

**KOMPOZİT MALZEMEDEN
YAPILAN YAPRAK
YAYLARIN ANALİZİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon İmalat Anabilim Dalı**

Erdoğan KILIÇ

Mart , 2006

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

Erdoğan KILIÇ, tarafından **Yrd. Doç Dr. Melih BELEVİ** yönetiminde hazırlanan **“KOMPOZİT YAPRAK YAYLARIN ANALİZİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Yrd. Doç. Dr. Melih BELEVİ

Danışman

.....
Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr. Hasan YILDIZ

Jüri Üyesi

.....
Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalıőmanın hazırlanmasında ilk günden itibaren bilgi ve deneyimlerini benden eksik etmeyen Sayın Danıőmanım Yrd. Doç Dr. Melih BELEVİ 'ye , deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. Bülent Murat İÇTEN ve Arő. Gör. Hasan ÖZTÜRK'e teőekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışma sürecinde desteğini hep yanımda hissettiğim sevgili eőime sonsuz teőekkürler.

KOMPOZİT MALZEMEDEN YAPILAN YAPRAK YAYLARIN ANALİZİ

ÖZ

Bu çalışmada ilk olarak kompozit malzemelerle ilgili genel tanımlamalar yapıp kompozit malzemelerin kullanım alanlarından ve üretim yöntemlerinden söz edilmiştir. Daha sonra çekme kuvvetine maruz kalan dört delikli glass fiber/epoksi yaprak yayın yatak mukavemeti, hasar çeşidi ve hasar yükü deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Yaprak yayın deliğin köşe uzaklığının delik çapına oranı (E/D) 1'den 4'e kadar ve yaprak yay genişliğinin delik çapına oranı (W/D) 4'den 5'e kadar değiştirilmiştir. Nümerik çalışma LUSAS 13.6 sonlu eleman analiz programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Ve daha sonrada deneysel sonuçlar ve nümerik tahminler karşılaştırılmıştır.

Anahtar sözcükler : Kompozit malzeme, kompozit yaprak yaylar, hasar analizi.

ANALYSIS OF COMPOSITE LEAF SPRINGS

ABSTRACT

In this study, firstly general definition about composite materials is given. Then the application and production of composite materials are mentioned . Then the bearing strength, failure mode, failure load of glass fibre-epoxy composite leaf spring with four circular holes which are subjected to tensile force are investigated experimentally and numerically. The end distance to diameter (E/D) ratios and width to diameter (W/D) ratios in the leaf spring were changed from 1 to 4 and 1 to 2 respectively. The numerical study is performed by using 3D FEM with assistance of LUSAS 13.6 finite element analysis program.

Keywords : Composite materials, composite leaf springs, failure analysis.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM 1 – GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 – KOMPOZİT MALZEMELER.....	2
2.1 Kompozit Malzeme Tanımı.....	2
2.1.1 Fiber Takviyeli Kompozitler.....	3
2.1.1.1 Glass Fiberler.....	3
2.1.1.2 Karbon Fiberler.....	4
2.1.1.3 Bor Fiber.....	4
2.1.1.4 Yapay Organik Fiberler.....	5
2.1.1.4.1 Aramid (kevlar) fiberler.....	5
2.1.1.4.2 Polipropilen fiberler.....	6
2.1.1.4.3 Polietilen fiberler.....	6
2.1.1.4.4 Naylon fiberler.....	6
2.1.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler.....	6
2.1.2.1 Semente Karbürler.....	6
2.1.2.2 Abrazivler (Aşındırıcılar).....	7
2.1.2.3 Elektrik Kontakt Malzemeleri.....	7
2.1.3 Tabakalı Kompozitler.....	7
2.1.3.1 Metal Tabakalı Kompozitler.....	7
2.1.3.2 Cam Tabakalı Kompozitler.....	9
2.1.3.3 Plastik Esaslı Tabakalı Kompozitler.....	9
2.1.3.4 Ahşap Tabakalı Kompozitler.....	10

2.1.4 Çok Bileşenli Kompozitler.....	10
2.2 Matriks.....	10
2.2.1 Plastik Matriksler.....	11
2.2.1.1 Termoplastikler.....	11
2.2.1.2 Termoset Plastikler.....	11
2.2.2 Metal Matriksler.....	13
2.2.3 Seramik Matriksler.....	13
BÖLÜM 3 – KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	14
3.1 Fiber Takviyeli Kompozitlerin Üretimi.....	14
3.1.1 El Yatırma Tekniği.....	14
3.1.2 Püskürtme Tekniği.....	14
3.1.3 Profil Çekme (Pultrüzyon).....	15
3.1.4 Santrifüj Kalıplama.....	16
3.1.5 Fiber Sarma.....	16
3.1.6 Basınçlı Kalıp Yöntemi.....	17
3.1.7 Yüksek Hızlı Reçine Transferi.....	17
3.2 Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi.....	19
3.2.1 Sıcak Presleme.....	19
3.2.2 Toz Metalürjisi.....	19
3.2.3 Sıvı Metal Emdirme.....	20
3.2.4 Elektrolitik Yöntem.....	20
3.2.5. Buhar Çöktürme.....	20
3.2.6 Birlikte Ekstrüzyon.....	21
BÖLÜM 4 – KOMPOZİT MALZEMELERİN	
GENEL KULLANIM ALANLARI.....	22
BÖLÜM 5 –KOMPOZİT MALZEMELERİN	
YORULMA DAVRANIŞLARI	29

5.1 Yorulma İle İlgili Temel Kavramlar.....	29
5.2 Fiber Takviyeli Kompozitlerin Yorulma Davranışları.....	31
5.3 Yorulma Davranışını Etkileyen Faktörler.....	34
5.3.1 Malzeme Çeşidi.....	34
5.3.2 Fiber Uzunluğu.....	36
5.3.3 Test Makinası ve Numune Etkisi.....	38
5.3.4 Frekans.....	38
5.3.5 Çentik ve Delikler.....	39
BÖLÜM 6 – DENEYSEL ÇALIŞMA VE NÜMERİK ANALİZ.....	40
6.1 Problemin Tanımı.....	40
6.2 Kompozit Yaprak Yayın Üretimi.....	43
6.3 Sonlu Eleman Analizi.....	43
6.4 Deneyler.....	50
6.4.1 Deney Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Tespiti.....	50
6.4.1.1 Fiber Doğrultusunda Çekme Deneyi	51
6.4.1.2 Kayma Modülünün (G_{12}) Deneysel Tespiti.....	52
6.4.1.3 Kayma Mukavemeti (S) Tespiti.....	54
6.4.2 Hasar Yükünün Deneysel Olarak Tespiti	55
BÖLÜM 8 –SONUÇLAR.....	69
KAYNAKLAR.....	70

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknolojinin hızlı bir şekilde ilerlemesi ve rekabet koşullarının ağırlaşması klasik malzemelere alternatif gelişmiş özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanılması gerekliliğini günden güne hissettirmektedir. Bu nedenle mevcut mühendislik malzemelerine alternatif olan kompozit malzemeler alanındaki çalışmalar son yarım asırdır hız kazanmıştır. Aslında kompozit malzemelerin tarihsel süreçte ilk kullanımları tam olarak bilinmese de eski medeniyetlerde bu tür kullanımlara rastlanmaktadır. Örneğin çamur tuğlalara saman parçalarının katılması , zırh olarak farklı metal tabakalarının bir araya getirilmesi gibi.

Mühendislik açısından incelendiğinde, klasik malzemeler ileri seviyede istekleri karşılayabilecek özelliklere sahip değillerdi. Özellikle uzay çalışmalarının başlamasından sonra yüksek mukavemetli hafif malzeme gereksinimi artmıştır. Bu nedenle hava sanayisi kompozit malzemelerin gelişimine öncülük etmiştir.

BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozit Malzeme Tanımı

Farklı malzeme özelliklerini tek bir malzemede toplamak ya da yeni bir özellik elde etmek amacı ile iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde birleştirilmesi ile üretilen yeni malzeme “Kompozit Malzeme” olarak adlandırılır. Kompozit malzeme temel olarak matriks olarak adlandırılan ana yapı ve takviye elemanından oluşmaktadır.

Uygulamada kompozit malzeme üretiminde, aşağıdaki özelliklerin bir veya bir kaçının geliştirilmesi hedeflenmektedir.

- Mekanik dayanımı
- Yorulma dayanımını
- Aşınma dayanımını
- Korozyon dayanımı
- Kırılma tokluğunu
- Yüksek sıcaklıktaki özellikler
- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenliğini
- Akustik özellik
- Rijitlik
- Ağırlık azalması
- Estetik

Kuşkusuz bu özelliklerin hepsinin tek bir malzemede toplanması mümkün değildir.

Kompozit malzemeler temel olarak dört grupta toplanabilir:

- Fiber takviyeli kompozitler
- Parçacık takviyeli kompozitler
- Tabakalı kompozitler
- Çok bileşenli kompozitler

2.1.1. Fiber Takviyeli Kompozitler

Takviye elemanı olarak fiber kullanılan kompozitlerdir. Fiberler, basit olarak bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan malzeme olarak tanımlanabilir. ASTM'ye göre bir malzemenin fiber olarak kabul edilebilmesi için şu şartlar gerekmektedir:

- Uzunluk/kalınlık oranı en az 10/1 olmalıdır.
- En büyük kesit alanı $\leq 0.05 \text{ mm}^2$
- En büyük genişlik $\leq 0,25 \text{ mm}$

Günümüzde birçok fiber çeşidi vardır. Bunların başlıcalarından bahsedilecektir.

2.1.1.1. Glass Fiberler

Glass fiberler, ekonomik olması nedeniyle kompozit malzeme üretiminde çok kullanılan fiber çeşididir. Glass fiberler ilk önceleri A-glass (alkali glass) olarak üretilmeye başlanmıştır. Daha sonraları ise mekanik özellikleri daha gelişmiş bor silikat camı olan E-glass kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda çeşitli glass fiber türleri geliştirilmiştir. Bunlardan biri olan S-glass, E-glassa göre daha yüksek alüminyum ve magnezyum oksit içerir ve mekanik özellikleri daha iyidir. Glass fiberler yüksek çekme ve darbe dayanımına sahiptirler. Elastisite modülleri nispeten düşüktür ve fiberlerin sürtünerek birbirini aşındırma problemleri vardır. Mekanik özellikler yüksek sıcaklıkta çok fazla düşmez. Glass fiberler, sürekli boylarda veya kırılmış şekilde kullanılırlar. Ayrıca keçe ve dokuma şeklinde de bulunurlar. Çeşitli glass fiberlerin mekanik özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Çeşitli glass fiberlerin özellikleri (Ersoy ,2001,s.56)

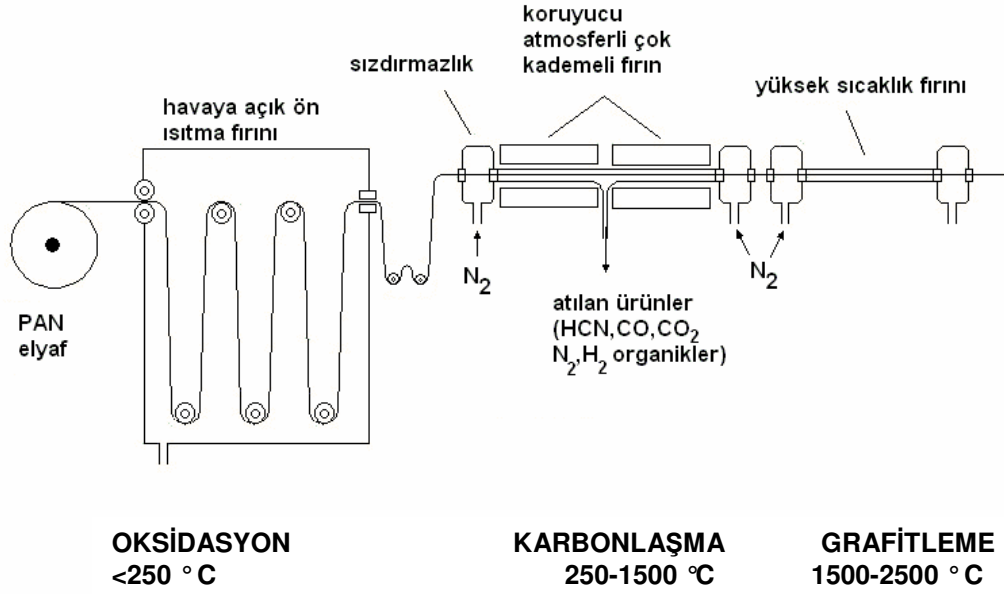
Özellikler	E-glass	A-glass	M-glass	S-glass	C-glass	D-glass
Özgül Ağırlık [gr/cm^3]	2,54	2,45	2,89	2,49	2,45	2,16
Çekme Dayanımı [MPa]	3600	3100	3500	4500	3400	2450
Kopma Uzama Oranı[%]	4,8	-		5,4	4,8	
Çekme E-Modülü [GPa]	76	72	111,3	86	70	53
Kırılma İndisi	1,548	1,512	1,635	1,523		1,47
Isıl Genleşme Katsayısı [cm/cmK°]	$1,6 \times 10^{-6}$	-		$1,7 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$
Fiber çapı [mm]	$3-20 \times 10^3$	-		$3-13 \times 10^{-6}$		
Yumuşama Noktası [$^\circ\text{C}$]	850	700		-	690	770
Dielektrik Sabiti[1 MHz]	6,33	-		5,34	5,8	-

2.1.1.2. Karbon Fiberler

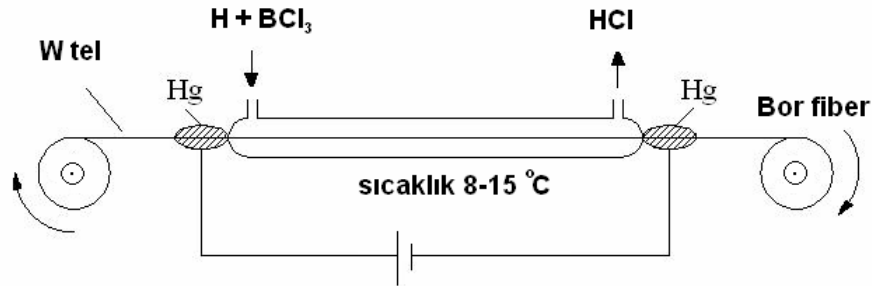
Mekanik özellikleri çok iyi olmasına karşın maliyetleri diğer fiberlere göre daha yüksektir. Karbon fiberler PAN(Poliakronitril) ve katrandan elde edilir. Karbon fiber üretimi Şekil 2.1’de görülmektedir. Çok yüksek mukavemet istenen uygulamalarda tercih edilirler. Örneğin hava sanayi, yüksek performans otomobilleri ve çeşitli spor aletleri.

2.1.1.3. Bor Fiber

Bor fiberler 1960’lı yılın sonlarına doğru üretilmeye başlanmıştır. Bor çok sert ve gevrek olduğu için doğrudan fiber olarak çekilemez. 8-15 $^\circ\text{C}$ sıcaklığa ısıtılmış W teli üzerine H_2 ve BCl_3 ’ün (Bortriklorür) elektriksel olarak çökeltilmesi ile elde edilir.(Şekil2.2). Metal matrikslerle kullanılırken sıcak presleme esnasında özelliklerinin bozulmaması için üzerleri B_4C (Bor karbür) ve SC (Silisyumkarbür) ile kaplanır. Burkulmaya karşı mukavemetleri çok yüksektir. Karbon fiberlerin üretilmeye başlamasıyla kullanımları azalmıştır.



Şekil 2.1. Karbon fiber üretimi



Şekil 2.2 Bor fiber üretimi

2.1.1.4. Yapay Organik Fiberler

Bu grup fiberler yapay nitelikli organik fiber olarak adlandırılmakta ve bazı kaynaklarda ise plastik esaslı fiberler denilmektedir.

2.1.1.4.1. *Aramid Fiberler(Kevlar)* . Ticari ismi 'Kevlar' olarak bilinen aramid fiberler yapay organik fiberlerdendir. Dupont Firması tarafından üretilen ve PRD-29 ve PRD-49 türleri en çok kullanılanlarıdır. Kevlar'ın basma dayanımları nispeten

daha düşüktür ve ısındıkça boyca kısalırlar. Örneğin Kevlar -49'un ısıl genleşme katsayısı -2×10^{-8} cm/cm^{°K}'dir. Bu fiberlerin yüksek sıcaklıkta sürünme dayanımları oldukça iyidir. Çekme dayanımı ve Elastisite modülü 100 °C'ye kadar sabittir fakat 300 °C'tan sonra birden düşer. Korozyon dayanımları iyi olmasına karşın UV ışıktan etkilenirler.

2.1.1.4.2. Polipropilen Fiberler. Dayanımları yüksek, alkali ortama iyi direnç gösterirler ve fiyatları ucuzdur. Malzemenin ergime sıcaklığı 165 °C'dir ve 100 °C'a kadar özelliklerini korurlar. Güneş ışınları ve oksijenden etkilenirler.

2.1.1.4.3. Polietilen Fiberler. Malzeme, doymuş bir hidrokarbondur ve kimyasal olarak kararlı haldedir. Genellikle tabaka ve film halinde kullanılırlar. En büyük dezavantajları düşük sıcaklıkta yumuşarlar.

2.1.1.4.4. Naylon fiberler. Düşük sürtünme katsayısı, yüksek mekanik dayanım, yüksek sıcaklıklarda özelliklerini iyi koruma gibi üstün özellikleri vardır. Ama naylonun atmosferik nemi soğurma özelliği vardır. Bu da malzemede şişmeye neden olmaktadır. Polipropilene göre daha pahalıdır.

2.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler

İsimlerinden de anlaşılacağı gibi takviye malzemesi olarak küçük parçacıklar kullanılır. Metal ve metal olmayan parçacıkların yine metal ve metal olmayan matrislerle kombinasyonu şeklinde çeşitleri vardır. Burada parçacıklar sert ve kararlı bir yapıya sahip olarak dislokasyonların hareketine engel olmalıdır.

2.1.2.1. Semente Karbürler (Sinterlenmiş Karbürler)

Parçacık olarak WC , TaC, TiC kullanılır. Genellikle kesme takımlarında tercih edilmektedir. Bu grup parçacıklarla genellikle matris malzemesi olarak Co kullanılır. Bu parçacıklar toz metalürjisi yöntemiyle üretilirler.

2.1.2.2. *Abrazivler (Aşındırıcılar)*

Bileşiminde SiC, Al₂O₃ , BN gibi aşındırıcı içerirler. Genellikle kesme ve taşlama taşları ve zımpara gibi malzemelerin yapımında kullanılırlar.

2.1.2.3. *Elektrik Kontak Malzemeleri*

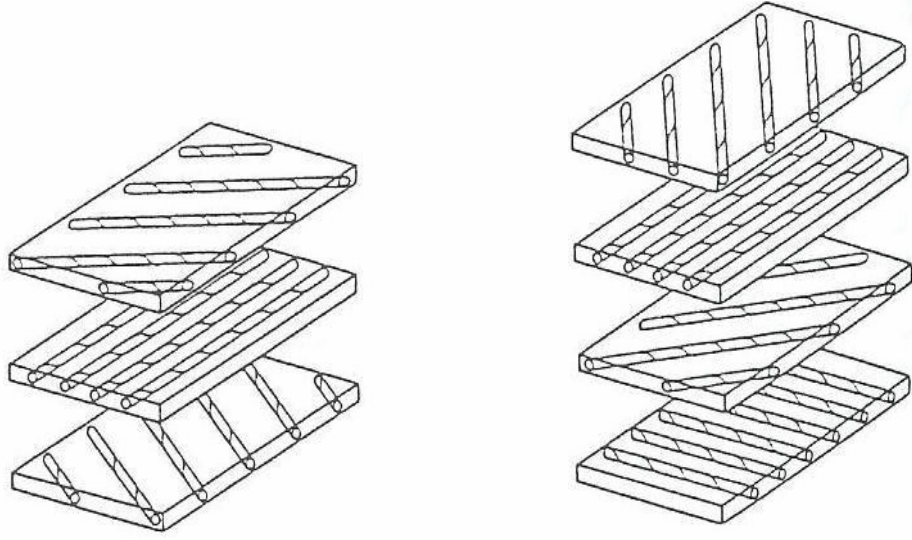
Bu tür malzemeler daha çok elektrik anahtarlarında kontak meydana gelen yerlerde kullanılırlar. Örneğin devre açılıp kapandığında ark oluşur. Bununla beraber çok yüksek sıcaklık meydana gelir ve malzeme buharlaşma sıcaklığına kadar çıkar. Bu nedenle bu tip malzemeler yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmalıdır.

2.1.3. *Tabakalı Kompozitler*

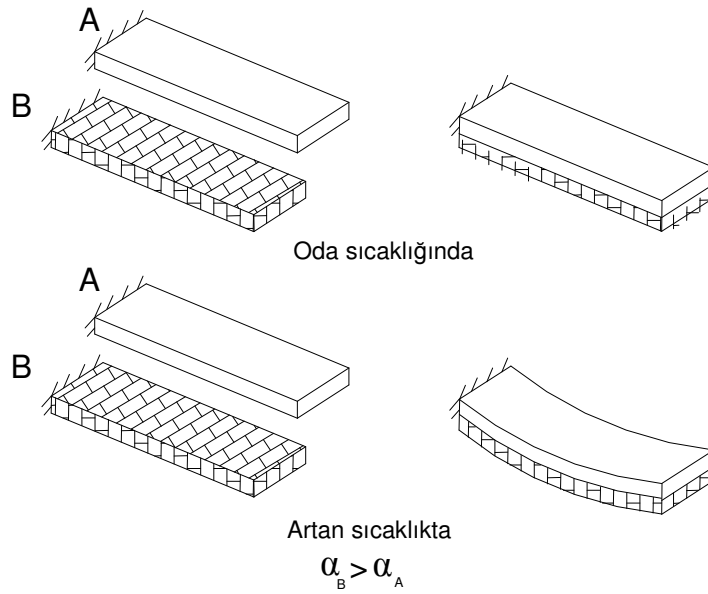
Tabakalı kompozitler en az iki farklı tabakanın bir araya getirilmesi ile oluşur. Farklı özelliklerdeki tabakalar bir araya getirilerek en iyi özellik elde edilmeye çalışılır.

2.1.3.1. *Metal Tabakalı Kompozitler*

En tipik örnekleri bimetallerdir Bimetaller farklı ısıl genleşme katsayısına sahip malzemelerdir. Sıcaklıkta bir değişim olduğunda metaller farklı miktarlarda uzayacaklardır. Bu özellik kullanılarak termostat, termometre, termik şalter gibi ekipmanlar üretilmektedir. Diğer bir örnek olarak da elektrik iletimde kullanılan bakır kaplı alüminyum teller verilebilir. Bakır teller alüminyuma göre daha ağır ve pahalıdır ama ısınma problemleri yoktur ve kolay bağlantı imkânı sağlarlar. Alüminyum teller ise hafif ve ucuzdur ama ısınırlar ve bağlantı yapılmaları daha zordur. Alüminyum telin üzerine bakır kaplandığında görece daha hafif, daha ucuz ve kolay ısınmayan bir ürün çıkar.



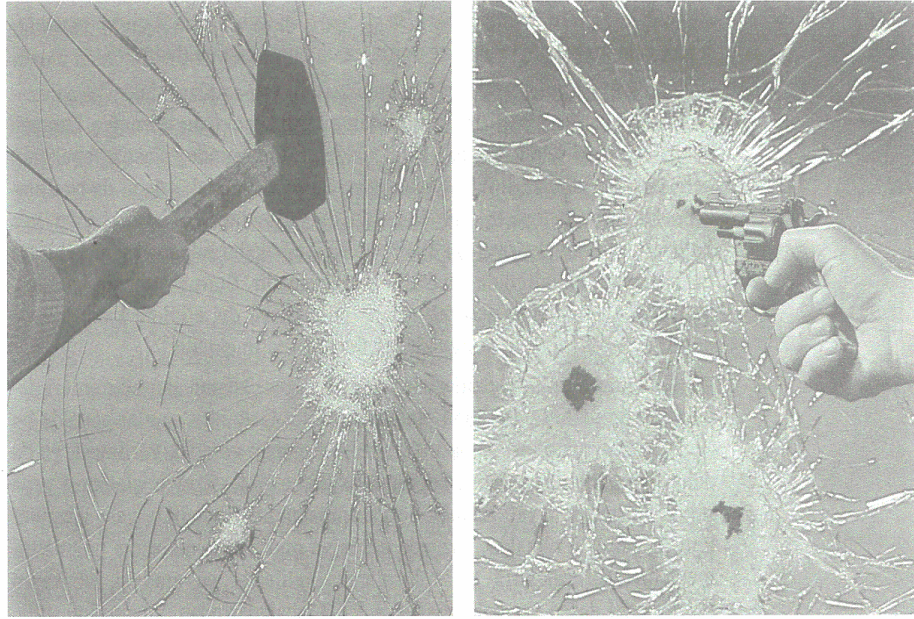
Şekil 2.3. Tabakalı kompozit malzemelerin ayırık görünümü .(Jones ,1999,s.17)



Şekil 2.4. Bimetalik malzeme örneği (Termostat)

2.1.3.2. Cam Tabakalı Kompozitler

Cam tabakalı kompozitler en basit biçimi ile iki cam tabakası arasına plastik kaplanmasıdır. En çok motorlu taşıtların camlarında kullanılır. Cam çok kırılğan olduğu için herhangi bir darbe aldığıında kırılırlar ve etrafa yayılarak kesilmelere neden olabilirler. Cam tabakalarının arasına PVB (Polivinilbütural) belirli bir sıcaklık ve basınç altında yapıştırılır.



Şekil 2.5. Tabakalı cam darbe dayanımı(Ersoy,2001,s.65)

2.1.3.3. Plastik Esaslı Tabakalı Kompozitler

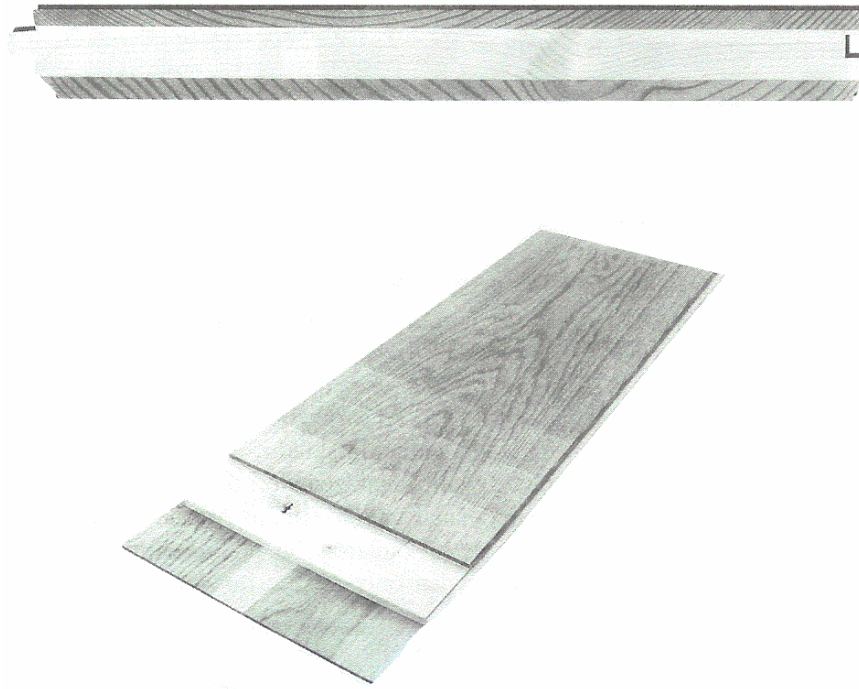
Çeşitli plastik malzeme katmanlarının bir araya getirilmesi ile üretilirler. En bilineni “ Formika” patent isimli malzemedir. Formika üretiminde fenolik reçine emdirilmiş kalın kraft kağıdı amine plastik reçine ile doyurulur. Baskılı dekoratif bir üst kağıt tabakası veya tabakaların bir araya getirilmesi ile oluşur.

Plastik esaslı kompozit malzemeler dekoratif uygulamalarda, banyo ve mutfak düzenlemelerinde sıklıkla kullanılırlar.

Cam, Kevlar ve naylon dokumalar çeşitli reçinelerle kullanılarak darbe dayanımı çok yüksek ve çok hafif ürünler elde edilebilir

2.1.3.4. Ahşap Tabakalı Kompozitler

Doğal ahşap günümüzde nispeten pahalı bir malzemedir istenilen büyük ebatlarda temin edilemeyebilir. Bu nedenle dış tabaka olarak daha estetik görünümlü malzemeler kaplanarak hem ekonomiklik hem de estetiklik sağlanabilir.



Şekil 2.6. Ahşap tabakalı kompozitler (Ersoy,2001,s.87)

2.1.4. Çok Bileşenli Kompozitler

Daha önce bahsedilen gruplardan ortak özellikler almış bunların kombinasyonu bir gruptur.

2.2. Matriks

Matriks, kompozit malzemenin ana yapısını oluşturur. Matriks kuvvetleri takviye elamanına iletir, takviye elemanını dış etkilerden korur ve kompozitin tokluğunu artırır. Matriksin takviye elemanını ıslatma kabiliyeti de iyi olmalıdır. Matriks

malzemesi olarak genellikle plastik matrisler, metal matrisler, seramikler kullanılır.

2.2.1. Plastik Matrisler

Fiber takviyeli kompozitlerinde üretiminde en çok kullanılan matris çeşididir. İyapılarına göre termoplastikler ve termoset plastikler olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

2.2.1.1. Termoplastikler

Lineer zincirli molekül yapısı vardır ve eklenme polimerizasyonu ile oluşurlar. Molekülleri arasında zayıf Van der Waals bağları vardır bu nedenle rijit değildirler. Sıcaklık yükseldikçe yumuşarlar, soğudukça tekrar sertleşirler. Termoplastik malzemeler oda sıcaklığında yüksek viskoziteye sahiptirler. Uygulamada matrisle fiber arasındaki bağların kurulması termoset plastiklere göre daha zordur. Akrilikler, fluorokarbon esaslı plastikler, asetol reçineler, polyamidler ve PVC gibi vinil esaslı plastikler bu gruba girmektedir.

2.2.1.2. Termoset Plastikler

Üç boyutlu ağ şeklinde molekül yapısı vardır ve yoğunlaşma polimerizasyonu ile oluşurlar. Üretimleri sırasındaki polimerizasyon reaksiyonun geri dönüşü olmadığından ısıtılarak tekrar yumuşatılması ve şekillendirilmesi söz konusu değildir. Epoksi reçineler, fenolik reçineler, doymuş ve doymamış polyester, silikon ve alkid reçineler bu gruba girmektedir.

Polyester reçineler glass fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde en sık kullanılan matris malzemesidir. Doymuş ve doymamış olmak üzere iki çeşidi mevcuttur. Doymamış polyester reçine termoset grubuna girmektedir. Sertleşme sırasında çekme oranı yüksektir. (% 5–12). Basma dayanımları düşüktür ve bünyelerine su alarak bozulabilirler. Bazik ve alkali ortamlarda korozyon dayanımları düşüktür.

Tablo2.2. Çeşitli cam takviyeli polysterlerin çelik ve alüminyum ile karşılaştırılması

	Cam	Doymamış polyster	Cam takviyeli polyster			Diğer Malzeme	
	Cam lifi		Keçe %30	Keçe %40	Dokuma Fitol %60	Çelik	Alüminyum
Özgül ağırlık [gr/cm ³]	2,57	1,2	1,5	1,6	1,8	7,8	2,7
Isıl genleşme kat [10 ⁶ cm/cmK]	5-7	100	25	20	12	12,5	23
Isıl iletkenlik kat. [W/mK]	0,74	0,13	0,21	0,23	0,26	39	150
Özgül ısı [Wh/kgK]	0,17	0,39	0,31	0,28	0,22	0,16	0,23
E-modülü [N/mm ²]	70x10 ³	4x10 ³	8x10 ³	10 ⁴	1,9x10 ⁴	2x10 ⁵	7-5x10 ⁴
Çekme dayanımı [N/mm ²]	3000	60	100	140	350	350	120
Eğilme dayanımı [N/mm ²]		100	190	240	440	400	200
Basınç dayanımı [N/mm ²]		100	150	180	290	400	200

Fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan diğer termoset grubu malzemeler ise epoksi reçinelerdir. Epoksi reçinenin polystere göre en büyük avantajı sertleşme sırasında % 1-2 gibi düşük çekme oranına sahip olmasıdır. Ark dirençleri yüksektir. Epoksi reçineler birçok fiber çeşidi ile çok iyi bağ oluştururlar ve dayanımları nispeten daha yüksektir.

Fenolik reçineler, 150–200 °C arasında basınç altında sertleştirilirler. Elektrik özellikleri, suya ve aside karşı dayanımları iyidir. 300 °C'ye kadar kullanılabilirler. Viskozitesi yüksektir ve gözenek oluşturma tehlikesi vardır.

Silikon reçineler, mekanik özellikleri düşük olmakla birlikte 250 °C'ye kadar dayanıklıdır. Ayrıca silikon pahalı bir ürün olduğu için kullanımları kısıtlıdır.

Vinil ester reçineler polyester reçineler gibi üretilmektedirler ve epoksi reçinelerin sertleşme özelliklerine sahiptirler. Kimyasal dayanım gereken kimya tesislerinde, boru ve depolama tanklarında kullanılmaktadırlar.

Polyamid reçineler, inorganik reçineler arasında ısıl stabilitesi en yüksek olanlarıdır. 127 ° C -300 ° C arasında kullanılan polyamid reçineler vardır.

2.2.2. Metal Matrisler

Metal matrisler taşıyıcılık açısından plastik matrislere oranla daha iyi performans sağlamaktadır. Metal matris kullanarak fiber takviyeli kompozit üretimi daha zor ve maliyetlidir ancak metal matris kompozitin tokluğunu önemli ölçüde artırmakta ve yüksek sıcaklıkta dayanımları olumlu yönde artmaktadır.

En çok kullanılan metal matris malzemeleri olarak alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır, nikel ve gümüş gelmektedir. Glass fiberler plastik matris malzemeleri ile çok başarılı bir şekilde kullanılmasına rağmen metal matrislerle kullanıldığında yüksek sıcaklıklarda taşıyıcılığını kaybetmektedir. Bu nedenle metal matrislerle kullanım için whisker adı verilen çok ince metal kıllar üretilmiştir.

Metal matrisli ve fiber takviyeli kompozitlerde, fazlar arasında elektro-kimyasal etkileşim olması, fazlardan birinin korozyona uğraması gibi problemler ortaya çıkabilmektedir. Örneğin alüminyum matris ile karbon fiber kullanıldığında, iki malzeme arasında galvanik korozyon görülmektedir. Bunu önlemek için fiber yüzeyi gümüş veya nikle kaplanır.

2.2.3. Seramik Matrisler

Çok yüksek sıcaklık ve termal şoklara karşı dayanımları yüksektir. Gevrektiler ve çentik hassasiyetleri yüksektir. Bu gruba en iyi örnek olarak SiC ve Al₂O₃ fiber ile takviye edilmiş SiC ve Si₃N₄ seramikleri gösterilebilir.

BÖLÜM 3

KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1. Fiber Takviyeli Kompozitlerin Üretimi

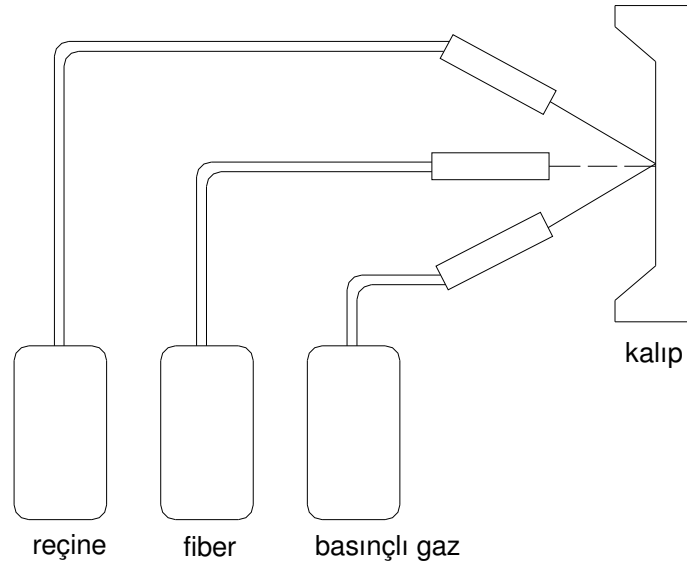
Fiber ve matris türleri ticari olarak çeşitli formlarda temin edilebilirler. Fiberler tek, kırılmış, keçe ve dokuma gibi formlarda temin edilebilir. Üretim yöntemini parçanın boyutları ve şekli, maliyet, zaman gibi faktörler de etkilemektedir.

3.1.1. El Yatırma Tekniği

Kompoziti hazırlamak için kalıp gereklidir. Kalıbın iç yüzeyi silindikten sonra birinci ayırıcı olarak vaks ile temizlenir. Daha sonra ikinci ayırıcı PVA sürülür. Fırça ile viskozitesi yüksek reçine (jelkot) sürüldükten sonra fiberler kesilerek hazırlanır. Jelkot üzerine reçine sürülür ve keçe veya dokuma şeklindeki takviye elemanı yerleştirilir. Fırça darbeleriyle reçine iyice emdirilir. Rulo kullanılarak hava kabarcıklarının kalmaması sağlanır. İstenilen kalınlık sağlanana kadar bu işleme devam edilir. Bu yöntemde en çok polyester ve epoksi reçine kullanılır. Sertleşme beklendikten sonra ürün kalıptan çıkarılır. Bu yöntem yoğun işçilik gerektiren bir yöntemdir ve az sayıda parça üretimi için uygundur.

3.1.2. Püskürtme Tekniği

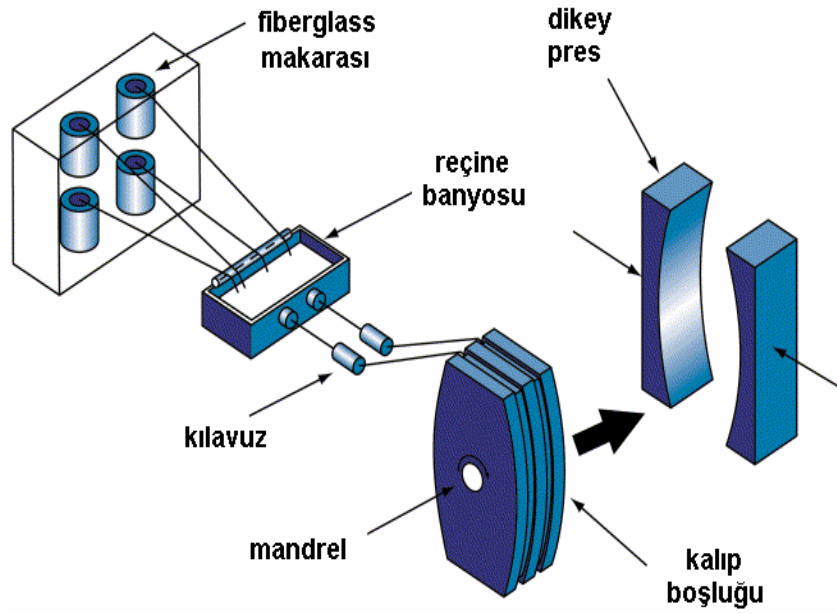
Bu yöntem el yatırma tekniğinin biraz daha gelişmiş hali olarak düşünülebilir. Yöntemde bir tabanca ile sürekli fiberler kırılmış halde reçine ve sertleştirici ile karıştırılarak kalıp içersine püskürtülür.(Şekil 3.1) Püskürtme tamamlandıktan sonra rulolanarak boşluklar alınır ve yüzey daha düzgün hale getirilir.



Şekil 3.1 Püskürtme tekniği

3.1.3. Profil Çekme (Pultrüzyon)

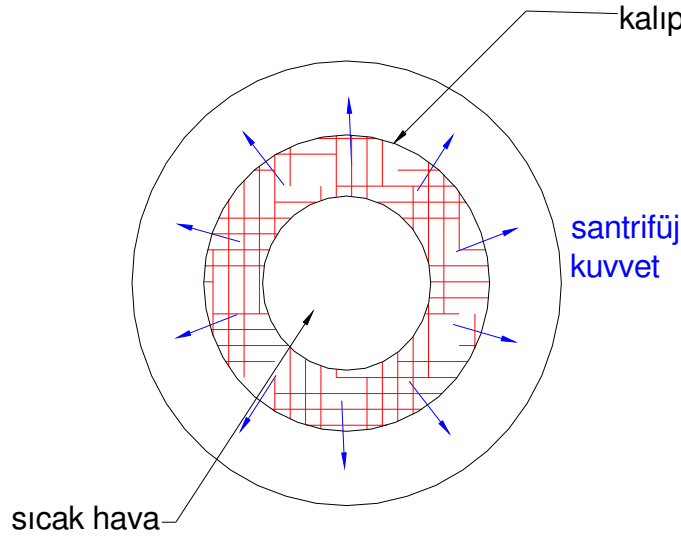
Yöntemde fiberler makaralara sarılı halde bulunur. Fiberler reçine banyosundan geçerek kalıba sarılır. Daha sonra sıcaklık ve basınç altında preslenir. Düşük maliyetlidir ve seri üretime uygundur.



Şekil 3.2 Profil çekme tekniği (www.reinforcedplastics.com)

3.1.4. Santrifüj Kalıplama

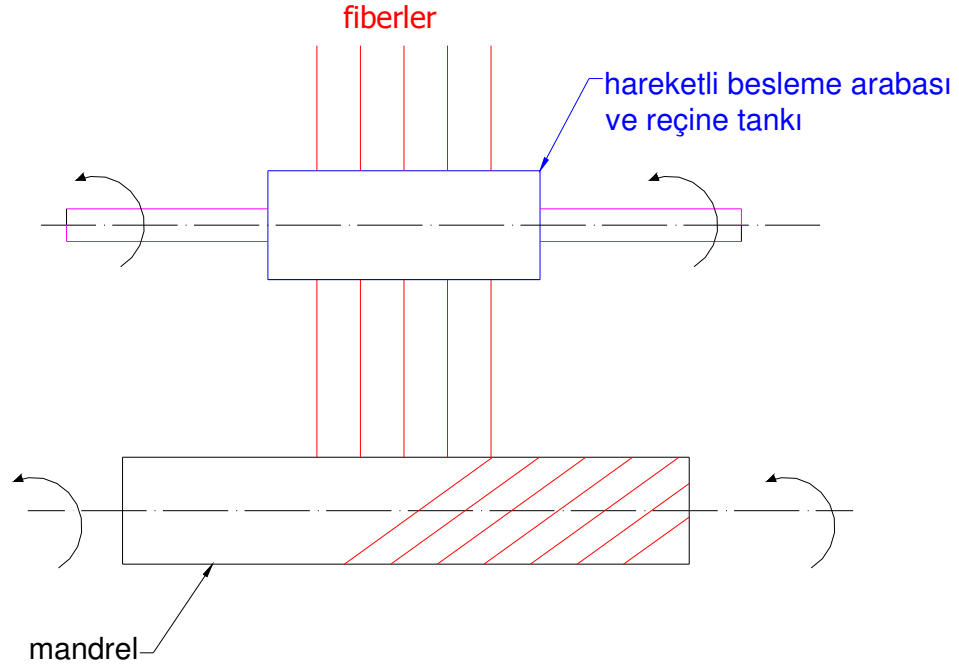
Kalıp içersine kırılmış fiberlerle takviye edilmiş reçine dökülür. Kalıp belirli bir hızla döndürülür. Santrifüj kuvvet ile malzeme dışa doğru savrulur ve böylece parçanın iç yüzeyi şekillenmiş olur. Kalıp içersine sıcak hava üflenerek sertleşme sağlanır. Silindirik parçaların üretimi için uygun bir yöntemdir.



Şekil 3.3 Santrifüj kalıplama

3.1.5. Fiber Sarma

Yöntemde reçine tankı bulunan hareketli besleme arabası ve fiberlerin sarıldığı mandrel kullanılır. Fiberler reçine tankından geçirildikten sonra mandrel etrafına sarılır.(Şekil 3.4) Bu yöntemle hacim oranı çok yüksek kompozit üretilebilir. Genellikle silindirik şekilli roket gövdeleri, basınçlı tanklar gibi ekipmanlar yapılır.



Şekil 3.4. Fiber sarma yöntemi

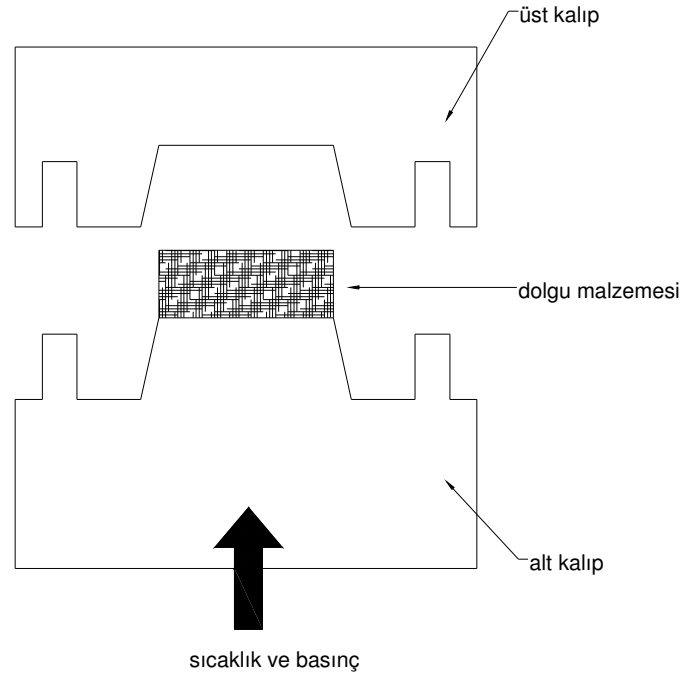
3.1.6. Basınçlı Kalıp Yöntemi

Yöntemde dişi ve erkek kalıp arasında önceden hazırlanmış dolgu malzemesi yerleştirilir. Isıtılmış kalıp belirli bir basınçta kapatılarak dolgu malzemesine istenilen şekil verilmiş olur. Bu yöntemde fiber yönlenmesi tam olarak kontrol edilemez. Yöntemin eksikliklerinin giderilmesi için daha gelişmiş yöntemler kullanılmaya başlanmıştır.

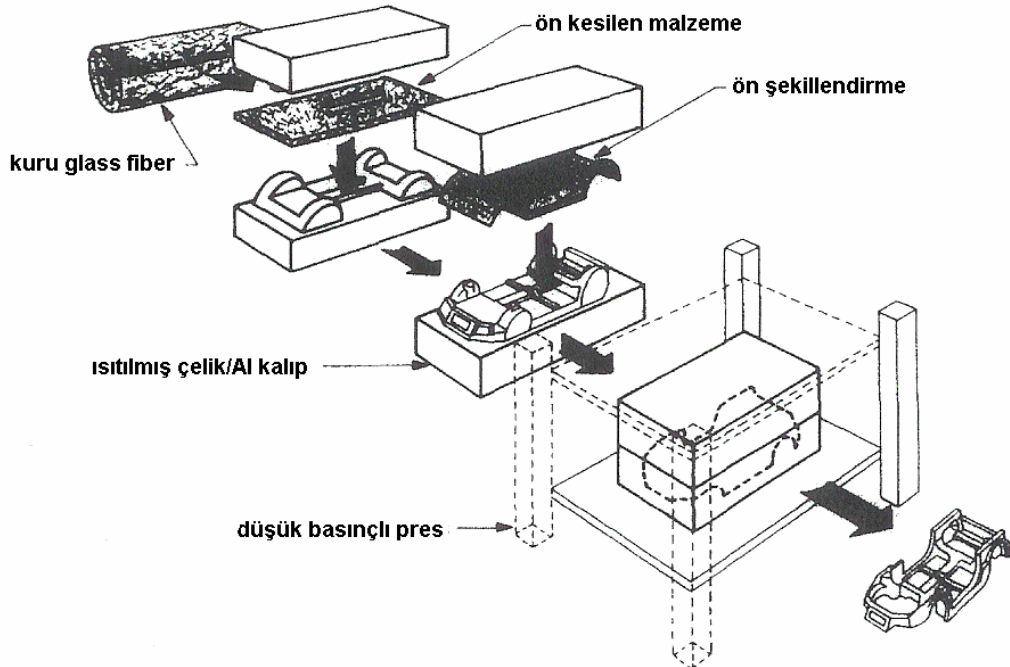
3.1.7. Yüksek Hızlı Reçine Transferi

Fiber kontrolüne imkân vermesi ve hızlı uygulanabilirlik normal kalıp yöntemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırmıştır. Yöntemde uygun ölçülerde kesilmiş kuru haldeki fiberlere kalıp yardımıyla ön şekil verilir. Daha sonra ön şekillendirilmiş fiberler ısıtılmış çelik veya alüminyum kalıp içersine konular ve reçine tatbik edilerek işlem gerçekleşir. Bu yöntemle karmaşık şekilli parçaların

üretimi mümkündür. Özellikle tekne üretiminde ve otomotiv sanayisinde kullanım alanlarına sahiptir.



Şekil 3.5 Basınçlı kalıp yöntemi

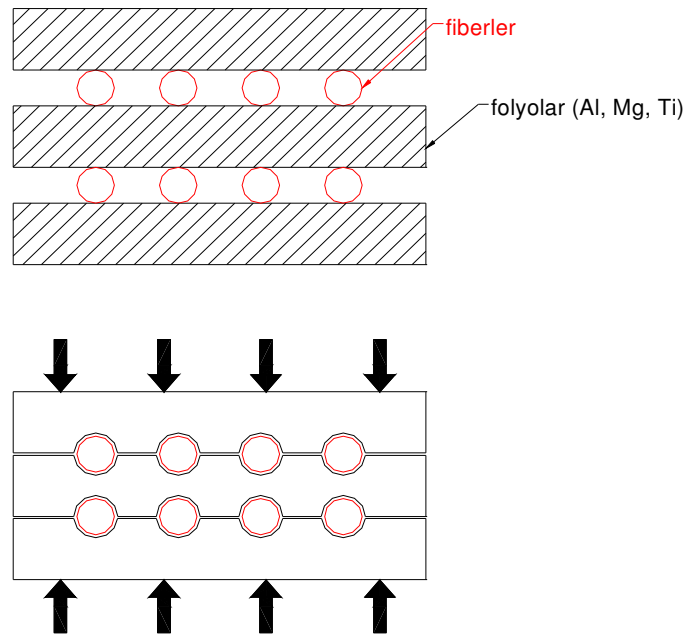


Şekil 3.6. Yüksek hızlı reçine transfer metodu (Beardmore, 1986,s.174)

3.2. Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi

3.2.1. Sıcak Presleme

Metal folyoların yüzeyine bağlayıcı püskürtülerek fiberlerin kaymaması sağlanır. Sıcaklık ve basınç uygulanır. Bağlayıcılar sıcaklıkla yanarak ayrılırlar. Fiberlerin özelliklerini kaybetmemeleri için sıcaklığın iyi ayarlanması gerekir.



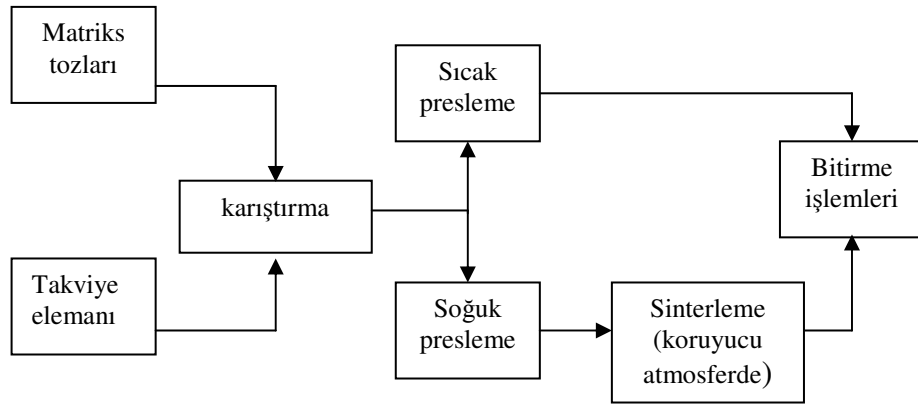
Şekil 3.7. Sıcak presleme yöntemi

3.2.2. Toz Metalürjisi

Bu yöntemde metal veya seramik tozlarının içersine takviye elamanları katılır. Bu malzemeler uniform bir şekilde karıştırıldıktan sonra katı hal difüzyonu için uygun sıcaklık ve basınç altında sinterlenirler.

3.2.3. Sıvı Metal Emdirme

Bu yöntemde sıvı metal fiberlerin arasına emdirilir. Sıvı metal kılcal etki ile fiberlerin arasında yükselir. Yöntemle ergime sıcaklıkları düşük magnezyum, alüminyum, bakır ve gümüş matriks malzemesi olarak kullanılır.



Şekil 3.8 Toz metalürjisi yöntemi

3.2.4. Elektrolitik Yöntem

Fiberler elektroliz banyosunda katot görevi yapan mandreller üzerine sarılır. Böylelikle fiberler üzerine metal çökmesi sağlanır. Yöntem düşük sıcaklıkta yapıldığı için fiberlerin özellikleri bozulmaz.

3.2.5. Buhar Çöktürme

Buhar halindeki matriks takviye fazı üzerine çökeltilir. Düşük sıcaklıklarda yapılabildiği için fiberlere zarar vermez. Pahalı bir yöntemdir. Al ve Ni gibi matriksler üretim için uygundur.

3.2.6. Birlikte Ekstrüzyon

Metalik tel, çubuk ve profillerin üretiminde kullanılan ekstrüzyon ve çekme teknikleri kompozit kabloların ve whisker takviyeli metallerin üretiminde de kullanılabilir.

BÖLÜM 4

KOMPOZİT MALZEMELERİN GENEL KULLANIM ALANLARI

Kompozit malzemelerin ilk kullanımlarına 1960 yıllarda hafiflik ve aynı zamanda mukavemet gerektiren hava sanayisinde başlanmıştır. İlk önceleri amaç sadece kompozit malzeme üreterek bu konuda bilgi edinmekle sınırlı idi. Daha sonraları mevcut metal parçaların kompozitlerle değiştirilmesi yoluna gidildi. Zamanla kompozit malzemelerle ilgili bilgilerin artmasıyla ve daha ekonomik ve hızlı üretim yöntemlerinin geliştirilmesiyle tasarımlar yenilenerek bunlara uygun kompozit parçalar geliştirilmeye başlanmıştır.

Kompozit malzemelerin hafifliklerine karşın yüksek mukavemete sahip olmaları hava sanayisinde kullanılmalarının en önemli sebeplerinden biridir. Özellikle karbon fiberlerin yüksek mekanik özellikleri hava sanayisinde vazgeçilmez bir malzeme olmasını sağlamıştır. Karbon fiber takviyeli kompozitler alüminyum alaşımlarına oranla %25–45 oranında ağırlık azalması sağlarlar. Bu da direkt olarak yakıt tasarrufu sağlar ve uçağın menzilini artırır. Uçakların gövde panelleri, yatay ve dikey dengeleyiciler, iniş takımları, burun kısımları, silindirik motor kılıfları gibi pek çok yapısal parçada kompozit malzemeler kullanılır. Ayrıca iç mekânlarda da kompozit malzeme kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin kullanıldığı diğer bir sektör ise otomotiv sektörüdür. Otomotiv sektöründe üretim hacimlerinin yüksek olması ve ekonomikliğin hava sanayisine göre daha kritik olması nedeniyle uçaklarda kullanılan çok pahalı kompozitlerin kara taşıtlarında kullanılması pek mümkün değildir. İlk zamanlarda kompozitler otomobillerde aksesuar amaçlı kullanılmaktaydı. Daha sonraları ana yapısal parçalarda da kullanılmaya başlanmıştır.

Kompozit malzemelerin otomotiv sanayisinde kullanımı iki temelde toplanabilir.

- Metal parçaların birebir kompozitlerle değiştirilmesi,
- Kompozit malzemeden yeni tasarımlar yapılarak parça sayısının azaltılması. (Bütünleştirme)



Şekil 4.1. Tek parça kompozit kardan şaftı (Beardmore, 1986, s.165)

Ford Ecoline Van için geliştirilen tek parçalı kompozit kardan şaftı bütünleştirme ilkesine iyi bir örnek olarak verilebilir. (Beardmore,1986) Normalde bu araçlarda çelik malzemeden yapılmış orta askılı iki parça halinde kardan şaftı kullanılmaktaydı. Çünkü şanzıman ve diferansiyel arasındaki mesafede tek parça çelik şaftın kullanılması durumunda aşırı vibrasyonlar meydana gelir. Ama tek parça kompozit şaft titreşim karakteristiklerini karşılamaktadır. Şekil 4.1. görülen bu kardan şaftı fiber sarma tekniği ile üretilmiştir.

Uzunlamasına yerleştirilen (0°) karbon fiberler 220 GPa elastisite modülüne sahiptir ve eğilme direnci sağlarken $\pm 45^\circ$ yerleştirilen E-glass fiberler ise burulma mukavemeti sağlarlar. Matriks malzemesi olarak da vinil-ester reçine kullanılmıştır.

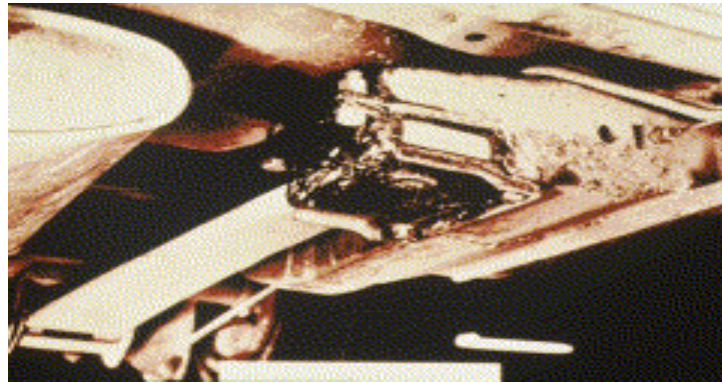
Kompozit malzemelerin gün geçtikçe gelişmekte olan kullanım yerlerinden biri de yaprak yay uygulamalarıdır. Motorlu araçlarda yaprak yaylar, yol bozuklukları ve aracın hareket durumları neticesinde oluşan titreşimleri ve darbeleri minimize etmek üzere tasarlanırlar. Potansiyel enerji yay içerisinde şekil değiştirme enerjisi olarak depolanır ve sonradan yavaşça serbest bırakılır. Bu nedenle yayın elastik enerji depo edebilme kapasitesi önemlidir. Yaprak yayın şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu:

$$U = \frac{1\sigma^2}{2E} \quad (4.1)$$

σ = Maksimum müsaade edilen gerilme

E = Elastisite modülü

Denklem (4.1)'den açıkça görüleceği şekil değiştirme enerjisinin yüksek olabilmesi için σ değerinin büyük olması veya E değerinin küçük olması gerekmektedir. Bu nedenle kompozitler yaprak yay kullanımı için uygun malzemelerdir. Ayrıca kompozit malzemeler hafif malzemelerdir. Araçlarda, jantlar, akslar ve yayın kendi ağırlığı gibi yaya transfer edilemeyen ağırlıklar vardır. Bu ağırlıkların azaltılması ile hem sürüş konforu artar hem de yakıt ekonomisi sağlanır.



Şekil 4.2 Kompozit yaprak yayların araçlarda ilk kullanımı,1963 (www.reinforcedplastics.com)

Otomotiv endüstrisinde kullanılan metal yaprak yaylar genellikle çok katlı olarak yapılırlar. Çalışma esnasında katlar arası sürtünmeler meydana gelir. Bu da sürüş konforunda olumsuzluklara neden olur. Kompozit malzemeden yapılan yaprak yaylar tek kat oldukları için katlar arası sürtünme ortadan kalkmış olur. ABD’de tomobiller için ilk kompozit yaprak yay çalışmaları 1963 -1967 yılları arasında yapılmıştır. 150 civarında yay üretilmiş ve bu yaylarda önemli ağırlık azalmaları sağlanmıştır. Fakat üretim yöntemlerinin pahalı olması bu projenin ertelenmesine sebep olmuştur. 1977 yılına gelindiğinde çalışmalar tekrar başlatılmış ve ilk enlemesine yerleştirilen glass fiber yaprak yay 1981 yılında üretilmiştir.

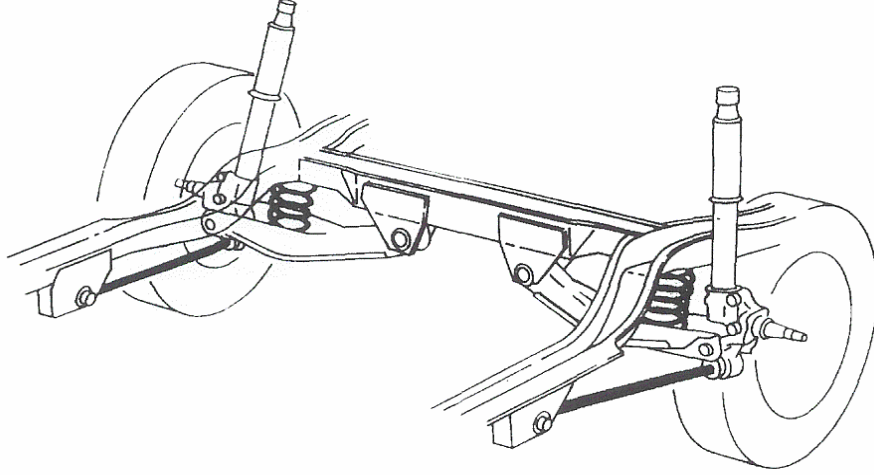
Yu ve Kim (1988) yaptıkları çalışmada dört katlı çelik yaprak yay yerine kullanılabilir glass-fiber/epoksi kompozitinden parabolik yaprak yay geliştirmişlerdir. Çelik yaprak yay 8,44 kg ağırlığında iken E-glass/epoksi kompozit yaprak yay göz kısımları hariç sadece 2,3 kg ağırlığında idi.

Rajendran ve Vijayarangan (2001) yedi katlı çelik yaprak yay alternatif olarak tek katlı kompozit yaprak yay geliştirmişler ve %75,6 oranında ağırlık azalması sağlamışlardır.

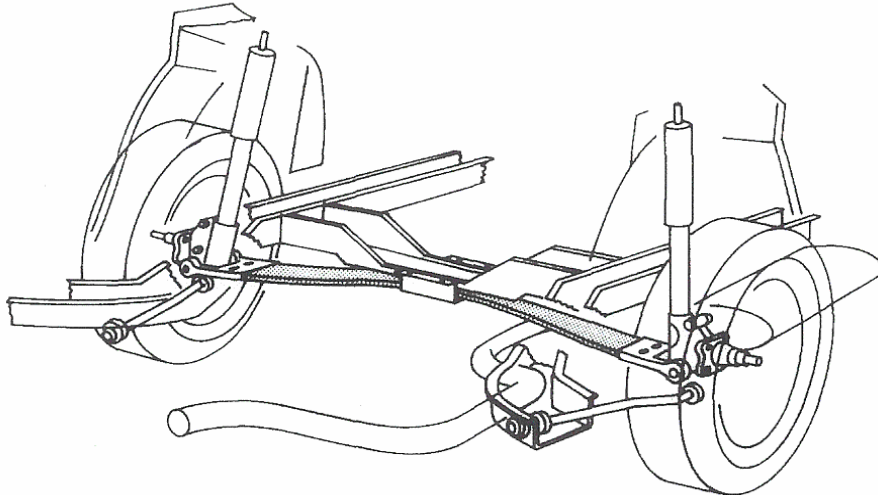
Tablo 4.1 Çelik ve kompozit yaprak yayların karşılaştırılması (Rajendran ve Vijayarangan)

Özellikler	Çelik yay	Kompozit yay
Düz halde yay uzunluğu (mm)	1220	1220
Yay kavisi (mm)	160	160
Elastisite modülü (GPa)	210	32,5
Malzeme yoğunluğu (kg/m ³)	7800	2600
Yük (N)	4500	4500
Max müsaade edilir gerilme (MPa)	800	550
Genişlik (mm)	34,25	28,475
Kalınlık (mm)	6,55 (her kat)	25,015
Max gerilme (MPa)	799,52	462,17
Max çökme (mm)	144,10	141,03
Ağırlık (kg)	8,54	2,26

Morris 1986 yılında yaptığı çalışmada Ford Escort model otomobil için enlemesine yerleştirilmiş kompozit yaprak yay geliştirmiştir. Böylece eski sistemde kullanılan helezon yaylar ve süspansiyon kolları kaldırılarak parça sayısında da azalma sağlamıştır.



Şekil 4.3 Helezon yay kullanılan süspansiyon sistemi (Morris,1986)



Şekil 4.4 Enlemesine yerleştirilmiş kompozit yaprak yay (Morris,1986,s.234)

Kompozit yaprak yaylar titreşimli konveyörlerde de kullanılmaktadır.(Şekil4.5) Kompozit yaprak yayların yorulma ömürlerinin yüksek olması bu tip tezgahlarda meydana gelen kısa sürede yay kırılması problemini ortadan kaldırmıştır.



Şekil 4.5.Titreşimli konveyörlerde kullanılan kompozit yaprak yaylar(www.izoreel.com.tr)

Ağırlığın ve mukavemetin önemli olduğu yüksek performans otomobillerinde ileri kompozit malzemelerin kullanımını görmekteyiz. Örneğin Formula 1 araçlarında şase dahil olmak üzere bir çok parça karbon fiber takviyeli kompozit malzemeden yapılmaktadır.

Özel örneklerin haricinde genellikle otomotiv sanayisinde kompozit malzemeler tampon, ön ızgara, spoiler, gösterge paneli, dikiz aynası, far gövdesi, pedallar, koltuk iskeleti gibi parçalarda kullanılmaktadır.

Kompozit malzemeler günlük ev yaşantımızda da sıklıkla karşılaştığımız malzemelerdir. Örneğin saç kurutma makinesi gövdeleri, televizyon kabinleri ve çeşitli dekoratif ev eşyalarının yapımında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

İnşaat sektöründe cephe kaplamaları, inşaat kalıpları, büfe, otobüs ve taksi durakları ve seyyar tuvaletler gibi kabinlerin yapımında da kompozit malzemelere rastlamaktayız.

Şehircilik olarak düşündüğümüzde de çocuk parkı gereçleri, çöp bidonları elektrik direkleri ve bankların da üretiminde kompozit malzeme kullanılmaktadır.

Denizcilik sanayisinde tekne gövdeleri ve yelken direkleri gibi alanlarda kompozit malzeme kullanım yeri bulmuştur.

Spor alanında ise kompozit malzemeler günden güne ağırlığını hissettirmektedirler. Golf sopası, tenis raketi gibi spor ürünlerinde hem hafiflik hem de darbe dayanımı önemli olduğu için karbon fiber takviyeli kompozitler iyi performans sağlamışlardır. Yarış bisikletleri, sörf, kano, su kayağı, kar kayağı gibi spor araçlarında kompozitler kullanılarak darbe dayanımı, şok emme, hafiflik gibi özellikler kazanılır.

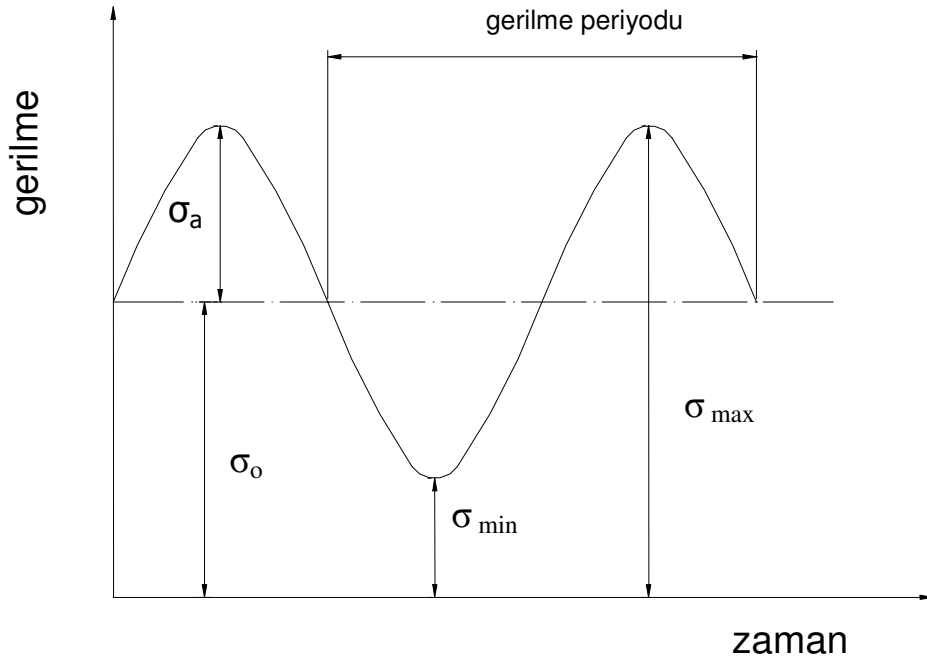
BÖLÜM 5

KOMPOZİT MALZEMELERİN YORULMA DAVRANIŞLARI

Uygulamada pek çok sistem elemanı akma sınırının altında gerilmelere maruz kalırlar. Buna rağmen tekrarlı gerilmeler akma sınırının altında olsa dahi zamanla parçalarda kırılma meydana gelir veya kullanılmaz hale gelecek şekilde hasarlar oluşur. Uygulanan gerilme akma sınırının üzerinde ise kısa ömürlü yorulma , akma sınırının altında ise uzun ömürlü yorulma olarak adlandırılır.

5.1. Yorulma İle İlgili Temel Kavramlar

Malzemelerin yorulma davranışlarını belirleyebilmek için burulma, eğilme, çekme, basma vb. tekrarlı gerilmeler uygulanarak testler gerçekleştirilir. Bu testlerde uygulanan temel gerilme değişkenleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



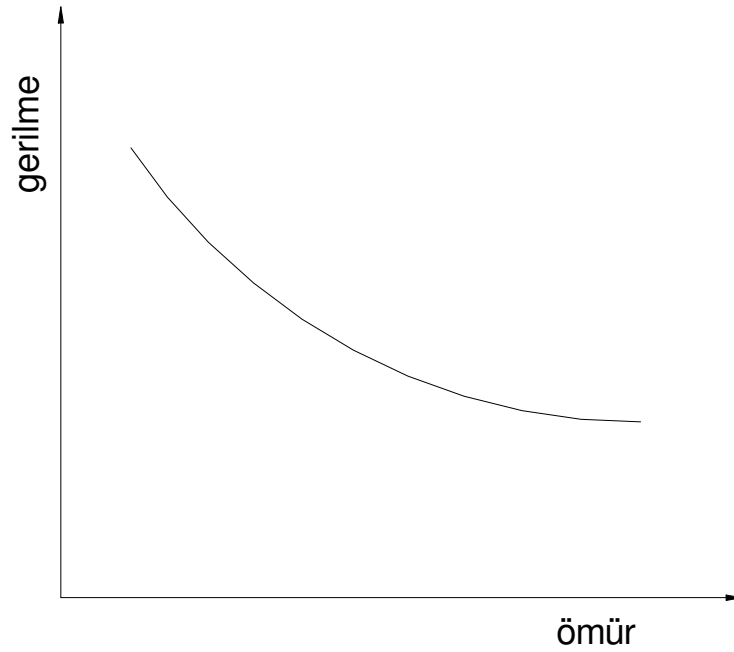
Şekil 5.1 Temel gerilme değişkenleri

$$\sigma_o = \text{Ortalama gerilme} \quad \sigma_o = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a = \text{Gerilme genliđi} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$R = \text{Gerilme oranı} \quad R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

Yorulma testleri sonucunda yorulma grafikleri (Wöhler diyagramı) elde edilir.

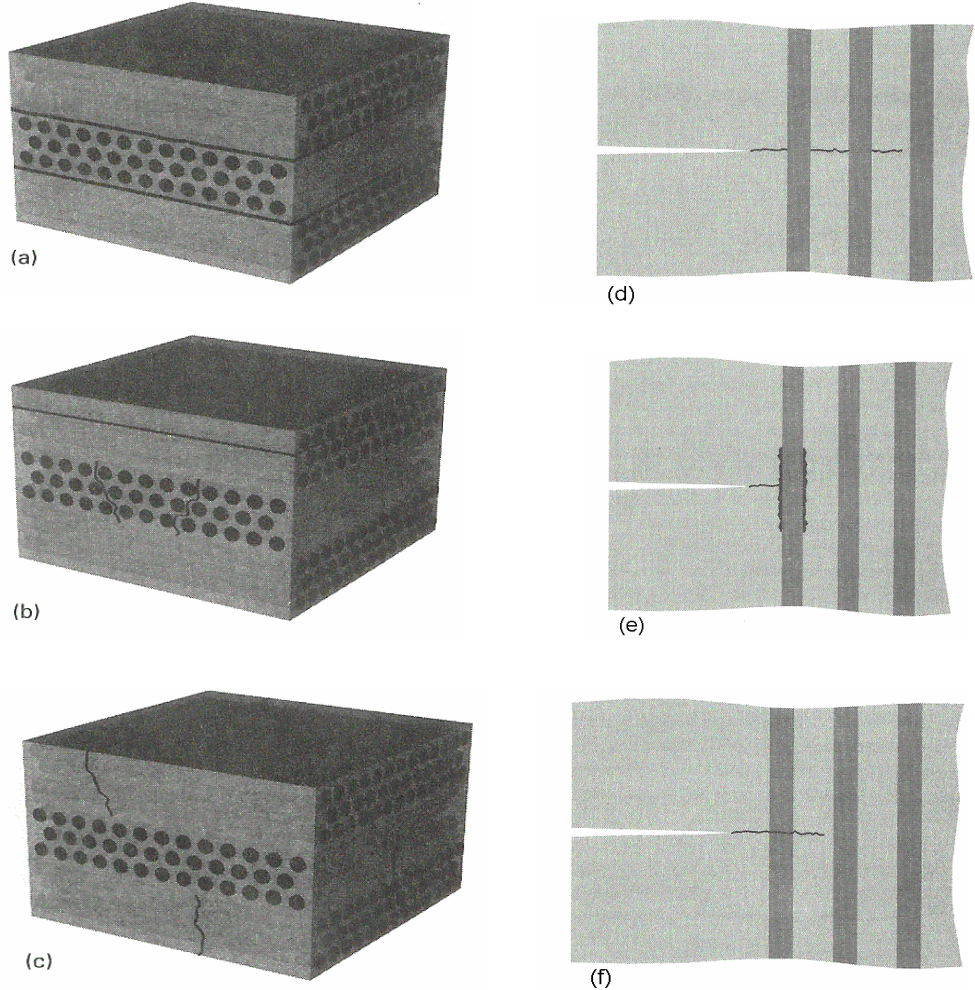


Şekil 5.2 Tipik gerilme-ömür (S-N) eğrisi

Yorulma grafiklerinde iki önemli parametre tanımlanır. Yorulma ömrü ; Belirli bir tekrarlı yük etkileyen malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısına yorulma ömrü denir. Yorulma dayanımı ; Belirli bir çevrim sayısı sonra malzemenin kırılmasına neden olan gerilme değerine de yorulma dayanımı denir.

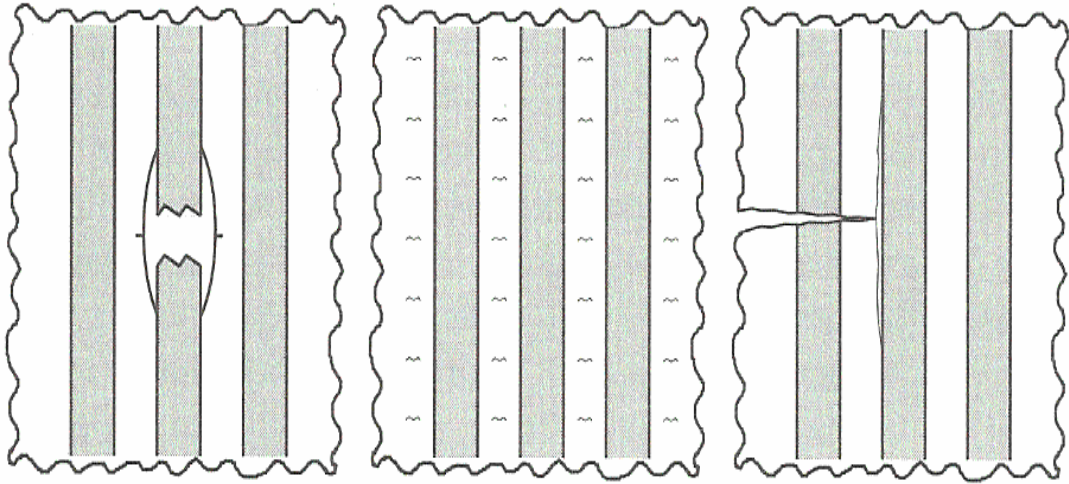
5.2. Fiber Takviyeli Kompozitlerin Yorulma Davranışları

Metallerin yorulması ile ilgili yüz yılı aşkın süredir araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar neticesinde bir çok tasarım verileri elde edilmiştir. Kompozit malzemeler metallere farklı olarak homojen değildirler ve ortotropik özelliğe sahiptirler yani özellikleri yöne bağlı olarak değişir. Bu nedenle yorulma hasar mekanizması çok kompleks bir yapıya sahiptir. Yorulma hasarı takviye elemanı çeşidine (glass fiber, karbon fiber vb.) tabaka yapısına (tek yönlü, çok yönlü), uygulanan yüke göre değişiklik göstermektedir. Kompozit malzemelerde görülen tipik kırılma modları Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



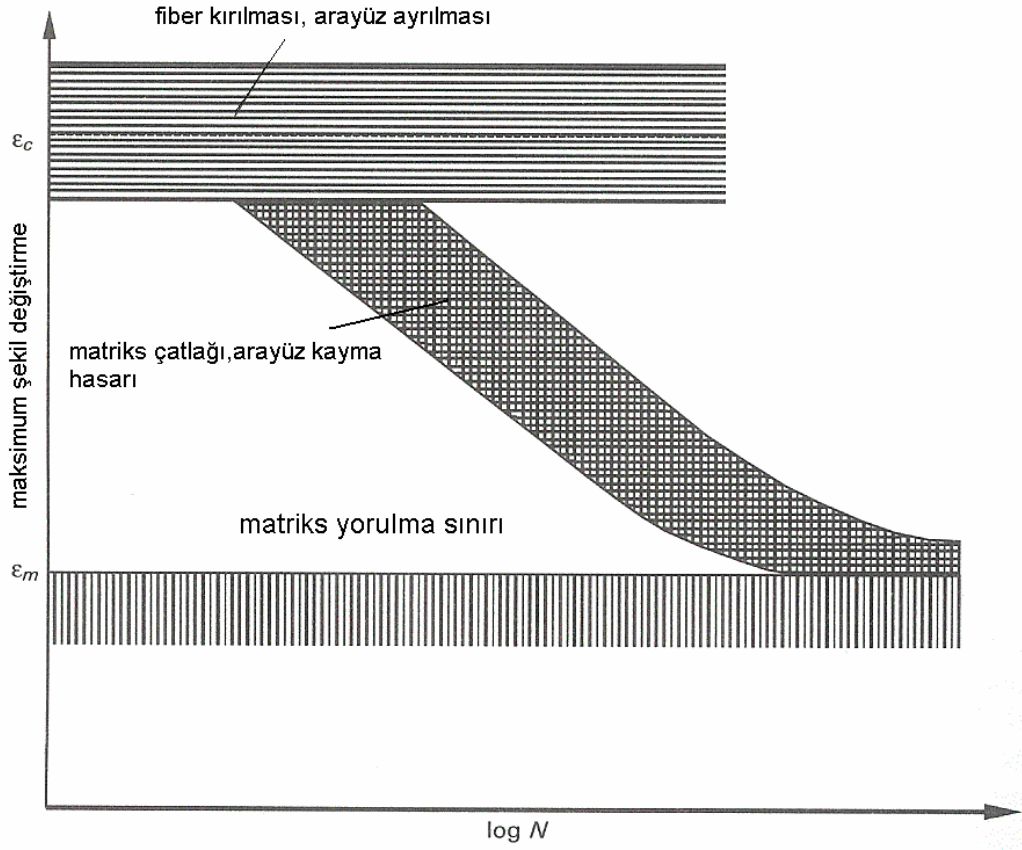
Şekil 5.3 Tipik kırılma modları (a)interlaminar kırılma (b) intralaminar kırılma (c) translaminar kırılma (d)matriks çatlağı (e) fiber-matriks ayrılması (f) fiber kırılması (Gdoutos, Pilakoutas, Rodopoulos,s.150,210)

Yorulma hasar mekanizmasını anlamak için Gduotos, Pilakoutas ve Rodopoulos (2000) yaptığı kabulle ilk önce en temel yapı olan tek yönlü tabakalı kompoziti ele alalım. Kompozit fiber yönünde çekme yüküne maruz kalsın. (Şekil 5.4.) Yerel gerilme değeri en zayıf fiberin kopma mukavemetini aşıyor ise fiber kırılması meydana gelir. Kırılan fiberin uç kısmı bölgesinde fiber- matriks ara yüzünde kayma gerilme yığılması oluşur.



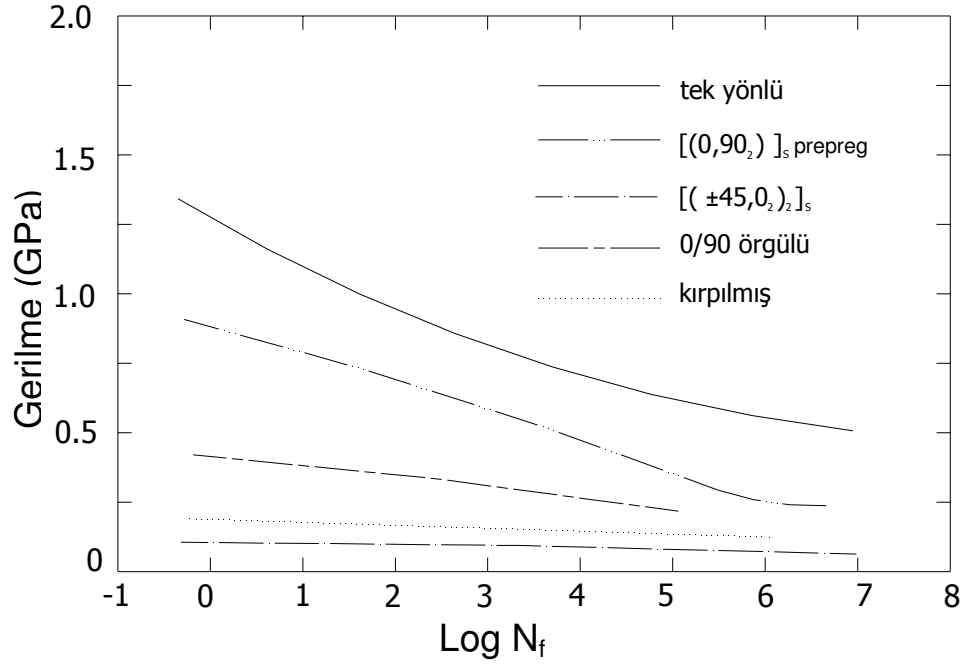
Şekil 5.4. Tek yönlü kompozitlerin yorulma hasar mekanizması (Gdoutos, Pilakoutas, Rodopoulos,s.250)

Ara yüzey, fiber doğrultusundaki çekme gerilmesi için gerilme yığılması gibi hareket eder ve matriksin kırılma mukavemetini geçer ve fibere dik yönde çatlak meydana gelir. Bu çatlaklar rasgele dağılımlıdır ve fiberler tarafından sınırlandırılır. Yorulma prosesi ilerlerken fiber kırılması ve matriks çatlağı nedeni ile yerel şekil değiştirmeler eşik değerini aşar. Matriks çatlağının ilerleme süresince çatlak ucundaki kayma gerilmesi matriks-fiber ara yüzünde hasara neden olur. Çatlak yeterli büyüklüğe ulaştığında da final hasarı meydana gelir. Tipik bir yorulma ömrü diyagramı Şekil 5.5.'de görülmektedir.



Şekil 5.5. Fiber doğrultusunda yüklenmiş tek yönlü kompozitlerin tipik yorulma diyagramı (Gdoutos, Pilakoutas, Rodopoulos,s.250)

Matriks için en düşük şekil değiştirme limiti ϵ_m olarak tanımlanır. Bu şekil değiştirme değeri yaklaşık olarak takviye edilmemiş matriks malzemesinin değerindedir. Diyagramın üst limiti kompozit hasarının meydana geldiği değer ϵ_c olarak tanımlanır ve bu değerinde aslında takviye elemanının hasar değeridir.



Şekil 5.6 Çeşitli fiber takviyeli kompozitlerin yorulma diyagramı (Harris,1999,s.216)

Glass fiberlerin yüksek şekil değiştirme oranı ve neme karşı duyarlılığı nedeni ile çekme mukavemetleri şekil değişimine ve sıcaklığa karşı hassastır ve çevrim boyunca yüksek şekil değişimlerinde önemli ölçüde sıcaklık artışı oluşur.

Glass fiber takviyeli kompozitlerin aksine karbon fiber takviyeli kompozitler çalışma durumlarında daha az deforme olurlar ve iyi ısı iletimleri sayesinde sıcaklık artışları önemsenecek düzeyde değildir.

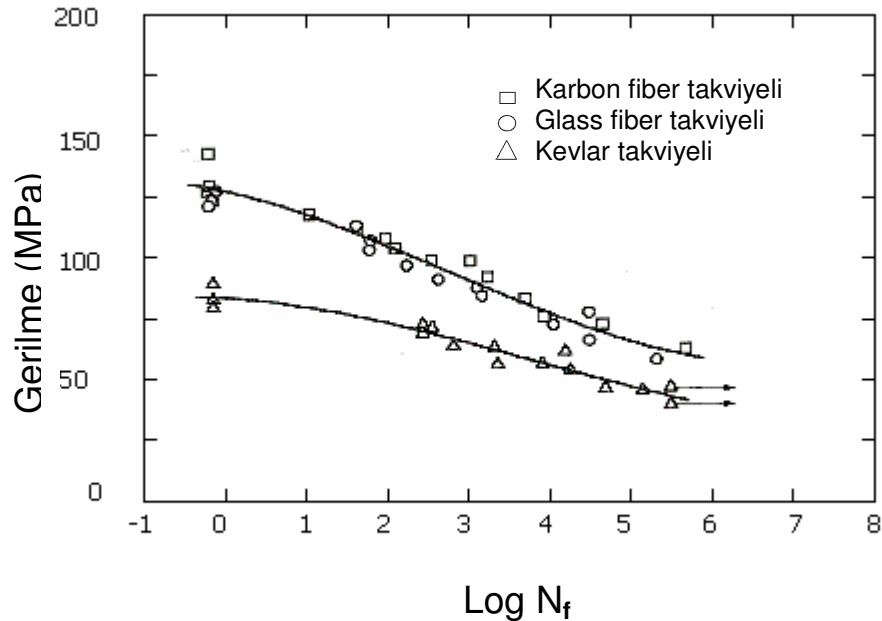
5.3. Yorulma Davranışını Etkileyen Faktörler

5.3.1. Malzeme Çeşidi

Glass , bor ve karbon fiberler gibi gevrek fiberler yorulma durumlarında metallerin zayıf özelliklerini göstermemelidirler. Eğer bu tip fiberlerle takviyeli kompozitlerde fiberler uygulanan yükün büyük bir bölümünü karşılıyorsa fiberler yorulmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Ayrıca takviye fazı, matrikste büyük elastik ve

viskoelastik deformasyonlara izin verecek kadar esnek olmamalıdır. Bu kompozitlerin $\sigma / \log N_f$ eğrileri genellikle düzdür. Çevrim devam ettiğinde reçine içerisinde, rasgele fiber hasarlarına izin veren yerel gerilme yığılmalarına neden olan küçük viskoelastik hareketler meydana gelir ve benzer hasarlar komşu herhangi bir gerilme yığılması bölgesinde de oluşur. Zamanın bir fonksiyonu olarak daha sonra gerilmeler yön değiştirdikçe hasar seviyesi kritik seviyeye ulaşır ve kırılma meydana gelir.

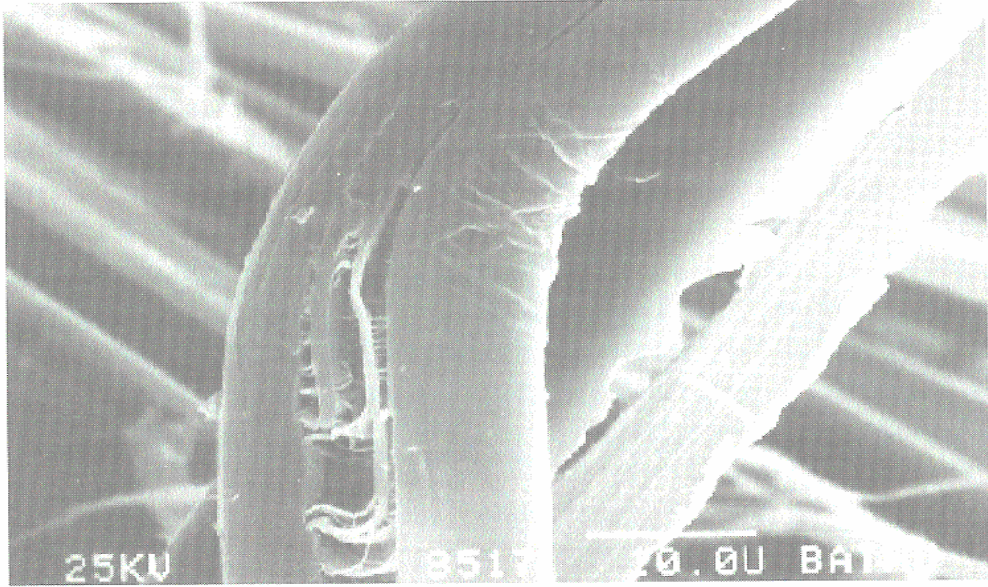
Eğer gerilme basit olarak çekme veya tek eksenli veya fiber doğrultusunda değilse matriks çok çeşitli yüklere maruz kalır ve kompozitin yorulma dayanımı düşer. Bası ve kayma gerilmeleri kevlar fiber takviyeli kompozitlerde, glass ve karbon fiber takviyeli kompozitlere oranla daha fazla hasara neden olurlar. Kevlar takviyeli kompozitlerin kayma düzlemindeki zayıflığı Şekil 5.7 açıkça görülmektedir. Bu tür gerilme durumlarında matriks ve ara yüz kompozitin yorulma davranışında fiberlere nazaran daha büyük rol oynarlar.



Şekil5.7 Fiber doğrultusuna 45°açılı test edilmiş.R = 0,1 RH = %65(Jones,1984)

Kevlar takviyeli kompozitin mikroskopik görüntüsünde (Şekil 5.8) fiberlerin kıvrılması ve yırtılması açıkça görülmektedir.

Burulma testine tabi tutulduğunda , kompozitlerin zayıf bölümleri (reçine ve ara yüz) direkt olarak kesme kuvvetine maruz kalırlar , fiberlerin mukavemeti ve rijitliği yorulma dayanımına nispeten az katkıda bulunur ve malzemenin burulma rijitliği çevrim ilerledikçe düşer. 10^6 çevrimde reçine içeriğindeki değişimler yorulma dayanımını önemli bir şekilde etkilemektedir. Karbon fiber takviyeli kompozitlerde ise reçine özelliğindeki değişimler yorulma dayanımını çok az bir şekilde etkilemektedir. (Owen ve Morris 1970)



Şekil 5.8 Kevlar-49 fiberin yorulma sonucu kırılması ve yırtılması (Fernando,1988)

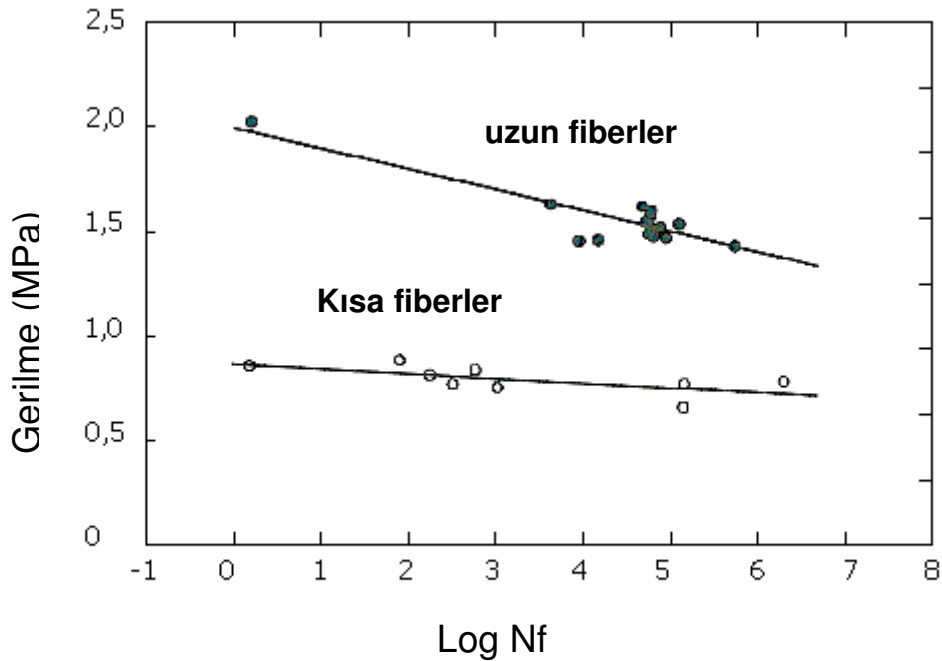
5.3.2. *Fiber Uzunluğu*

Kısa fiber takviyeli kompozitlerin yorulma dayanımı sürekli fiber takviyeli kompozitlere oranla daha düşüktür. Yerel hasarlar matrikste başlar ve fiberlerde herhangi bir hasar olmasa bile kompozitin bütünlüğü zarar görür. Ara yüzdeki kayma gerilmesi her çevrimde yön değiştirdiği ve fiber uçlarında gerilme yığılmaları meydana geldiği için ara yüz, yorulma hasarına karşı daha hassastır. Ayrıca

yönlenmiş ve rasgele yönlenmiş kısa fiber takviyeli kompozitlerde fiberlerin uçları ve zayıf ara yüz yorulma çatlağının başlangıç bölgesi olabilir.

Lomax ve O'Rourke (1966) yaptıkları çalışmada polikarbonatın yorulma ömrünü, içersine hacmen %40 oranında 6,4 mm uzunluğunda glass fiberler kullanarak yedi kat arttırmışlardır. Lavengood ve Gulbransen (1969) kısa bor fiber takviyeli epoksi kompozitinin gerilme-ömür eğrisini çıkartmışlar ve verilen herhangi bir gerilme değerinde yorulma ömrünün , şekil oranının (l/d) 200'e çıkmasıyla ani bir şekilde arttığını görmüşlerdir.

Harris ve arkadaşları (1990) sürekli ve süreksiz fiber takviyeli karbon/epoksi kompozitlerin yorulma davranışlarını incelemişlerdir. (Şekil 5.9) Kısa fiber olarak 3 mm uzunluğunda prepregler kullanılmış olup fiber hacim oranı % 35'dir. Kısa fiber takviyeli kompozitin mukavemet değerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Diğer yandan yorulma davranışını sergileyen eğrinin daha iyi olduğu görülür.



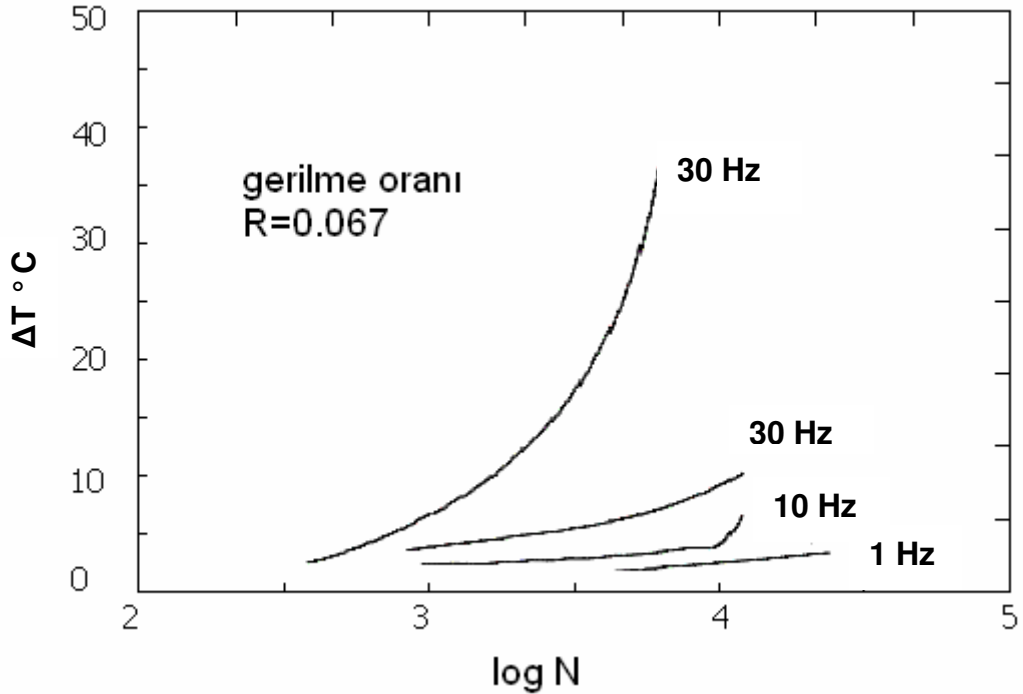
Şekil 5.9 Kısa ve sürekli fiber takviyeli karbon/epoksi kompozitin yorulma eğrisi(Harris,1990)

5.3.3. Test Makinesi ve Numune Etkisi

Yorulma deneyleri için çok çeşitli test cihazları kullanılabilir. Önemli olan test sırasında histeritik ısınmanın neden olacağı aşırı sıcaklıktan kaçınılacak test oranının belirlenmesidir. Bir çok takviyeli plastiğin iletimle ısıyı dağıtma özelliği zayıftır. Polimer malzemelerde , küçük sıcaklık artışları mekanik özelliklerde önemli değişikliklere neden olur. Numune şeklini test edilecek kompozitin doğal yapısı önemli ölçüde etkiler.

5.3.4. Frekans

Testler genellikle numunede aşırı ısınmaya neden olmayacak şekilde mümkün olduğunca yüksek frekansta yapılır. Fakat iyi ısı iletim özeliğine sahip olan karbon fiber takviyeli kompozitlerde bile test boyunca yorulma ömrünü etkileyen histeritik sıcaklık artışı olabilir. Önceden varolan delikler veya çatlakların varlığı tekrarlı yüklemeler sırasında yüksek yerel sıcaklık artışlarına neden olabilir. (Şekil 5.10)



Şekil 5.10 Karbon fiber takviyeli kompozitin farklı frekanslardaki çevrim sonucu oluşan numune ısınması.(Sun ve Chan,1979)

5.3.5. *Çentik ve Delikler :*

Çentik ve deliklerin kompozitin yorulma dayanımı üzerindeki etkisi konusunda kesin bir fikir birliği sağlanamamıştır. Boller (1957,1964) yaptığı araştırmalarda glass fiber takviyeli kompozitlerde keskin çatlakların deliklerden daha tehlikeli olduğu sonuçlarını elde etmiştir. Yapılan bu çalışmada küçük deliklerin uzun ömürlü yorulmada bir etkisi olmadığı da gösterilmiştir.

Owen ve Bishop (1972) deliklerin yorulma hasar başlangıcında etkili olmasına rağmen yorulmanın en son safhasını her zaman etkilemediğini göstermişlerdir. Ayrıca dairesel deliklerin gerilme yığılmasına neden olduğu ve glass fiber takviyeli kompozitlerde yorulma dayanımını 2 veya dört kat azalttığını görmüşlerdir.

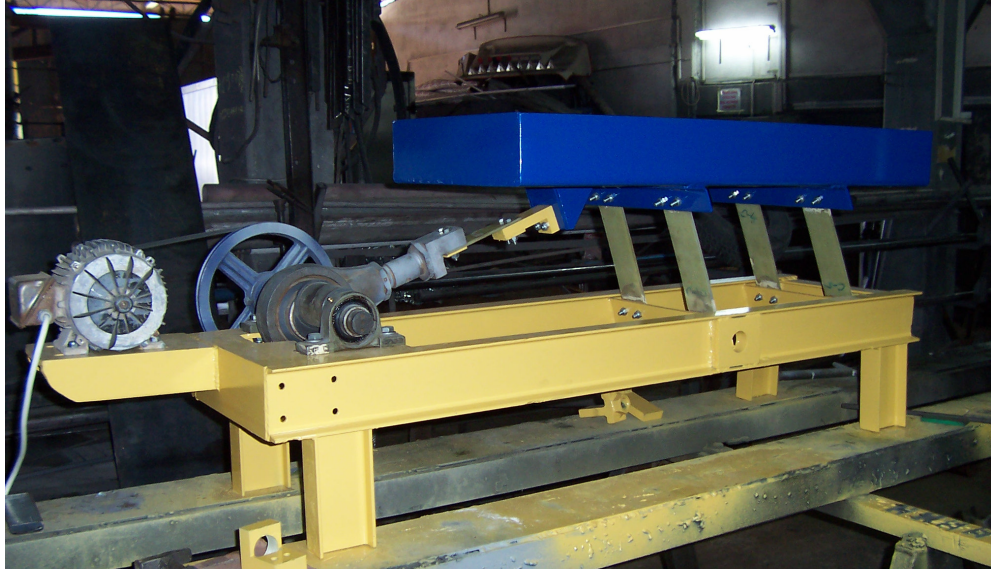
Kompozitlerin homojen olmayan yapısı nedeniyle çatlak durdurma özelliğine sahip olmaları bir çok durumda kırılma mekaniği yaklaşımlarının yorulma testlerine ve tasarımlara uygulanmasını zorlaştırır. Bu zorluk önceden reçine emdirilmiş fiberlerin preslenmesiyle oluşan tek yönlü kompozitlerde ve tabakalarda daha öne çıkar.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMA VE NÜMERİK ANALİZ

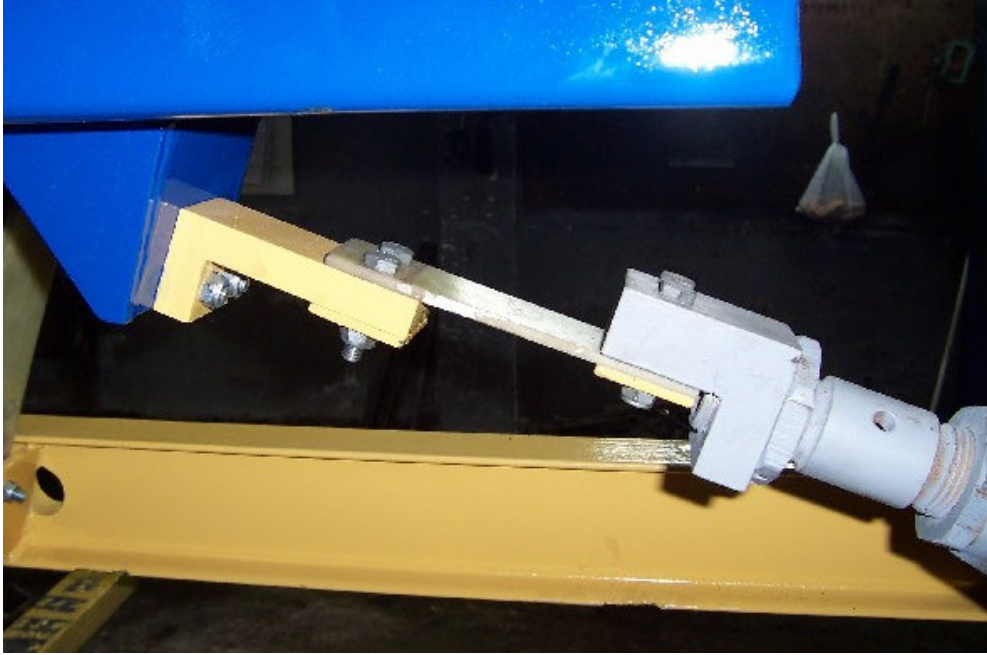
6.1. Problemin Tanımı

Kompozit yaprak yayların kullanım alanlarından Bölüm 4’de genel olarak bahsedilmiştir. Bu çalışmada titreşimli konveyörde krank mili ile tezgah tablası arasında kullanılan ve çeki-bası yüklerine maruz kalan yaprak yay esas olarak alınmıştır. Titreşimli konveyör tezgahı Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Titreşimli konveyör

Tezgah krank mili 1420 d/dak devire ve 1,2 KW güce sahip bir elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. Motor kasnak çapı 120 mm ve krank mili kasnak çapı 300 mm’dir. Böylece krank mili 567 d/dak hızla dönmektedir. Kompozit yaprak yay krank mili ile tezgah tablası arasına yerleştirilip 4 adet M10 cıvata ile bağlanmıştır. Yaprak yay bağlantı detayı Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Kompozit yaprak yay bağlantı detayı

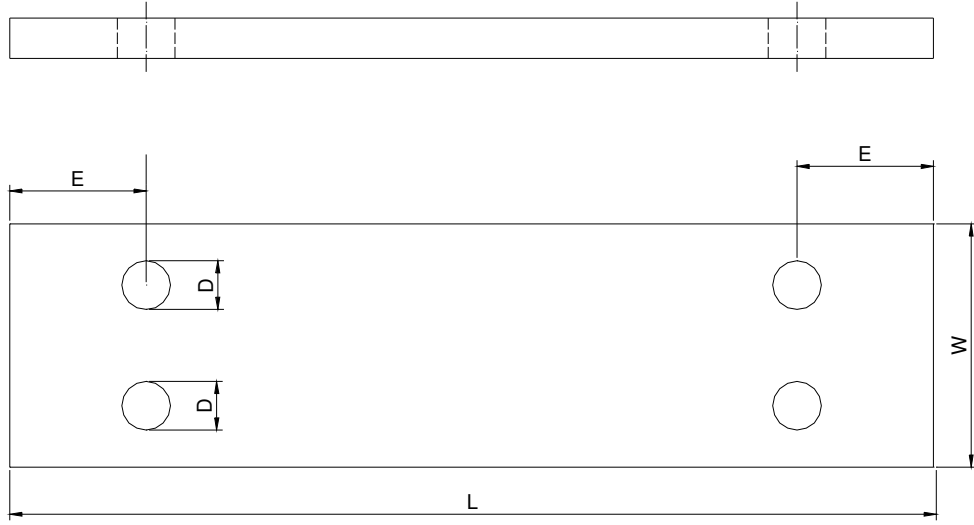
Krank mili ve tezgah tablası arasındaki çalışan yaprak yay çeki ve bası zorlamasına maruz kalmaktadır.

Kompozit yaprak yay $L = 190$ mm uzunluğunda , W genişliğinde ve D delik çapına sahip dikdörtgen şeklindedir. Yay geometrisi Şekil 6.3.'de gösterilmiştir. D delik çapı 10 mm'de sabit tutularak W/D oranı 4 ve 5 olarak ve E/D oranı 1,2,3,4 olarak değiştirilmiştir.

Statik yatak mukavemeti :

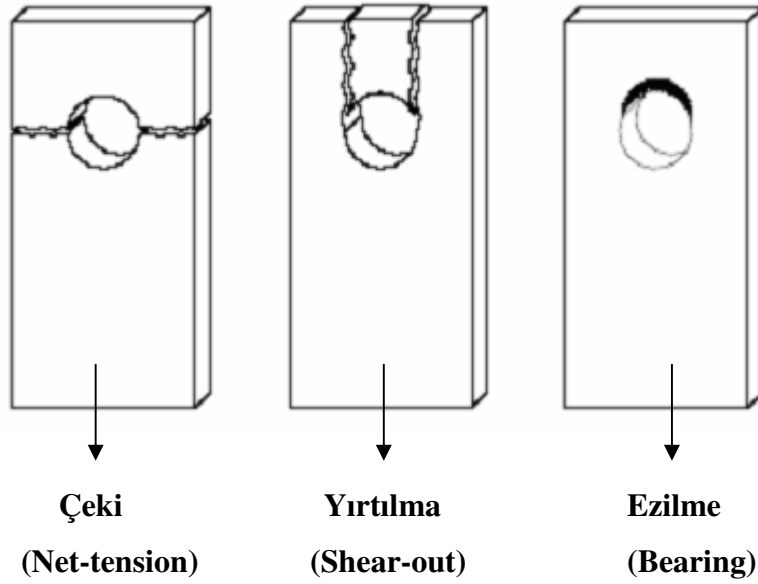
$$\sigma_b = \frac{P}{2D.t} \quad (6.1)$$

formülüyle hesaplanır.



Şekil 6.3 Yay geometrisi

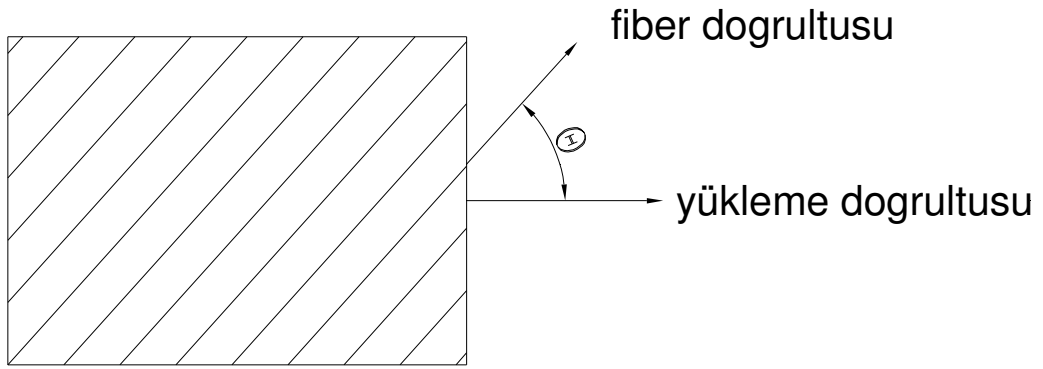
Mekanik olarak sabitlenmiş bağlantılar çeki yüklemesine maruz kaldığında genel olarak hasarlar üç temel hasar modu şeklinde oluşur. Bunlar Çeki (net-tension), yırtılma (shear-out) , ve ezilme (bearing) hasar modudur. Bu hasar modları Şekil 6.4’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Çekmeye maruz kalan mekanik bağlantılarda oluşan hasar tipleri

6.2. Kompozit Yaprak Yayın Üretimi

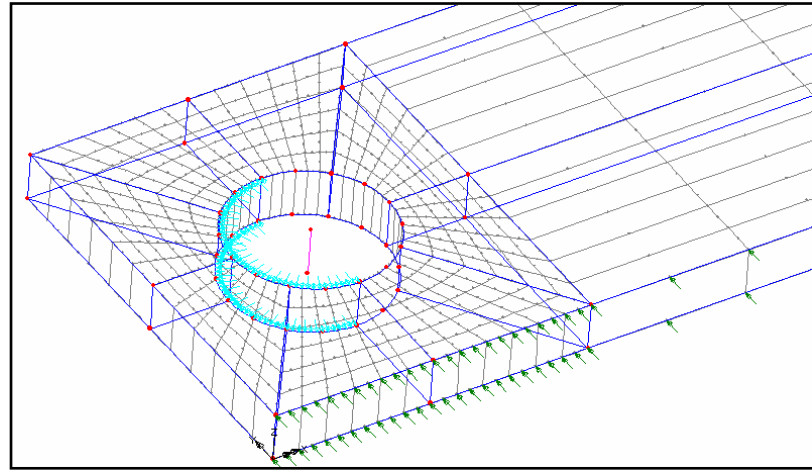
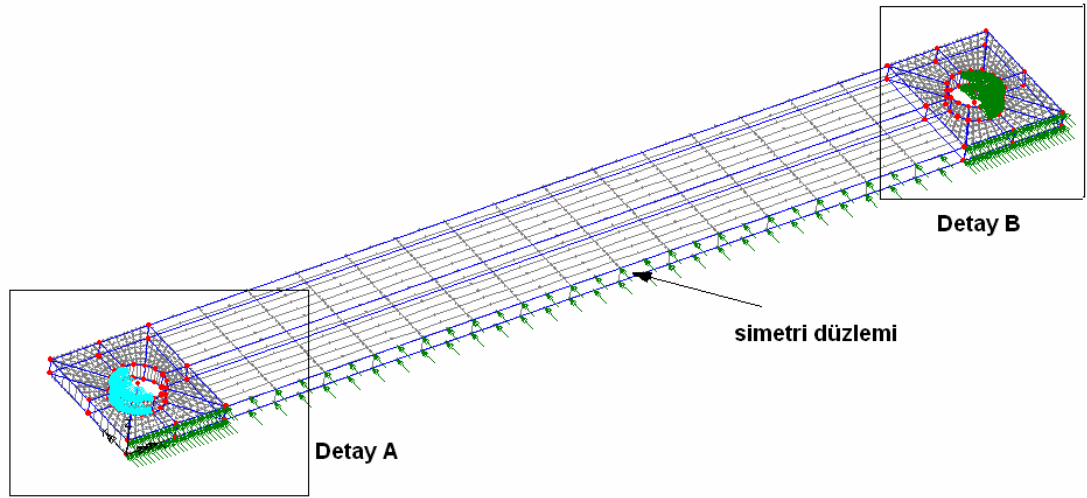
Deneysel çalışmada kullanılan numuneler İzoreel Kompozit Malzemeler firmasında hazırlanmıştır. Numunelerin yarısında tek yönlü E-glass fiberler 0° - 90° yerleştirilerek 8 kattan oluşan yapı elde edilmiştir. Numunelerin diğer yarısında fiberler $\pm 45^{\circ}$ yerleştirilmiştir. Matriks malzemesi olarak da epoksi reçine kullanılmıştır. Sertleşme işlemi 130°C 'de 4 saat boyunca sürmüştür.



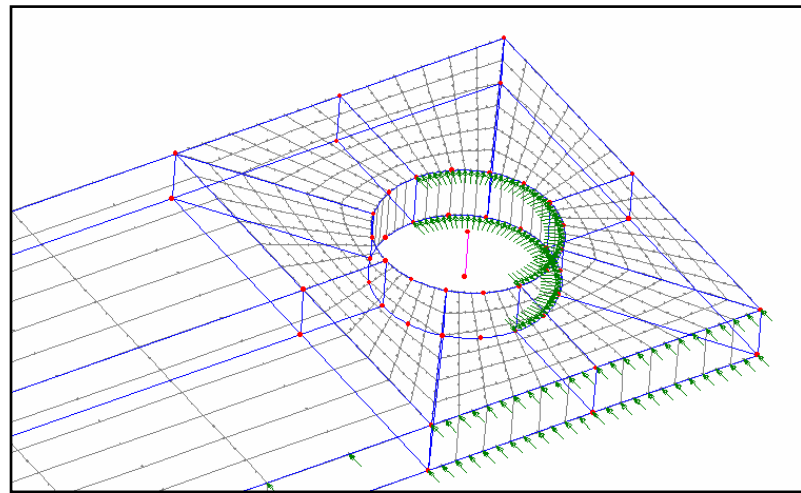
Şekil 6.5. Fiber doğrultusu

6.3. Sonlu Eleman Analizi

Yaprak yayın 3 boyutlu sonlu eleman analizi LUSAS 13.6 analiz programında gerçekleştirilmiştir. Hasar analizi için Hashin hasar kriteri seçilmiştir. Eleman tipi olarak Hexahedral şekle ve Quadratic interpolasyona sahip olan Composite Brick (HX16L) seçilmiştir. Simetrik özelliğinden dolayı, analizi kolaylaştırmak amacı ile yayın yarısı modellenmiştir. (Şekil 6.6) Yarım modelin simetri yüzeyi XZ düzleminde kayar mesnetle sabitlenmiştir. Yayın sağ delik yüzeyi (cıvatanın temas ettiği yüzey) radyal olarak sabitlenmiştir. Diğer delik yüzeyine yayılı yük uygulanmıştır. Problem nonlineer olarak tanımlanmıştır.



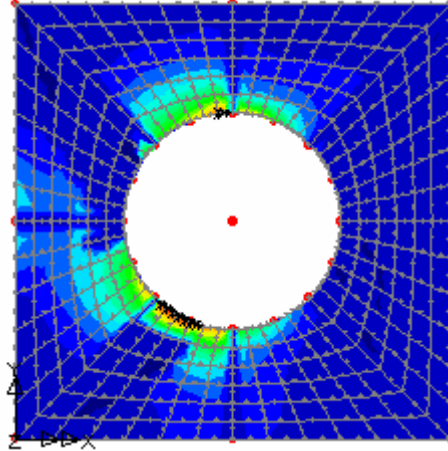
Detay A Yükün uygulandığı delik



Detay B sabitlemenin yapıldığı delik

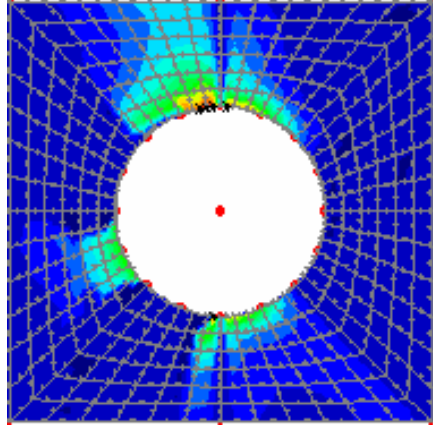
Şekil 6.6 Kompozit yaprak yayın sonlu eleman modeli

LUSAS programında elde edilen analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.



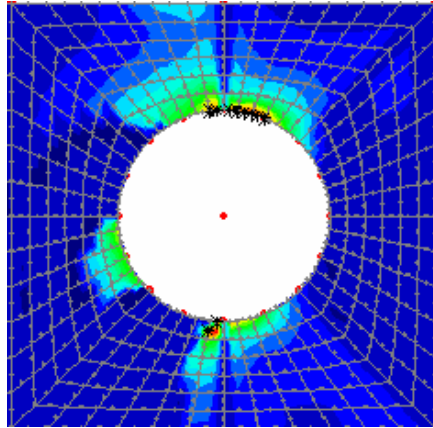
Şekil 6.7 $E/D=1$, $W/D=4$ $\theta = \pm 45^\circ$

$P_{\max} = 1532$ N hasar modu : çeki



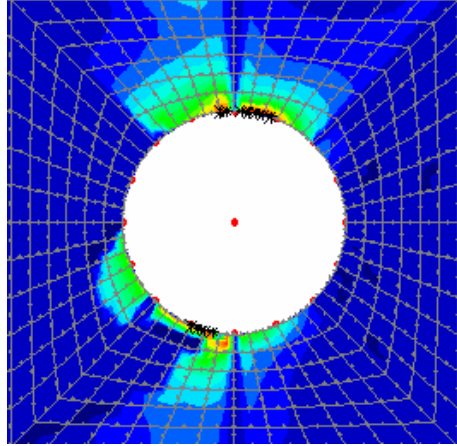
Şekil 6.8 $E/D=2$, $W/D=4$ $\theta = \pm 45^\circ$

$P_{\max} = 1688$ N hasar modu : çeki



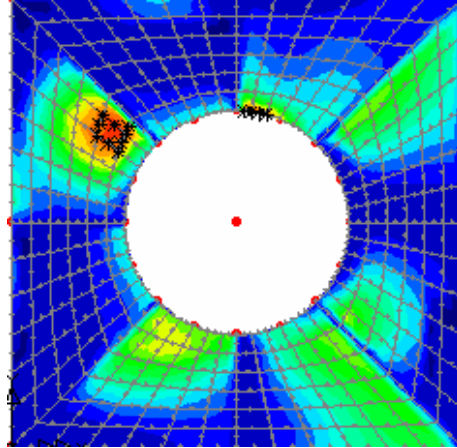
Şekil 6.9 $E/D=3$, $W/D=4$ $\theta = \pm 45^\circ$

$P_{\max} = 1704$ N hasar modu : çeki



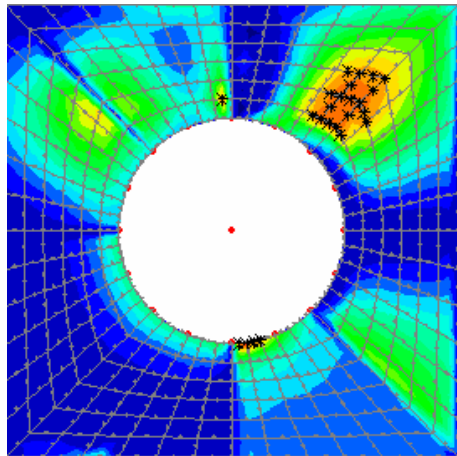
Şekil 6.10 $E/D=4$, $W/D=4$ $\theta = \pm 45^\circ$

$P_{\max} = 1734$ N hasar modu : çeki



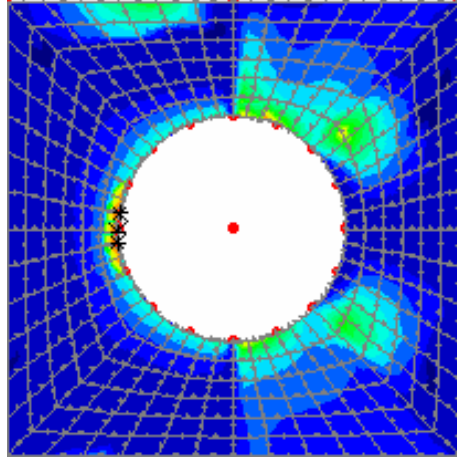
Şekil 6.11 $E/D=1$, $W/D=4$ $\theta = 0^\circ-90^\circ$

$P_{\max} = 3810$ N hasar modu : yırtılma ve çeki



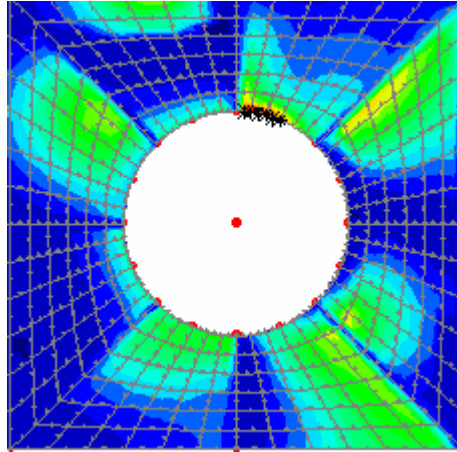
Şekil 6.12 $E/D=2$, $W/D=4$ $\theta = 0^\circ-90^\circ$

$P_{\max} = 4004$ N hasar modu : çeki



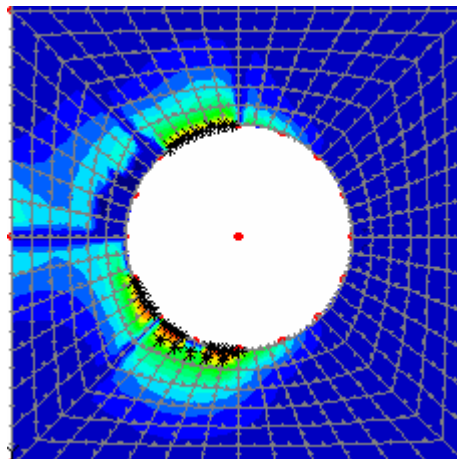
Şekil 6.13 $E/D=3$, $W/D=4$ $\theta = 0^\circ - 90^\circ$

$P_{\max} = 4142$ N hasar modu : ezilme



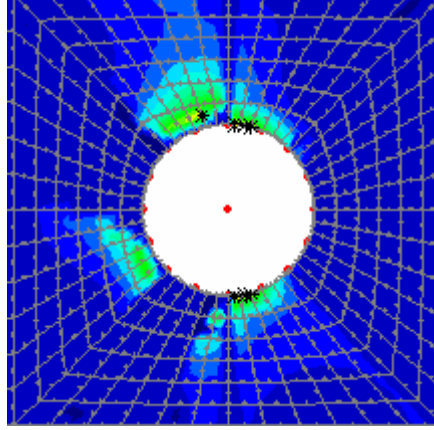
Şekil 6.14 $E/D=4$, $W/D=4$ $\theta = 0^\circ - 90^\circ$

$P_{\max} = 3914$ N hasar modu : çeki



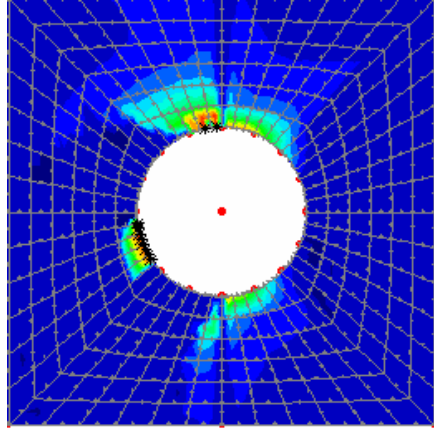
Şekil 6.15 $E/D=1$, $W/D=5$ $\theta = \pm 45^\circ$

$P_{\max} = 1642$ N hasar modu : çeki ve yırtılma



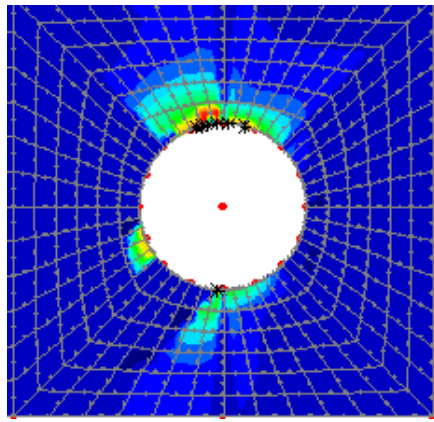
Şekil 6.16 $E/D=2$, $W/D=5$ $\theta = \pm 45^\circ$

$P_{\max} = 2226$ N hasar modu: çeki



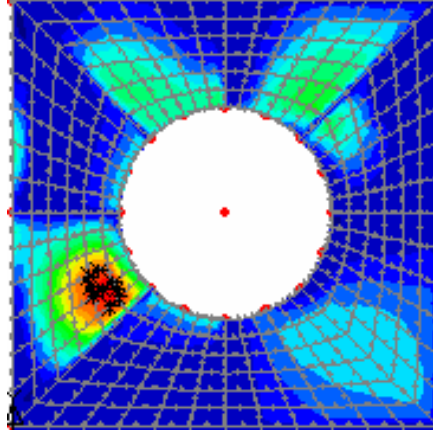
Şekil 6.17 $E/D=3$, $W/D=5$ $\theta = \pm 45^\circ$

$P_{\max} = 2246$ N hasar modu: çeki-
yırılma



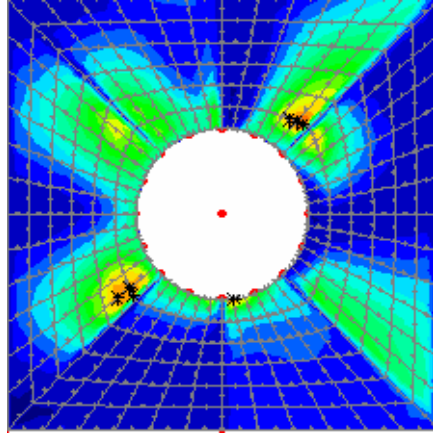
Şekil 6.18 $E/D=4$, $W/D=5$ $\theta = \pm 45^\circ$

$P_{\max} = 2240$ N hasar modu : çeki



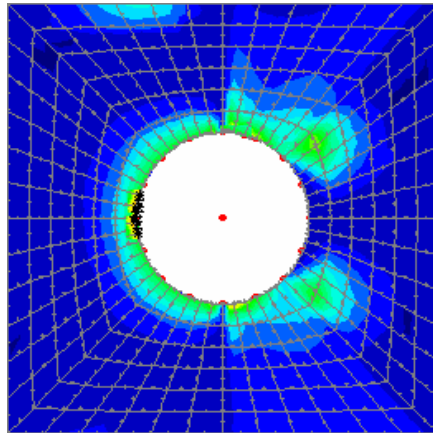
Şekil 6.19 $E/D=1$, $W/D=5$ $\theta = 0^\circ-90^\circ$

$P_{\max} = 3834$ N hasar modu : yırtılma



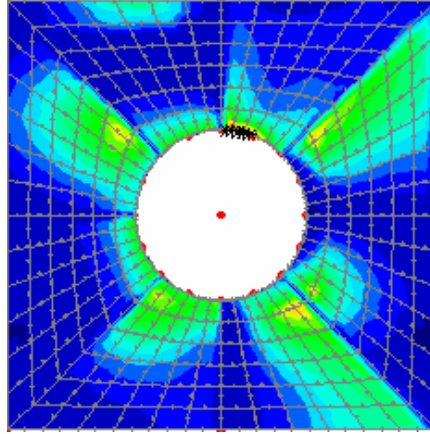
Şekil 6.20 $E/D=2$, $W/D=5$ $\theta = 0^\circ-90^\circ$

$P_{\max} = 4968$ N hasar modu : yırtılma



Şekil 6.21 $E/D=3$, $W/D=5$ $\theta = 0^\circ-90^\circ$

$P_{\max} = 5324$ N hasar modu : ezilme



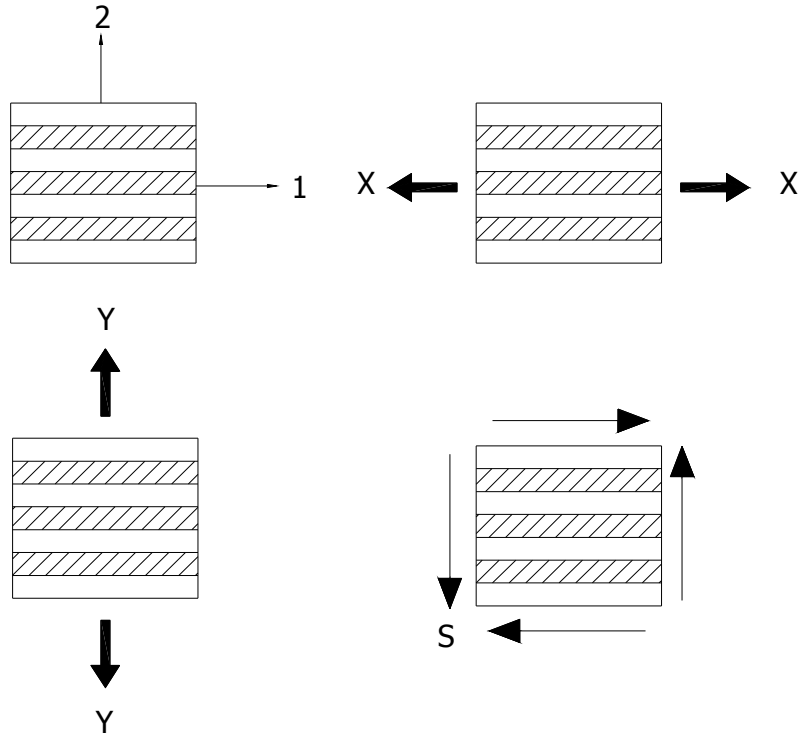
Şekil 6.22 $E/D=4$, $W/D=5$ $\theta =0^\circ-90^\circ$

$P_{\max} = 5054$ hasar modu ;çeki

6.4. Deneyle

6.4.1. Deneyle Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Tespiti

Kompozit malzemeler ortotropik malzemelerdir yani mekanik özellikleri yöne bağlı olarak değişir. Tek yönlü tabakanın temel mukavemetleri Şekil 6.23'de gösterilmiştir



Şekil 6.23 Tek yönlü tabakalı kompozit mukavemetleri

E_1 = 1 doğrultusunda elastisite modülü

E_2 = 2 doğrultusunda elastisite modülü

X = 1 doğrultusunda mukavemet

Y = 2 doğrultusunda mukavemet

G_{12} = 1-2 düzleminde kayma modülü

ν_{12} = Poisson oranı

Kompozit malzemelerin çoğu, bası ve çekide farklı özellikler sergilerler. Bu nedenle bası ve çeki özelliklerinin ayrı ayrı tanımlanması gerekir.

X_t = 1 doğrultusunda çeki mukavemeti

X_c = 1 doğrultusunda bası mukavemeti

Y_t = 2 doğrultusunda çeki mukavemeti

Y_c = 2 doğrultusunda bası mukavemeti

S = 1-2 düzlemindeki kayma mukavemeti

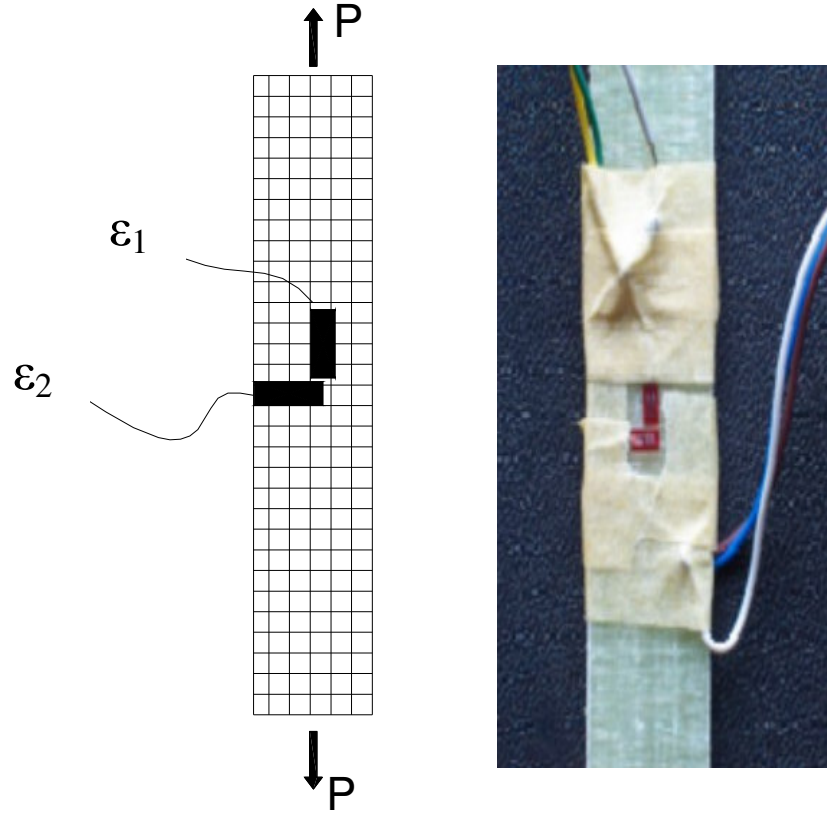
6.4.1.1. Fiber Doğrultusunda Çekme Deneyi

Mühendislik sabitlerinin tespit edilmesi için fiber (1) doğrultusunda çekme deneyi yapılır. (Şekil 6.24) Fiber doğrultusunda yerleştirilen strainauge'den ϵ_1 değeri fibere dik doğrultuya yerleştiren strainauge'den ise ϵ_2 değeri elde edilir.

$$\sigma_1 = \frac{P}{A}, \quad \sigma_{kopma} = \frac{P_{kopma}}{A} = X \quad (6.2)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} \quad (6.3)$$

$$\nu_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (6.4)$$



Şekil 6.24 Fiber doğrultusunda yapılan çekme deneyi

6.4.1.2. Kayma Modülünün (G_{12}) Deneysel Tespiti

Kayma modülünün tespiti için 45° off-axis testi gerçekleştirilir. (Şekil 6.25)

$$\sigma_x = \frac{P_x}{A} \quad (6.5)$$

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x} \quad (6.6)$$

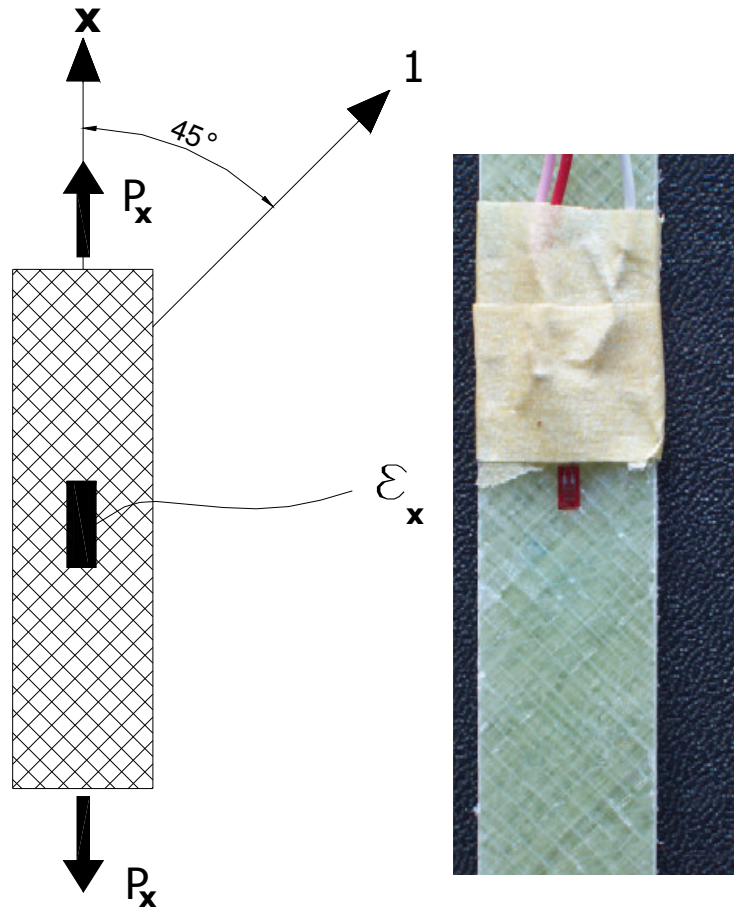
$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_1} \cos^4 \theta + \left[\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{E_2} \sin^4 \theta \quad (6.7)$$

Deney numunesinde fiber doğrultusu ile yükleme doğrultusu arasında 45° açı vardır. Denklem (6.7) da $\theta = 45^\circ$ yazıldığında ;

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{E_1} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} + \frac{1}{E_2} \right] \quad (6.8)$$

Değerler yerine konulup G_{12} çekildiğinde ;

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_x} - \frac{1}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{E_2}} \quad \text{olur.} \quad (6.9)$$



Şekil 6.25 45° offaxis testi

6.4.1.3. Kayma Mukavemeti (S) Tespiti

Kayma mukavemetinin bulunması için Iosipescu test metodu kullanılmıştır. Bu testte kullanılan numunenin boyutları Şekil 6.26.de gösterilmiştir.

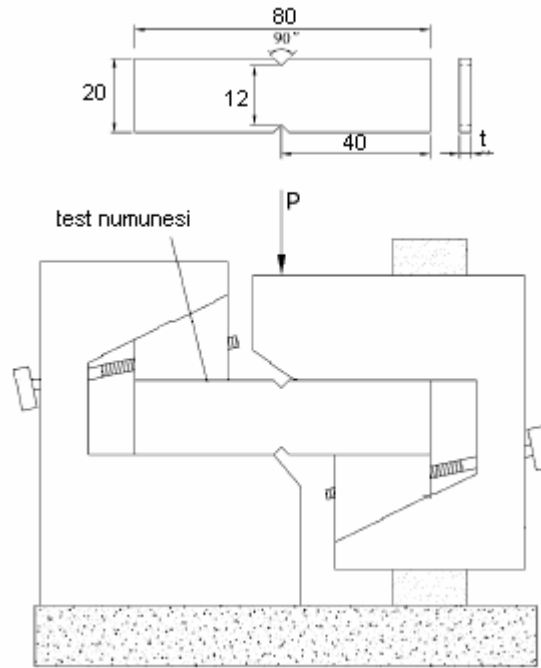
$$S = \frac{P_{max}}{t.c} \quad (6.10)$$

P_{max} = hasar yükü

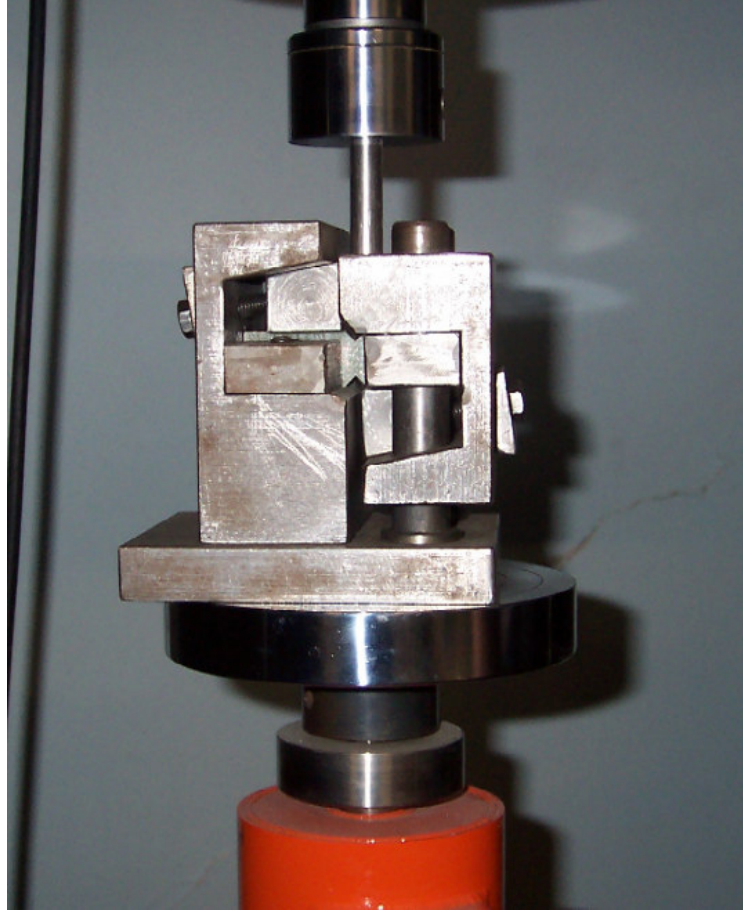
t = kalınlık(3 mm)

c = 12 mm

Denklem (6.10) kullanılarak S bulunur.



Şekil 6.26 Iosipescu testi şematik gösterimi



Şekil 6.27 Iosipesco testi

Kompozit yaprak bidirectional yapıya sahiptir ve her iki doğrultuda da (x ve y doğrultusu) mekanik özellikleri aynıdır

Test sonuçlarında elde edilen mekanik özellikler Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

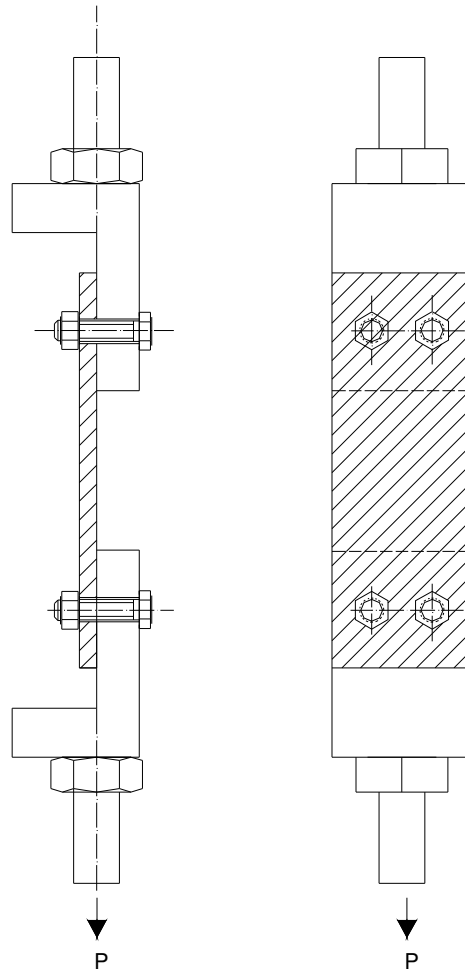
Tablo 6.1. Numunelerin mekanik özellikleri

$E_1=E_2$ (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	$X_t = Y_t$ (MPa)	$X_c = Y_c$ (MPa)	S (MPa)
23070	4630	0,05	398	313	77

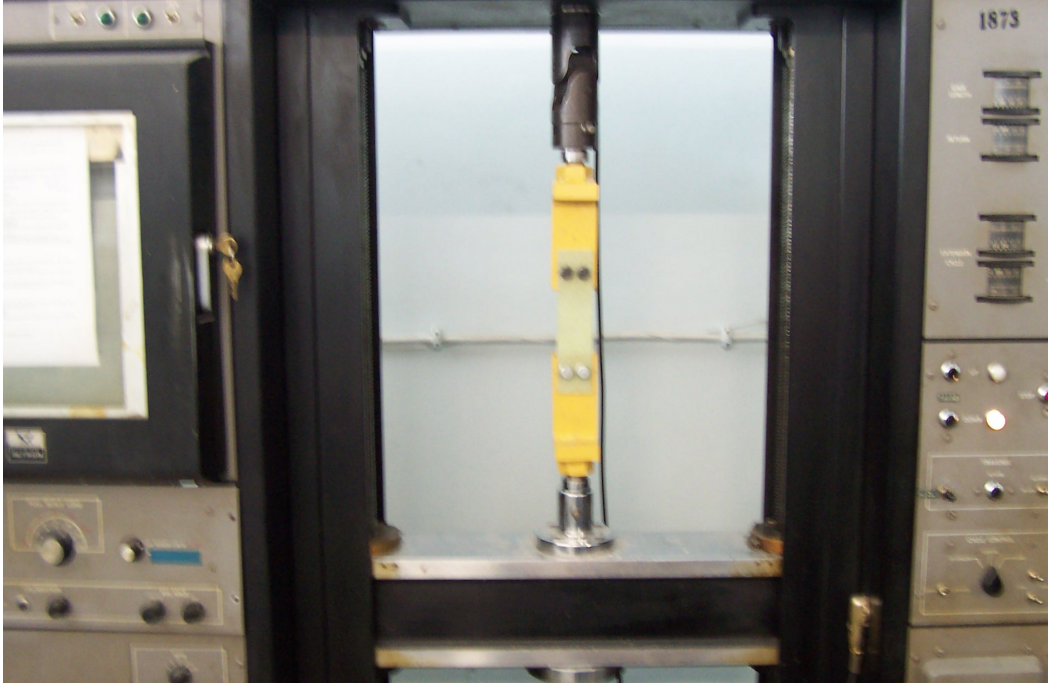
6.4.2. Hasar Yükünün Deneysel Olarak Tespiti

Kompozit yaprak yayın hasar yüklerini ve hasar modlarını tespit edebilmek için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan Instron makinesinde gerçekleştirilmiştir. 20 kN kapasiteli bu makinede deneyler 0.5 mm/dak hızla gerçekleştirilmiştir. Her geometri ile ilgili üç adet deney yapıp bu deneylerin ortalaması baz alınmıştır.

D delik çapı , t kalınlık ve L uzunluk ölçüsü sabit tutularak W/D oranı 5 ve 4 ayrıca E/D oranı 1,2,3,4 olarak değiştirilmiştir. Bağlantı şekli Şekil 6.28’da gösterilmiştir.

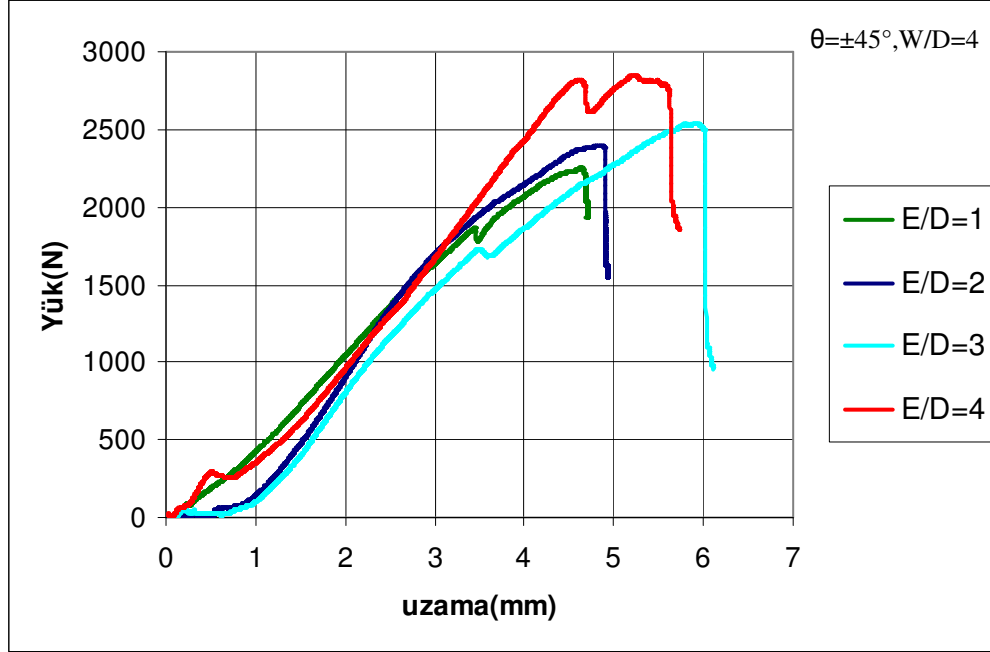


Şekil 6.28. Yaprak yayın test düzeneğine bağlantı şekli

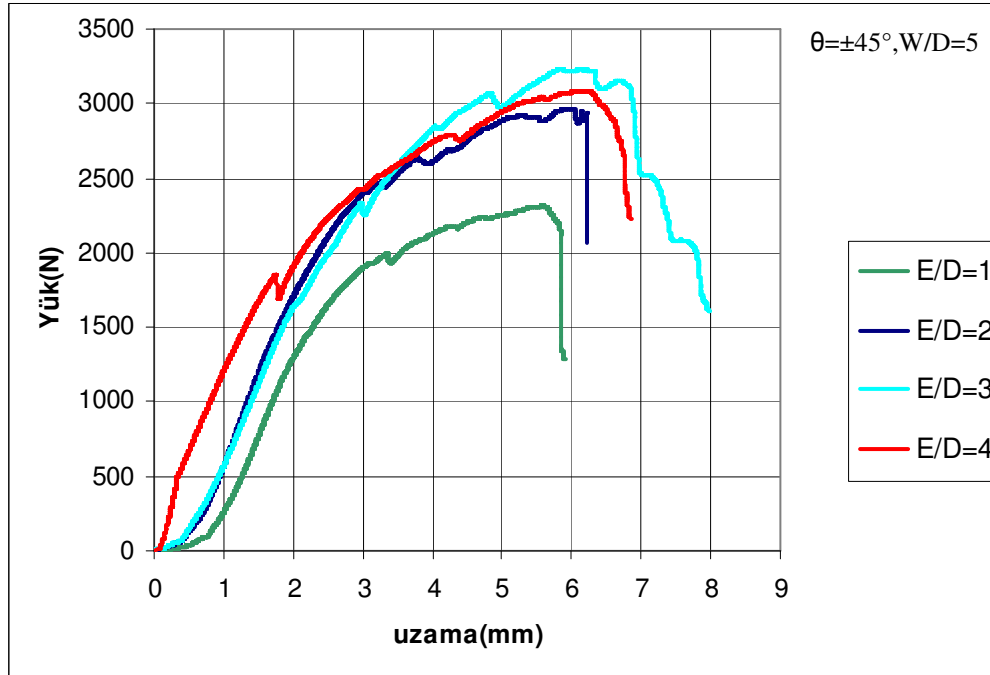


Şekil 6.29. Numunelerin test cihazına bağlanması

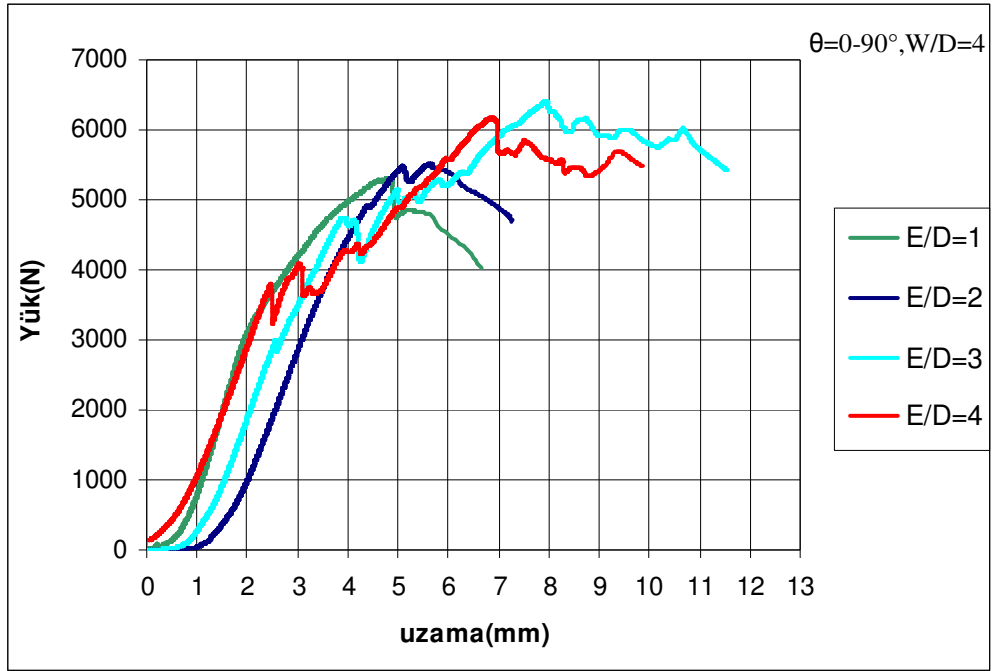
Deneysel çalışmada her numune, hasar meydana gelene kadar yüklenmiştir. Numunelerin genel davranış biçimleri yük/uzama grafiklerinde görülmektedir.



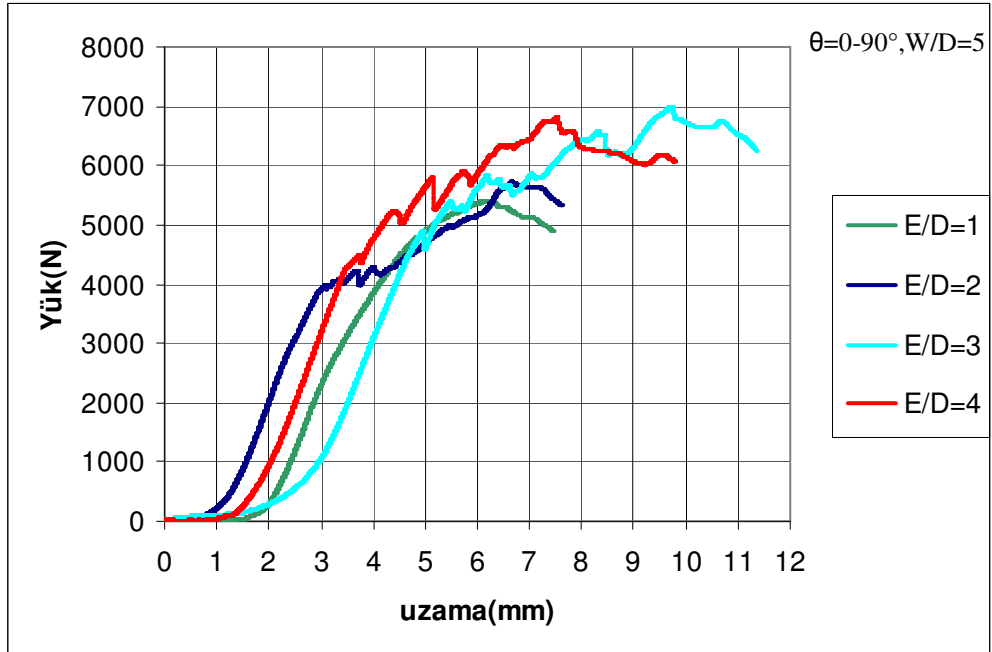
Şekil 6.30 $\theta = \pm 45^\circ$ kompozitin $W/D=4$ durumu için yük – uzama grafiği



Şekil 6.31 $\theta = \pm 45^\circ$ kompozitin $W/D=5$ durumu için yük – uzama grafiği



Şekil 6.32 $\theta = 0^\circ-90^\circ$ kompozitin $W/D = 4$ durumu için yük – uzama grafiği



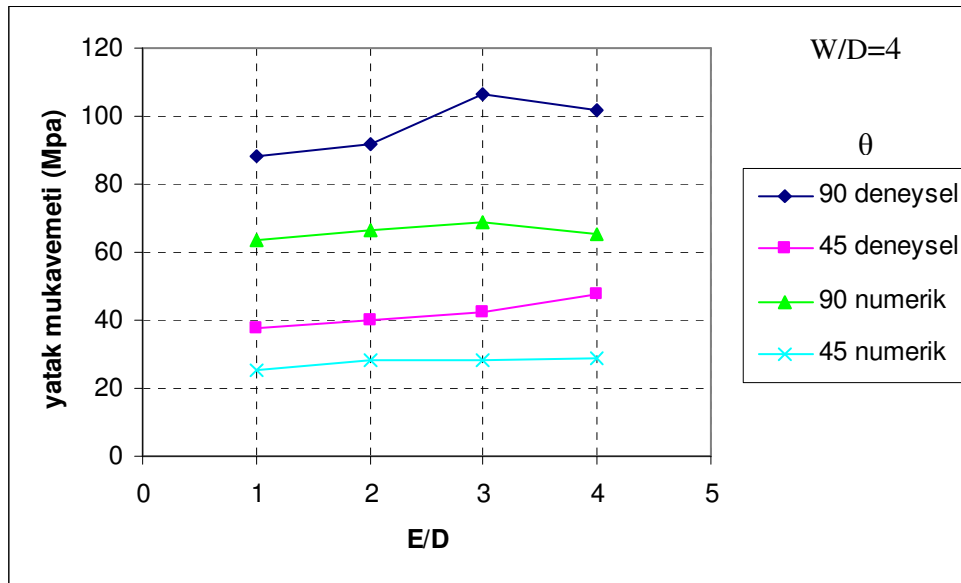
Şekil 6.33 $0^\circ-90^\circ$ kompozitin $W/D = 5$ durumu için yük – uzama grafiği

İlk hasar oluşuncaya kadar yük-uzama eğrilerinin genellikle lineer olarak arttığı görülmüştür. Grafiklerde üç temel eğri görülmektedir. Bunlardan ilki çeki hasar moduna karşılık gelen eğridir. Bu eğride yük belirli bir değere kadar çıkar ve aniden

kırılma meydana gelir. Bu hasar çeşidi en tehlikeli olanıdır. Diğer bir eğri çeşidinde de yük maksimum noktasına ulaşır daha sonra yük azalırken deplasman artmaya devam eder ve yırtılma meydana gelir. Bu eğri ise yırtılma hasar moduna karşılık gelir. Son eğri çeşidinde de ilk hasar meydana geldikten sonra yük artarken aynı zamanda deplasman da artmaya devam eder. Yük maksimum noktaya ulaşır ve bunu takiben yük düşerken deplasman artar. Fakat parça hala yük taşımaya devam eder. Bu hasar modu ise ezilme hasar modudur.

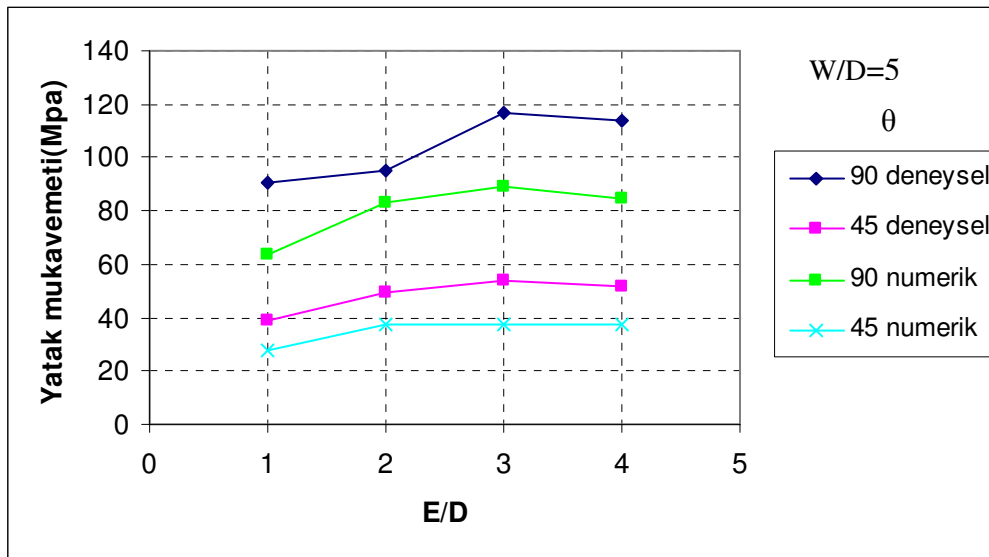
$\pm 45^\circ$ kompozitin $W/D=4$ durumunda nümerik sonuçlar incelendiğinde yatak mukavemeti E/D oranı artıkça artmaktadır. (Şekil 6.34) Deneysel sonuçlar incelendiğinde E/D oranı artıkça yatak mukavemetindeki artış nümerik sonuçlara göre daha fazladır. (Şekil 6.34) $E/D=1$ için yırtılma ve çeki bileşik hasar modu $E/D=2$, $E/D=3$ ve $E/D=4$ için çeki hasar moduna dönüşmektedir. (Şekil 6.30)

$0^\circ-90^\circ$ kompozitin $W/D = 4$ durumunda hem deneysel hem de nümerik sonuçlar açısından $E/D=4$ kritik durumdur. $E/D=4$ olduğunda yatak mukavemeti düşmektedir. (Şekil 6.34) Yatak mukavemetindeki değişim miktarı deneysel sonuçlarda daha fazla olmaktadır. $E/D=1$ ve $E/D=2$ için hasar modu yırtılmadır. $E/D=3$ ve $E/D=4$ için hasar modu ezilmeye dönüşür. (Şekil 6.32)



Şekil 6.34 $W/D=4$ durumunda $0-90^\circ$ ve $\pm 45^\circ$ kompozitin E/D değişiminin deneysel ve nümerik olarak yatak mukavemetine etkisi

$\pm 45^\circ$ kompozitin $W/D=5$ durumunda $E/D=4$ kritik durumdur. (Şekil 6.35) $E/D=4$ için yatak mukavemeti düşer. $E/D=1$ için hasar modu yırtılma ve çeki bileşke modudur. (Şekil 6.31) . $E/D = 2$, $E/D = 3$ ve $E/D = 4$ için hasar modu ezilme ve çeki bileşke hasar moduna dönüşür. Yatak mukavemetindeki değişim miktarı nümerik sonuçlarda çok fazla olmamaktadır.



Şekil 6.35 $W/D=5$ durumunda $0-90^\circ$ ve $\pm 45^\circ$ kompozitin E/D değişiminin deneysel ve nümerik olarak yatak mukavemetine etkisi

$0^\circ-90^\circ$ kompozitin $W/D=5$ durumunda $E/D = 4$ kritik durumdur.(Şekil 6.35) $E/D=4$ olduğunda yatak mukavemeti düşer. $E/D=1$ ve $E/D=2$ için hasar modu yırtılmadır. $E/D=3$ ve $E/D=4$ için hasar modu ezilmeye dönüşür. (Şekil 6.33)

$0^\circ-90^\circ$ ve $\pm 45^\circ$ kompoziti için her E/D oranında W/D oranı arttıkça yatak mukavemeti artmaktadır.

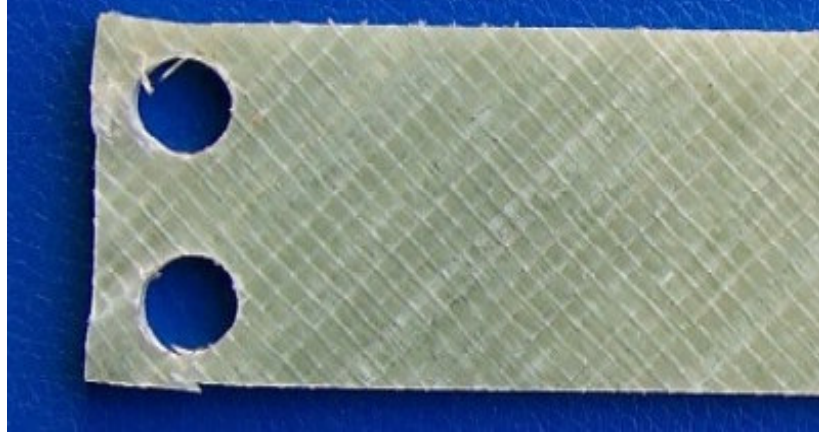
Fiber yönlenme açısı olan θ açısı $\pm 45^\circ$ olduğu tüm durumlarda yatak mukavemeti $0^\circ-90^\circ$ olduğu durumlardan düşüktür.

Deneysel ve analiz sonuçlarından elde edilen hasar modları ve hasar yükleri Tablo6.2'de verilmiştir.

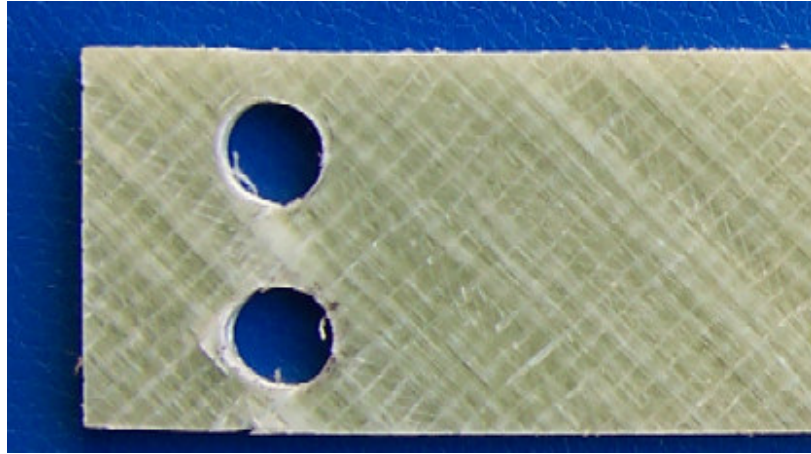
Tablo 6.2 Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması Ç: çeki hasar, Y : yırtılma hasarı ezilme hasarı

W/D =4	θ^0	Hasar modu		Hasar yükü (N)	
		Deneysel	Hashin	Deneysel	Hashin
E/D=1	0-90	Y	Y-Ç	5303	3810
	± 45	Y-Ç	Ç	2248	1532
E/D=2	0-90	Y	Ç	5522	4004
	± 45	Ç	Ç	2394	1688
E/D=3	0-90	E	E	6385	4142
	± 45	Ç	Ç	2540	1704
E/D=4	0-90	E	Ç	6112	3914
	± 45	Ç	Ç	2846	1734
W/D=5	θ^0				
E/D=1	0-90	Y	Y	5415	3834
	± 45	Y-Ç	Ç	2316	1642
E/D=2	0-90	Y	Y	5722	4968
	± 45	E-Ç	Ç	2966	2226
E/D=3	0-90	E	E	7003	5324
	± 45	E-Ç	Y-Ç	3326	2246
E/D=4	0-90	E	Ç	6811	5054
	± 45	E-Ç	Ç	3082	2240

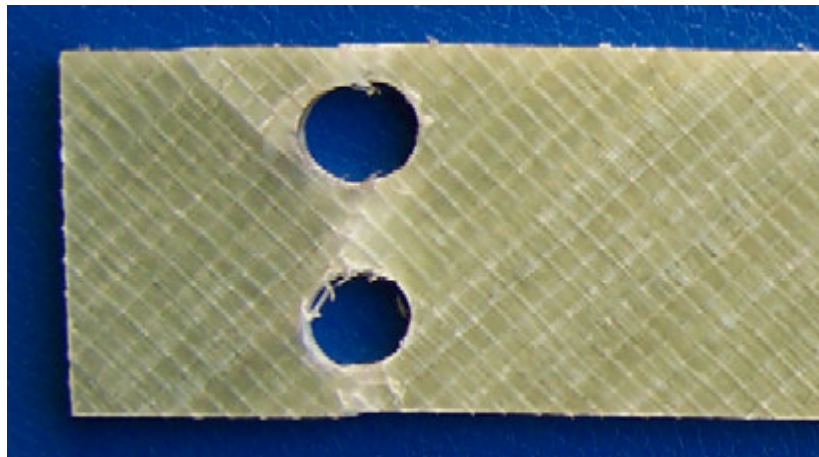
Şekil 6.36'den Şekil 6.51'a kadar deney numunelerinin hasar sonrası resimleri görülmektedir



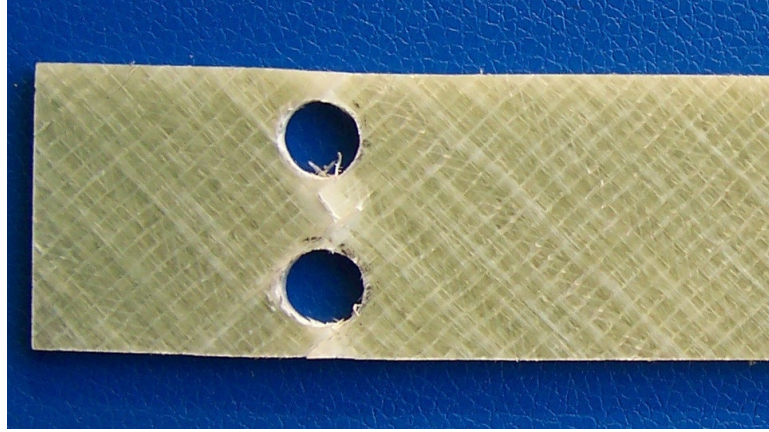
Şekil 6.36. $E/D=1$, $W/D=4$ $\theta = \pm 45^\circ$ $P_{\max} = 2248$ N hasar modu : yırtılma ve çeki



Şekil 6.37. $E/D=2$, $W/D=4$ $\theta = \pm 45^\circ$ $P_{\max} = 2394$ N hasar modu : çeki



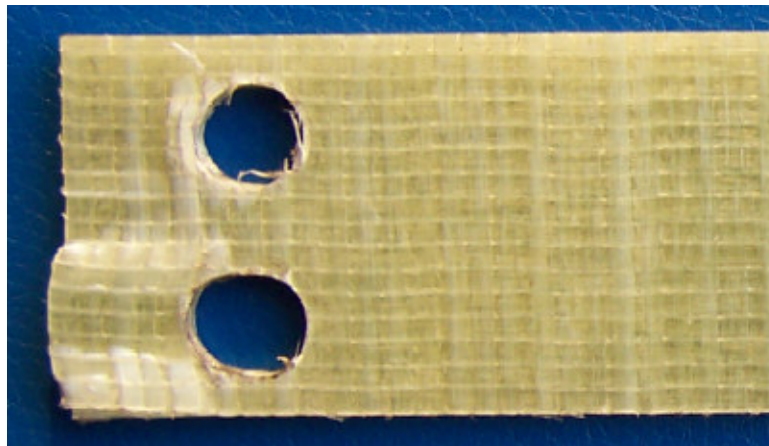
Şekil 6.38. $E/D=3$, $W/D=4$ $\theta = \pm 45^\circ$ $P_{\max} = 2540$ N hasar modu : çeki



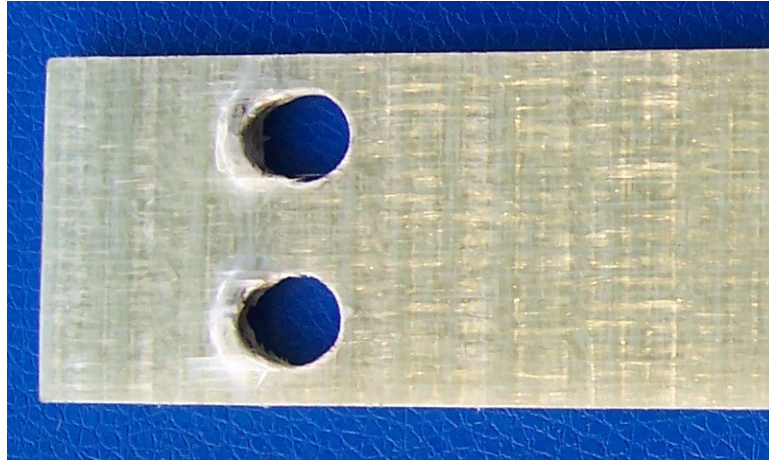
Şekil 6.39. $E/D=4$, $W/D=4$ $\theta = \pm 45^\circ$ $P_{\max} = 2846$ N hasar modu : çeki



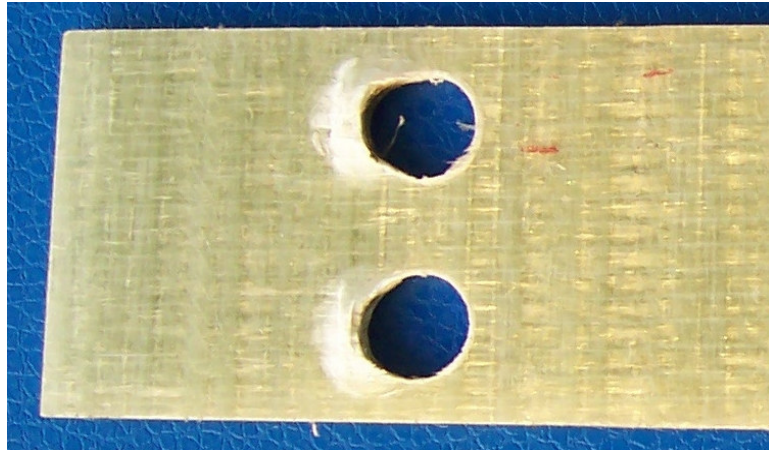
Şekil 6.40. $E/D=1$, $W/D=4$ $\theta = 0 - 90^\circ$ $P_{\max} = 5303$ N hasar modu : yırtılma



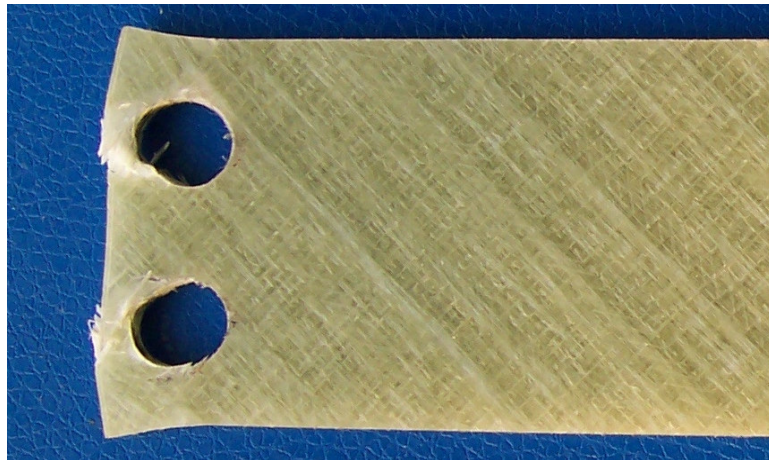
Şekil 6.41. $E/D=2$, $W/D=4$ $\theta = 0-90^\circ$ $P_{\max} = 5522$ N hasar modu : yırtılma



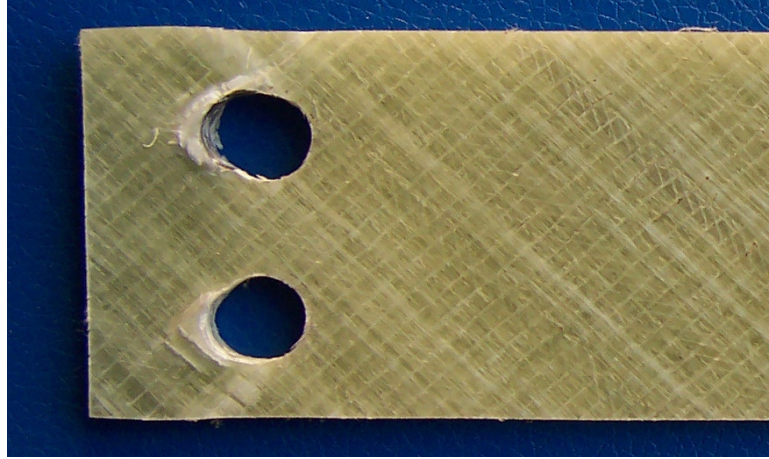
Şekil 6.42. $E/D=3$, $W/D=4$ $\theta=0-90^\circ$ $P_{\max} = 6385$ N hasar modu : ezilme



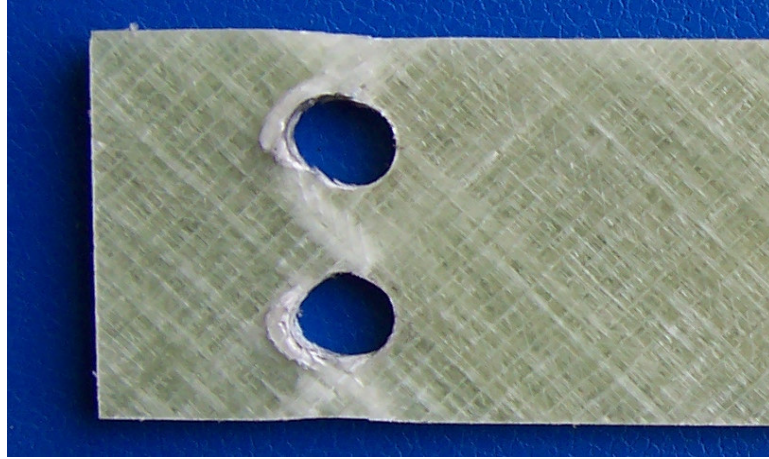
Şekil 6.43. $E/D=4$, $W/D=4$ $\theta=0-90^\circ$ $P_{\max} = 6112$ N hasar modu : ezilme



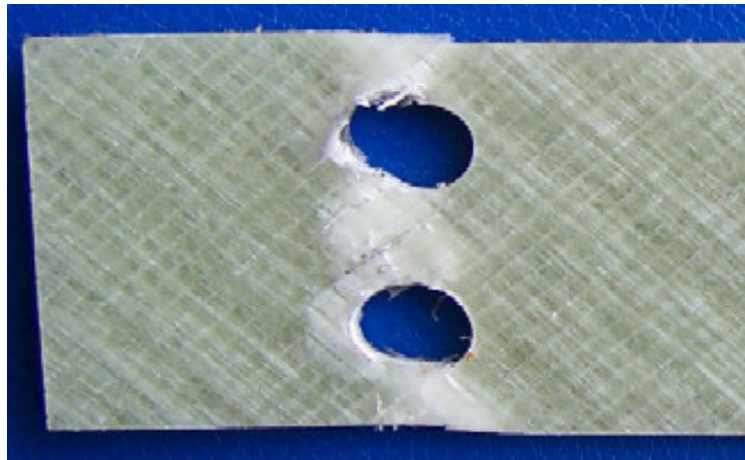
Şekil 6.44. $E/D=1$, $W/D=5$ $\theta= \pm 45^\circ$ $P_{\max} = 2316$ N hasar modu : çeki ve yırtılma



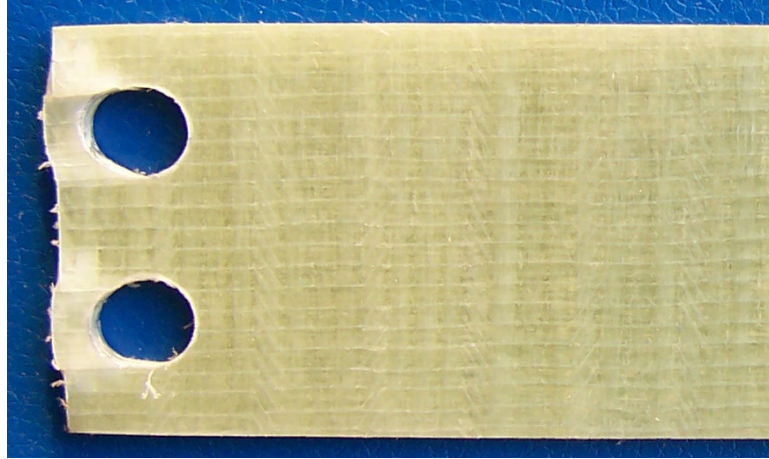
Şekil 6.45. $E/D=2$, $W/D=5$ $\theta = \pm 45^\circ$ $P_{max} = 2966$ N hasar modu : çeki ve ezilme



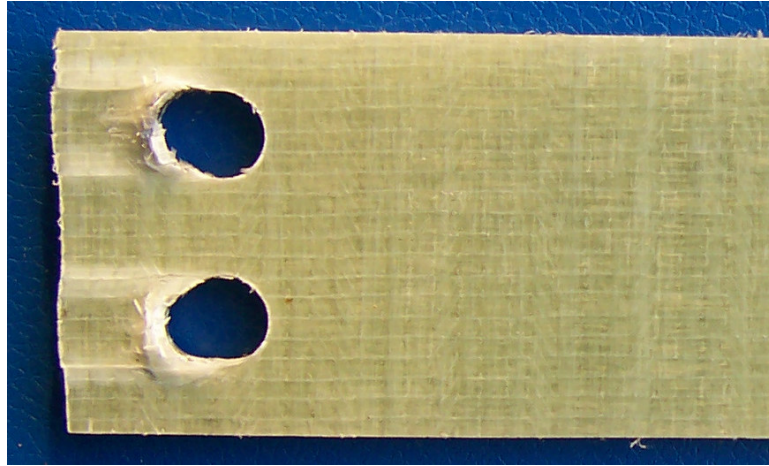
Şekil 6.46. $E/D=3$, $W/D=5$ $\theta = \pm 45^\circ$ $P_{max} = 3236$ N hasar modu : çeki ve ezilme



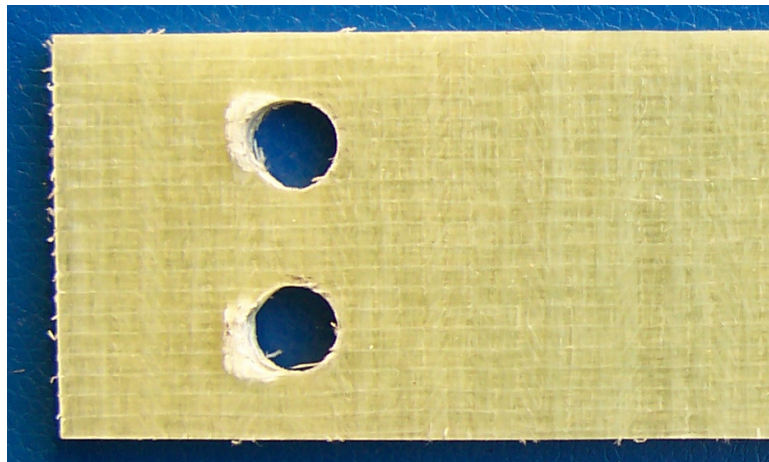
Şekil 6.47. $E/D=4$, $W/D=5$ $\theta = \pm 45^\circ$ $P_{max} = 3082$ N hasar modu : çeki ve ezilme



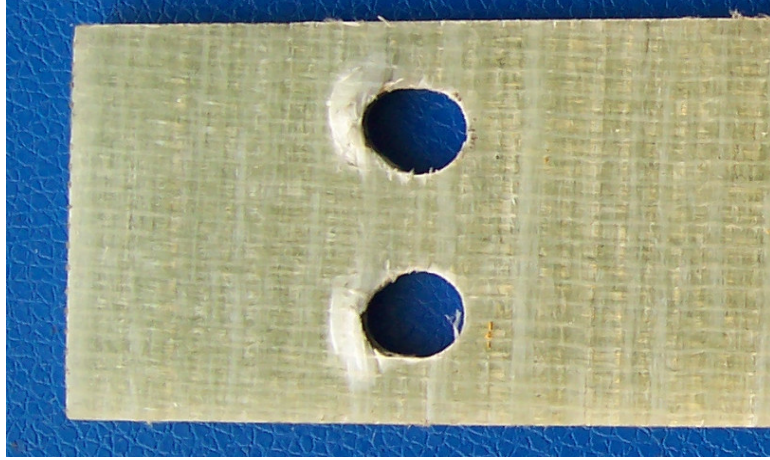
Şekil 6.48. $E/D=1$, $W/D=5$ $\theta=0-90^\circ$ $P_{\max} = 5415$ N hasar modu : yırtılma



Şekil 6.49. $E/D=2$ $W/D=5$ $\theta=0-90^\circ$ $P_{\max} = 5722$ N hasar modu : yırtılma



Şekil 6.50. $E/D=3$ $W/D=5$ $\theta=0-90^\circ$ $P_{\max} = 7003$ N hasar modu : ezilme



Şekil 6.51. E/D4 W/D=5 $\theta=0-90^\circ$ $P_{\max} = 6811$ N hasar modu : ezilme

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada titreşimli konveyör tezgahlarında krank mili ile tezgah tablası arasında bulunan, tezgah tablasının ileri-geri hareketini sağlayan ve çeki-bası yüklerine maruz kalan E-glass/epoksi kompozitinden imal edilen yaprak yayların hasar yükleri ve hasar modları deneysel ve sonlu eleman analizi ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda üç farklı hasar türü de görülmüştür .Bazı numunelerde bu hasar türlerinin kombinasyonu şeklinde de hasar oluşmuştur. En tehlikeli hasar türü çeki hasarıdır. Kopma birden meydana geldiği için uygulamada elemanlar aniden görevini yerine getiremez duruma düşecektir. Ezilme hasar türünde ise ilk hasar oluşsa bile eleman yük taşımaya devam eder.

- 0-90° fiber açısına sahip numunelerde $W/D = 4$ için $E/D = 4$ durumu kritiktir.(Şekil 6.34) $E/D = 4$ olduğu zaman yatak mukavemetinde düşme gözlenmektedir.
- $\pm 45^\circ$ fiber açısına sahip numunelerde $W/D = 4$ durumu için E/D oranı arttıkça yatak mukavemeti artmaktadır. $W/D = 4$ durumunda bütün E/D oranlarında hasar türü çeki hasarıdır. Delik yüzeyi ile numune yan yüzeyi arasında mesafe az olduğu için hasarlar burada oluşmaktadır.
- 0-90° fiber açısına sahip numunelerde $W/D = 5$ için $E/D = 4$ durumu kritiktir.(Şekil 6.35) $E/D = 4$ oranından sonra yatak mukavemetinde azalma görülmektedir.
- $\pm 45^\circ$ fiber açısına sahip numunelerde $W/D = 5$ durumu için $E/D = 4$ durumu kritiktir. (Şekil 6.35)
- 0-90° fiber açılarında tüm W/D oranlarında $E/D = 1$ ve $E/D = 2$ durumlarında hasar çeşidi yırtılma hasarıdır. $E/D = 3$ ve $E/D = 4$ durumlarında ise hasar türü ezilmeye dönüşmektedir.
- Fiber yönlenme açısı θ 0-90° 'den $\pm 45^\circ$ düştüğünde tüm W/D ve E/D oranları için yatak mukavemeti düşmektedir.
- Yatak mukavemetindeki değişim nümerik analiz sonuçlarında deneysel sonuçlara göre daha az olmaktadır.

Kaynaklar

- Al-Qureshi,H.A.(2001). Automobile leafs spring from composite materials *Journal of Materials Processing Technology*,118,58-61, <http://www.elsevier.com/locate/jmatprotec>
- Beardmore,P.(1986). Composite structure for automobiles. *Composite Structure*,5(3),163-176, <http://www.elsevier.com/locate/compstruct>
- Beardmore,P.,& Johnson, C.F.(1986). The potential for composites in structural automotive applications.*Composite Science and Technology*,42(4),251-281, <http://www.elsevier.com/locate/compscitech>
- Ersoy,H.Y.(2001). Kompozit Malzeme.İstanbul:Literatür Yayınları.
- Gdoutos,E.E.,Pilakoutas,K , & Rodopoulos,C.A.(2000). Failure analysis of industrial composite materials.New York :McGraw-Hill.
- Harris, B. (1999). Engineering composite materials(2nded.).London:IOM Communiations.
- İçten ,B.M. , & Karakuzu , R. (2002). Progressive failure analysis of pin-loaded carbon-epoxy woven composite plates. *Composite Science and Technology*,62,1259-1271, <http://www.elsevier.com/locate/compscitech>
- Jones, M.R. (1999). Mechanics of composite materials (2nd ed.). NewYork:Taylor&Francis.
- Karakuzu , R. , Gülem , T., & İçten ,B.M. (2004). Failure analysis of woven laminated glass-vinylester composites with pin-loaded hole. *Composite Structure*,72,27-32 , <http://www.elsevier.com/locate/compstruct>

- Kirkham, B.E., Sulvian,L.S.& Bauerle,R.E.(1982).Development of the Liteflex suspension leaf spring. *SAE Technical Paper Series*,820160,663-673.
- Morris,C.J.(1986). Composite integrated rear suspension. *Composite Structure*,5(3),233-242, <http://www.elsevier.com/locate/compstruct>
- Rajendran,I.,&Vijayarangan,S.(2001). Optimal design of a composite leaf spring using genetic algorithms. *Computers & Structure*,79(11),1121-1129, <http://www.elsevier.com/locate/compstruc>
- Shokrieh, M.M.,& Rezai,D.(2003). Analysis and optimization of composite leaf spring. *Composite Structures*,60(3), 3177-325, <http://www.elsevier.com/locate/compstruct>
- Tae Seong ,L., Byung C.K., & Dai G.L. (2006). Fatigue characteristics of the bolted joints for unidirectional composite laminates. *Composite Structure*,72,58-68 , <http://www.elsevier.com/locate/compstruct>
- Yu,V.J.,& Kim,H.C.(1988). Double tapered FRP beam for automotive suspension leaf spring. *Composite Structures* , 9(4) ,279-300, <http://www.elsevier.com/locate/compstruct>