi uygulamalarında çok çeşitli uygulama alanları vardır. Kompozit malzemeler, gemi, yat, yolcu feribotları, deniz botları, can simidi vb. ürünlerin

üretiminde kullanılırlar. Deniz endüstrisinde kullanılan kompozit malzemeler genellikle cam takviyeli plastik kompozitlerdir (Mazumdar, 2002).

vii) Tüketici Eşya Sektörü

Kompozit malzemeler tüketici eşya üretiminde çok geniş uygulama alanları vardır. Kompozit malzemeler dikiş makineleri, kapılar, küvetler, masalar, bilgisayarlar, yazıcılar vb. ürünlerin üretiminde kullanılırlar. Bu ürünlerin parçalarını çoğu kısa fiber kompozit malzemeler olup hazır kalıplama ve enjeksiyon kalıplama yöntemleriyle üretilirler (Mazumdar, 2002).

3.2. Matris Malzemeleri

Matris, elyaf takviyeli karma malzemelerin önemli iki bileşeninden biri olup elyaf takviyelerin öngörülen zorlamaları taşıması matrisin uygun seçilmesine bağlıdır. Matris aynı zamanda kompozitin darbe, mukavemet, tokluk gibi mekanik özelliklerinde de çok önemlidir.

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir yada birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit olarak dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gerektirir. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf yada matriste oluşacak bir çatlakın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma

yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğrultuda bir çatlak elyaf/matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

Kompozitleri matrislerine göre 3 sınıfa ayırabiliriz:

- Plastik (polimer) matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler

3.2.1. Plastik Matris Malzemeleri

Plastikler (polimerler) kompozit malzemelerde matris olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Plastiklerin ana maddesini organik polimerler oluşturur. Bunlar genellikle büyük molekülü organik bileşiklerdir. Kimyasal bakımdan incelendiğinde plastiklerde genelde karbon (C), hidrojen (H), azot (N), oksijen (O), silisyum (Si), kükürt (S), klor (Cl) ve flor (F) elementlerinin bulunduğu görülür. Bu elementlerin çeşitli yöntemlerle tepkimeye girmesiyle makromolekül adını taşıyan çok büyük ve kompleks moleküller meydana gelir ve böylece polimerler oluşur (Yalçın ve Gürü 2002)

Polimer kompozitlerde kullanılan en önemli bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir. Pekiştirici liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti yükselir. Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet(mukavemet/ özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere üstün durumundadırlar. Örneğin yüksek mukavemetli çeliklerde özgül mukavemetin 110 Nm / gr olmasına karşın cam lifi – polyesterlerde 620 Nm/gr dır. Diğer taraftan karbon lifi epoksidede 700 Nm/gr ve kevlar epoksidede 886 Nm/gr dır. Diğer taraftan karbon liflerinin özgül elastisite modülü alüminyumunkinin 5 katı kadardır. Bu üstünlüklerinden dolayı polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilir.

Plastiklerin fizikokimyasal özelliklerini incelemek gerekirse (Yalçın ve Gürü 2002):

- **Özgül ağırlık:** Plastiklerin en önemli özelliklerinden biri bir yapı malzemesi olarak hafif oluşlarıdır. Plastiklerin çoğunun özgül ağırlıkları 1-2 arasındadır ve özgül ağırlıkları 1.7-12 arasında olan metallere göre bu durum büyük bir avantaj sağlamaktadır.
- **Özgül ısı:** Plastiklerden çeşitli eşyaların üretimi genellikle hammaddenin ısıtılmasını gerektirdiğinden malzemenin özgül ısısı arttıkça ısıtma işleminin maliyeti de artar ve plastiklerin özgül ısıları metallere göre genellikle yüksektir. Bu durumda plastikler metallere göre daha güç ısınmakta ve daha geç soğumaktadır.
- **Termal Özellikler:** Plastiklerin diğer malzemelerden farklı olan özelliği ısı iletkenliğidir. Plastiklerin ısı iletim katsayıları çok düşüktür ve bu nedenle ısı yalıtım işlerinde kullanılırlar.
- **Termal genleşme katsayısı:** Plastiklerin metallere göre termal genleşme katsayıları çok daha büyüktür, birçok halde sıcaklık değişimleri sonucunda meydana gelen genleşmeler sorun yaratır. Özellikle kalıplı üretimde çekme (büzülme) nedeniyle önemli problemler ortaya çıkar ve bu yüzden plastikler, metaller gibi küçük toleranslarda kalıplanamazlar ve dökülemezler.
- **Yararlı sıcaklık sınırları:** Termal bozunma sıcaklığı; plastiğin belirli bir bozunmaya başlama sıcaklığıdır. Plastikler de önemli olan diğer bir sıcaklık da Vicat yumuşama sıcaklığıdır ve bu sıcaklığa bağlı olarak kullanılan plastik malzemenin hangi sıcaklıkta yumuşamaya başlayacağı tespit edilir ve malzeme bu sıcaklığı aşmayan uygun alanlarda kullanılır.
- **Su emilimi:** Plastiklerin çoğu suda çözünmezler, fakat bir miktar suyu bünyelerine katabilirler. Su emilimi özelliklerde değişim getirebilir ve bu nedenle plastiğin etkinliği düşebilir. Mesela; elektriksel özelliklerde belirgin bir bozulma gözlemlenir, mekanik dayanımın düştüğü görülür. Ham plastikte ise rutubet üretimi güçleştirir ve son üründe hatalara yol açar.
- **Çözücüye dayanıklılık:** Bir çözücünün plastiği çözebilmesi için, bu çözücünün plastikteki moleküller arası kuvvetleri yenmesi gerekmektedir. Çözücüler plastik molekülleri arasına girip onları ayırarak çözerler. Plastik malzemede moleküller arası bağlar ne kadar zayıf ise, çözücünün ayırma işlemi o kadar kolaydır.

- **Elektriksel Özellikler:** Genelde plastiklerin elektrik iletkenlikleri zayıftır. Polimerlerin elektrik iletmesi için yapısında serbest elektron veya iyon bulundurması gerekmektedir ve bu elektron veya iyonların yapıda serbestçe hareket edebilmesi gereklidir. Fakat polimerlerin yapısında sert ve bükülmez zincirlerin olması, bu zincirlerin birbirini kuvvetli etkilemesi, yüksek kristal yapıya sahip olma ve yönlenme yüzünden yapıdaki elektronlar serbest hareket edemezler ve bu da plastiklerin düşük elektrik iletkenliğine sahip olmalarına neden olmaktadır.

Elyaf takviyeli karma malzemelerde matris olarak kullanılan plastik reçineler termoset ve termoplastikler olarak ikiye ayrılır.

3.2.1.1. Termoset Plastikler

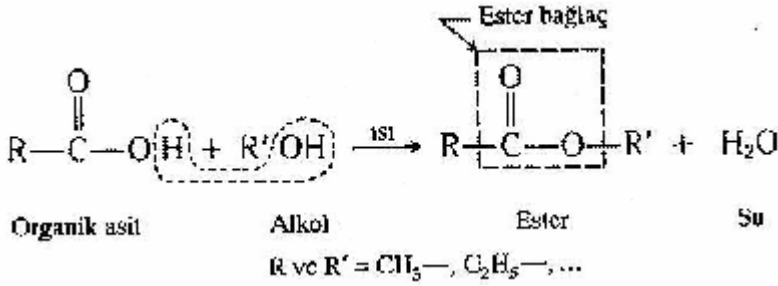
Termoset plastikler küçük monomer moleküllerini ve aralarında kuvvetli bağlar bulunan polimer molekülleri haline getiren kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Bu reaksiyonların gerçekleşmesi için genellikle bir sertleştirici ve hızlandırıcı(katalizör) katılması ve bazen enerji verilmesi (ısı, mikrodalga vb.) gereklidir. Kovalent üç boyutlu bağların oluşması nedeniyle termosetler oldukça rijittirler. Polimerizasyon reaksiyonu tersinir olmadığından tekrar ısıtılarak yumuşatamazlar. Kalıplama sırasında polimerleşme ilerleyerek plastik çapraz bağlanmaya geçer ve akma özelliğini kaybeder. Bu yüzden termoset plastikler yeniden üretim sürecine giremezler. Yüksek sıcaklarda ise kovalent bağlar kopar ve giderek kömürleşir.

Termoset plastikler, birincil ortak kullanılan bağlara sahip molekül yapısında bir molekül ağı oluşturarak şekillendirilir. Bazı termosetler ısı etkisiyle veya ısıyla basıncın birlikte etkisiyle çapraz bağlanırlar. Diğerleri ise oda sıcaklığında (soğukta sertleşen termosetler) meydana gelen kimyasal tepkimeyle çapraz bağlanabilir. Termosetlerden yapılan parçalar sertleşmeden sonra ısıtıldıklarında yumuşamalarına rağmen ortak kullanılan çapraz bağlar nedeniyle onların sertleşmeden önceki akışkanlıklarına ulaşmalarına engel olur. Dolayısıyla termosetler termoplastikler gibi yeniden ısıtılıp eritilemez. Isıtılan termoset malzeme direkt yanacağı için geriye kalan hurda tekrar işleme sokulmadığı için bu olay termosetlerin istenmeyen özellikleri arasındadır. Ayrıca termosetler çözücülerde çözünmezler (Yalçın ve Gürü 2002).

Doymamış polyester, epoksi, fenolik, silikon ve amino gibi termoset polimerler elyaf takviyeli karma malzemelerde yaygın olarak kullanılan matris reçineleridir.

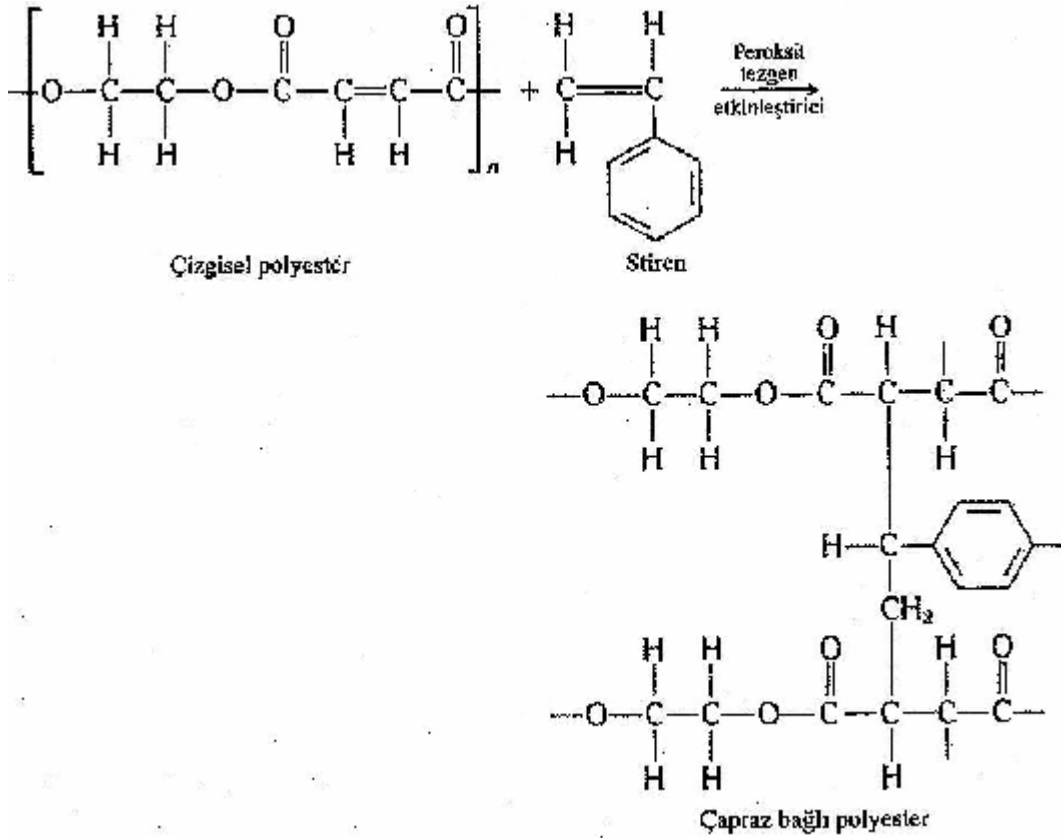
a) Polyester

Karma malzeme matrisi olarak özellikle cam elyaf takviyesi ile yaygın kullanır. Termoset olanı doymamış polyesterdir. Ester grubunun sertleşmesiyle oluşur. Ester polimerizasyonda reaksiyon dibazik ve diasidit monomerlerin birleşmesidir. Doymamış polyesterin kimyası şöyle özetlenebilir; ester bağlayıcı Şekil 3.2.1.1’de gösterildiği gibi alkolün bir organik asitle tepkimeye girmesiyle elde edilir.



Şekil 3.4. Ester bağlayıcı alkolün organik asitle tepkimesi

Doymamış polyesterde karbon atomları çift bağ içerir. Bu çift bağlar doymamış bir monomer yardımıyla polimer zincirleri arasındaki çapraz bağların kurulmasına ve üç boyutlu, kuvvetli bir ağı oluşturulmasına olanak sağlar. Bu durumda sertleştirici olarak kullanılan monomer ağı bir parçası olur. Şekil 3.2.1.2’de çapraz polyester reaksiyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Çapraz bağı polyesterin elde edilmesi reaksiyonu

Polyesterler doymuş ve doymamış olmak üzere iki farklı gruba ayrılırlar. Bu ayırım polyesterin çifte bağı içerip içermemesine bağı olarak değışmektedir. Eğer bünyesinde çifte bağı barındırmayan bir polyester ise bu malzemeler termoplastiktir, eğer çifte bağı içeriyorsa bunlar termoset malzemelerdir.

Doymamış polyester reçineleri yüksek miktarda dolgu maddeleri ve güçlendiricilerle karıştırılabilen, düşük viskositeye sahip malzemelerdir. Doymamış polyesterler %80'e varan miktarlarda cam lifiyle güçlendirilebilirler. Bu güçlendirilmiş doymamış polyesterler çapraz bağlarını oluşturmayı tamamladıklarında 172-344 MPa dayanıma, iyi darbe dayanımına ve kimyasal dirence sahip olurlar.

Polyester üretiminde iki yol geliştirilmiştir. İlk üretim yöntemi eriyik kondensasyondur. Bu yöntemde işlemden kullanılan kazana önce sıvı glikoller konulur ve karıştırılır. Karışan bu glikolün içine katı asitler veya anhidridler verilir ve ısıtılır. Bir süre sonra ısıtma kendi kendine devam eder çünkü meydana gelen reaksiyon ekzotermik reaksiyondur. Reaksiyon sonucu oluşan su distile edilerek sistemden uzaklaştırılır. Oluşan polimerizasyonun takibi alınan örneklerin asit sayısı ve viskositesi ölçülerek

kontrol edilir. Karışım pişirmenin sonuna doğru dışarıdan ısıtılır ve belli bir süreden sonra sisteme vakum uygulanır. Reaksiyon sonuna doğru daha az ısı üretilir ve daha az su çıkar. Asit sayısı ve viskosite değerleri standartta verilen değerleri yakaladığında polyester biraz soğutulur ve sıcak halde stiren bulunan ortama konulur. Bu sıcakta stirenle buluşan polimer kendiliğinden reaksiyona girer. Bu durumu engellemek için ortama inhibitör madde eklenir. Stiren içine diğer eklenmesi gereken katkıları da eklenir, ayarlamalar yapılır ve sevkiyat kaplarına aktarılır. Distile edilen suyla birlikte bir miktarda glikol kaybı olduğu için reaksiyonun başında glikol miktarı biraz daha fazla tutulur (Başbudak 2003).

İkinci bir üretim şekli de azeotropik destilasyonla üretilmektedir. Burada suyu daha düşük ısıda dışarıya çıkaracak bir yardımcı çözücü kullanılmaktadır. Genelde toluol veya ksilol hem suyla bir faz oluşturabilmeleri ve hem de azeotropik bir karışım halinde destilasyonla dışarı taşınmaları nedeniyle tercih edilirler. Destile edilen bu azeotropik karışım bir ayırma kabında toplanır. Oluşan fazın üst kısmında toplanan çözücü kazana geri konulur, alttaki su ise dışarı atılır. Bu şekilde reaksiyon sonuna kadar aynı taşıyıcı yardımıyla su hareketi devir daim edilmiş olur. Üretim bittiğinde toluol ve suyun kalan kısmı vakumla ortamdan uzaklaştırılır (Başbudak 2003).

Polyesterlerde bağların şekli değiştirilerek çok farklı özellikler elde edilebildiğinden bunlar hakkında genel bir fikir vermek güçtür. Polyester reçineler 100°C sıcaklığın altında mekanik ve kimyasal dayanım bakımından iyi olup fiyatları düşüktür. Doymamış polyester daha çok cam elyaf takviyeli olarak kullanılsa da takviyesiz kullanım alanları da vardır. Kullanımının % 70'i cam elyaf takviyeli yani kompozit olarak geri kalan % 30'u da yüzey kaplaması, düğme ve döküm şeklindedir. Kompozitlerde reçine oranı % 20 ile % 90 arasında değişirken, takviyesiz kullanımlarda bu oran % 100'dür. Polyesterlerin sertleşme öncesinde viskositesi düşüktür ve cam elyafını çok iyi ıslatır. Karma malzemelerde matris olarak kullanırken dolgu malzemeleri katılabilir.

Polyesterin zayıf yönleri:

- Sertleşme sırasında kendini çekme oranı yüksektir (%5-12) ve bu durum liflerin basma gerilmeleri altında burkulmasına neden olabilir. Bu nedenle malzemenin basma zorlanmaları altındaki dayanımı düşüktür ve düzgün yüzey elde etmek güçtür.

- Özellikle alkali ve bazik ortamlarda korozyon dayanımları düşüktür.
- Bünyesine su alarak bozunur.

b) Epoksi

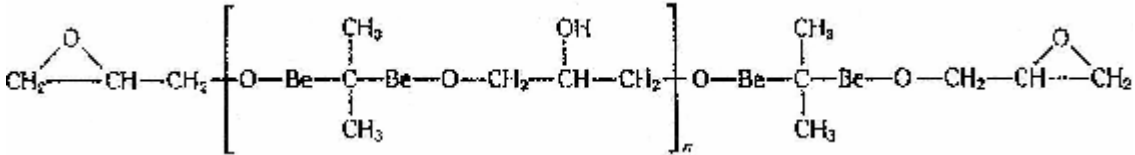
Gelişmiş kompozitlerde genellikle tercih edilen ve her tür elyaf ile kullanabilen bir reçinedir. Epoksit grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Farklı formüller kullanılarak özellikleri büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. Çok değişik epoksiler geliştirilmiştir ve uygun bir seçim yapmak çok önemlidir. Kullanılan sertleştiricini türü, ortaya çıkan karma malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Sertleşme süresi 1 saat dolayında olup 127 ve 177 °C sıcaklıklarda ve genellikle basınç altında gerçekleştirilir. Ayrıca epoksilerin 250 °C'ye kadar ısı kararlı türleri de geliştirilmiştir. Sertleşme sırasında çekme sorunu yoktur.

Olgunlaştırıldıklarında (çapraz bağlandıklarında) yan ürün açığa çıkarmazlar ve bu nedenle düşük olgunlaşma büzülmesi gösterirler. Diğer malzemelere kolaylıkla yapışırlar ve kimyasal etkilere çevre koşullarına karşı iyi dirence sahiptirler, mekanik özellikleri ve elektrik yalıtım özellikleri iyidir.

Termoset malzemeleri şekillendirmek için epoksi reçineler çapraz bağlanma sağlayan maddelerle ve/veya katalizörlerle olgunlaştırılmalıdır. Epoksi hidroksil grubu (—OH) çapraz bağlanma için tepkime yerleridir. Çapraz bağlanma için gerekli olan maddeler olarak aminler, anhidritler ve aldehit kondensasyon ürünleri gösterilebilir. Oda sıcaklığında olgunlaştırma için epoksi katı malzemenin ısı ihtiyacının az olduğu durumlarda (yani 100°C'nin altında), dietilen triamin ve trietilen tetramin gibi aminler de olgunlaştırma maddesi olarak kullanılabilir. Bazı epoksi reçineler olgunlaştırma maddesi kullanılarak çapraz bağlanır, diğerleri ise uygun bir katalizörün bulunması halinde kendi tepkime bölgeleriyle tepkimeye girerler. Bir epoksi tepkimesinde epoksid halkası açılır ve örneğin bir aminden veya hidroksil grubundan bir hidrojen, epoksid grubunun oksijeniyle tepkimeye girer.

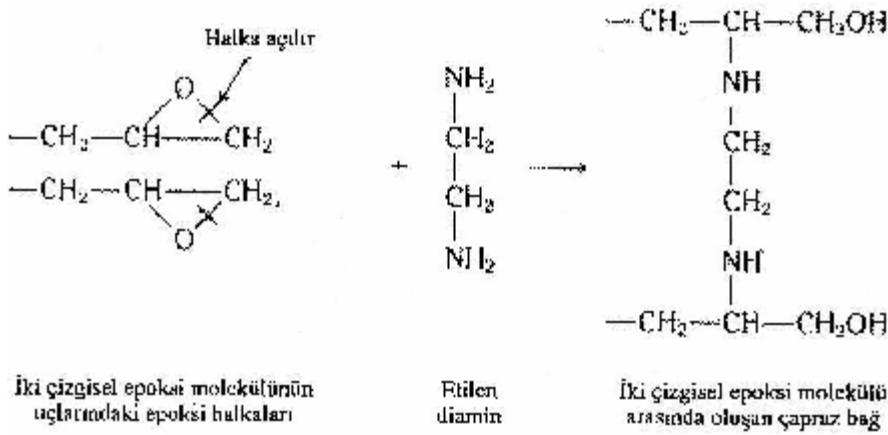
Epoksinin yapı ve özelliklerine bakarsak; sıvı haldeki olgunlaştırılmamış epoksid reçinelerin düşük molekül ağırlığı onlara işleme sırasında üstün molekül hareketliliği verir. Bu özellik, sıvı epoksi reçinelerin, yüzeyleri çabucak ve tam olarak ıslatabilmesine imkan verir. Güçlendirilmiş malzemeler için ve yapışkan olarak kullanılan epoksilerde bu ıslatma etkisi önemlidir. Elektrik devrelerin kaplanması

uygulamalarında son biçimde dökülebilme yeteneği yani düşük viskositeye sahip olmak da önem taşır. Epoksid grupların aminler gibi olgunlaştırma maddeleriyle yüksek derecede tepkimeye girme isteği, yüksek derecede çapraz bağlanma, iyi bir sertlik, dayanım ve kimyasal direnç meydana getirir. Olgunlaştırma işlemi sırasında yan ürün oluşmadığından sertleşme sırasında büzülme azdır.



Şekil 3.6.Epoksi reçinenin kimyasal yapısı

Epoksi reçineler iyi yapışmaları ve iyi mekanik ve kimyasal dirençleri nedeniyle koruyucu ve süs kaplaması olarak birçok yerde kullanılır. Örnek kullanım alanları içinde konserve ve fiçı kaplamaları, otomotiv ve mutfak eşyalarında ilk kat kaplamalarını ve kablo kaplamalarını gösterebiliriz. Epoksi reçineler elektrik ve elektronik sanayinde, dielektrik dayanımları, olgunlaştırma sırasındaki düşük büzüşmeleri, iyi yapışmaları, ıslanma ve yüksek nem dahil kötü çevre koşullarına karşı dirençleri nedeniyle tercih edilir. Örnek olarak yüksek gerilim yalıtkanları, şalterleri ve transistör koruyucuları gösterilebilir. Epoksi reçineleri lifle güçlendirilmiş anafaz malzemelerindeki katmancıkların yapımında da kullanılır. Epoksi reçineleri, grafit gibi yüksek modüllü güçlendiriciler kullanan yüksek performanslı malzemelerin çoğunun anafazıdır.



Şekil 3.7.Epoksi reçinenin çapraz bağ oluşturma tepkimesi (Başbudak 2003)

c) Fenolikler

Fenolik reçineler 300°C'ye kadar sürekli, asbest elyafla takviye edildiğinde 1000°C'ye kadar kısa süre kullanabilir. Viskositesi yüksek olan bu reçinelerde gözenek oluşma riski vardır. Bu yüzden yüksek kalıplama basınçları uygulanır. Sertleşme sonrası 250 °C'ye sıcaklığa kadar bir ısı işleminin uygulaması gerekir. Alkalilere karşı duyarlı olup suya ve birçok aside karşı dayanıklıdır.

Fenoliklerin yapı ve özelliklerini inceleyecek olursak; aromatik yapının çapraz bağlanması iyi elektrik, ısı yalıtım ve kimyasal direnç yanında yüksek sertlik ve dayanım verir.

Fenolik bileşikler yaygın olarak elektrik kablolarında, elektrik düğmelerinde, bağlantı elemanlarında ve telefon iletim sistemlerinde kullanılır. Otomobil üreticileri fenolik kalıplama bileşiklerini hidrolik fren ve nakil parçalarında kullanmaktadır. Fenolikler aletlerin elle tutma yerlerinde, düğmelerde ve panellerde kullanılır. Yüksek ısı dayanımına sahip ve neme dirençli olduklarından, fenolik reçineler ağaç kaplamasında da kullanılır. Fenolik reçine aynı zamanda dökümhanelerde kabuk kalıplamada kum bağlayıcı olarak da büyük miktarlarda kullanılır.

d) Yüksek Sıcaklık Reçineleri

127'den 316 °C sıcaklığa kadar kullanabilen polimit reçine türleri vardır; ancak bunların üretimleri güçtür. Fiyatları da epoksilere göre daha yüksektir.

e) Silikon Reçineler

Mekanik özellikleri düşük olmasına rağmen 250°C'ye kadar sürekli çalışabilir. Pahalı olmasına rağmen mekanik ve elektriksel özellikleriyle suya, ısıya ve Oksidasyona karşı dayanımları mükemmeldir (Aran 1990).

Çizelge 3.2.1.11'de malzeme matrisi olarak kullanılan bazı termoset reçinelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Karma malzeme matrisi olarak kullanılan bazı reçelerin özellikleri

Özellik	Polyester	Epoksi	Polimit
Yogunluk gr/cm ³	1.1-1.4	1.1-1.2	1.43-1.9
Çekme Modülü GPa	1.2-4.0	2.0-5.0	3.1-4.9
Kayma Modülü GPa	1.0-2.0	1.5	--
Çekme Dayanımı MPa	42-90	55-120	70-110
Basma Dayanımı MPa	140	--	288
Poisson Oranı	0.35-0.36	2.5-3.9	--
Kopma Uzaması (%)	2-6	1.5-8.5	1.5-3
Isıl Genleşme Kat. cm/cm. °C ⁻¹ (x10 ⁻⁶)	60.0-70.0	55.0-70.0	--
Kullanım Sıcaklığı (°C)	100	150	300
Çekme (%)	5-12	1-5	--

3.2.1.2. Termoplastik Plastikler

Termoplastikler rijit bir ağ yapısına sahip değildir. Burada önce çizgisel molekül zincirleri oluşur sonra bunlar birbirlerine genellikle zayıf Van der Waals bağları ile bağlanırlar. Bir termoplastik malzeme kritik bir “camsı duruma geçiş sıcaklığının” üzerine ısıtılırsa yumuşar ve sıcaklık arttıkça plastiğin viskozitesi düşer. Bu malzemeler tekrar soğutulduklarında yeniden sertleşirler. Buharlaşma ile bileşimleri değişmediği sürece bu çevrim istenildiği kadar tekrarlanabilir. Termoplastik matrisli karma malzeme üretimi daha güçtür; çünkü termoset reçinelerin sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda termoplastiklerin viskozitesi hala yüksektir. Dolayısıyla matris-elyaf bağının gerçekleştirilmesi daha zordur.

Plastik matrisli karma malzemeler üretim masrafları düşük olduğu için yaygın olarak kullanılırlar. Düşük yoğunlukları, düşük elektrik ve ısı iletkenlikleri ile yüksek korozyon g-dayanımları bu malzemelerin başlıca özellikleridir. Genellikle termosetler tercih edilirler; ancak kolay şekille bilmeleri üretimini yaygınlaştırmaktır.

Bu tür plastikler ısıtıldığında yumuşar ve şekillendirildikten sonra soğutulduğunda sertleşir. Bu işlem sırasında plastiğin mikro yapısında bir değişiklik

olmaz. Genellikle 5-50°C arasında kullanılabilirler. Şekillendirilebilmeleri için ısıtılmaları gereken termoplastik malzemeler, soğuduktan sonra şeklini korur. Bu plastikler, özelliklerinde önemli değişiklik olmadan defalarca ısıtılarak yeni şekillere sokulabilir ve bu işlem sırasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Isı ve basınç altındayken yumuşarlar ve soğutulduktan sonra sertleşirler. Uygun çözücülerde çözünebilirler ve bu şekilde kalıplanarak çeşitli şekiller alabilirler. Termoplastiklerin çoğu, birbirine ortaklaşım bağıyla bağlı çok uzun karbon atomları zincirlerine sahiptirler. Asılı atomlar ve atom grupları bu ana zincir atomlarına ortaklaşım ile bağlanırlar. Bazen ana molekül zincirlerine ortaklaşım ile azot, oksijen veya kükürt atomlarının bağlandığı da olur. Termoplastik polimerlerdeki uzun molekül zincirleri ise birbirine ikincil bağlarla bağlanır. Termoplastiklerin bünyelerindeki moleküller doğrusaldır ve çapraz bağlanamazlar. Bu gruba giren plastikler naylon, polietilen, polistren, karbonflorür akrilikler, selülozikler, viniller sayılabilir.

Burada piyasada en çok kullanılan termoplastik malzemelerden kısaca söz edilecektir:

a) Polietilen (PE)

Renksizden beyaza değişen renkte saydam bir termoplastik malzemedir. Renklendiriciler kullanılarak çeşitli renkte ürünler elde edilebilir. Genel olarak düşük yoğunluk (LDPE) ve yüksek yoğunluk (HDPE) polimeri olarak iki tür polietilen bulunmaktadır. Düşük yoğunluğa sahip polietilenin dallanmış bir zincir yapısı vardır. Buna karşın yüksek yoğunluğa sahip polietilenin düzgün bir zincir yapısı vardır. Düşük yoğunluktaki polietilenin kristallik derecesini ve yoğunluğunu düşüren dallanmış zincir yapısı vardır. Dallanmış zincirli yapı, moleküller arası bağ kuvvetlerini zayıflatarak düşük yoğunluk polietilenin dayanımını düşürür. Aksine yüksek yoğunluğa sahip polietilenin ana zinciri üzerindeki dallanma çok azdır, dolayısıyla zincirler daha sıkı bir şekilde bir araya gelerek kristalliği ve dayanımı artırır. Polietilenin en yaygın kullanılan termoplastik malzeme olmasının ana nedenleri; düşük maliyeti, oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklardaki tokluğu, birçok uygulamada yeterli dayanımı, -73°C'ye kadar düşen sıcaklıklarda bile eğilebilir olması, mükemmel aşınma direnci, mükemmel yalıtım özelliği, kokusuzluğu, tatsızlığı ve su buharını az geçirmesi gösterilebilir.

b) Polivinilklorür (PVC)

En yaygın kullanılan ikinci termoplastik malzemedir. PVC'nin yaygın kullanılmasının nedeni kimyasal direnci ve katkı malzemeleriyle karıştırılarak farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerde bileşiklerin yapılabilmesidir. PVC'nin ana zinciri üzerindeki her iki karbon atomundan birine takılan klor atomları, amorf ve kristallenmeyen bir polimer malzeme meydana getirir. PVC polimer zincirleri arasındaki yüksek çekim kuvvetlerinin başlıca nedeni, klor atomlarının çift kutup momentleridir. Fakat klor atomları büyük oldukları ve negatif yükle yüklü oldukları için bir üç boyutlu engelleme ve elektrostatik itme yaratırlar ve bu nedenle polimer zincirlerinin eğilebilirliği azalır. Bu molekül hareketsizliğinden dolayı türdeş polimerlerin işlenmesinde zorluk oluşacağından, PVC işlenmesini kolaylaştıran katkılar eklenmeden son ürün haline pek şekillendirilemez. PVC türdeş polimeri nispeten yüksek dayanıma (51.75 – 62.1 MPa) sahiptir ve gevrek bir malzemelerdir. PVC orta değerde ısı dayanıma (57 - 82°C), iyi elektriksel özelliklere ve çözücülere karşı yüksek çözücü direnci vardır. PVC'deki yüksek klor miktarı alevlenmeye ve kimyasal maddelere direnç sağlar çünkü halojen içeren plastikler yanmazlık özelliği kazanırlar. Şekillendirmek amacıyla PVC'ye genellikle katılan bileşikler yoğrutucular, ısı kararlaştırıcılar, yağlayıcılar, dolgu malzemeleri ve renklendiricilerdir.

c) Polipropilen (PP)

Satış ağırlığı yönünden üçüncü en önemli plastiktir ve petrokimyasal hammaddeden yapıldığından en ucuz plastiklerden biridir. Polietilenden polipropilene geçerken polimer zincirinde her iki karbon atomundan birinin üzerine bir metil grubunun takılması, zincirin dönmesinin engelleyerek, daha dayanımlı fakat daha az eğilebilir bir malzeme oluşturur. Zincirdeki metil grupları aynı zamanda cam geçiş sıcaklığını da yükseltir, bu nedenle polipropilen polietilenden daha yüksek erime ve ısı dayanım sıcaklığına sahiptir. Erime noktası 165–177°C arasında olan PP, 120°C'de biçim değişikliğine uğramadan rahatlıkla kullanılabilir. PP birçok ürün için ilgi çeken özelliklere sahiptir. Bunlar arasında iyi kimyasal, nem ve ısı direnci, düşük yoğunluğu (0.900–0.910 g/cm³), iyi yüzey sertliği ve boyutsal kararsızlığı sayabiliriz.

PP aynı zamanda menteşelerde mükemmel bükülme ömrüne sahiptir. PP, monomerinin ucuzluğu nedeniyle de tercih edilen bir termoplastik malzemedir. PP için

en önemli uygulama alanları ev eşyaları, mutfak aletleri, paketleme malzemesi, laboratuvar eşyaları ve çeşitli şişelerdir taşıtlarda yüksek dayanımlı PP bağlaşık polimerleri, akü kabında lastiğin yerini almıştır. Aynı reçineler tampon ve çamurluk etekleri için de kullanılmaktadır. Dolgulu propilen yüksek ısı dirence sahip olduğu için otomobil fan ve ısıtıcı kanallarında kullanılmaktadır. PP türdeş polimeri halı desteği ve sanayi ürünleri taşınmasında torba olarak kullanılmaktadır. PP aynı zamanda yumuşak malzemeleri sarmak için ince film olarak ve paketleme kutu burğu ve kapağı olarak kullanılmaktadır.

d) Poliamidler (Naylonlar)

Ana zincirinde tekrar eden amin grupları bulunan ve erimiş halde şekillendirilen termoplastik malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklarda üstün yük taşıma kabiliyetleri, iyi toklukları, düşük sürtünme özellikleri ve iyi kimyasal dirençleri vardır. Birçok naylon türü olmasına karşın ve her birinin tekrar eden birimi değerine göre farklı olmasına rağmen hepsinde amid bağlayıcı bulunmaktadır.

Naylonlar, ana polimer zincirlerinin düzenli dizilimleri nedeniyle yüksek kristallikte polimer malzemeleridir. Denetimli katılma koşullarında yapıda küre şeklinde polimerlerin oluşması naylonların yüksek kristalleşebilirliğinin göstergesidir. Naylonların yüksek dayanıma sahip olmaları kısmen molekül zincirleri arasındaki hidrojen bağının bir sonucudur. Amid bağlantısı zincirler arasında —NHO türü bir hidrojen bağının oluşmasını sağlar. Bunun bir sonucu olarak da naylon poliamidler yüksek dayanıma, yüksek ısı dirence ve iyi kimyasal dirence sahip olurlar.

Ana karbon zincirindeki eğilebilirliği, düşük viskoziteye ve kolay işlenebilirliğin nedeni olan molekül eğilebilirliğine neden olur. Karbon zincirlerinin eğilebilirliği yüksek kayganlık, düşük yüzey sürtünmesi ve iyi aşınma direnci sağlar. Fakat kutuplaşma ve amid gruplarının hidrojen bağı, artan nem miktarıyla birlikte boyutsal değişimlere yol açan su emilimine neden olur.

Uygulama alanları sanayinin her yerinde rahatlıkla gözlemlenebilir. Otomobildeki uygulamalarına örnek olarak hızölçer ve cam sileceği dişlileri, camla güçlendirilmiş naylon motor pervanesi kanatları, fren ve hidrolik direksiyon sıvısı hazneleri ve direksiyon mili kutusu gösterilebilir. Elektrik ve elektronik uygulamalarına örnek olarak bağlantı telleri yalıtıcıları, fişler, tapalar, anten yuvaları ve terminaller

gösterilebilir. Aynı zamanda paketleme de dâhil olmak üzere genel amaçlı birçok uygulamada yer almaktadır.

3.2.2. Metal Matris Malzemeleri

Metallar organik reçinelere göre çok daha yüksek dayanımlı matrislerdir. Buna ek olarak metal matris, karma malzemelerin tokluğunu ve kullanım sıcaklığının yükselmesini sağlar. Ancak matrisin metal olduğu karma malzemelerin üretimi güçtür ve bunlar her elyaf ile birlikte kullanılamazlar. Metal matris içinde en kolay kullanılabilen elyaf türü olan bor ve borsic elyaftır. Yaygın olarak kullanılan metal matrislere örnek 6061 ve 2024 alüminyum alaşımları ile 1010 saf alüminyum gösterilebilir. Buradan karma malzeme 450-550 °C sıcaklıkta sıcak pres ile üretilir. Böyle bir malzeme 300 °C'ye kadar oda sıcaklığındaki özellikleri korur. Titanyum alaşımları da yayınma bağı yoluyla borsic ve SiC elyafla birleştirilerek matris olarak kullanılabilir. Bu tür malzemenin kullanım sıcaklığı 420-520 °C'ye kadar çıkabilir. Karbon elyaf da alüminyum alaşım içine gömülebilir; ancak karbon ile alüminyum arasındaki galvanik korozyonun önlenmesi için önce yüzeyinin nikel veya gümüşle kaplanması gerekir.

Metal matrisli malzemeler daha çok uzay ve havacılık alanlarında, mesela uzay teleskobu, platform taşıyıcı parçalar, uzay haberleşme cihazlarının reflektör ve destek parçaları vs. yerlerde kullanılır.

3.2.3. Seramik Matris Malzemeleri

Seramiklerin matris olarak kullanılması halinde karma malzemeler 1300 °C sıcaklığa kadar kullanabilme şansına sahip olur. Bu tür malzemelerin en gelişmişlerine örnek olarak SiC veya Al₂O₃ elyaf ile takviye edilmiş SiC ve Si₃N₄ seramikleri örnek gösterebilir. Karbon elyafın da kullanabildiği bu tür matrislerde (cami seramik, mullit, MgO, Al₂O₃, SiC) liflerin rolü farklıdır. Mekanik özellikleri bakımından matristen çok farklı olmayan elyafın buradaki görevi daha çok malzemenin tokluğunu arttırmaktır.

Karbon matris içine gömülü karbon elyafından oluşmuş kompozitlerin 4000°C'ye kadar dayanma şansı vardır. Bu kompozitler yüksek sıcaklıklarda olağanüstü ısıl ve mekanik özelliklere sahiptirler. Metal veya metal olmayan malzemelerin bileşiminden oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım

göstermekle birlikte rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık Özelliği gösterirler. Üç ayrı grupta toplanan seramik kompozitler şu şekilde sıralanabilir:

- **Seramik - Seramik Sistemi:** İki seramik fazın karışmasından oluşmaktadır. Örnek olarak saf çini verilebilir.
- **Seramik - Cam Sistemi:** Yaşamımızın her alanında kullanılan porselen, bir seramik cam kompozitidir. Kuartz fiberlerin bir cam matris içersine çini ile birlikte hamurlanıp yerleştirilmesiyle oluşmuştur.
- **Seramik - Metal Sistemi:** Bu tür kompozitler, çok fazlı bir yapıya sahiptirler.

Bir metal faz, bir seramik faz, bir gözenek fazı ve daha çok karmaşık formlarda seramik ve metalin ilave fazlarından meydana gelmiştir. Endüstride kullanılan ve elmas olarak adlandırılan kesme aletleri en iyi örneklerdir. Bir kobalt matris içine dağılmış tungsten karpit parçalarından oluşan bu kompozit malzeme büyük bir dayanım sağlamaktadır.

3.3. Elyaf Türleri

Elyaf takviyeli karma malzemelerden elyafın birinci görevi yükü taşıyarak dayanım ve rijitliği sağlamaktır. Bir malzemenin elyaf olarak adlandırabilmesi için ASTM'ye göre(Aran 1990):

- Uzunluk/enine ortalama boyut en az 10/1
- En büyük kesit $\leq 0.05 \text{ mm}^2$
- En büyük genişlik $\leq 0.25 \text{ mm}$ koşullarının sağlamalıdır.

Sürekli elyaf, fitil ya da filament olarak da adlandırılırlar. Metal lifler için se tel adı kullanılır. Bir elyafın kesitinde genişlik/kalınlık 4:1 ise buna şerit adı verilir.

Elyaf lar genel olarak üç gruba ayrılır:

- Doğal elyaf lar (örneğin, yün, pamuk, asbest...)
- Rejenere elyaf (Doğada bulunan uzun makro moleküllerden faydalanılarak elde edilirler, rayon örnek verilebilir.)
- Yapay elyaf (naylon, kevlar...)

Bu tez kapsamında kompozit malzemelerde kullanılan bazı önemli elyaf türleri hakkında özet bilgi verilecektir.

3.3.1 Cam Elyafı

Reçine matrisli karma malzemelerde cam elyafı en yaygın kullanılan ve en ucuz takviye türüdür. Esas olarak SiO₂ olan camda diğer elementlerin oksitleri de bulunur. Değişik özellikler (elektriksel, kimyasal, korozyon dayanımı ve elastiklik modülü) elde etmek için farklı kimyasal bileşimlerde olan cam üretilir. En yaygın kullanılan cam elyaf türü E camıdır. Alüminyum ve magnezyum oksit içeriği daha yüksek olan S-camının ise mekanik özellikleri daha iyidir. Kuvarz yüksek saflıkta silikadır (%99.95 SiO₂). Pahalı olduğundan mükemmel dielektrik özelliklerinin ve yüksek sıcaklık dayanımının gerektirdiği yerlerde kullanılır. Çizelge 3.3.1’de bazı cam türlerinin özellikleri ve diğer elyaflar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Cam elyaf imalinde silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır. Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur:

Çizelge 3.4. Bazı elyaf türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması

Elyaf	E-camı	S-camı	Kuvarz	Bor	Karbon	Kevlar
Yogunluk gr/cm ³	2.54	2.48	2.2	2.68	1.85	1.44
Çekme Dayanımı MPa	3448	4585	3100	3448	2900	2706
d _c (mm)	0.003-0.02	0.003-0.013	0.01	0.1-0.2	0.005-0.013	0.012
Isıl Genleşme Kat. cm/cm. °C ⁻¹ (x10 ⁻⁶)	5	2.9	2.9	3	-1	-2
Kopma Uzaması (%)	2.75	--	--	0.7	0.5-1.3	2.5

- 1. A (Alkali) Camı:** A camı yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek, en yaygın cam tipidir.
- 2. C (Korozyon) Camı:** Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.
- 3. E (Elektrik) Camı:** Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E camı kullanılır.

- 4. S (Mukavemet) Camı:** Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. Cam elyaflar genellikle plastik veya epoksi reçinelerle kullanılırlar.

Cam elyaf çeşitleri Çizelge 3.3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Cam elyaf çeşitlerinin özellikleri

Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastik modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti(MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genleşme katsayısı (m/m/°Cx10 ⁶)	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727.0	749.0	841.0	970.0
Katki Malzemeleri (%)				
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

Fiber takviyeli malzemeler genel olarak takviyesiz hallerine göre daha mukavemetli bir yapıya sahip olurlar. Cam fiber oranı arttıkça malzemenin mukavemetinde de artış görülür. Normal cam fiberler çeliğe göre 3 kat daha mukavemetli ve çeliğin ağırlığına göre daha tok bir davranış sergilerler. Genelde dokuma olmayan cam fiber kullanılarak üretilen el yatırması ürünleri, dokuma fiberlerden üretilen ürünlere göre %40 – 50 daha az mukavemete sahiptirler. Fakat bazı yapılarda özel olarak uygun şekilde dizilen fiberlerle üretilen kompozitler, dokuma kullanılarak üretilen kompozitlere yakın hatta bazen daha iyi özellikler gösterirler (Rosato 2004).

Takviyeli plastikler, genel olarak laminat yapımında birkaç katman halinde uygulanırlar. Bu uygulamada son ürünün özelliklerini etkileyecek birçok önemli parametre vardır. Bunlardan birkaç tanesi uygulanan katman (keçe) sayısı, matris tipi, fiber/matris oranı, fiber tipi ve fiberlerin yönlendirilmesidir.

Sadece filamentlerin veya fiberlerin mühendislikte kullanım alanları sınırlıdır. Bunları bir yapı veya mekanizmada tutacak bir destek gerekir. Bu durumda fiberlerin içine gömülüp yerleşebilecekleri, devamlı, fiberleri hep aynı şekilde ve sabit tutabilecek, fiberlerin eğilip kopmalarını engelleyecek ve fiberler arasında kuvvet transferini sağlayabilecek polimer matris kullanılır. Matris çoğu zaman fiberlerden daha zayıf, daha düşük elastik modülüne ve daha düşük yoğunluğa sahip olur. Fiberler olmadan yüksek gerilmelere dayanamaz. Fiberler ve matris kompozit bir malzeme içindeyken, ayrı ayrı kullanılmalarından çok farklı olarak bir sinerji oluştururlar ve yüksek mukavemet, rijitlik, tokluk kombinasyonları yaratırlar.

Uzun ve kısa kırılmış, sürekli vb. cam fiber çeşitleri geniş kullanım alanına sahip olup hem termoset hem de termoplastik malzemelerin mukavemet, boyutsal ve ısı stabilite, korozyon direnci, dielektrik özellikleri vb. özelliklerinde artış sağlarlar. Cam fiberler basma ve darbe özellikleri dışında yüksek mukavemet ve düşük uzama, daha yüksek elastik modülüs ve daha iyi eğme mukavemetine sahiptirler. Ayrıca sahip oldukları yüksek sıcaklık direnci ve düşük nem tutabilme özelliği sayesinde boyutsal değişim çok küçük olur ortam şartlarına karşı olan direnci de çok iyidir. Son olarak düşük nem tutabilme özelliği, çok farklı hava koşullarında iyi elektiksel özellikli kalıp bileşenleri hazırlamayı kolaylaştırır. Bununla beraber fiber ve matris arasında uygun bir bağın olması gereklidir. Aksi halde reçine ve fiber arasına nem kaçmasıyla polimerin mekanik özelliklerinde çok büyük oranda düşüş gözlenir. Bütün bunlarla birlikte fiberin kendisi de elastik özellik gösterir. Kuvvet uygulandığında kırılma noktasına kadar uniform olarak gerilecek ve yük kaldırıldığında orijinal boyutlarına geri dönecektir. Bu histeresise sahip olmaması durumu yüksek mekanik gerilmelerle biraraya geldiğinde, fiberlerin enerji kaybı olmadan büyük miktardaki yükleri depolayıp geri bırakabilmesine olanak tanır. Aynı zamanda aşınmaya karşı da koruma varsa, bu özellik dinamik fatik direncini çok yüksek seviyelere taşıyarak çok çeşitli uygulamalarda kullanılmasını etkin kılar (Rosato 2004).

3.3.1.1 Cam Elyaf Üretimi

Cam elyaf üretimi beş aşamada incelenebilir:

- a) Hammadde harmanlanması
- b) Camın ergitilmesi

- c) Elyaf çekilmesi
- d) Bağlayıcı uygulanması
- e) Proses sonrası işlemler

a) Hammadde harmanlanması

Cam elyaf üretebilmek için yapılması gereken ilk adım cam elde edebilmek için gerekli hammaddeyi sağlamak ve bunların homojen bir şekilde karışmasını sağlamaktır. Cam elyaf; kil, kum, kaolen, kolemanit, fluspat, dolomit, kireç hammaddelerinden ve daha farklı birtakım eklentilerden üretilmektedir. Farklı cam üretimleri için bu maddeleri farklı oranlarda içeren değişik reçeteler vardır.

Harmanlama makinalarına reçetede verilen ağırlıkları yazarak besleyicilerden hammadde gelmesi, bunların yükleme hücrelerinde tartılarak ihtiyaç kadar madde alınması, sonra bu maddelerin ara bunkere aktarılması ve buradan da mikserge geçirilip karıştırılması sağlanır.

Önceden karıştırmada insan gücü kullanılırdı fakat yeni teknoloji sayesinde artık tozlar pnömatik olarak yani mikserde 6 farklı bölgeden 3'er dakika hava verilip türbülans oluşturularak karıştırılır. Bu hammaddelerin çok ince öğütülmesi ve hepsinin iyi bir şekilde karışması çok önemlidir çünkü tozların iyi öğütülmesi, segregasyon oluşumunu engeller. Mikserde iyice karıştırılan hammaddeler buraya bağlı bir boruyla 3 kg'lık basınçla şarjörlerle gönderilir. Herbir fırına ait 4 şarjör bulunur. Şarjörlerin kenarlarında motorlar bulunur. Bunun nedeni şarjör içindeki maddelerin kenarlarda takılıp kalmaması ve fırına daha rahat gidebilmesi için sürekli titreşim uygulayıp hareketlerini sağlamaktır. Böylece fırındaki sıvı cam seviyesi azaldıkça şarjörden gelen hammaddeler otomatik olarak fırınlara verilir. Fırınlardaki cam seviyeleri bu hammaddelerin ilk dökülüp eritildiği bölmede ölçülür çünkü akışın devamlı olduğu yer burasıdır. Bu durum aynı zamanda kontrolün kolay olmasını sağlar. Ergimiş cam bu bölümden geçip kemer bölgesine, oradan da fırının iç kısmına girerek kanalların olduğu bölgeye akar.

Harmanlama işleminde karşılaşılabilecek bazı problemler reçetenin yanlış uygulanması ve hammaddelerin tane boyutlarının birbirinden çok farklı olmasıdır. Örneğin bir madde diğerlerine göre daha büyük taneli olursa hava türbülansı esnasında diğerleriyle birlikte karışamayıp dibe çökebilir ve verilen reçeteye uygun cam elde

edilemez. En ufak bir yanlışlık o camda istenilen özelliklerin elde edilememesine neden olur. Böyle bir sorun karşısında oluşacak zarar çok büyüktür çünkü fırınlar 24 saat çalışır durumdadır. Yanlış üretilen camı o fırından temizleyebilmek, çok zahmet ve en azından birkaç gün üretimsiz geçen iş günü demektir. Sonuç olarak üretim sırasında sorun yaşanmaması için kullanılan hammadde kontrolsüz olarak değiştirilmemeli, hep aynı reçeteye bağlı kalınmalı ve hammaddelerin tane boyutları iyi bir şekilde kontrol edilmelidir.

b) Camın Ergitilmesi

Ergitme işlemi üç temel aşamadan oluşur; Birincisi, gelen hammaddelerin sıvı faza geçirilmesi ve böylece camsı bir yapı elde etmektir.

İkincisi, ergitme sırasında sıcak hava üflenerek yapıdaki CO₂, SO₂ gibi oksit halde bulunan gazların uçurulması ve saflaştırma işlemidir. Eğer bu gazlar uçurulmadan camın içinde kalmasına izin verilirse, çekilen elyaflarda boşluk oluşmasına neden olur.

Sonuncu, aşama ise homojenizasyon aşamasıdır. Homojenizasyon sağlayarak camda uniform bir kompozisyon elde edilir.

Harmanlama işleminde karıştırılan hammaddeler şarjörlerden 1600°C'de çalışan fırınlara beslenir. Fırınlarda ısıtılmasında doğalgaz, elektrikli ısıtma vb. yöntemler kullanılabilir.

c) Elyaf Çekilmesi

Fırınlarda 4 kanal ve herbir kanalda 14 kovan olmak üzere toplam 56 bushingden elyaf çekilir. Bushingler genelde %80 Pt - %20 Rh alaşımından üretilir. Cam ergitilirken sıcaklık 1600°C civarına çıktığı için bushinglerde sıcaklık, korozyon ve aşınma direnci yüksek olan Pt kullanılır fakat yumuşak bir madde olması nedeniyle mukavemeti sağlamak için alaşıma Rh katılır. Ayrıca Pt'nin iletkenliği de düşük olduğu için daha az kayıp olur ve daha rahat ısınır.

Elyafın çapları 5-20 mm aralığında olacak şekilde çekmek için bushinglerde en az 300, en fazla 4800 delik vardır. Bu deliklerin çapları 1.0-1.4 mm arasındadır. Delikler ne kadar küçük olursa yüzey gerilimi o kadar azalır ve böylece o kadar ince elyaf çekilebilir.

Bushinglerden akan camın belli bir viskoziteye sahip olması gerekir, aksi halde elyaf çekilemez. Bunun için fırındaki cam yüksekliği, elyafın sarılma hızı, deliklerin çapları, hammaddelerin sağladığı akışkanlık, sıcaklık gibi özellikler çok önemlidir. Örneğin fırındaki ergimiş cam yüksekliği azalırsa sıvı basıncı azalacak ve bushinglere gelen sıvı miktarı da azalacağı için elyaf çapları azalacaktır. Fakat sarma bobinlerinin hızlarını düşürürsek aynı süre içinde daha çok miktarda elyaf geleceği için böyle bir durumda elyaf çapı artacaktır. Deliklerin çaplarının büyümesi ve sıcaklık artışı, elyaf çaplarında yine bir artışa neden olacaktır. Çünkü sıcaklık artınca viskozite düşer ve akışkanlık artar, bu durumda daha fazla cam akacağı için elyaf çapında artış görülecektir.

Bushing deliklerinden akan elyaf bushing plakalarının hemen altında bulunan bölmelerden püskürtülen hava ve suyla soğutulur. Böylece elyaf sarma ve uç sayısı ayarlama işlemi bu bölümde çalışanlar tarafından elle ayarlanabilir. Elyaf çapını azaltmak için sarma hızı artırılabilir, ergimiş cam yüksekliği azaltılabilir, sıcaklık düşürülebilir, delik boyutu küçültülebilir veya cam kompozisyonu değiştirilebilir. Delik sayısını değiştirmek ise elyaf çapını değiştirmez, sadece “tex”i değiştirir. Tex, bir kilometre uzunluğundaki elyafın gram cinsinden ağırlığıdır.

d) Bağlayıcı (sizing) Uygulaması

Çekilen elyafın suyla soğutulmasının bir amacı da uygulanacak bağlayıcı kimyasalının elyafa iyi tutunabilmesi ve elyafın bu bağlayıcıyı emebilmesidir. Bağlayıcı, film oluşturucu, bağlama grupları, antistatik katkı, plastifiyan ve lubrikant adı verilen malzemelerin karışımından oluşmaktadır. Bağlayıcı, cam elyafın mekanik veya fiziksel özelliklerini etkileyen en önemli parametredir. En yüksek performansı alabilmek için cam elyaf, matris ve bağlayıcının birbirine uyumlu olması gerekir.

Elyaf bushing deliklerinden akıp suyla soğutulduktan sonra artık elle tutulur bir hale gelir. Bu aşamadan sonra bağlayıcı içinde dönen merdanelere temas ettirilerek elyafa bağlayıcı uygulaması işlemi yapılır. Bağlayıcı uygulamasından sonra artık elyaf son ürünün cinsine göre değişik şekillerde sarılırlar. Çekilen elyafların hepsinin kompozisyonu aynıdır, farklı bağlayıcıların uygulanmasıyla ürün çeşidi sağlanır. Sarma aşamasından sonra elde edilen bu ürünlerin kurutulması gerekir. Böylece uygulanan bağlayıcının “cure” olması ve keklerde bulunan fazla suyun buharlaştırılması sağlanır.

RF (radyo frekansı) ve konvensiyonel fırın olmak üzere iki çeşit kurutma fırını vardır. RF fırınlarında direk sarma bobinleri kurutulur. Bobinler fırın bantları üzerine konulur ve bu bantlar 2m/saat hızında ilerler. RF fırının amacı, sıcaklığı 100-105°C civarına çıkarıp sadece bobinlerdeki suyu buharlaştırmaktır. Çünkü çok yüksek sıcaklıklara çıkıldığı zaman bobinlerin dış kısımları aşırı ısıya maruz kaldığından dolayı sararır ve kullanılamaz hale gelir. Nitekim konvensiyonel fırında sıcaklık 170°C civarına çıktığı için kurutulan keklerin dış kısmı sararır ve kullanılmadan atılır

e) **Bağlayıcı (sizing) Uygulaması**

Sarma işleminden sonra elde edilen direk sarma bobinleri (tek uçlu fitil) herhangi bir proses sonrası işlem uygulanmadan paketlenerek kullanıma hazır hale gelir. Bu direk sarma bobinleri sarma esnasında mekiklerin sağ - sol hareket etmesinden dolayı örgü biçiminde sarılır. Böylece elyafların çok sıkı sarılmaması sağlanır ve aralarda boşluk kalıp en altta kalan elyafın ezilmesi engellenir. Kekler ise çok uçlu bobin, kırılmış elyaf ya da keçe üretimi için kullanılır.

3.3.2 **Karbon Elyafı**

1965'ten sonra geliştirilen ve öncelikle uçak ve uzay sanayinde geniş uygulama alanı bulan karbon elyaf, karma malzemeler teknolojinde büyük öneme sahiptir. Yüksek elastiklik modülüne sahip karbon elyafın yoğunluğu düşük, yüksek sıcaklık dayanımı iyidir. Önceleri kılcal kristal olarak elde edilen bu malzeme geliştirilen teknikler sayesinde bu gün sürekli lifler olarak da üretilmektedir.

Karbon, yoğunluğu 2.268 gr/cm³ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Hem karbon hemde grafit elyaflar aynı esaslı malzemedden üretilirler. Bu malzemeler hammadde olarak bilinirler. Karbon elyafların üretiminde üç adet hammadde mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde 1000 - 3000 °C civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaflar uygun değildirler.

Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı elyaflar 2413 ila 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve

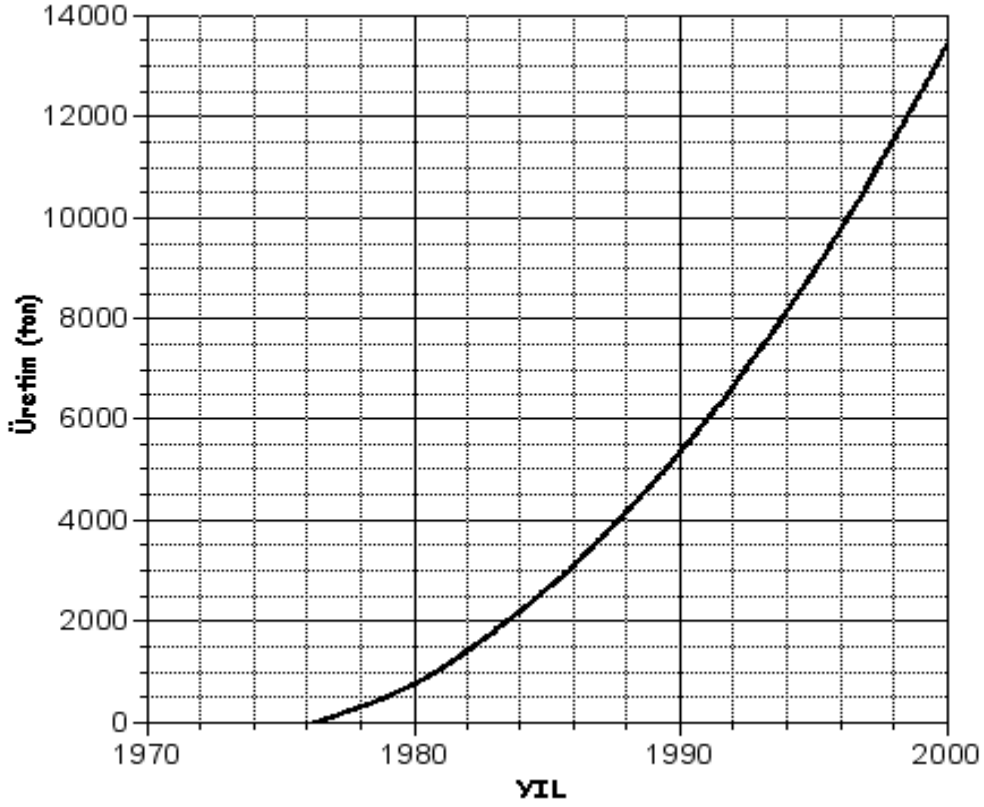
maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyaflar ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyaflar kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür.

Çizelge 3.6. Karbon ve Grafit elyaflarının karşılaştırılması

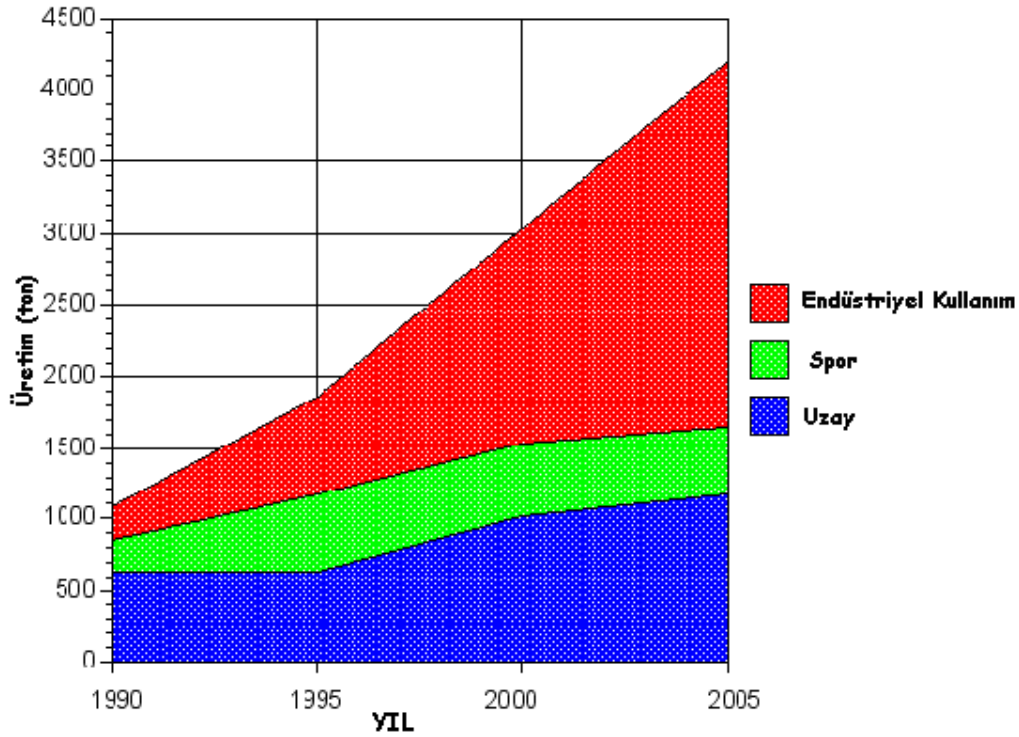
Özellik	Grafit	Karbon
Safılık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı (°C)	> 1700	< 1700
Elastite Modülü (GPa)	>345	<345

Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanısıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaflar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar.

Dünyadaki karbon lifi üretiminin yaklaşık yarısı Japonya tarafından karşılanmaktadır. En büyük karbon lifi tüketicisi % 60'lık payla Amerika'dır. Son yıllarda meydana gelen üretim fazlalığı nedeniyle yaklaşık 1350 ton/yıl üretim miktarı ile sınırlandırılmıştır. Şekil 3.3.1'de karbon liflerinin yıllara göre üretim miktarları; şekil 3.3.2.'de de kullanım alanları gösterilmektedir (Yaman ve ark. 2009).



Şekil 3.8. Karbon liflerinin yıllara göre üretim miktarları (Yaman ve ark. 2009)



Şekil 3.9. Karbon liflerinin alanlara göre kullanım miktarları (Yaman ve ark. 2009)

3.3.2.1 Karbon Elyaf Üretimi

Karbon lifinin özellikleri kullanılan hammadde, üretim aşamaları ve işlem sıcaklığı ile belirlenmektedir. Bu nedenle karbon liflerinin sınıflandırılması yapılırken bu özellikler dikkate alınarak, modüllerine, gerilim dayanımlarına ve son işlem sıcaklıklarına göre yapılmaktadır.

Karbon lifleri; stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitizasyon gibi bir seri işlemden geçerek üretilmektedir. Poliakrilnitril (PAN), kömür ve petrol esaslı katran, selüloz ve fenolik reçine prekürsörler, polivinildenklorür veya polivinildenklorür kopolimerleri ve polimidin karbon lif üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Karbon lifi üretimi sırasında yüksek sıcaklıklar sayesinde karbon olmayan elementler gaz fazına geçerek ortamdan uzaklaşmaktadır. Bu şekilde lif üretimi için kullanılan hammaddenin erimeden önce ayrışmasını sağlamak için stabilize edilmektedir. Karbonkarbon bağlarını koparmak için yeterli enerji karbonizasyon adımında sağlanamadığından bu aşamada karbon liflerinde pek çok zarar meydana gelmektedir.

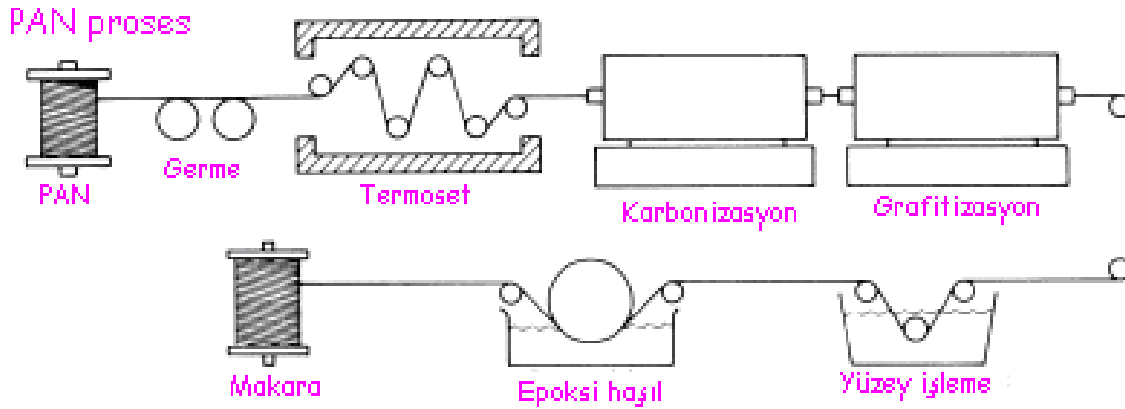
Grafitizasyon işlem sıcaklığı olan 2500-3000 C'a kadar karbon lifleri oldukça stabildir. Karbon lifi üretimi sırasındaki gaz uzaklaşması lif çapındaki azalma ve ağırlık kaybı ile karakterize edilmektedir. İşlem koşulları ve hammadde cinsine bağlı olarak ağırlık kaybı %40-90 arasında değişmektedir. Mikroskopik seviyede karbon lifleri oldukça heterojen mikro yapıya sahiptir.

Literatürde karbon liflerinin yapısını karakterize eden pek çok model verilmektedir. Bir karbon lifi lif eksenine çok az paralelleştirilmiş kurdela benzeri grafit yapılı lamellerden meydana gelmektedir. Bu lamellerden meydana gelen tabakalar hem boyuna hem de enine bağlarla birbirine bağlanmış durumdadır.

a) Poliakrilnitril (PAN) Liflerinden Karbon Lifi Üretimi

Karbon lifi üretiminde ticari olarak en çok ilgi gören hammadde poliakrilnitril lifleridir. 1970'li yıllarda poliakrilnitril lif esaslı karbon lif üretimi artmıştır. Üretilen karbon liflerinin yaklaşık %90'ı poliakrilnitril lif esaslıdır. Akrilik liflerinden su uzaklaştırılması ve oksidasyon işlemleri ile oksijen ve azot içeren polimerler üretilmektedir. Genellikle kuru lif çekim yöntemine göre üretilmiş olan poliakrilnitril lifleri karbon lif üretiminde kullanılsa da, kopma dayanımı 500 N/mm²'den fazla olan

yaş lif çekim yöntemine göre üretilmiş lifler de kullanılabilir. Karbon lif üretiminde kullanılan poliakrilnitril liflerinin oryantasyon derecesi üretilen karbon liflerinin özelliklerinin etkilemektedir. Poliakrilnitril lifleri %54 oranında karbon atomu içermektedir. Ancak poliakrilnitril liflerinden karbon lif üretimi sırasında verim yaklaşık %40-45 civarındadır. Poliakrilnitril liflerinden karbon lifi elde ederken geçtiği işlemler Şekil 3.3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.10. Poliakrilnitril liflerinden karbon lif üretimi (Yaman ve ark. 2009)

b) Bitkisel Esaslı Hammaddelerden Karbon Lifi Üretimi

Rayon esaslı karbon liflerinin ticari olarak ilk üretimi 1959 yılında askeriye için yapılmıştır. Germe dayanımının iyi olması nedeniyle poliakrilnitril liflerinden üretilmiş olan karbon lifleri rayon esaslı karbon liflerinin yerini almaktadır. Üretilen karbon liflerinin ancak %1'i selüloz esaslı hammaddelerden üretilmektedir.

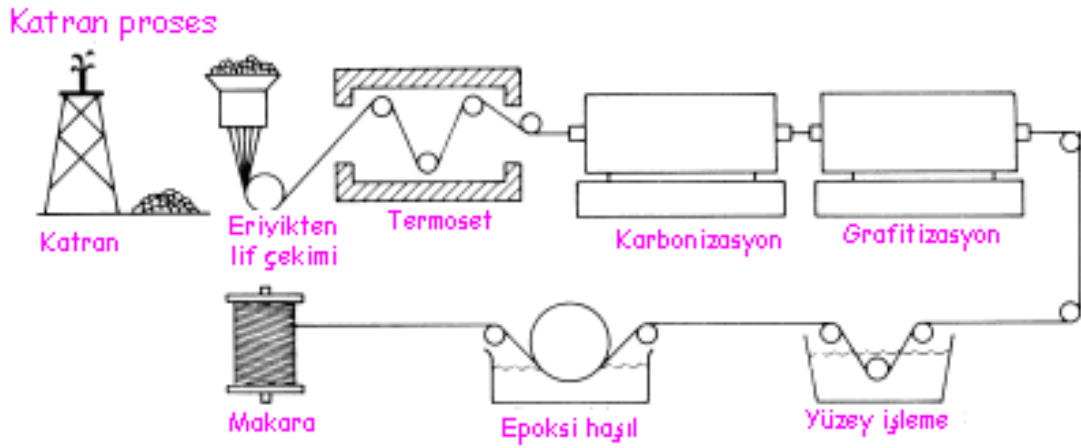
c) Katran Tortusu ve Ziftten Karbon Lifi Üretimi

Taşkömürü katranının destilasyonu sonucu kalan tortunun C/H oranı yaklaşık 1,70 iken, ziftte bu oran 1,17'dir. Taş kömürü katranından ve ziftten elde edilmiş karbon lifleri iyi ısıl iletkenliğe ve çok yüksek Young's modülüne sahip olduğu için kritik askeri ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. Katran ve ziftten daha ekonomik olarak yüksek performanslı karbon lifi üretilmektedir. Katran ve ziftin ekonomik olmasının nedenleri şöyle sıralanmaktadır:

- Ham madde olarak kullanılan katran ve zift poliakrilnitril liflerinden %40-50 daha ucuzdur.

- Katran ve ziftten elde edilen karbon liflerinin yapısı grafit yapısına PAN liflerinden elde edilenlerden daha yakındır ve bu nedendir ki daha az enerji ile grafit haline getirilebilmekte, daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürede karbonize edilebilmektedir.
- Katran ve zift hammaddesi PAN'dan daha az miktarda azot, hidrojen ve diğer elementlerden içerdiği için karbonizasyon sırasında üretilen karbon miktarı daha fazladır. PAN liflerinden %40-45 oranında karbon lifi elde edilirken, katran ve zift kullanıldığında bu oran %75 olmaktadır.

Taş kömürü katranı ve ziftten karbon lif üretim şeması Şekil 3.3.3.4'te verilmektedir



Şekil 3.11. Taş kömürü Katranı ve ziftten karbon lif üretimi (Yaman ve ark. 2009)

3.3.3 Bor Elyafı

Bor, 1960'lı yıllarda elyaf olarak üretildiklerinde gelecekleri parlak olarak görülüyordu. Ancak bor elyafından birkaç yıl sonra üretilmeye başlanan karbon elyaf bir çok uygulamada bunun yerini almıştır. Pahalı olmasına rağmen yüksek dayanım nedeniyle özellikle metal matrisler ile bazı uygulamalarda hala kullanılmaktadır.

Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle Tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır.

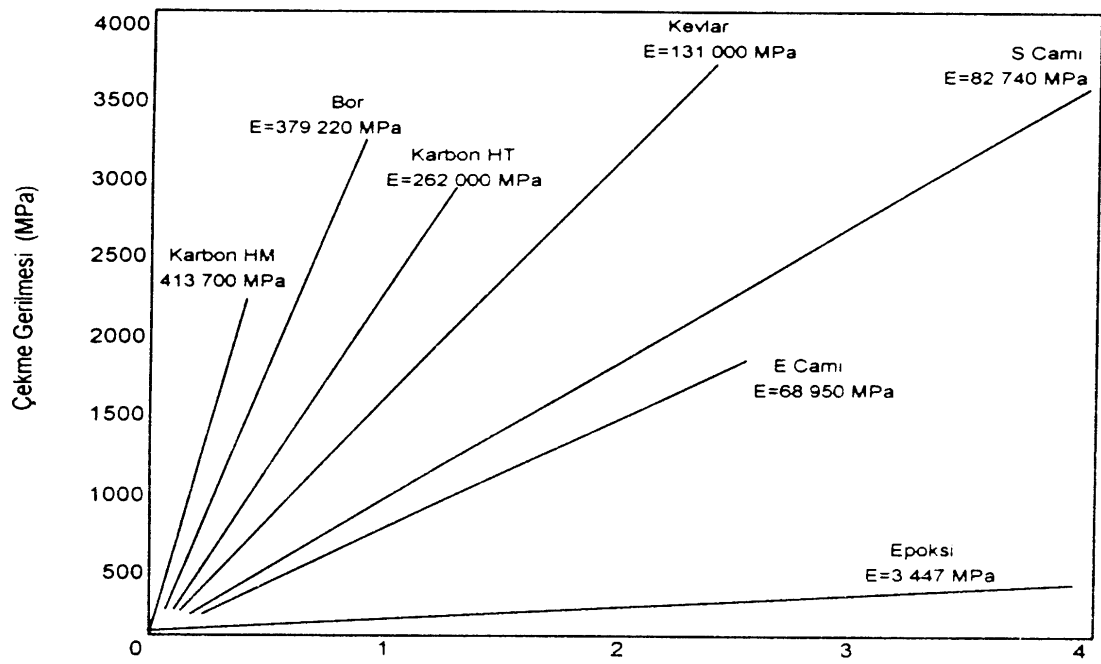
Bor-Tungsten elyaflar, sıcak tungsten flamanın hidrojen ve bortriklorür (BC13) gazından geçirilmesi ile üretilirler. Böylece Tungsten flamanın dışında bor plaka

oluşur. Bor elyaflar değişik çaplarda üretilirler (0.05mm ila 0.2mm). Tungsten çekirdek ise daima 0.01 mm çapında üretilir. Bor elyaflar yüksek çekme mukavemetine ve elastik modüle sahiptirler. Çekme mukavemetleri 2758 MPa ila 3447 MPa'dır. Elastite modülü ise 400 GPa'dır. Bu değer S camının elastite modülünden beş kat fazladır. Üstün mekanik özelliklere sahip olan bor elyaflar, uçak yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Ancak, maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle, son yıllarda yerlerini karbon elyaflara bırakmışlardır. Bor elyafların Silisyum Karbür (SiC) veya Bor Karbür (B4C) kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara dayanımı artar. Özellikle bor karbür kaplanması ile çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040°C civarındadır.

3.3.4. Aramid Elyafı

Aramid "aromatik polyamid" in kısaltılmış adıdır. Polyamidler uzun zincirli polimerlerdir, aramidin moleküler yapısında altı karbon atomu birbirine hidrojen atomu ile bağlanmışlardır. İki farklı tip aramid elyaf mevcuttur. Bunlar Du Pont firması tarafından geliştirilen Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur. Aramidin mekanik özellikleri grafit elyaflarda olduğu gibi elyaf eksenine doğrultusunda çok iyi iken elyaflara dik doğrultuda çok zayıftır. Aramid elyaflar düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptir. Darbe direnci yüksektir, gevrekliği grafitin gevrekliğinin yarısı kadardır. Bu nedenle kolay şekil verilebilir. Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenir.

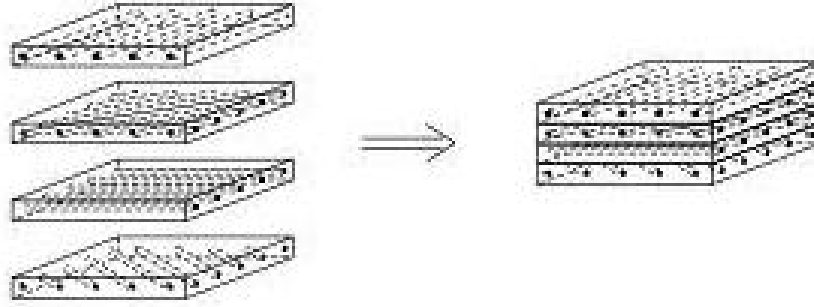
Her iki kevlar da 2344 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptir ve kopma uzaması %1.8'dir. Kevlar 49'un elastik modülü kevlar 29'unkinden iki kat fazladır. Kevlar elyafın yoğunluğu cam ve grafit elyafların yoğunluklarından daha düşüktür. Kevlar49/Epoksi kompozitlerinin darbe mukavemeti grafit epoksi kompozitlere oranla yedi kat, bor/epoksi kompozitlere oranla dört kat daha iyidir. Uçak yapılarında, düşük basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte hibrid kompozit olarak, kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Aramid elyaflar elektriksel iletkenliğe sahip değildirler. Basma mukavemetlerinin iyi olmamasının yanısıra kevlar epoksi kompozitlerinin nem absorbe etme özellikleri kötüdür. Şekilde 3.3.3.4'te farklı elyaf malzemelerin ve epoksi matrisin gerilme-uzama diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.12. Farklı elyaf malzemelerin ve epoksi matrisin gerilme-uzama diyagramı

4. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ

Kompozit malzemeler iki farklı yapıya sahip olan elyaf ve matrisin bir araya gelmesiyle karma bir tabaka; tabakların bir araya gelmesiyle de çok plakalı bir yapı meydana gelir.

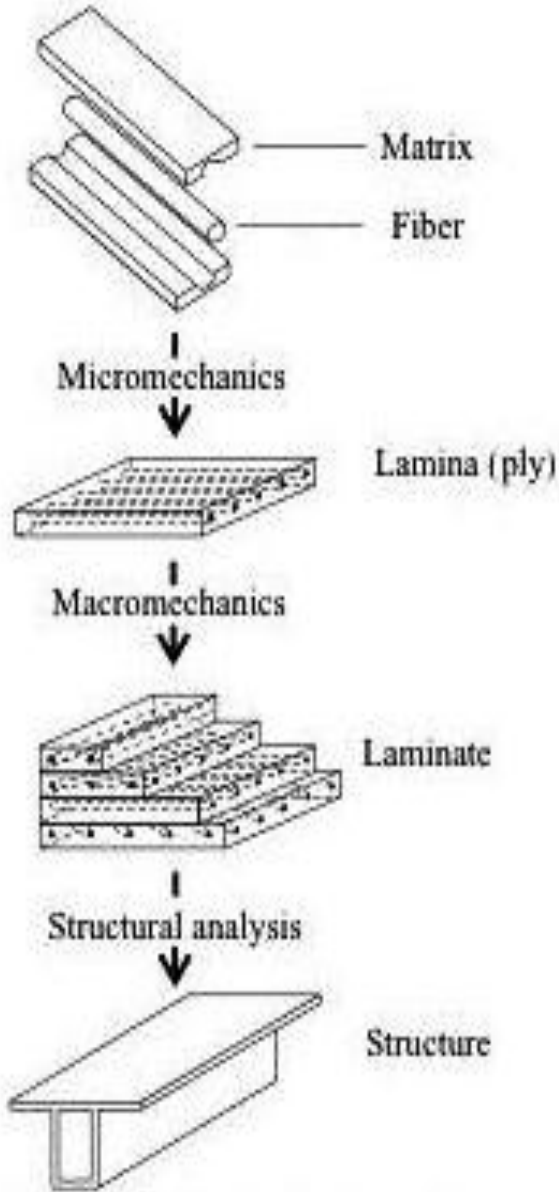


Şekil 4.1. Çok tabakalı bir kompozitin oluşumu

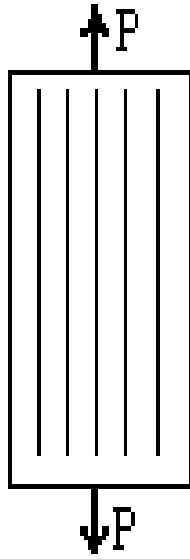
Kompozit bir yapının mekanik ve termal davranışı yapıyı oluşturan elyaf ve matris özellikleri ile yönlendirilmiş elyaf miktarına bağlıdır. Karma malzemelerin mekaniği genellikle Mikromekanik ve Makromekanik olmak üzere iki alt gruba ayrılarak ele alınır Şekil 4.2.

- a) Mikromekanikte karma malzemeyi oluşturan bileşenlerin ve bunların geometrik düzeninin malzemenin genel özelliklerini nasıl etkilediği araştırılır. Burada amaç, cisme etki eden dış kuvvetlerin etkisiyle heterojen karma malzeme içinde oluşan gerilme veya şekil değiştirme alanını tarif etmektir. Karma malzemenin genel özelliklerine etki eden faktörlerin başlıcaları:
- i. Bileşenlerin hacim oranları, biçim ve büyüklükleri ile düzenlenişi
 - ii. Bileşenlerin özellikleri
 - iii. Bileşenler arasındaki bağların özellikleri
- b) Makromekanikte ise elyaf takviyeli karma malzeme homojen fakat anizotrop bir cisim gibi düşünülerek mekanik davranışı incelenir.

Kompozitlerde lifler kuvvet yönüne paralel veya dik yönde veyahut rast gele dağılmış durumda bulunurlar. Lifler yönlenmiş durumda iken kompozit büyük ölçüde anizotrop olur. Lifler rast gele dağılmış ise düzlemsel boyutta izotrop olurlar.



Şekil 4.2. Bileşenlerin bir yapıyı oluşturma aşamaları (Kollar ve Springer 2003)



Şekil 4.3. Sürekli elyaf ve tek doğrultuda düzenlemiş kompozit

Şekil 4.3'teki gibi liflerle kuvvet birbirine paralel ise liflerle matris aynı miktarda şekil değiştirir. Buna eş şekil değiştirme hali denir. Buna göre birim uzama

$$\varepsilon_k = \varepsilon_e = \varepsilon_m$$

yazılabilir. (k: Karma malzeme, e:Elyaf, m: Matris)

karma malzenin taşıdığı yük ise

$$P_k = P_e + P_m$$

olur.

A kesit alanı olmak üzere gerilme denklemi:

$$\sigma_k \cdot A_k = \sigma_e \cdot A_e + \sigma_m \cdot A_m \quad (4.1)$$

yazılarak bileşenlerin hacim oranları

$$v_e = A_e / A_k \quad , \quad v_m = A_m / A_k \quad ,$$

$$v_e + v_m = 1$$

Dolayısıyla 4.1 denklemi karma malzeme alanına bölünürse

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot v_e + \sigma_m \cdot (1 - v_e)$$

olur ve denklem birim uzama değerine bölünürse karma malzemenin elastik modülü için;

$$E_k = E_e \cdot v_e + E_m \cdot (1 - v_e) \quad (4.2)$$

Bulunur. Bu denklem karışımlar kuralında paralel toplama olarak adlandırılır ve genel ifadesi;

4. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ

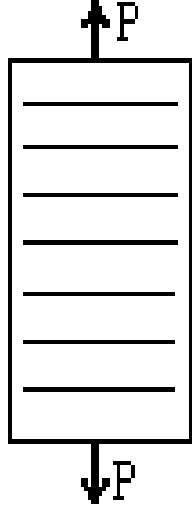
$$\bar{\epsilon}_k = \sum v_i \cdot \bar{\epsilon}_i$$

şeklinde yazılabilir. Burada

v_i : i bileşenin hacim oranı

$\bar{\epsilon}_i$: i bileşenin özelliğidir.

Benzer şekilde elyafa dik yöndeki zorlamalarda ise yapı bileşenlerinin aynı gerilme altında kaldığı kabul edilir (Şekil 4.4.).



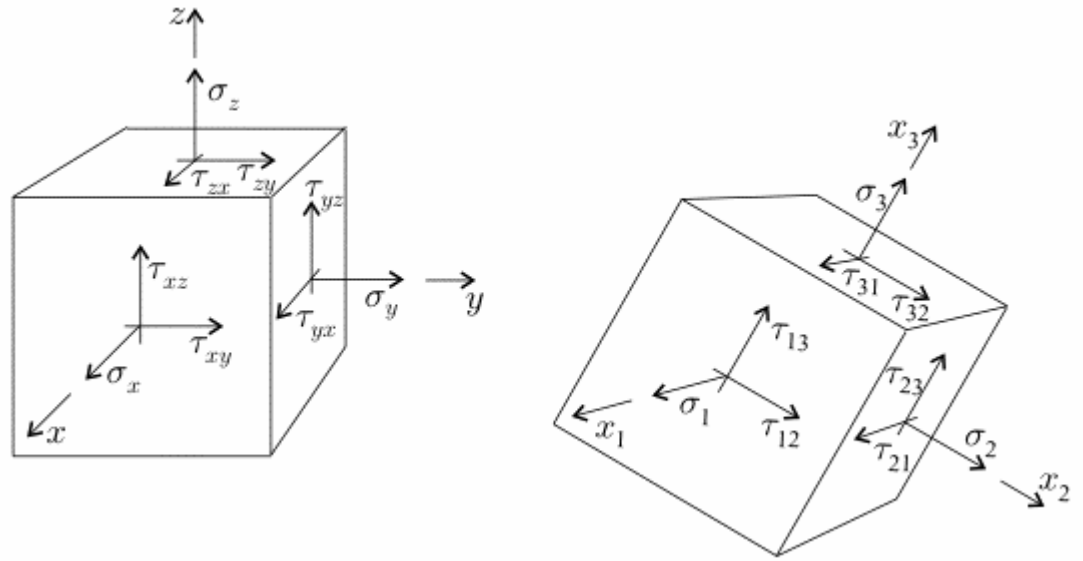
Şekil 4.4. Karma malzemenin eş gerilme hali

Genel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$1/\bar{\epsilon}_k = \sum v_i / \bar{\epsilon}_i$$

4.1. Gerilme ve Gerinim İlişkisi

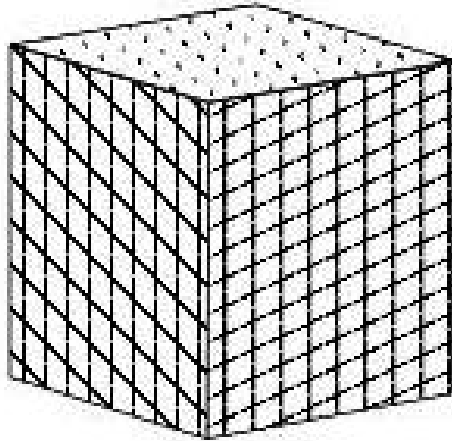
Kompozit malzemelerde elyafın yönlenmesine bağlı olarak karma malzemenin mekanik davranışı elyaf açısına bağlı olarak değişir. Bu davranışa bağlı olarak kompozit malzemeler anizotrop, monoklinik, ortotropik, transvers izotropik ya da izotropik olarak sınıflandırılabilir. Bu tez kapsamında deneysel çalışmada kullanılan plakalar ortotropik olduğundan daha ortotropik malzemeler üzerinde durulacaktır. Denklemler global ya da yerel koordinatlara yazılabilir. Ya da bir koordinat sisteminden diğerine dönüşüm matrisi ile rahatlıkla geçiş yapılabilir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Genel ve yerel koordinatlarda gerilmelerin gösterimi (global koor.: x, y, z yerel koor.: 1, 2, 3)

4.1.1. Anizotrop Malzemeler

Bir karma malzemede mekanik olarak hiçbir simetri eksenini olmayan malzemeye anizotrop malzeme denir (Şekil 4.6). Dolayısıyla anizotrop bir malzemenin mekanik özellikleri lif yönüne bağlı olarak değişir.



Şekil 4.6. Anizotrop malzeme

Anizotrop malzemeler için genelleştirilmiş Hooke Kanunu şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma_{ij} = C_{ijk1} \cdot \epsilon_{k1}$$

$$\epsilon_i = S_{ijk1} \cdot \sigma_{k1}$$

$$S_{ijk1} = [C_{ijk1}]^{-1}$$

Burada;

σ_{ij} :Gerilme tansörünün bileşenleri

ϵ_{kl} :Şekil değiştirme tansörünün bileşenleri

C_{ijkl} :Elastik rijitlik tansörü

S_{ijkl} :Elastik gevşeklik tansörü

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= C_{11} \cdot \epsilon_x + C_{12} \cdot \epsilon_y + C_{13} \cdot \epsilon_z + C_{14} \cdot \gamma_{yz} + C_{15} \cdot \gamma_{xz} + C_{16} \cdot \gamma_{xy} \\
 \sigma_y &= C_{21} \cdot \epsilon_x + C_{22} \cdot \epsilon_y + C_{23} \cdot \epsilon_z + C_{24} \cdot \gamma_{yz} + C_{25} \cdot \gamma_{xz} + C_{26} \cdot \gamma_{xy} \\
 \sigma_z &= C_{31} \cdot \epsilon_x + C_{32} \cdot \epsilon_y + C_{33} \cdot \epsilon_z + C_{34} \cdot \gamma_{yz} + C_{35} \cdot \gamma_{xz} + C_{36} \cdot \gamma_{xy} \\
 \tau_{yz} &= C_{41} \cdot \epsilon_x + C_{42} \cdot \epsilon_y + C_{43} \cdot \epsilon_z + C_{44} \cdot \gamma_{yz} + C_{45} \cdot \gamma_{xz} + C_{46} \cdot \gamma_{xy} \\
 \tau_{xz} &= C_{51} \cdot \epsilon_x + C_{52} \cdot \epsilon_y + C_{53} \cdot \epsilon_z + C_{54} \cdot \gamma_{yz} + C_{55} \cdot \gamma_{xz} + C_{56} \cdot \gamma_{xy} \\
 \tau_{xy} &= C_{61} \cdot \epsilon_x + C_{62} \cdot \epsilon_y + C_{63} \cdot \epsilon_z + C_{64} \cdot \gamma_{yz} + C_{65} \cdot \gamma_{xz} + C_{66} \cdot \gamma_{xy}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

(4.2) denklemini matris formunda yazılırsa

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^- & C_{12}^- & C_{13}^- & C_{14}^- & C_{15}^- & C_{16}^- \\ C_{21}^- & C_{22}^- & C_{23}^- & C_{24}^- & C_{25}^- & C_{26}^- \\ C_{31}^- & C_{32}^- & C_{33}^- & C_{34}^- & C_{35}^- & C_{36}^- \\ C_{41}^- & C_{42}^- & C_{43}^- & C_{44}^- & C_{45}^- & C_{46}^- \\ C_{51}^- & C_{52}^- & C_{53}^- & C_{54}^- & C_{55}^- & C_{56}^- \\ C_{61}^- & C_{62}^- & C_{63}^- & C_{64}^- & C_{65}^- & C_{66}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

C_{ij} , [C] rijitlik matrisinin global koordinatlarındaki elemanlarıdır. Rijitlik matrisinin tersi [S] matrisi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^- & S_{12}^- & S_{13}^- & S_{14}^- & S_{15}^- & S_{16}^- \\ S_{21}^- & S_{22}^- & S_{23}^- & S_{24}^- & S_{25}^- & S_{26}^- \\ S_{31}^- & S_{32}^- & S_{33}^- & S_{34}^- & S_{35}^- & S_{36}^- \\ S_{41}^- & S_{42}^- & S_{43}^- & S_{44}^- & S_{45}^- & S_{46}^- \\ S_{51}^- & S_{52}^- & S_{53}^- & S_{54}^- & S_{55}^- & S_{56}^- \\ S_{61}^- & S_{62}^- & S_{63}^- & S_{64}^- & S_{65}^- & S_{66}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

Aynı matrisler yerel koordinat olan x_1, x_2, x_3 koordinat sisteminde şu şekilde yazılır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

C_{ij} , [C] rijitlik matrisinin global koordinatlarındaki elemanlarıdır. Rijitlik matrisinin tersi [S] matrisi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

Elastik bir malzemede rijitlik ve kompliyans matris elemanları arasındaki aşağıdaki gibi bir simetri vardır (Kollar ve Springer 2003).

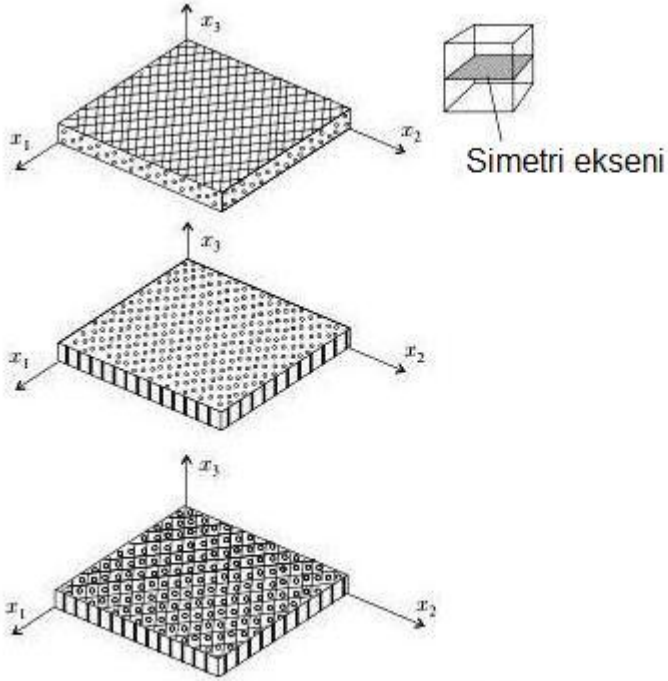
$$S_{ij}=S_{ji} \quad C_{ij}=C_{ji} \quad i,j=1,2,\dots,6.$$

4.1.2. Monoklinik Malzemeler

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

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

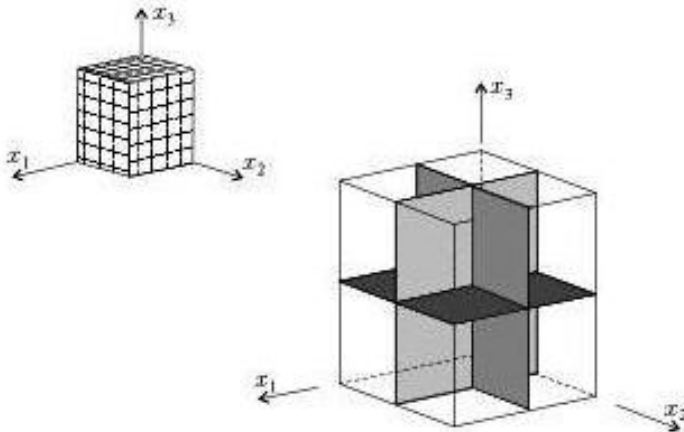
Burada simetri düzlemi $z=0$ düzlemdir. Böyle bir malzeme monoklinik olarak adlandırılır ve bağımsız değişken sayısı 13 olur (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. Monoklinik kompozit malzeme

4.1.3. Ortotropik Malzemeler

Bir kompozit malzemede mekanik özellikler bakımından üç simetri düzlemi (ortogonal düzlemler) varsa malzeme ortotropik olarak adlandırılır (Şekil 4.1.3.).



Şekil 4.8. Üç simetri eksenli kompozit malzeme

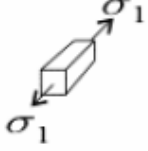


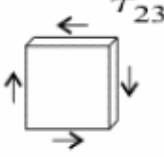
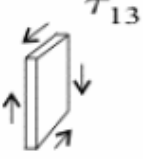
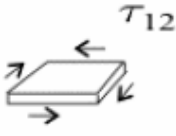
Simetri eksenlerdeki gerilmelerin bir kısmı sıfır olacağından rijitlik ve gevşeklik matrisleri aşağıdaki gibi olur.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{13} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Ortotropik malzemelerin gevşeklik matris elemanları Çizelge4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ortotropik malzemenin gevşeklik matris elemanları

Test	Esneklik matrisinin elemanları	
	$\bar{S}_{11} = \varepsilon_1 / \sigma_1$ $\bar{S}_{21} = \varepsilon_2 / \sigma_1$ $\bar{S}_{31} = \varepsilon_3 / \sigma_1$	$\bar{S}_{41} = \gamma_{23} / \sigma_1 = 0$ $\bar{S}_{51} = \gamma_{13} / \sigma_1 = 0$ $\bar{S}_{61} = \gamma_{12} / \sigma_1 = 0$
	$\bar{S}_{12} = \varepsilon_1 / \sigma_2$ $\bar{S}_{22} = \varepsilon_2 / \sigma_2$ $\bar{S}_{32} = \varepsilon_3 / \sigma_2$	$\bar{S}_{42} = \gamma_{23} / \sigma_2 = 0$ $\bar{S}_{52} = \gamma_{13} / \sigma_2 = 0$ $\bar{S}_{62} = \gamma_{12} / \sigma_2 = 0$
	$\bar{S}_{13} = \varepsilon_1 / \sigma_3$ $\bar{S}_{23} = \varepsilon_2 / \sigma_3$ $\bar{S}_{33} = \varepsilon_3 / \sigma_3$	$\bar{S}_{43} = \gamma_{23} / \sigma_3 = 0$ $\bar{S}_{53} = \gamma_{13} / \sigma_3 = 0$ $\bar{S}_{63} = \gamma_{12} / \sigma_3 = 0$
	$\bar{S}_{14} = \varepsilon_1 / \tau_{23} = 0$ $\bar{S}_{24} = \varepsilon_2 / \tau_{23} = 0$ $\bar{S}_{34} = \varepsilon_3 / \tau_{23} = 0$	$\bar{S}_{44} = \gamma_{23} / \tau_{23}$ $\bar{S}_{54} = \gamma_{13} / \tau_{23} = 0$ $\bar{S}_{64} = \gamma_{12} / \tau_{23} = 0$
	$\bar{S}_{15} = \varepsilon_1 / \tau_{13} = 0$ $\bar{S}_{25} = \varepsilon_2 / \tau_{13} = 0$ $\bar{S}_{35} = \varepsilon_3 / \tau_{13} = 0$	$\bar{S}_{45} = \gamma_{23} / \tau_{13} = 0$ $\bar{S}_{55} = \gamma_{13} / \tau_{13}$ $\bar{S}_{65} = \gamma_{12} / \tau_{13} = 0$
	$\bar{S}_{16} = \varepsilon_1 / \tau_{12} = 0$ $\bar{S}_{26} = \varepsilon_2 / \tau_{12} = 0$ $\bar{S}_{36} = \varepsilon_3 / \tau_{12} = 0$	$\bar{S}_{46} = \gamma_{23} / \tau_{12} = 0$ $\bar{S}_{56} = \gamma_{13} / \tau_{12} = 0$ $\bar{S}_{66} = \gamma_{12} / \tau_{12}$

Şu ana kadar verilen rijitlik matrisi elemanları, deneylerle tespit edilen, mühendislik sabitleriyle belirlenir. Ortotropik bir malzeme için bu sabiteler Tablo 4.2'de verilmiştir (Kollar ve Springer 2003).

Çizelge 4.2. Ortotropik malzemenin gevşeklik matris elemanları

x_1 yönündeki Young modülü	$E_1 = \sigma_1/\varepsilon_1$
$x_1 - x_2$ düzlemine göre Poisson oranı	$\nu_{12} = -\varepsilon_2/\varepsilon_1$
$x_1 - x_3$ düzlemine göre Poisson oranı	$\nu_{13} = -\varepsilon_3/\varepsilon_1$
x_2 yönündeki Young modülü	$E_2 = \sigma_2/\varepsilon_2$
$x_2 - x_1$ düzlemine göre Poisson oranı	$\nu_{21} = -\varepsilon_1/\varepsilon_2$
$x_2 - x_3$ düzlemine göre Poisson oranı	$\nu_{23} = -\varepsilon_3/\varepsilon_2$
x_3 yönündeki Young modülü	$E_3 = \sigma_3/\varepsilon_3$
$x_3 - x_1$ düzlemine göre Poisson oranı	$\nu_{31} = -\varepsilon_1/\varepsilon_3$
$x_3 - x_2$ düzlemine göre Poisson oranı	$\nu_{32} = -\varepsilon_2/\varepsilon_3$
$x_2 - x_3$ düzlemine göre kayma modülü	$G_{23} = \tau_{23}/\gamma_{23}$
$x_1 - x_3$ düzlemine göre kayma modülü	$G_{13} = \tau_{13}/\gamma_{13}$
$x_1 - x_2$ düzlemine göre kayma modülü	$G_{12} = \tau_{12}/\gamma_{12}$
$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}$	

Yukarıdaki tabloya göre esneklik matrisinin elemanları mühendislik sabitlerine göre tekrar yazılacak olursa; Çizelge 4.3'de ki gibi elde edilebilirler.

Çizelge 4.3 Mühendislik sabitlerine göre gevşeklik matris elemanları

$S_{11} = \varepsilon_1/\sigma_1 = \varepsilon_1/(E_1\varepsilon_1) = \frac{1}{E_1}$	$S_{41} = 0$
$S_{21} = \varepsilon_2/\sigma_1 = \varepsilon_2/(E_1\varepsilon_1) = -\frac{\nu_{12}}{E_1}$	$S_{51} = 0$
$S_{31} = \varepsilon_3/\sigma_1 = \varepsilon_3/(E_1\varepsilon_1) = -\frac{\nu_{13}}{E_1}$	$S_{61} = 0$
$S_{12} = \varepsilon_1/\sigma_2 = \varepsilon_1/(E_2\varepsilon_2) = -\frac{\nu_{21}}{E_2}$	$S_{42} = 0$
$S_{22} = \varepsilon_2/\sigma_2 = \varepsilon_2/(E_2\varepsilon_2) = \frac{1}{E_2}$	$S_{52} = 0$
$S_{32} = \varepsilon_3/\sigma_2 = \varepsilon_3/(E_2\varepsilon_2) = -\frac{\nu_{23}}{E_2}$	$S_{62} = 0$
$S_{13} = \varepsilon_1/\sigma_3 = \varepsilon_1/(E_3\varepsilon_3) = -\frac{\nu_{13}}{E_1}$	$S_{43} = 0$
$S_{23} = \varepsilon_2/\sigma_3 = \varepsilon_2/(E_3\varepsilon_3) = -\frac{\nu_{32}}{E_3}$	$S_{53} = 0$
$S_{33} = \varepsilon_3/\sigma_3 = \varepsilon_3/(E_3\varepsilon_3) = \frac{1}{E_3}$	$S_{63} = 0$
$S_{14} = 0$	$S_{44} = \gamma_{23}/\tau_{23} = \gamma_{23}/(G_{23}\gamma_{23}) = \frac{1}{G_{23}}$
$S_{24} = 0$	$S_{54} = 0$
$S_{34} = 0$	$S_{64} = 0$
$S_{15} = 0$	$S_{45} = 0$
$S_{25} = 0$	$S_{55} = \gamma_{13}/\tau_{13} = \gamma_{13}/(G_{13}\gamma_{13}) = \frac{1}{G_{13}}$
$S_{35} = 0$	$S_{65} = 0$
$S_{16} = 0$	$S_{46} = 0$
$S_{26} = 0$	$S_{56} = 0$
$S_{36} = 0$	$S_{66} = \gamma_{12}/\tau_{12} = \gamma_{12}/(G_{12}\gamma_{12}) = \frac{1}{G_{12}}$

4.1.4. Transvers İzotropik Malzemeler

Bir malzemenin ortotropik özelliklerine ek olarak mekanik özelliklerin tüm doğrultularda eşit olduğu bir düzlem varsa bu tip malzemeler transvers izotropik olarak adlandırılır (Şekil 4.9). Örneğin 1-2 düzlemi özel izotropi düzlemi ise bu durumda rijitliklerdeki 1 ve 2 alt indisleri yer değiştirebilir ve böylece gerilme-şekil değiştirme bağıntısındaki sabit sayısı 5 düşerek aşağıdaki hali alır.



Şekil 4.9. Transvers izotropi kompozit malzeme

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

4.1.5. İzotropik Malzemeler

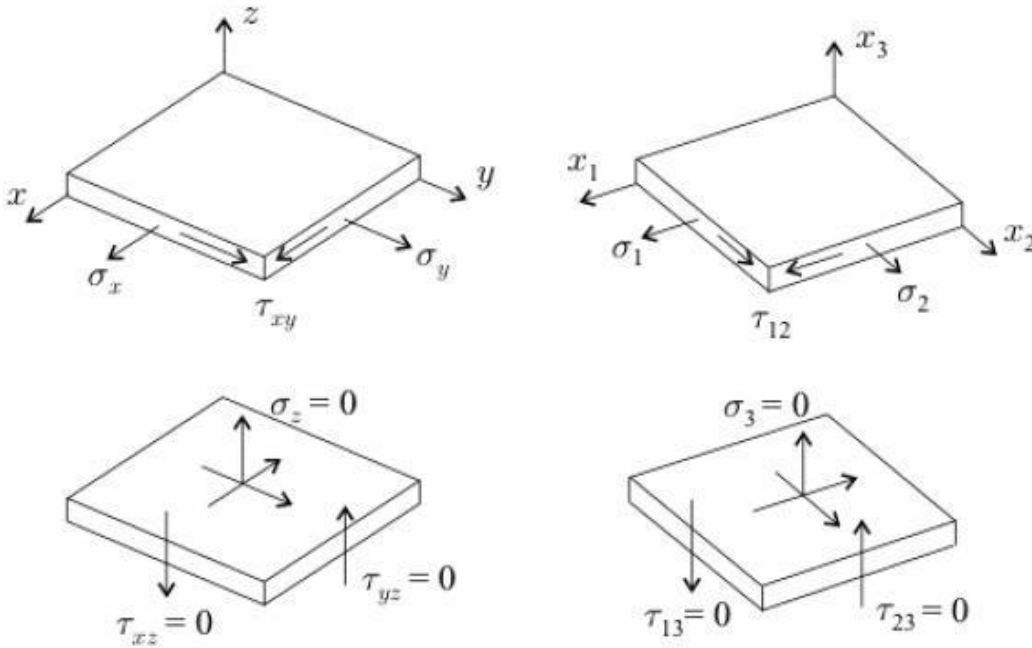
Bir malzeme özelliklerine ait simetri düzlemleri sonsuz sayıda ise yani malzeme özellikleri yöne bağımlı değilse buna izotrop malzeme denir. Bu durumda rijitlik matrisindeki bağımsız değişken sayısı yalnızca 2'dir.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

4.2. Düzlem Gerilme Durumu

Elyaf takviyeli tabaklar çoğunlukla ince olduklarından düzlem gerilme durumunun geçerli olduğu varsayılır. Düzlem gerilme durumunda, şekil 4.10'da görüldüğü üzere, düzleme dik olan z (x3) eksenindeki gerilmenin ve düzlem dışı kayma gerilmelerinin sıfır olduğu kabul edilir (Kollar ve Springer 2003).

$$\sigma_z = 0 \quad \tau_{yz} = 0 \quad \tau_{xz} = 0$$



Şekil 4.10. Düzlem gerilme durumunda gerilmeler

Bu durumda sabitlerin sayısı daha azalacağından 6 boyutlu matris yerine 3 boyutlu Q_{ij} matrisi kullanır. Böylece Hook bağıntısı kullanılarak ortotropik bir malzeme için (4.7) bağıntısı aşağıdaki gibi olur.

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

Ortotropik malzemeler için S_{16} ve S_{26} sıfır olduğundan geriye kalan matris elemanları Tablo 2.4’de verilen mühendislik sabitlerine göre yazılıp tersi alınacak olursa, ortotropik malzemeler için düzlem – gerilme durumunda katılık matrisi elde edilmiş olur (Reddy 2004).

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{D} & \frac{\nu_{12}E_2}{D} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{D} & \frac{E_2}{D} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}, \text{ burada } D = 1 - \frac{E_2}{E_1}\nu_{12}^2 = 1 - \nu_{12}\nu_{21}.$$

4.3. Mekanik Davranışın Yöne Bağlı Değişimi

Bir malzemeye uygulanan gerilmeler her zaman asal eksenler doğrultusunda olmayabilir. Böyle bir durumda farklı yönlerdeki bağıntılar transformasyon tansörü T_{ij} kullanılarak saptanabilir.

Örneğin etkiyen gerilmeler malzemenin asal doğrultuları olan 1 ve 2 yönünde değil de x ve y yönünde etkimesi halinde bu gerilme halinin malzeme asal eksenine ile çakışan bir koordinatta ifadesi veya transformasyonu şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

veya bunun tersi

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

Benzer şekilde

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix}$$

yazılabilir. Asal eksenler ile x, y eksenleri arasındaki dönme açısı θ ise $c=\cos\theta$ ve $s=\sin\theta$ olmak üzere $[T]$ transformasyon açısı aşağıdaki gibi yazılır.

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2-s^2 \end{bmatrix}$$

Bununla beraber bir $[R]$ matrisi kullanılırsa

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [R] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix}$$

olur.

Eğer gerilmenin uygulandığı eksenler olan x ve y, malzemenin asal eksenleri olan 1 ve 2 eksenleri ile çakışmıyorsa ise gerilme-gerinim bağıntısı şöyle yazılır (Aran 1990). Burada \bar{Q}_{ij} trasforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisini göstermektedir.

Benzer biçimde $[\bar{Q}_{ij}]$ matrisini tersi alınarak gevşeklik matrisi bulunur.

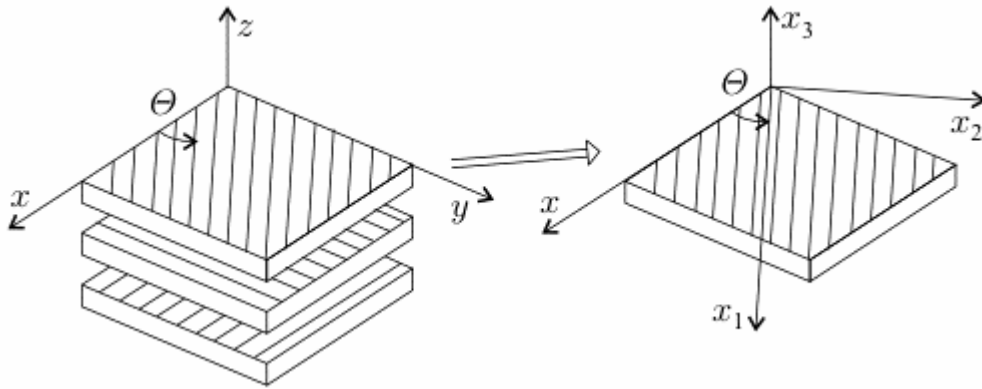
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \underbrace{[T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1}}_{[\bar{Q}]} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

$c=\cos\theta$ ve $s=\sin\theta$ olmak üzere $[\bar{Q}_{ij}]$ matrisinin elemanları aşağıda verilmiştir.

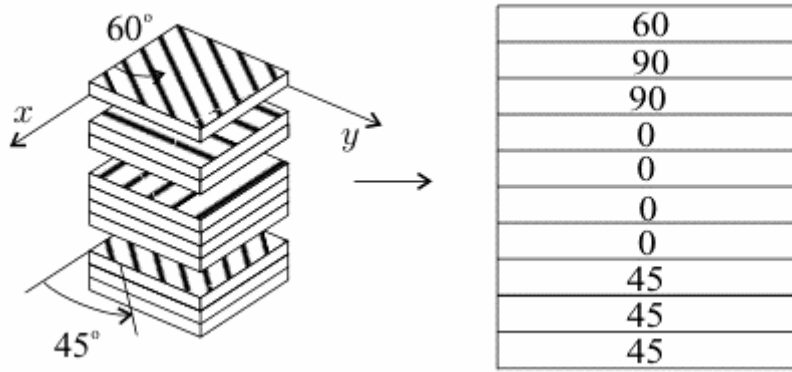
$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= c^4 Q_{11} + s^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) \\ \bar{Q}_{22} &= s^4 Q_{11} + c^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) \\ \bar{Q}_{12} &= c^2 s^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) + (c^4 + s^4) Q_{12} \\ \bar{Q}_{66} &= c^2 s^2 (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12}) + (c^2 - s^2) Q_{66} \\ \bar{Q}_{16} &= cs(c^2 Q_{11} - s^2 Q_{22} - (c^2 - s^2)(Q_{12} + 2Q_{66})) \\ \bar{Q}_{26} &= cs(c^2 Q_{11} - c^2 Q_{22} + (c^2 - s^2)(Q_{12} + 2Q_{66})) \end{aligned}$$

4.4. Çok Sayıda Tabakadan Oluşan Kompozitler

Elyaf takviyeli karma malzemeler çoğunlukla tek yönde takviyeli çok sayıda ince ortotropik tabakadan oluşur. Bunların istiflenme geometrisi, elyaf doğrultularının üstten alta doğru sıralanması ile belirtilir. Sürekli ve tek yönlü olan tabakalar, şekil 4.11.' de görüldüğü gibi, x eksenine göre θ açısı ile tanımlanır. Bu çalışmada, θ açısı saatin tersi yönünde pozitif kabul edilmiştir. Bir plaktaki tabakaların sayısı, verildiği açının yan tarafında küçük indislerle gösterilir. Bu notasyona ait bazı örnekler aşağıda belirtilmiştir.

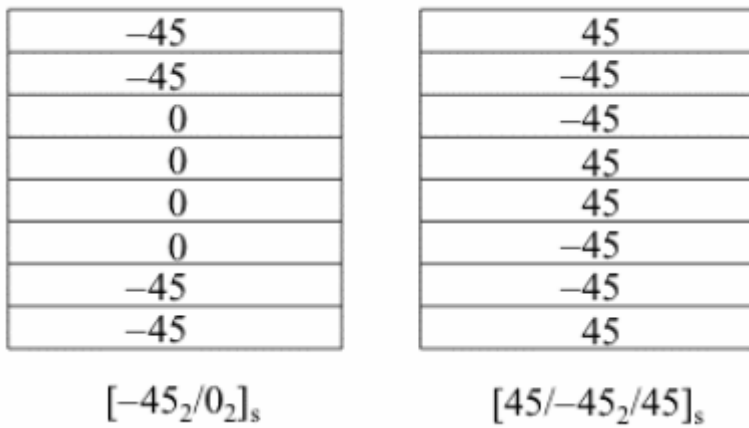


Şekil 4.11. x, y, z laminatın, x_1, y_1, z_1 bir tabakanın koordinat sistemi ve dönme açısı



Şekil 4.12. $[45^0_3/0^0_4/90^0_2/60^0]$ şeklinde dizilmiş plağın gösterimi

Simetrik yerleştirmelerde s alt ile notasyon kısaltılabilir (şekil 4.13.)



Şekil 4.13. Simetrik dizilmiş plağın gösterimi

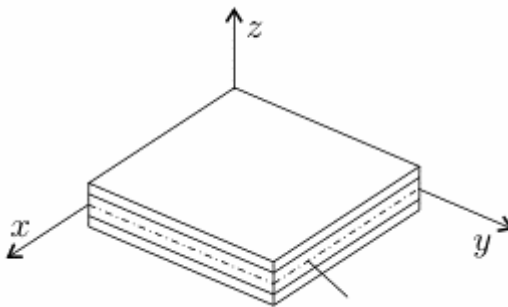
4.5. Çok Tabakalı Kompozitlerin Rijitlik Matrisleri

İki ve daha fazla tabakadan oluşan levhalar malzeme asal eksenleri çeşitli açılar yapan zorlamalara dayanabilecek şekilde ve tabakların değişik doğrultularda istiflenmesiyle üretilirler. Bu tip levhaların rijitlikleri klasik laminasyon teorisi yardımıyla hesaplanabilir. Bu teoriye göre genlemeler tabaka boyunda lineer değişmektedir. Düzlem dışı kayma deformasyonları ihmal edilebilecek kadar küçük kabul edilir. Plak düzlemine dik olan normal gerilme ve kayma gerilmeleri diğer gerilmelere göre çok küçüktür kabulleri yapılacaktır (Özakıncı 2006).

Çok tabakalı bir levhada gerilme-gerinim davranışında; levhanın kalınlığı boyunca uzama ve eğilme rijitliklerinin bilinmesi gerekir. Bir çok tabakadan oluşan levhaların mekanik davranışının incelenmesinde şu kabuller yapılır:

- Tabaklar arasındaki bağlar mükemmeldir ve kayma etkisiyle deforme olmazlar; levha tek bir plaka gibi davranır.
- Levhanın orta düzlemine dik düzlem, levha şekil değiştirirse dahi orta düzleme dik kalır. Yani orta düzleme dik düzlemlerde kayma olmaz.
- Normal doğrultularda kalınlığın sabit kaldığı kabul edilir.

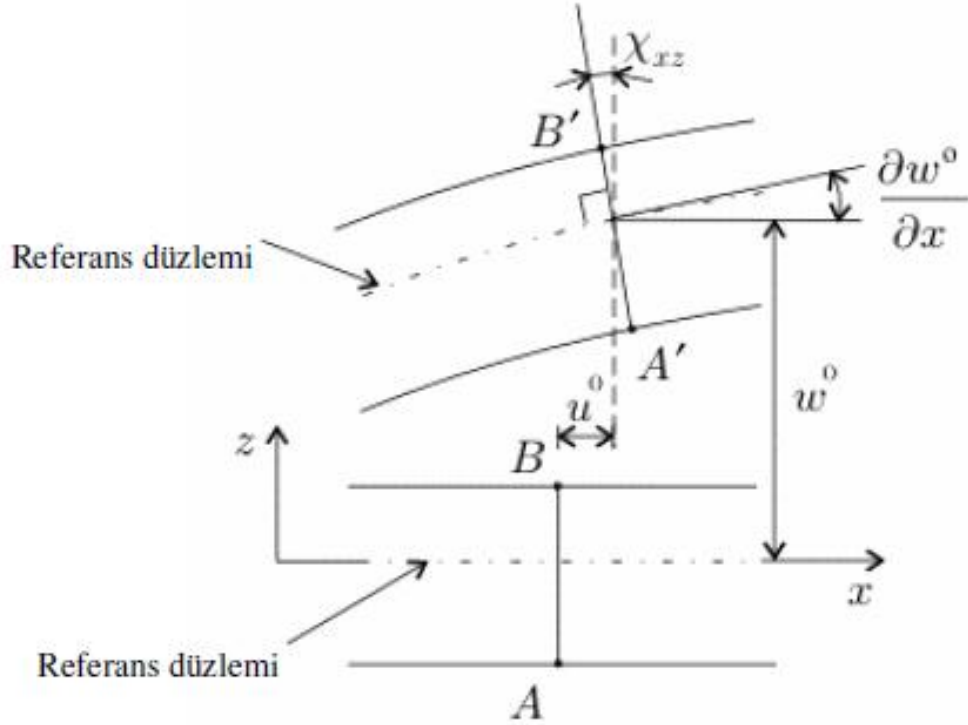
Tabakalı kompozit plakların katılık matrisi; $[A]$, $[B]$, $[D]$ matrisi olmak üzere, üç ayrı matristen oluşmaktadır. Bu kısımda bu matrisler plağın küçük deformasyonlara uğradığı kabul edilerek elde edilmiştir (Özakıncı 2006). Şekil 4.13.'de görüldüğü gibi tabaka analizlerinde genellikle referans düzlemi, plağın orta düzleminde alınır. Tabakalar plak orta düzlemine göre simetrik olmadığı sürece, orta düzlem doğal düzlem olarak kabul edilmez.



Şekil 4.14. Koordinat sistemi ve orta düzlem

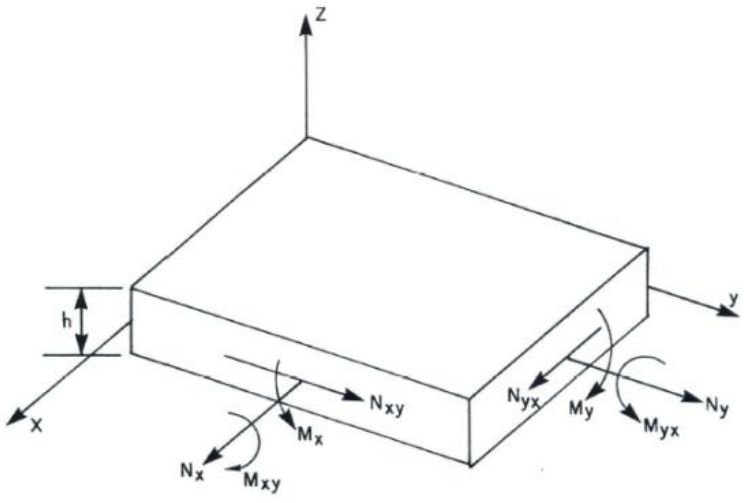
Ayrıca bu çalışmada analizler Kirchhoff hipotezine göre yapılmıştır. Bu hipoteze göre; şekil 4.13.'de görüldüğü üzere deformasyondan önce plak orta düzlemine dik olan

doğrultular; deformasyondan sonra şekil değiştirmez, doğru kalırlar ve deforme olmuş yüzeye teğet olacak şekilde dönerler (Kollar ve Springer 2003).



Şekil 4.15. Plagın x-y düzleminde yer değiştirmesi

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi, plak üzerinde etkiyen iç kuvvetler ve momentler aşağıdaki gibidir:



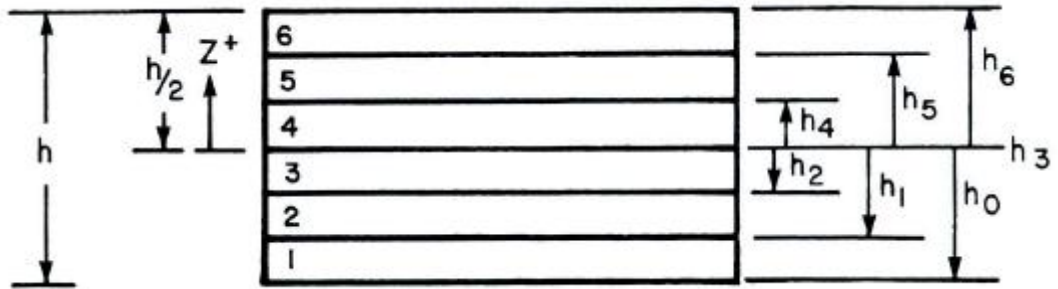
Şekil 4.16. Referans düzlemine etkiyen iç kuvvetler, momentler ve kayma kuvvetleri

$$N_i = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_i dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma_i^k dz \quad (4.1)$$

$$M_i = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_i dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} z \sigma_i^k dz$$

N_i ($i=1, 2, 6$) birim uzunluktaki iç kuvvetleri, M_i ($i=1, 2, 6$) ise birim uzunluktaki iç kuvvetleri temsil etmektedir. hterimi de şekil 4.15'te görüldüğü üzere, plakanın kalınlığını göstermektedir. Ayrıca yukarıdaki denklemlerden matris notasyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_6 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ \hline B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1^0 \\ \epsilon_2^0 \\ \epsilon_6^0 \\ k_1^0 \\ k_2^0 \\ k_6^0 \end{pmatrix}$$



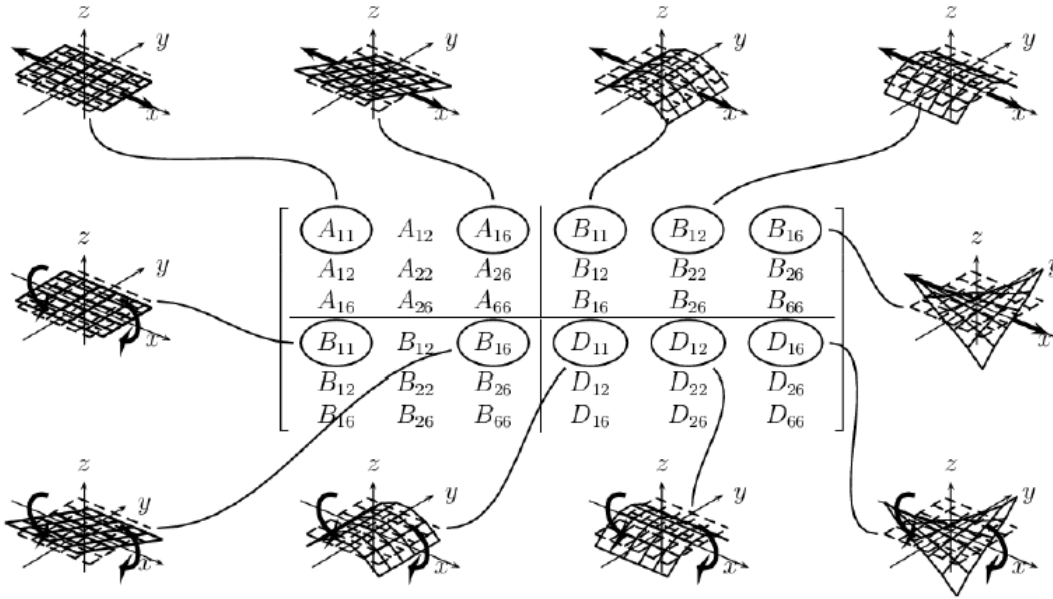
Şekil 4.17. Tabakaların referans düzlemine olan mesafeleri

$[A]$, $[B]$, $[D]$ matrisinin elemanları, k plakanın katman numarası, Q tabakanın katılık matrisi olmak üzere aşağıdaki gibi formüle edilebilir (Kollar ve Springer 2003). Bu matris elemanlarının davranışı şekil 4.15'te verilmiştir.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k - h_{k-1})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k^2 - h_{k-1}^2)$$

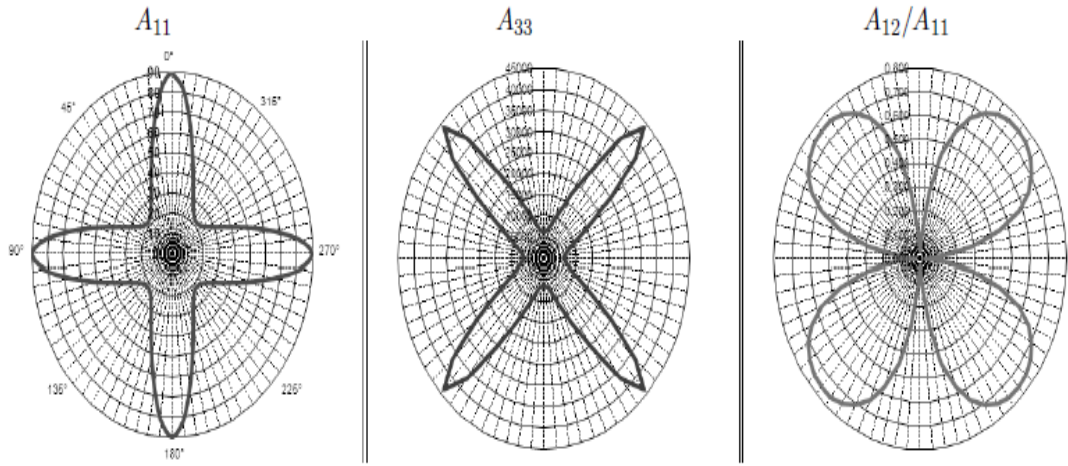
$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k^3 - h_{k-1}^3)$$



Şekil 4.18. [A], [B] ve [D] matris elemanlarının mekanik davranışı

[A] matris elemanlarının θ açısına bağlı olarak dairesel bir grafikte gösterilebilir.

Young modülü, kayma modülü ve Poisson oranı sırasıyla A_{11} , A_{33} ve A_{12}/A_{11}



Şekil 4.19. $[A]$ matris elemanlarının ortotropik $[(0,90)_n]_s$ plakada açığa göre değişimi

5. TİTREŞİM VE ANALİZİ

Titreşim bir denge noktası etrafındaki mekanik salınımdır. Bu salınımlar bir sarkaçın hareketi gibi periyodik olabileceği gibi çakıllı bir yolda tekerleğin hareketi gibi rastgele de olabilir (Anonim 2013).

Titreşim bazen arzu edilir. Örneğin; bir akort çatalının, üflemeli çalgılarda veya mızıkada dilin veya bir hoparlörde koninin hareketi birçok aletin doğru kullanılması için gerekli olan arzu edilir titreşimdir.

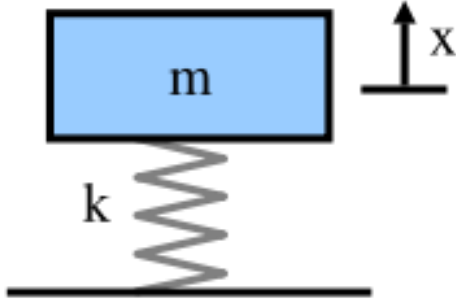
Daha sıklıkla, titreşim istenmeyen bir harekettir, çünkü boşa enerji harcar ve istenmeyen ses ve gürültü oluşturur. Örneğin, motorların, elektrik motorlarının ya da herhangi mekanik aracın çalışma esnasındaki hareketi istenmeyen titreşimler üretir. Böyle titreşimler motorlardaki dönen parçaların balanssızlığından, düzensiz sürtünmeden, dişli çarkların hareketinden kaynaklanabilir. Dikkatli tasarımlar genellikle istenmeyen titreşimleri minimize ederler.

Titreşim olayı potansiyel enerjinin kinetik enerjiye, kinetik enerjinin ise potansiyel enerjiye dönüşümünü içermektedir. Bu nedenle titreşim yapan sistemler potansiyel enerji ve kinetik enerji depolayan elemanlara sahip olmalıdır. Potansiyel enerji depolayan elemanlar yay veya elastik elemanlar, kinetik enerji depolayan elemanlar ise kütle veya atalet elemanlarıdır. Elastik elemanlar potansiyel enerji depolar ve bu enerjiyi atalet elemanına kinetik enerji olarak geri verir. Basit bir kütle-yay sistemi bu durumu en güzel örnektir (Şekil 5.1).

Bir kütle yay sistemi (Şekil 5.1) ele alındığında sistemdeki kütlelerin zamana göre yer değiştirme hareketi, sistemin periyodik ve sönüm olacağı kabulü ile

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (5.1)$$

şeklinde yazılır. Burada A genlik, ω_n doğal frekans, ϕ faz açısını göstermektedir.



Şekil 5.1 Kütle- yay sistemi

Konum denklemini birinci türevi hızı denklemini verecektir:

$$\dot{x}(t) = w_n A \cos(w_n t + \phi) \quad (5.2)$$

Hız denklemini zaman göre türevi de ivme denklemini verecektir;

$$\ddot{x}(t) = -w_n^2 A \sin(w_n t + \phi) \quad (5.3)$$

Doğal frekans: Bir cismin sadece esnekliğine ve kütesine bağlı olan ve cismin o frekansta uyarılırsa yüksek genlikle ve sürekli olarak titreşeceği frekansa “doğal frekans” denir. Diğer bir deyişle doğal frekans her cisme ait öyle bir frekanstır ki cisim o frekansta bir kere uyarıldıktan sonra uyarı kesilse bile titreşmeye devam eder.

Doğal frekansın diğer bir özelliği de cisim doğal frekansında uyarıldığında uyarının şiddetine değil sadece sistemde mevcut sönülmeye bağlı olarak çok yüksek genliklerde titreşir (Çağlayan 2009).

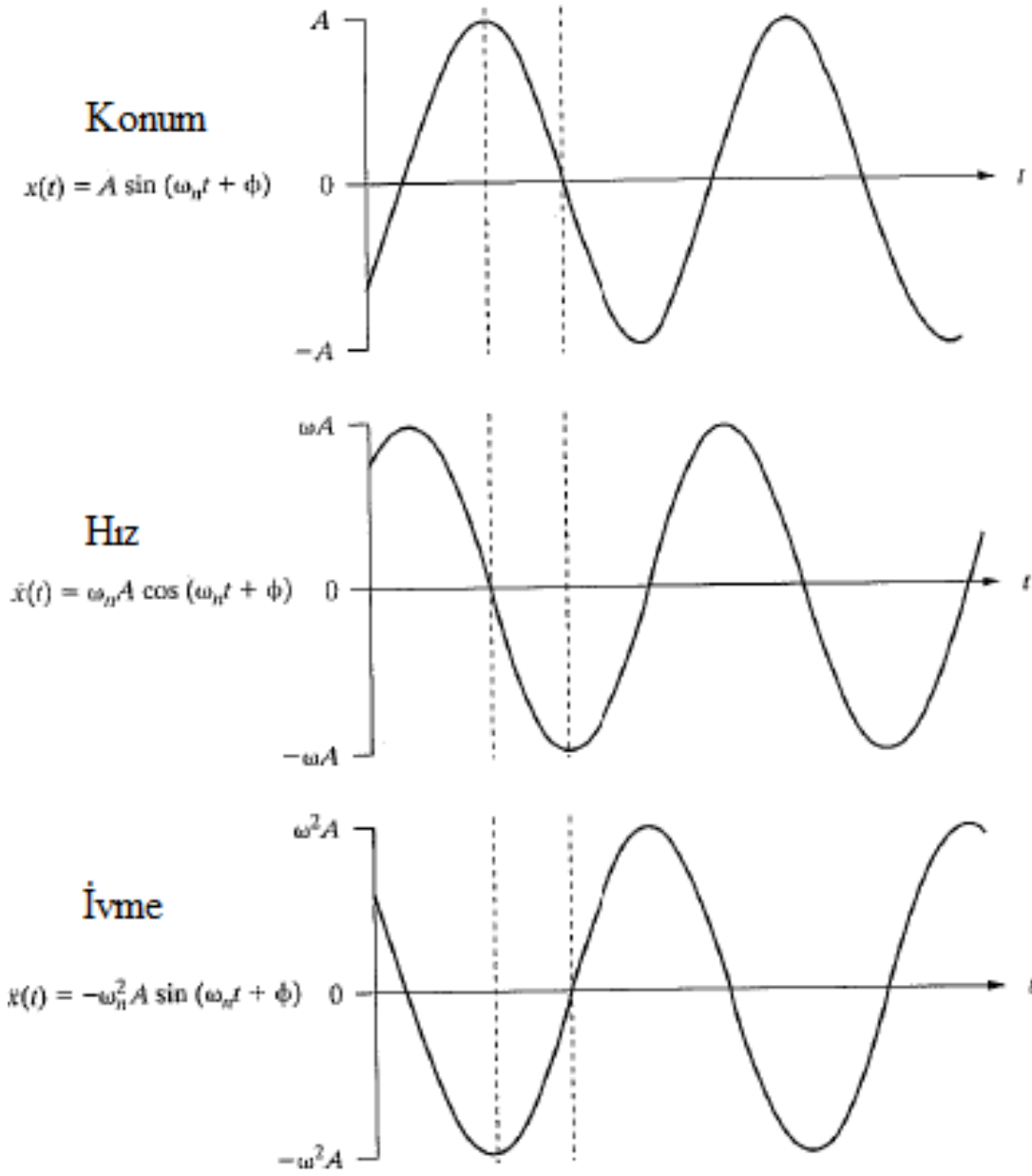
Doğal frekansında uyarılan bir çelik konstrüksiyonun titreşim genliği, uyarı genliğinin 10 katı ya da daha yukarıya çıkabilir. Fatih Sultan Mehmet boğaz köprüsünün doğal frekansı 0.33 Hz. İnsan omurgasının doğal frekansı 3-5 Hz civarındadır. Uçakların kanatları ise genellikle 1 Hz doğal frekansa sahiptir (Çağlayan 2009).

5.3 denkleminin çözüldüğünde sistemin doğal frekansı;

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

şeklinde bulunur.

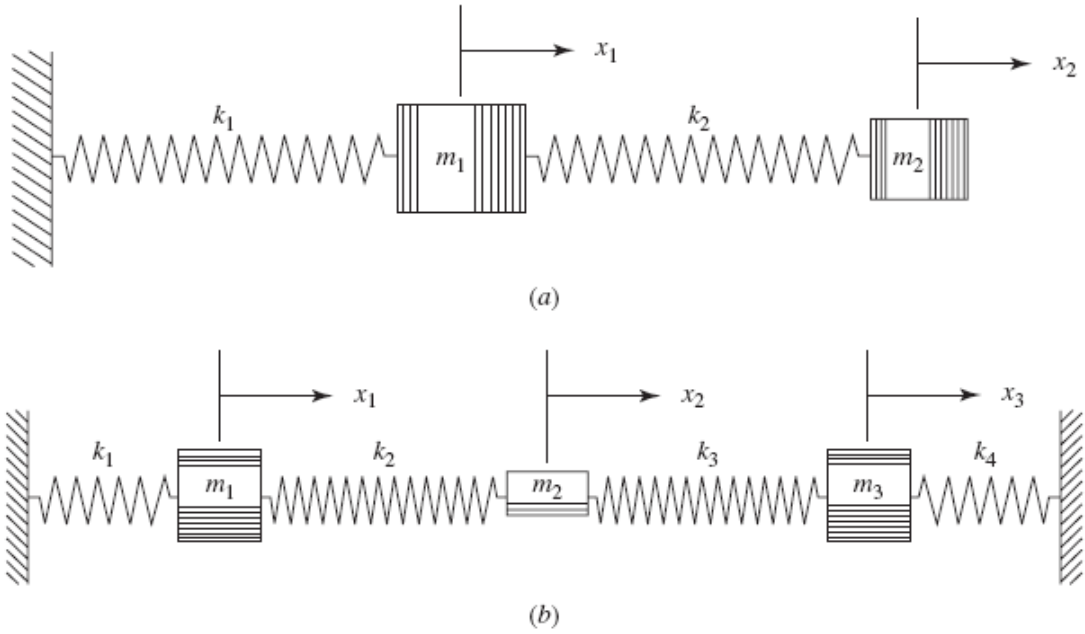
Basit harmonik hareket yapan bir sisteme ait konum, hız ve ivme arasındaki ilişki (Şekil 5.2)'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Basit harmonik harekette konum, hız ve ivme arasındaki ilişki(Inman 2008)

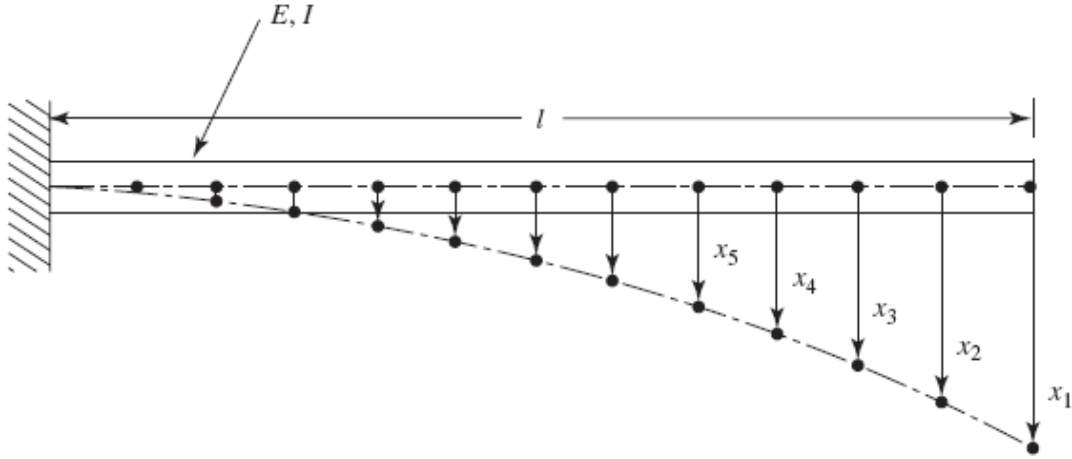
Serbestlik Derecesi

Bir sistemin serbestlik derecesi, sisteme ait her parçanın herhangi bir t anındaki konumlarını tanımlayabilmek için gerekli olan minimum bağımsız koordinat sayısıdır. Şekil 5.1'deki yay kütle sistemindeki kütlelerin konumu sadece x koordinatı ile ifade edilebilir, dolayısıyla yay kütle sistemi tek serbestlik derecelidir. Sistem konumuna ve elemanların hareketine göre serbestlik derecesi değişir. Şekil 5.3'te 2 (a) ve 3 (b) olan sistemlere örnekler verilmiştir.



Şekil 5.3 Serbestlik derecesi farklı olan benzer sistemler

Diğer taraftan, sürekli sistemlerde kütle, elastiklik ve sönüm sistem üzerine dağılmış durumdadır. Titreşim sırasında sonsuz sayıdaki noktasal kütleler birbirlerine göre farklı hareketler yapabilir. Bu tip sistemlere dağıtılmış sürekli veya sonsuz boyutlu sistemler adı verilir. Sürekli sistemler için temel bir örnek Şekil 5.4'te gösterilen ankastre kiriştir. Kiriş sonsuz sayıda maddesel kütleye sahiptir ve bunun sonucu olarak kiriş hareketini (çökmesini) ifade edebilmek için sonsuz sayıda koordinata ihtiyaç vardır. Bu sonsuz sayıdaki koordinat kirişin elastik çökme eğrisini oluşturur. Bir sistemin serbestlik derecesi sayısı kadar doğal frekansları vardır.



Şekil 5.4 Ankastre kiriş (sonsuz serbestlik dereceli)

5.1 Titreşimin Sınıflandırılması

Titreşim problemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

a) Sönümsüz ve Sönümlü Titreşimler

Eğer sistemde sürtünme veya benzeri dirençler sebebi ile enerji kaybı ve sönümüne sebep olacak bir etki yok ise titreşim problemi sönümsüz (undamped) olarak adlandırılır. Eğer sistemde sönüm mevcut ise sistem sönümlü (damped) olarak adlandırılır. Titreşim problemlerini incelerken sönüm ihmal edilerek çözüm basitleştirilebilir, fakat sönüm etkileri özellikle rezonans durumu için oldukça önemlidir.

b) Serbest ve Zorlanmış Titreşimler

Eğer sistem ilk şartlar neticesinde titreşiyor ise ($t > 0$ için sisteme etki eden dış zorlama yok) sistem titreşimlerine serbest titreşim adı verilir. Eğer sistem dış zorlama etkisi ile titreşiyor ise oluşan titreşimlere zorlanmış titreşim adı verilir.

c) Lineer ve Lineer Olmayan Titreşimler

Eğer titreşim yapan sistemin tüm bileşenleri doğrusal (lineer) davranışa sahip ise oluşan titreşimlere lineer titreşim adı verilir. Eğer sistem elemanlarından herhangi biri doğrusal olmayan davranışa sahip ise oluşan titreşimlere lineer olmayan (nonlinear) titreşim adı verilir. Bu tip sistemlerin hareketini ifade eden diferansiyel denklemler lineer olmayan formdadır. Birçok titreşim sistemi,

büyük titreşim genlikleri için lineer olmayan davranışa sahiptir.

5.2 Titreşim Analizi

Doğadaki her cisim, “Doğal Titreşim Frekansı” olarak adlandırılan, sonsuz sayıda titreşim frekansı ve şekline sahiptir. Bu frekansların hesaplanması ve şeklinin bilinmesi, titreşim kaynaklı mühendislik problemlerinin çözülmesinde temel önemi taşımaktadır.

Titreşim ölçüm ve analizinin yapılmasının bir çok sebebi vardır. Daha öncede anlatıldığı üzere dinamik bir sistemin davranışı anlamak ve olabilecek herhangi bir hareketi ön görmek noktasında söz konusu sistemin doğal frekansın bilinmesi hayati derecede önemlidir. Dolayısıyla titreşim analizi yapılmasının başlıca nedeni mekanik sistemlerinin doğal frekanslarını bulmaktır. Doğal titreşim analizinin yapılması ile yapının doğal titreşim frekansları bulunmuş olur. Yapıya uygulanan periyodik bir kuvvetin frekansı, bu doğal frekanslardan herhangi birisi civarında ise, bu frekans uyarılmış olur ve yapı bu doğal frekans ve şekli ile titreşmeye başlar. Eğer uyarıcı kuvvetin frekansı ile yapının doğal frekansı çakışır ise “rezonans” olayı meydana gelir. Rezonans istenmiyorsa, ya uyarıcı kuvvetin frekansının, ya da yapının frekansının değiştirilmesi gerekecektir.

Diğer önemli nedenlerde biri de bir sistem dizayn edilirken sistem için ön görülen analitik modelin doğru olup olmadığını test edilmesi ve benzer sistem dizaynlarında da aynı modelin kullanılması sağlamaktır. Bu tez kapsamında bir analitik modelin doğruluğu araştırılacaktır.

Titreşim analizi yapılmasının bir diğer amacı da titreşim testi yapılarak bir sistemin dayanıklılığını ya da karalılığını çalışma koşullarında belirlemektir. Böylece bir sistem daha çalışmadan ömrü tayin edilebilir.

Titreşim analizi makine ve ekipmanların çalışma esnasında her hangi bir sorununa sahip olup olmadığı, adeta bir kalp grafisi çeker gibi, teşhis konur ve olası büyük arızaların önüne geçilerek ciddi anlamda tasarruf sağlanır. Burada da temel düşünce, söz konusu sistemin doğal frekansı bulup onu sistemi sürekli izleyerek titreşim parametrelerinde herhangi bir kayma olduğunda anında farkına varmak ve gerekli müdahaleyi yapmaktır.

6. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında kaynak (Kollar ve Springer 2003)'in 93-151 sayfalarında enerji metodunu kullanarak düzlem-gerilme durumunda çok tabakalı ortotropik simetrik dikdörtgen kompozit bir levhanın doğal frekansını hesaplamak için bulduğu formül cebri hesaplar için kullanılacaktır. Bulunan cebri hesaplar, aynı kompozit plaklarla yapılan titreşim analizideneylerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

6.1 Tabakalı Kompozit Plakaların Titreşim Analizi

Bu çalışmada plak problemlerinin çözümünde, enerji yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümde enerji yöntemi için gerekli olan genleme enerjisi; düzlem – gerilme durumundaki plak için elde edilmiştir.

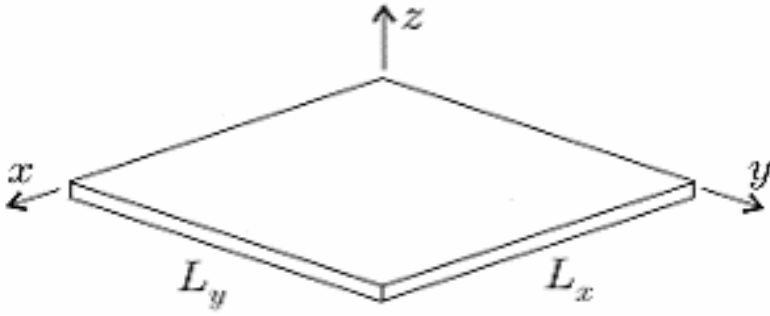
Aşağıda özetle bu formülün çıkarılışı anlatılacak daha sonra yapılan deneysel çalışma anlatılacaktır.

Kenarları L_y ve L_x olan simetrik dağılımlı bir dikdörtgen levhanın düzlem-gerilme durumunda genleme enerjisi aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$U = \frac{1}{2} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_{-h_b}^{h_t} (\varepsilon_x \sigma_x + \varepsilon_y \sigma_y + \gamma_{xy} \tau_{xy}) dz dy dx \quad (6.1)$$

[A], [B], [C] matrisleri hesaba katılırsa genleme enerjisi şöyle yazılabilir:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} dy dx \quad (6.2)$$



Şekil 6.1. Çok tabakalı kompozit dikdörtgen levha

Serbest titreşim yapan sönümsüz bir sistemdeki titreşim ifadesinin zamana bağlı değişimi:

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (6.3)$$

Yukarıdaki denklemde ω_n dairesel frekansı, f ise Hz cinsinden frekansı; ϕ faz farkını ifade etmektedir. Titreşim periyodu T aşağıdaki gibidir:

$T = \frac{1}{f}$, $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ Simetrik bir levhada $[B]=0$ olduğundan, 6.2 ve 6.3 denklemleri birleştirilip ve gerekli enerji denklemleri yeniden düzenlenirse ortotropik bir levha için doğal frekans denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$f_{ij} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_{ij}}{\rho L_x L_y}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(D_{11} \frac{\alpha_1^4}{L_x^4} + D_{22} \frac{\alpha_3^4}{L_y^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\alpha_2}{L_x^2 L_y^2} \right)} \quad (6.4)$$

$$\alpha_2 = \alpha_4 \alpha_5$$

f_{ij} : i ve j 'nci mod için doğal frekans (Hz)

λ_{ij} : i ve j 'nci mod için özdeğerler

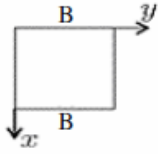
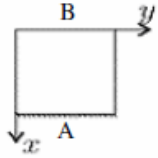
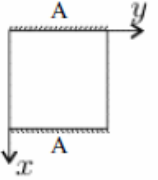
ρ : yoğunluk (kg/m^3)

α : mesnet şekline göre değişen sınır katsayısı

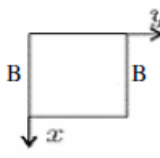
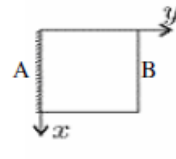
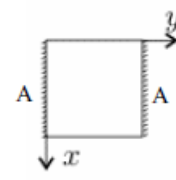
D: [D] matrisinin elemanları (N.m)

Mesnet şekline göre değişen sınır katsayısı Çizelge 6.1 ve 6.2 'den alınır.

Çizelge 6.1 α_1 ve α_4 katsayılarının yaklaşık değerleri

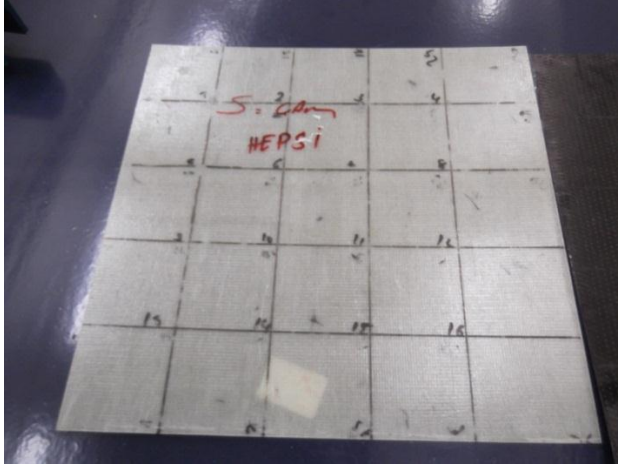
	α_1	α_4	i
	$i\pi$	$i^2\pi^2$	1, 2, 3,....
	$(i + 0.25)\pi$	$\alpha_1(\alpha_1 - 1)$	1, 2, 3,....
	4.730 $(i + 0.5)\pi$	$\alpha_1(\alpha_1 - 2)$ $\alpha_1(\alpha_1 - 2)$	1 1, 2, 3,....

Çizelge 6.2 α_3 ve α_5 katsayılarının yaklaşık değerleri

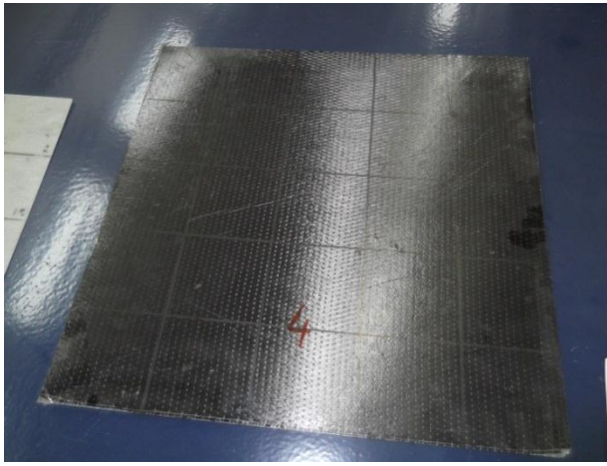
	α_3	α_5	j
	$j\pi$	$j^2\pi^2$	1, 2, 3,....
	$(j + 0.25)\pi$	$\alpha_3(\alpha_3 - 1)$	1, 2, 3,....
	4.730 $(j + 0.5)\pi$	$\alpha_3(\alpha_3 - 2)$ $\alpha_3(\alpha_3 - 2)$	1 1, 2, 3,....

6.2 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Bulunması

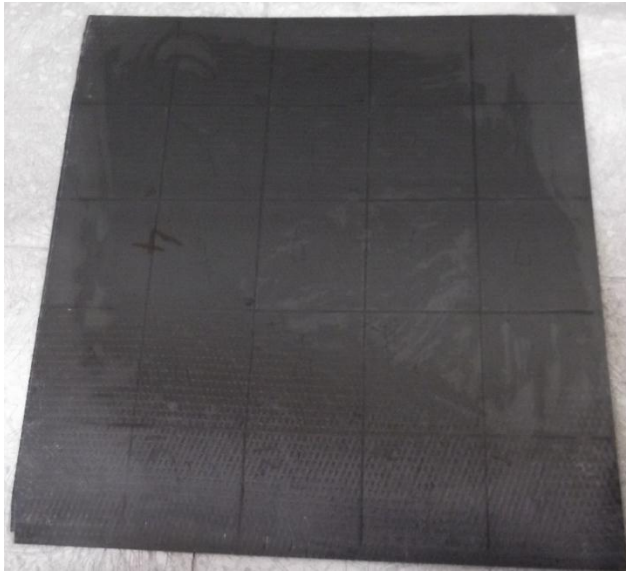
Bu deneysel çalışmada kullanılan kompozit malzemeler verilen dizilim ve malzeme bileşenlere, elyaf yatırma metodu kullanılarak özel üretilmiş ve 120 C^0 'de kürlenmiştir. Kompozit malzemelerde kullanılan farklı tip elyafların malzeme titreşim davranışının olan etkisi araştırmak için cam ve karbon elyafı ayrı ayrı ve birlikte epoksi reçine ile hibrit oluşturularak temelde 3 çeşit malzeme üretilmiştir (Şekil 6.2, 6.3 ve 6.4.). Ayrıca karma malzeme içindeki elyaf açılarının malzeme titreşim davranışına olan etkisi araştırmak adına cam-karbon/epoksi kullanılarak elde edilen hibrit malzemenin içindeki elyaf açıları değiştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.2. Cam/epoksi kompozit dikdörtgen levha



Şekil 6.3. Karbon/epoksi kompozit dikdörtgen levha



Şekil 6.4. Cam+karbon/epoksi kompozit dikdörtgen levha

Bu çalışmada kullanılan malzemeler ve özellikleri Çizelge 6.3.'te belirtilmiştir.

Çizelge 6.3. Karma malzeme bileşenlerinin mekanik özellikleri (Summerscales 2011)

Karma Malzeme Bileşenlerinin Mekanik Özellikleri				
Bileşen	Takviye Yönündeki Elastiklik Modülü	Takviyeye Dik Yönündeki Elastiklik Modülü	Kayma Modülü	Poission Oranı
	GPa	GPa	GPa	GPa
	E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}
Cam elyaf	70	67,8	36	0,23
Karbon elyaf	300	15	6,4	0,2
Epoksi reçine	2,40	2,40	0,90	0,34

Karma malzemenin mekanik özellikleri klasik laminasyon teorisine göre (4.2) denklemi kullanılarak elde edilmiştir (Çizelge 6.4.).

Çizelge 6.4 Deneyde kullanılan karma malzemelerin mekanik özellikleri

Karma Malzemelerin Mekanik Özellikleri								
Malzeme Adı	Bileşenler	Takviye Yönündeki Elastiklik Modülü	Takviyeye Dik Yönündeki Elastiklik Modülü	Kayma Modülü	Poission Oranı	Elyaf oranı	Dizilim	Ebatlar
		GPa	GPa	GPa	GPa	V_f	[././.] _s	mm
		E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}			
C	Cam/Epoksi	43	10,8	3,3	0,27	0,6	[0/90/90/0] _s	500x500x2
K	Karbon/Epoksi	181,00	6,85	4,2	0,26	0,6	[0/90/90/0] _s	500x500x2
H1	Cam+karbon/epoksi	111,96	5,23	1,99	0,27	0,6	[0/0/4] _s	500x500x2
H2	Cam+karbon/epoksi	111,96	5,23	1,99	0,27	0,6	[0/15/15/0] _s	500x500x2
H3	Cam+karbon/epoksi	111,96	5,23	1,99	0,27	0,6	[0/30/30/0] _s	500x500x2
H4	Cam+karbon/epoksi	111,96	5,23	1,99	0,27	0,6	[0/45/45/0] _s	500x500x2

Verilen kompozit levhaların doğal frekansları cebirsel olarak hesaplamak için malzemelerin mekanik özelliklerini kullanarak söz konusu tabakalı yapının genleşme, bağlantı ve eğilme rijitleri olana [A], [B] ve [D] matris elemanlarının bulunması gerekir.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Kullanılan malzemeler ortotropik olduğundan $[B]=0$ olur. Çizelgede 6.4'teki malzeme özellikleri kullanılarak, The Laminator programı aracılığıyla A_{ij} ve D_{ij} elemanları aşağıdaki gibi elde edilir.

C: Cam/Epoksi [0/90/90/0]_s

$$[A] = \begin{bmatrix} 55.87 & 6.07 & 0 \\ 6.07 & 55.87 & 0 \\ 0 & 0 & 6.58 \end{bmatrix} \times 10^6 \text{ N.m} \quad [D] = \begin{bmatrix} 20.33 & 2.02 & 0 \\ 2.02 & 16.25 & 0 \\ 0 & 0 & 2.20 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

K: Karbon/Epoksi [0/90/90/0]_s

$$[A] = \begin{bmatrix} 188.0 & 1.86 & 0 \\ 1.86 & 188.0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.77 \end{bmatrix} \times 10^6 \text{ N.m} \quad [D] = \begin{bmatrix} 73.56 & 0.62 & 0 \\ 0.62 & 51.78 & 0 \\ 0 & 0 & 1.59 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

H1: Cam-Karbon/Epoksi [0/0/]_{4s}

$$[A] = \begin{bmatrix} 225.30 & 4.79 & 0 \\ 4.79 & 17.94 & 0 \\ 0 & 0 & 11.9 \end{bmatrix} \times 10^6 \text{ N.m} \quad [D] = \begin{bmatrix} 66.48 & 1.68 & 0 \\ 1.68 & 6.25 & 0 \\ 0 & 0 & 4.19 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

H2: Cam-Karbon/Epoksi [0/15/15/0]_s

$$[A] = \begin{bmatrix} 203.10 & 15.29 & 0 \\ 15.29 & 19.14 & 0 \\ 0 & 0 & 22.41 \end{bmatrix} \times 10^6 \text{ N.m} \quad [D] = \begin{bmatrix} 60.47 & 4.52 & 10.84 \\ 4.52 & 6.56 & 0.98 \\ 10.84 & 0.98 & 7.03 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

H3: Cam-Karbon/Epoksi [0/30/30/0]_s

$$[A] = \begin{bmatrix} 150.10 & 36.30 & 56 \\ 36.30 & 30.09 & 19.62 \\ 56 & 16.62 & 43.41 \end{bmatrix} \times 10^6 \text{ N.m} \quad [D] = \begin{bmatrix} 46.13 & 10.21 & 15.17 \\ 10.21 & 9.53 & 5.31 \\ 15.17 & 5.31 & 12.72 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

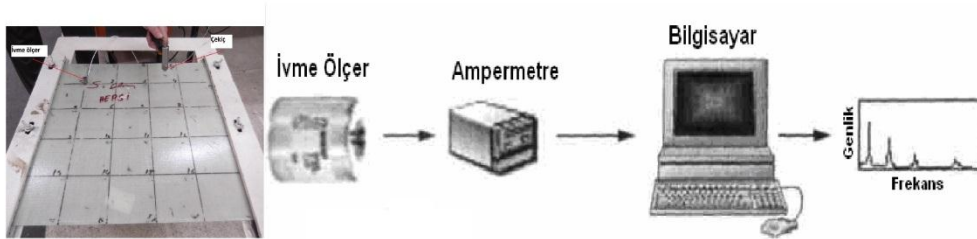
H4: Cam-Karbon/Epoksi [0/45/45/0]_s

$$[A] = \begin{bmatrix} 95.96 & 46.80 & 43.65 \\ 46.80 & 63.24 & 43.65 \\ 43.65 & 43.65 & 53.91 \end{bmatrix} \times 10^6 \text{ N.m} \quad [D] = \begin{bmatrix} 31.46 & 13.05 & 11.82 \\ 13.05 & 18.51 & 11.82 \\ 11.82 & 11.82 & 15.56 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

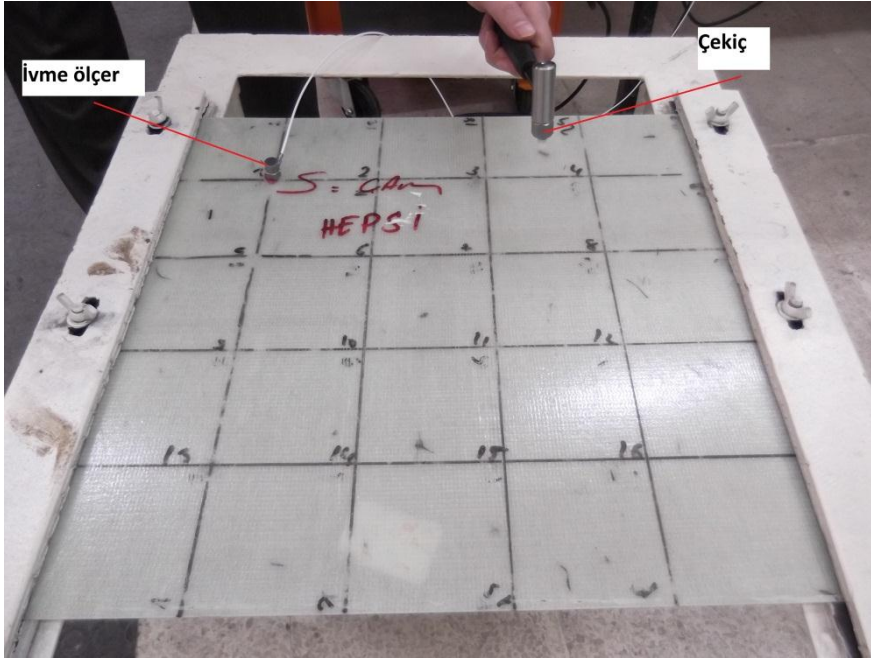
6.3 Titreşim Analizi Deneyi

Daha önce üretilmiş cam/epoksi, karbon/epoksi, cam-karbon/epoksi çok tabakalı kompozit levhaların her biri 25 eş kareye bölünmüş ve levhalar iki taraftan mesnetlenerek titreşim analizi deneyine hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.3.).

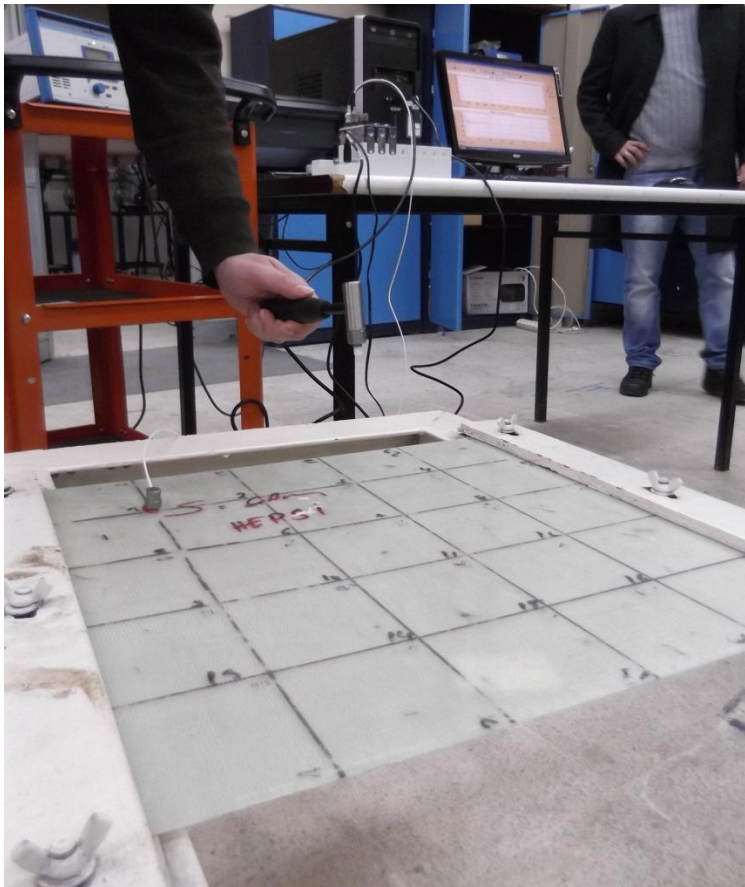
Levhanın titreşim davranışını tam ortaya çıkarabilmek adına ivme ölçer her seferinde farklı bir sütuna konulmuş ve çekiçle tüm noktalara vurularak sonuçlar bilgisayar ortamındaki software programında işlenmiştir.



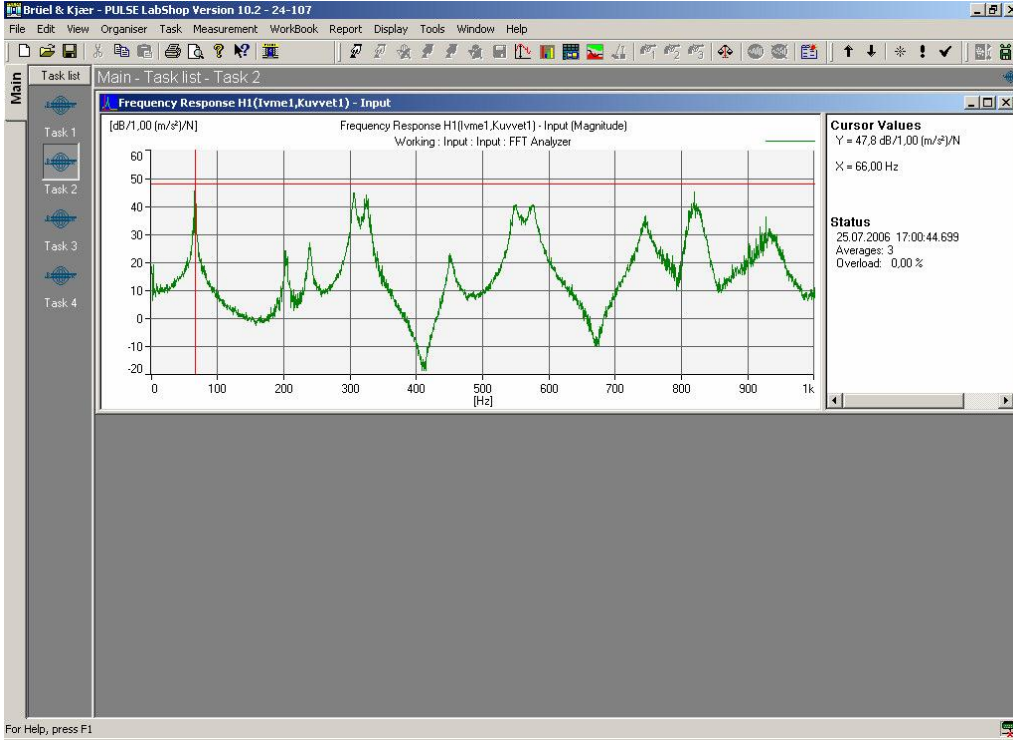
Şekil 6.5. Şematik deney düzeneği



Şekil 6.6. Deneyde kullanılan levhalar ve titreşim aletleri



Şekil 6.7. Titreşim analizi deney düzeneği



Şekil 6.8. Titreşim analizinin frekans cevabı

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1 Kompozit Levhaların Cebirsel Olarak Doğal Frekanslarının Hesaplanması

Bu tez çalışmasında kaynak Ritz metodunu kullanılarak düzlem-gerilme durumunda çok tabakalı ortotropik simetrik dikdörtgen kompozit bir levhanın doğal frekansını hesaplamak için bulunan formül cebri hesaplar için kullanılacaktır (Kollar ve Springer 2003).

$$f_{ij} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_{ij}}{\rho L_x L_y}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(D_{11} \frac{\alpha_1^4}{L_x^4} + D_{22} \frac{\alpha_3^4}{L_y^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\alpha_2}{L_x^2 L_y^2} \right)}$$

Formülündeki D_{ij} katsayıları her malzeme için ayrı ayrı bulunmuştur. α_i katsayısı Çizelge 6.1 ve 6.2'den yararlanıldığından $i, j=1,2,3 \dots$ olmak üzere :

$$\alpha_1 = (i+0.25) \cdot \pi$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 \cdot (\alpha_1 - 1)$$

$$\alpha_3 = (j+0.25) \cdot \pi$$

$$\alpha_5 = \alpha_3 \cdot (\alpha_3 - 1)$$

olarak bulunur.

ρ : yoğunluk (kg/m^3) aşağıdaki gibi alınacaktır:

Cam/epoksi: 2,86

Karbon/epoksi: 3,15

Hibrit : 2,9

Tez çalışmasında bundan böyle

C: Cam/Epoksi [0/90/90/0]_s

K: Karbon/Epoksi [0/90/90/0]_s

H1: Cam-Karbon/Epoksi [0/0/]_{4s}

H2: Cam-Karbon/Epoksi [0/15/15/0]_s

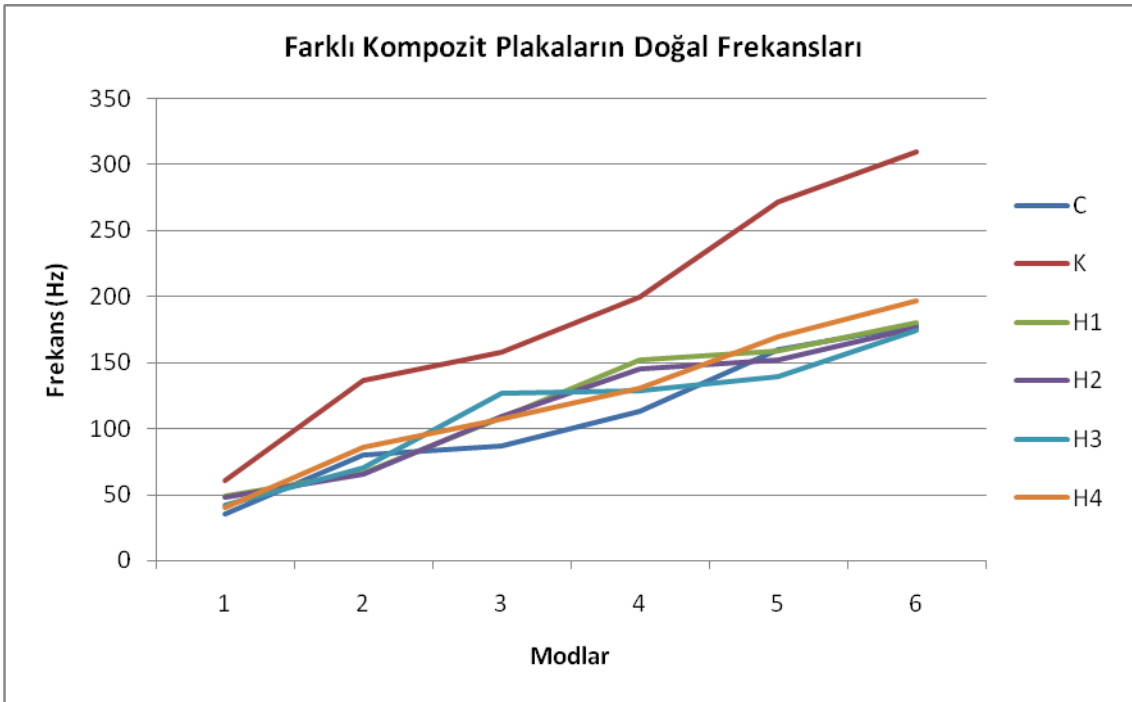
H3: Cam-Karbon/Epoksi [0/30/30/0]_s

H4: Cam-Karbon/Epoksi [0/45/45/0]_s

Şeklinde kısaltmalar kullanılacaktır.

Çizelge 7.1. Cebirsel olarak hesaplanan doğal frekanslar

Cebrik Hesaplanan Doğal Frekanslar (Hz)						
Malzeme	Mod1	Mod2	Mod3	Mod4	Mod5	Mod6
C	35	80	87	103	160	178
K	61	137	158	200	272	310
H1	49	66	108	152	159	180
H2	48	65	109	145	152	176
H3	42	70	126	128	139	174
H4	40	86	107	131	170	197



Şekil 7.1. Farklı kompozitlerin cebrik olarak hesaplanan doğal frekansları

Şekil 6.6'da görüldüğü üzere karbon/epoksi malzemesi doğal frekans yönünden diğer malzemelerden bariz bir şekilde ayrılmaktadır. Bunun temel nedeni karbon elyafının cam elyafına oranla özellikle elyafa dik yöndeki elastiklik modülünün yüksek olmasıdır.

7.2 Titreşim Analizi Deney Sonuçları

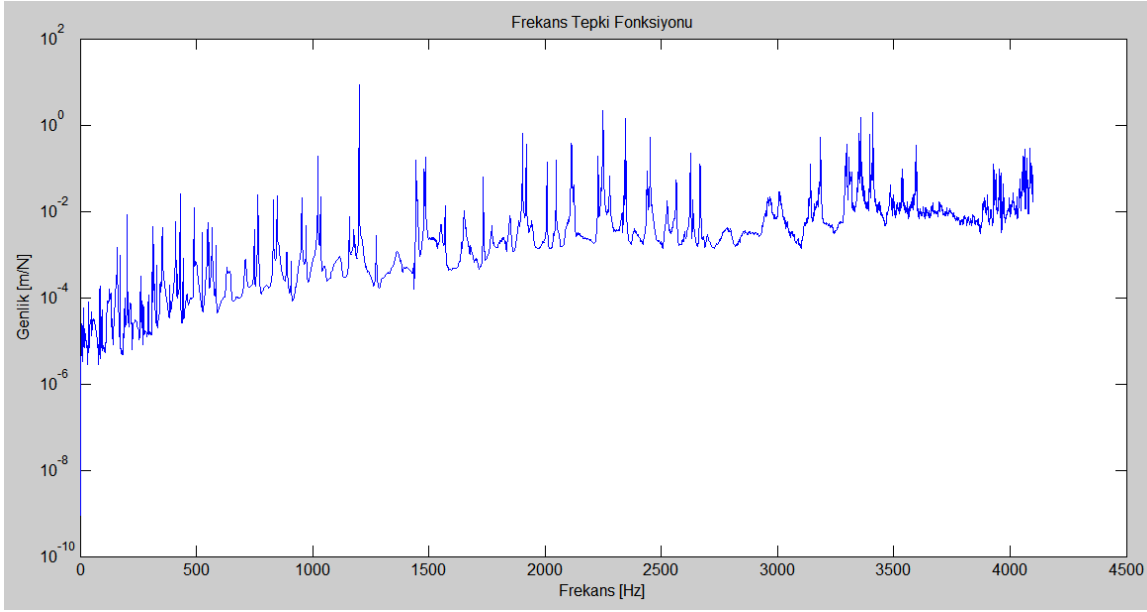
Doğadaki her cisim, “Doğal Titreşim Frekansı” olarak adlandırılan, sonsuz sayıda titreşim frekansı ve şekline sahiptir. Bu frekansların hesaplanması ve şeklinin bilinmesi, titreşim kaynaklı mühendislik problemlerinin çözülmesinde temel önemi taşımaktadır. Basit cisimlerin doğal frekans ve şekillerini analitik olarak hesaplamak mümkündür. Ancak karmaşık şekillerin hesabı nümerik yöntemlerle mümkündür. Sonlu elemanlar yöntemi ve bilgisayar hesap kapasitelerindeki gelişmeler, karmaşık yapıların, ancak idealleştirme yapılarak hesaplanabilen doğal frekans ve şekillerini daha doğru ve anlaşılır hesaplanmasına imkân tanımışlardır.

Doğal titreşim analizinin yapılması ile yapının doğal titreşim frekansları bulunmuş olur. Yapıya uygulanan periyodik bir kuvvetin frekansı, bu doğal frekanslardan herhangi birisi civarında ise, bu frekans uyarılmış olur ve yapı bu doğal frekans ve şekli ile titreşmeye başlar. Eğer uyarıcı kuvvetin frekansı ile yapının doğal frekansı çakışır ise “rezonans” olayı meydana gelir.

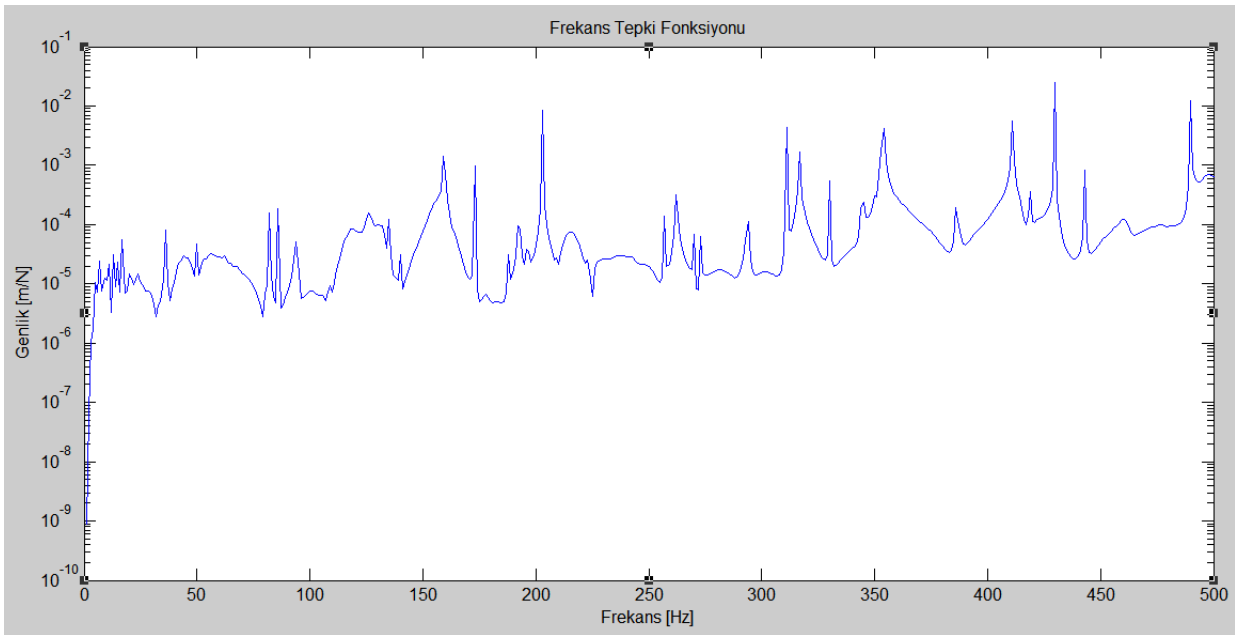
Bu tez kapsamındaki deneyde iki tarafından mesnetlenmiş 8 tabakalı kompozit bir levhanın doğal frekansı ivme ölçer kullanılarak çekişle uyarım yapılarak 5000 Hz’a kadar olan frekanslar deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen frekanslardan faz açısına bakılarak doğal frekanslar belirlenmiştir. Gerçek hayatta anlamlı olması bakımından levhaları sadece ilk altı moddaki doğal frekanslar dikkate alınmıştır.

7.2.1 Cam/Epoksi Levhanın Titreşim Analizi Deney Sonuçları

Cam/epoksi kompozit levhanın titreşim analizi sonucu 5000 Hz’e kadar elde edilen sonuçlar Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2. Cam/epoksi kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu



Şekil 7.3. Cam/epoksi kompozit plakanın 500 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu

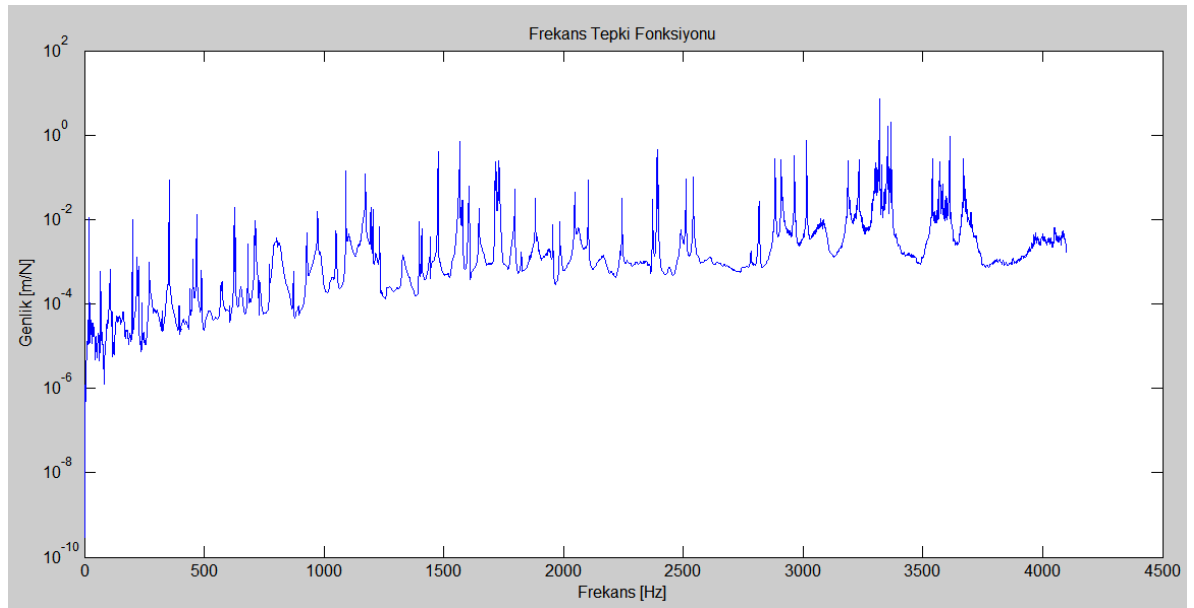
Çizelge 7.2. Cam/epoksi levhanın doğal frekanslarının dibrk ve deneysel karşılaştırılması

C Kompozit Levhanın Doğal Frekansları (Hz)			
Modlar	Cebrik Ritz Yöntemi	Deneysel	Fark %
Mod 1	35	36	2,8
Mod 2	80	82	2,4
Mod 3	87	86	-1,2
Mod 4	103	94	-9,6
Mod 5	160	159	-0,6
Mod 6	178	173	-2,9

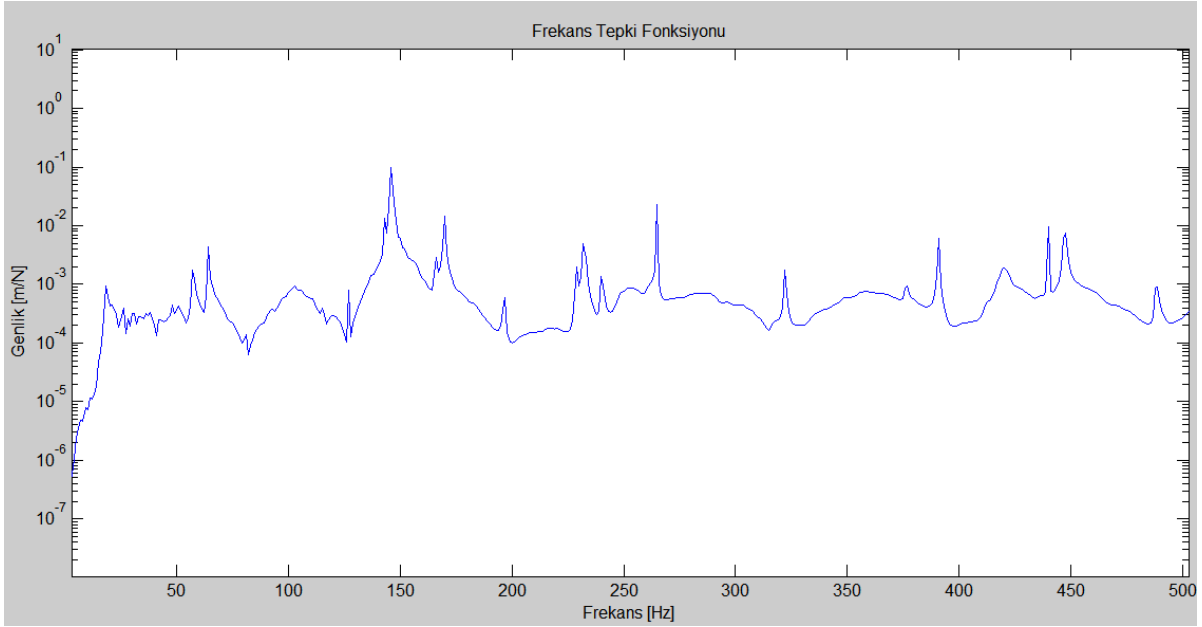
Kompozit malzemelerin titreşim analizinde sonucu etkileyen çok parametreleri olmasına rağmen elde edilen sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içinde çıkması hem cebirsel hem de deneysel çalışmaların nedenli titiz yapıldığının göstergesidir.

7.2.2 Karbon/Epoksi Levhanın Titreşim Analizi Deney Sonuçları

Cam/epoksi kompozit levhanın titreşim analizi sonucu 5000 Hz'e kadar elde edilen sonuçlar Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.4. Karbon/epoksi kompozit plakannın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu



Şekil 7.5. Karbon/epoksi kompozit plakanın 500 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu

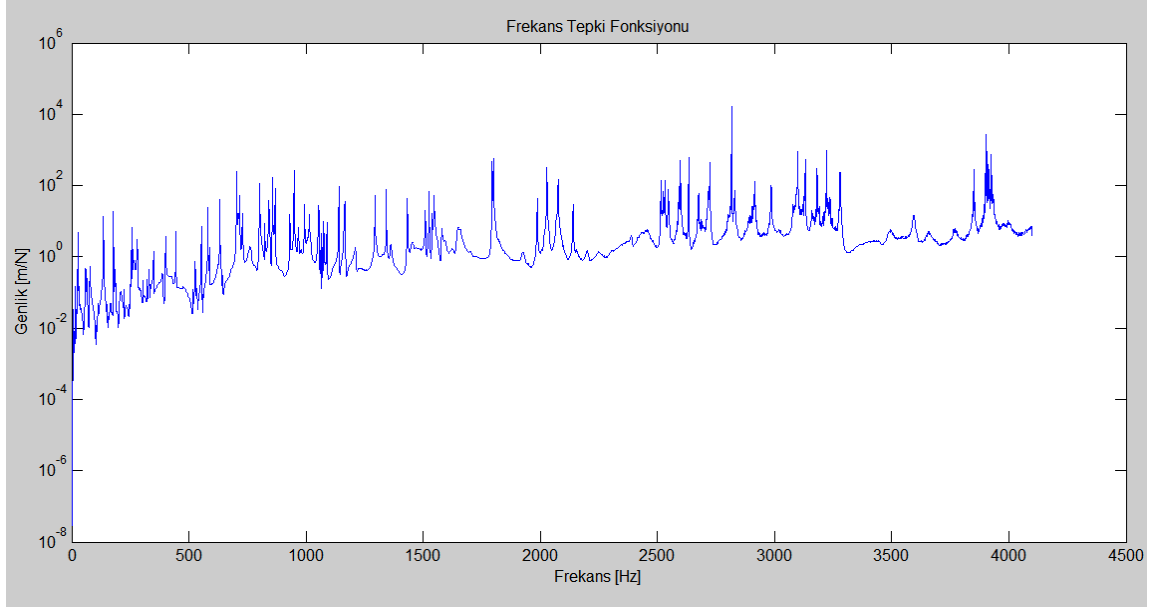
Kompozit malzemelerin titreşim analizinde sonucu etkileyen çok parametreleri olmasına rağmen elde edilen sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içinde çıkması hem cebirsel hem de deneysel çalışmaların nedenli titiz yapıldığının göstergesidir (Çizelge 7.2.).

Çizelge 7.3. Karbon/epoksi levhanın doğal frekanslarının deneysel ve teorik karşılaştırılması

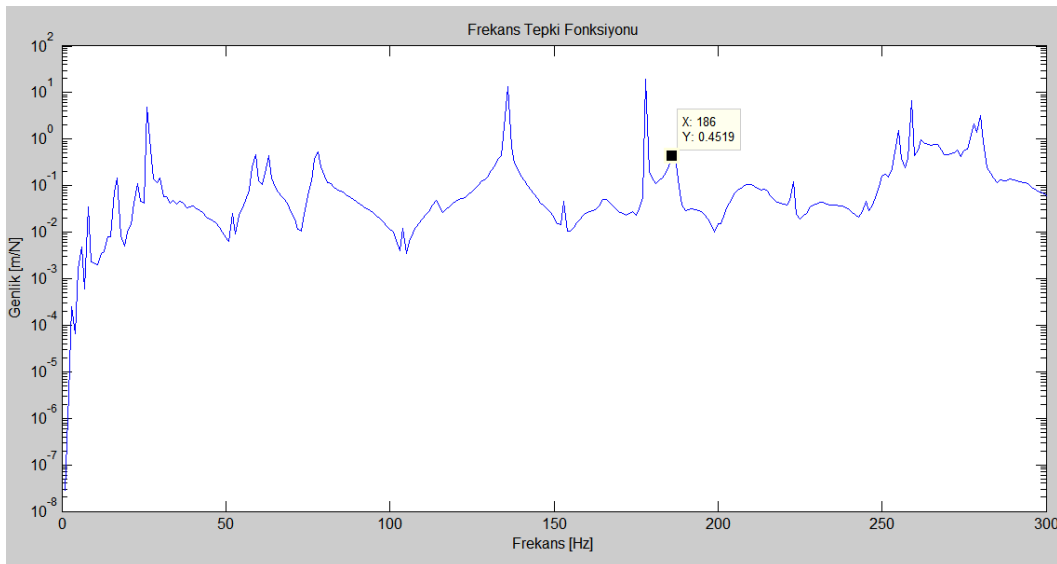
K Kompozit Levhanın Doğal Frekansları (Hz)			
Modlar	Cebrik Ritz Yöntemi	Deneysel	Fark %
Mod 1	61	57	-7,0
Mod 2	137	127	-7,9
Mod 3	158	168	6,0
Mod 4	200	197	-1,5
Mod 5	272	265	-2,6
Mod 6	310	322	3,7

7.2.3 Cam-Karbon/Epoksi [0/0]_{4s} Dizilimli Levhanın Titreşim Analizi Deneysel Sonuçları

Cam-karbon/epoksi [0/0]_{4s} dizilimli kompozit levhanın titreşim analizi sonucu 5000 Hz'e kadar elde edilen sonuçlar Şekil 7.6'te verilmiştir.



Şekil 7.6. Cam- karbon/epoksi [0/0]_{4s} dizilimli kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu



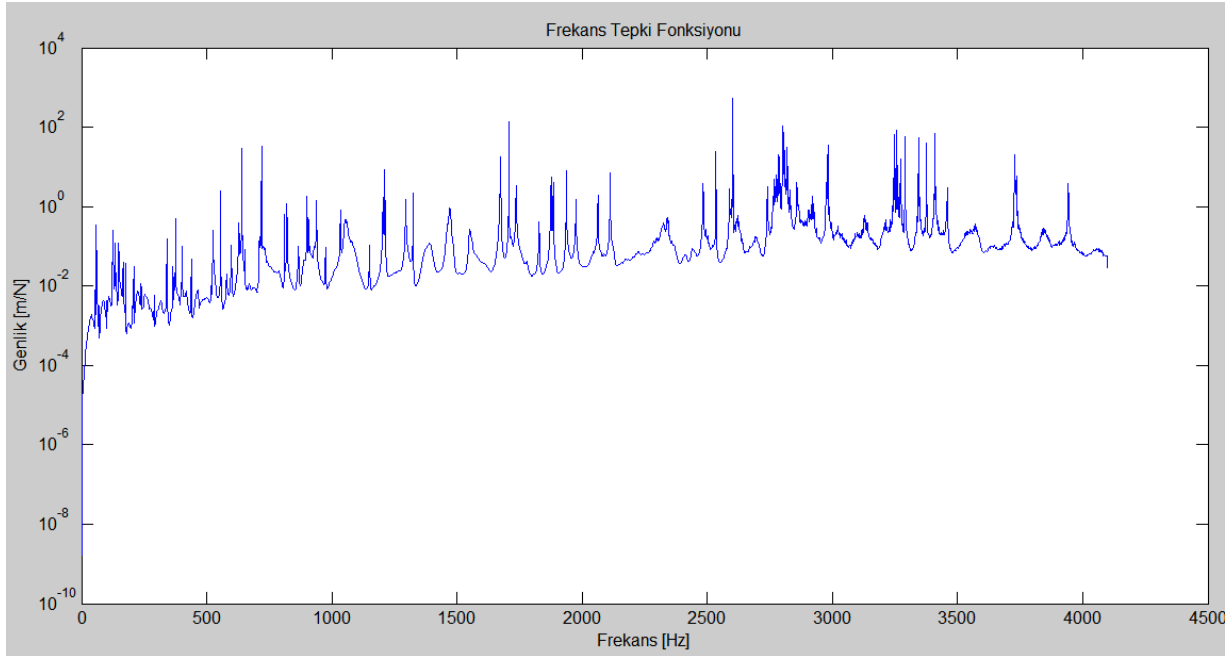
Şekil 7.7. Cam- karbon/epoksi [0/0]_{4s} dizilimli kompozit plakanın 300 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu

Çizelge 7.4. Cam-karbon/epoksi [0/0/]_{4s} dizilimli levhanın doğal frekanslarının dibrk ve deneysel karşılaştırılması

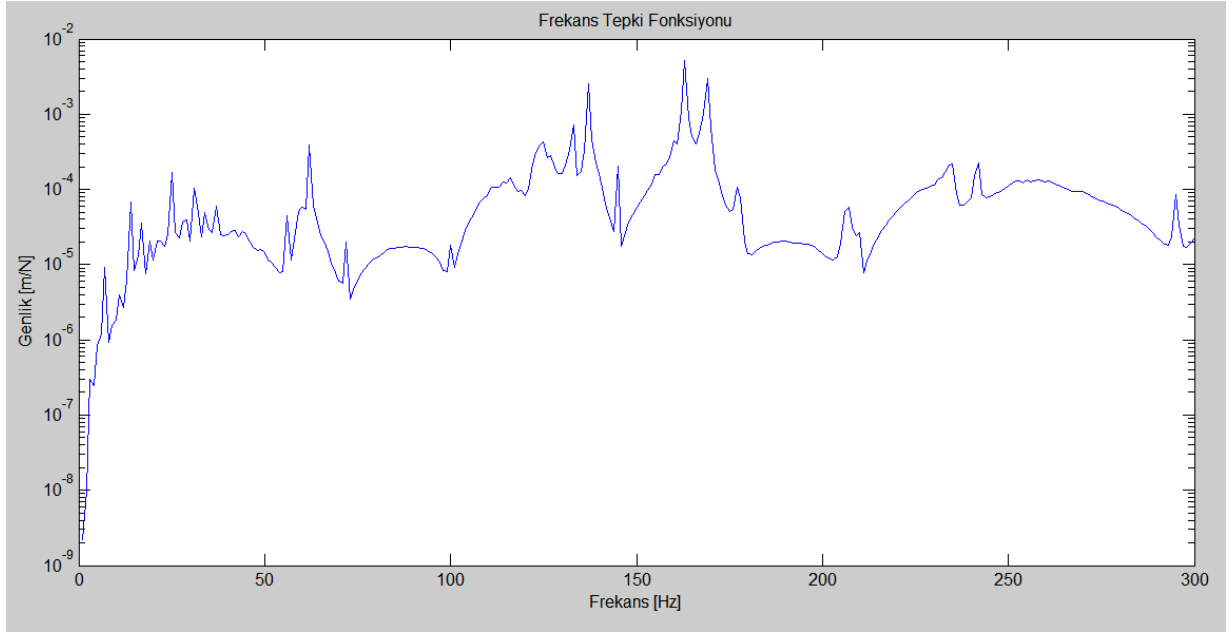
H1 Kompozit Levhanın Doğal Frekansları (Hz)			
Modlar	Cebrik Ritz Yöntemi	Deneysel	Fark %
Mod 1	49	52	5,8
Mod 2	66	63	-4,8
Mod 3	108	114	5,3
Mod 4	152	153	0,7
Mod 5	159	178	10,7
Mod 6	180	186	3,2

7.2.4 Cam-Karbon/Epoksi [0/15/15/0], Dizilimli Levhanın Titreşim Analizi Denev Sonuçları

Cam-karbon/epoksi [0/15/15/0] dizilimli kompozit levhanın titreşim analizi sonucu 5000 Hz'e kadar elde edilen sonuçlar Şekil 7.8'te verilmiştir.



Şekil 7.8. Cam- karbon/epoksi [0/15/15/0]_sdizilimli kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu



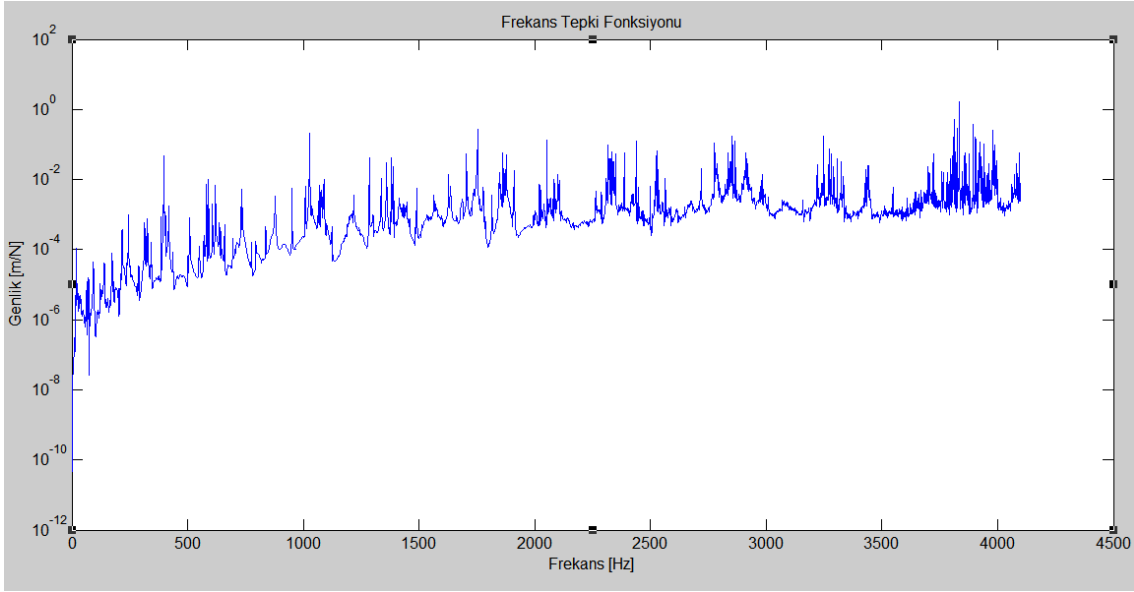
Şekil 7.9. Cam- karbon/epoksi [0/15/15/0],dizilimli kompozit plakanın 300 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu

Çizelge 7.5. Cam-karbon/epoksi [0/15/15/0] dizilimli levhanın doğal frekanslarının cibrık ve deneysel karşılaştırılması

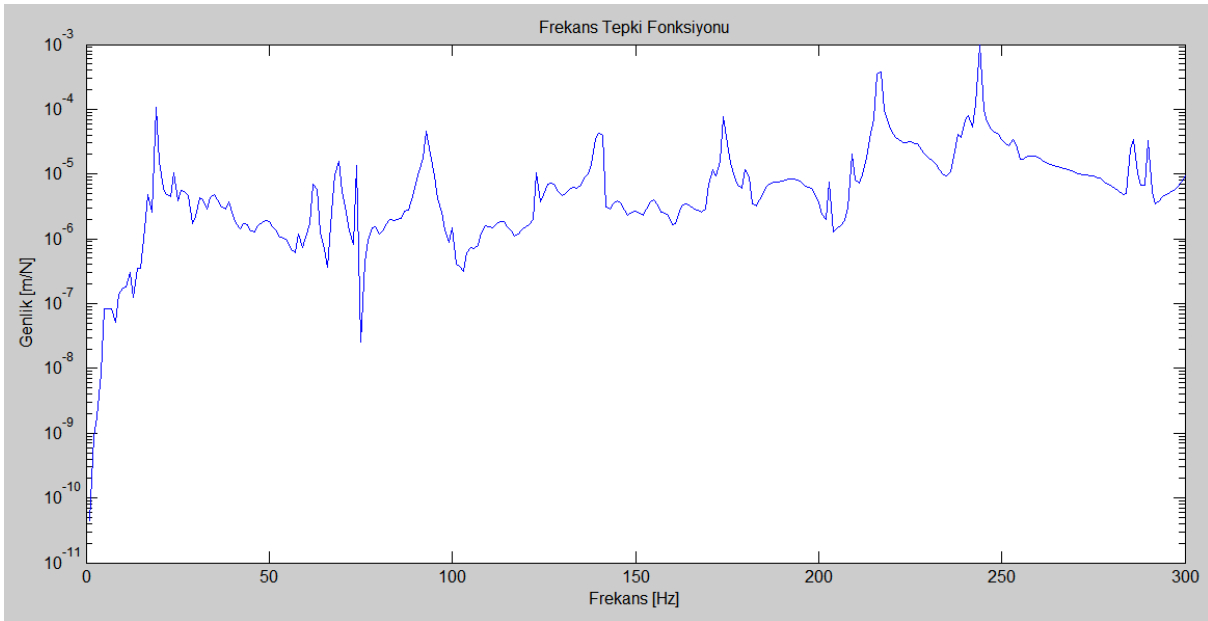
H2 Kompozit Levhanın Doğal Frekansları (Hz)			
Modlar	Cebrik Ritz Yöntemi	Deneysel	Fark %
Mod 1	52	56	7,1
Mod 2	65	62	-4,8
Mod 3	105	100	-5,0
Mod 4	145	145	0,0
Mod 5	152	163	6,7
Mod 6	176	177	0,6

7.2.5 Cam-Karbon/Epoksi [0/30/30/0], Dizilimli Levhanın Titreşim Analizi Deney Sonuçları

Cam-karbon/epoksi [0/30/30/0] dizilimli kompozit levhanın titreşim analizi sonucu 5000 Hz'e kadar elde edilen sonuçlar Şekil 7.10'te verilmiştir.



Şekil 7.10. Cam- karbon/epoksi [0/30/30/0]_s dizimli kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu



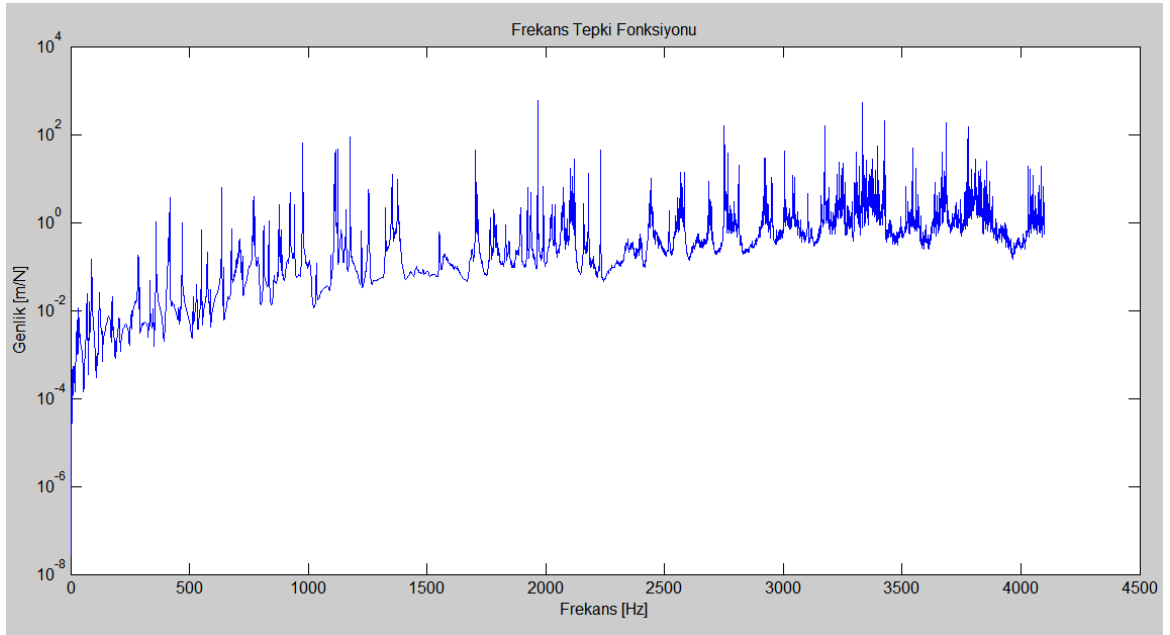
Şekil 7.11. Cam- karbon/epoksi [0/30/30/0]_s dizimli kompozit plakanın 300 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu

Çizelge 7.6. Cam-karbon/epoksi [0/30/30/0] dizilimli levhanın doğal frekanslarının dibrık ve deneysel karşılaştırılması

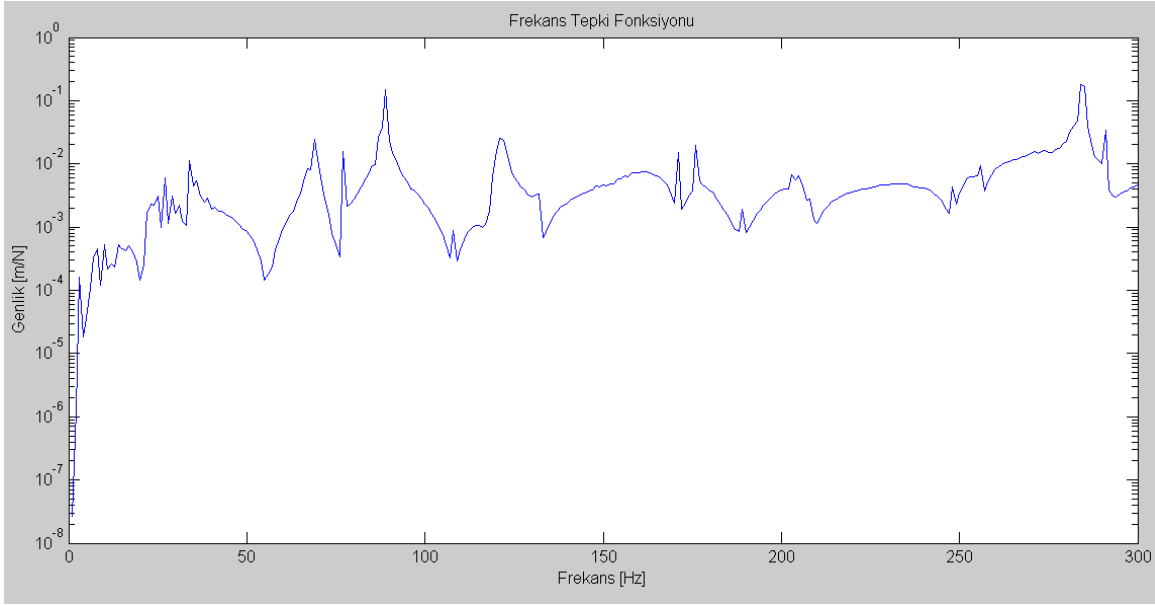
H3 Kompozit Levhanın Doğal Frekansları (Hz)			
Modlar	Cebrik Ritz Yöntemi	Deneysel	Fark %
Mod 1	42	39	-7,7
Mod 2	70	69	-1,4
Mod 3	126	123	-2,4
Mod 4	128	127	-0,8
Mod 5	139	140	0,7
Mod 6	174	174	0,0

7.2.5 Cam-Karbon/Epoksi [0/45/45/0], Dizilimli Levhanın Titreşim Analizi Denev Sonuçları

Cam-karbon/epoksi [0/45/45/0] dizilimli kompozit levhanın titreşim analizi sonucu 5000 Hz'e kadar elde edilen sonuçlar Şekil 7.12'te verilmiştir.



Şekil 7.12. Cam- karbon/epoksi [0/45/45/0]_s dizilimli kompozit plakanın 5000 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu



Şekil 7.13. Cam- karbon/epoksi [0/45/45/0]_s dizilimli kompozit plakanın 300 Hz'e kadar olan frekans tepki fonksiyonu

Çizelge 7.7. Cam-karbon/epoksi [0/45/45/0] dizilimli levhanın doğal frekanslarının cibrık ve deneysel karşılaştırılması

H4 Kompozit Levhanın Doğal Frekansları (Hz)			
Modlar	Cebrik Ritz Yöntemi	Deneysel	Fark %
Mod 1	40	39	-2,6
Mod 2	86	89	3,4
Mod 3	107	108	0,9
Mod 4	131	121	-8,3
Mod 5	170	171	0,6
Mod 6	197	205	3,9

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, düzlem gerilme durumunda olduğu kabul edilen simetrik katmanlı dikdörtgen ortotropik; cam-epoksi, karbon-epoksi ve 4 farklı elyaf takviye açısına sahip cam-karbon-epoksi hibrit kompozit plakaların titreşim davranışları incelenerek plakaların doğal frekansları, önce Rayleigh–Ritz metodu kullanılarak cebirsel olarak hesaplanmış daha sonra titreşim analiz deneyi ile bulunarak mukayese yapılmıştır.

Deneysel ve cebrik sonuçlar arasında ortalama %5 civarında bir sapma olduğu görülmüş. Bu da deney şartlarından, malzeme özelliklerinin saptamasında bazı kabullere dayanan klasik laminasyon teorisinden ve üretilen malzemelerin tam homojen olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Doğal frekanslara malzemeler açısından bakıldığında aynı modlarda karbon-epoksi'nin, cam-epoksi ve cam-karbon-epoksi malzemelerine göre 2 katına yakın derecede yüksek olduğu görülür. Bunun temel sebebi cama göre daha rijit olan karbon elyafının daha yüksek bir elastik matrisi oluşturması ve bunun da daha yüksek titreşim frekanslarını üretmesidir. Cam-karbon-epoksi'den oluşan hibrit malzemeler de beklenildiği gibi karbon ve cam arasındaki değerlerde titreşim davranışı göstermektedir.

Elyaf takviye açısının titreşim davranışına olan etkiyi gözlemek adına cam-karbon-epoksiden oluşan hibrit malzemedan oluşan kompozit plakalar, dokuma elyaf açıları 0° , 15° , 30° ve 45° olacak şekilde imal edilmiş titreşim davranışları incelenmiştir. Dokuma kumaş elyaf kullanıldığından çok bariz bir değişim olmamakla beraber en fazla değişim 30° takviye açısında; 3. Modda %15 oranında doğal frekansta artış görülürken 3. Moddan daha büyük modlarda ise %10 oranında doğal frekansta azalma olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma elyaf yönlenme etkileri göz önüne alınarak, farklı mikromekanik modeller kullanılarak genişletilebilir. Ayrıca modal analiz yapılarak malzemelerin farklı modlardaki davranışları incelenebilir. Malzemelerin elastiklik ve kayma modülleri ile poisson oranları gibi elastik özellikler karışımlar kuralı yerine deneyle belirlenirse daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilir. Elyaf açısı, elyaf oranları ve kütleme sıcaklığı göz önünde bulundurularak farklı mikromekanik modeller incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 1984. A.S. M.International, Composite materials I the basics, Materials Engineering Institute. Ohio. S, 10-15
- Aran, A. 1990. Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler. İTÜ Rektörlük Ofset Atölyesi, Sayfa:95, İstanbul.
- Aricasoy, O. 2006. Kompozit Sektör Raporu. İstanbul Ticaret Odası
- Baharlou, B.and Leissa, A.W., 1987, “Vibration and buckling of generally laminated composite plates with arbitrary edge conditions”, International Journal of Solids and Structures, 29(8), 545–555.
- Başbudak, M., “Termoset Plastikler”, İstanbul, Maya Basımevi, 2003
- Christensen, RM, Malls, WF., 1972, “Effective stiffness of randomly oriented fiber composites”, J Comp Mater.6, 518-532.
- Çağlayan, İ. 2009. Rezonans: Makinaların ve Yapıların Gizli Düşmanı. Makine ve Mühendis,50 (598): 55-60.
- Dickinson, S.M. and Blasio, A. Di, 1986, “On the use of orthogonal polynomials in Erişim:[<http://www.tech.plym.ac.uk/sme/MATS324/MATS324A2%20E-G-nu.htm>]. Erişim Tarihi: 28.01.2013
- Eruslu S., 2008 .Kısa elyaf takviyeli kompozit plaklarda titreşim analizi .Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi , Edirne,99.
- Gächter, R. Müller, H. 1987. Plastics Additives 2nd Edition, Hanser Publishers, Munich
- Gay, D., Hoa, S.V., Tsai S.W., 2003. Composite Materials Design and Applications. Sayfa:3–27, Paris
- Gibson, R.F., 1994. Principals of Composite Material Mechanics. McGraw-Hill
- Inman, J.D.,2008. Engineering Vibration.Pearson Prentice Hall, New Jersey
- Jensen, D.W., Crawley, E.F., 1984, “Frequency determination techniques for cantilevered plates with bending- torsion coupling”, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 22(3),415–420.
- Jones, R.M., 1973, “Buckling and vibration of unsymmetrically laminated cross-ply rectangular plates”, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal,

- Kayrak, M.A.1999. Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri. Sayfa:1-39 Eskişehir.
- Kollar, L.,Springer,G,. 2003. Mechanics of Composite Structures. Cambridge University Press, 480, New York
- Leissa, A.W. and Narita, Y., 1989, “Vibration studies for simply supported symmetrically laminated rectangular plates”, Composite Structures, 12, 113-132.
- Mazumdar, S. 2002. Composites Manufacturing, Materials, Product, and Process Engineering. Sayfa:4-5 New York.
- Özakıncı, M. 2006 Tabakalı Kompozit Plakların Titreşim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 103.
- Reddy, J.N., 2004. Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells : Theory and Analysis, CRC Pres, Boca Raton London New York Washington, D.C.
- Rosato, D., Rosato, D. 2004. Reinforced Plastics Handbook 3rd Edition, Elsevier Science & Technology Books,
- Summerscales, J., 2011.Composites Design and Manufacture.
- Whitney, J.M. and Leissa, A.W., 1969, “Analysis of heterogeneous anisotropic plates”, Journal of Applied Mechanics, 36, 261–266.
- Yalçın H., Gürü M., “Malzeme Bilgisi”, Ankara, Palme Yayıncılık, 2002
- Yaman, N.,Oktem, T.,Seventekin N., 2009. Karbon liflerin üretimi. Erişim:[www.tekstilvekonfeksiyon.com/pdf/20090723100601.pdf]. Erişim Tarihi:01.09.2013
- Yee, J.C.H., Pellegrino S., 2005. Folding of Woven Composite Structures,
- Yıldızhan, H. 2008. Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 3.

ÖZGEÇMİŞ

EĞİTİM DURUMU

1999 -2004 İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ (Lisans)
Makine Mühendisliği

1998 -2003 İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ (Lisans)
Tekstil Mühendisliği

1995 –1998 ANKARA ÖZEL FEN LİSESİ

DENEYİM

2007-

Şirket adı : TÜRKİYE PETROLLERİ A.O (TPAO)

Görev : Saha Şefi

- Türkiye'nin en büyük petrol sahası olan Batman Batıraman Sahasında Saha Şefi olarak çalışmaktadır.

2005 – 2007

□

Şirket adı : ARSLANLI ÖRME A.Ş, İstanbul

Görev : Üretim Planlama Müdürü

2003-2005

Şirket adı : ARSLANLI ÖRME A.Ş, İstanbul

Görev : Çorap Departman Sorumlusu

YABANCI DİL

İngilizce : İyi düzeyde (Speaking, Writing, Reading)

Almanca : Başlangıç düzeyinde