

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN PİM İLE YÜK  
TAŞIMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Y. Müh. Taner YILMAZ**

**Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği**

**Danışman: Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK**

**KOCAELİ, 2006**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN PİM İLE YÜK  
TAŞIMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Y. Müh. Taner YILMAZ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 Kasım 2006**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 26 Aralık 2006**


**Tez Danışmanı**

**Üye**

**Üye**

**Doç.Dr.Tamer SINMAZÇELİK Prof.Dr.İsmail CÜRGÜL Prof.Dr.Ümit KOÇABIÇAK**

  
(.....)

  
(.....)

  
(.....)

**Üye**

**Üye**

**Doç.Dr. Özgen Ümit ÇOLAK**

**Yrd.Doç.Dr.Armağan ARICI**

  
(.....)

  
(.....)

**KOCAELİ, 2006**

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde polimer kompozit malzemelerin kullanım alanları ev aletlerinden inşaat sektörüne, otomotiv sanayinden uzay sanayine kadar çok geniş bir alanı kapsamaktadır. Polimer kompozitlerin bu kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahip olmalarının en önemli nedenlerinden birisi yüksek özgül mukavemete (mukavemet/yoğunluk) sahip olmalarıdır. Günümüzde, özellikle havacılıkta böyle malzemelere büyük ihtiyaç duyulmaktadır.

Sürekli fiber takviyeli polimer kompozitler yüksek mukavemet özellikleri yanında matris malzemesinin özellikleri ile ilişkili olarak pek çok korozyon ve kimyasal olarak saldırgan ortamlarda kullanılabilirler. Konvansiyonel malzemelerin, özellikle metallerin dayanamadığı, reaksiyona girerek mekanik ve morfolojik özelliklerini yitirdikleri ortamlarda polimer kompozitlerin kullanılabilmesi bu malzemeleri çok çekici hale getirmektedir. Polimerlerin pek çok ortamda inert davranmaları, bu malzemelerin yeri geldiğinde kuvvetli asit ve baz ortamlarda dahi çalışmalarını mümkün kılmaktadır. Gün geçtikçe polimer kompozitlerin kullanım alanları daha da artmaktadır.

Bu çalışmada polimer kompozitlerin başta havacılık uygulamaları olmak üzere kullanıldıkları şartlara yakın zorlanma koşulları altında pim ile yük taşıma performansları incelenmiştir.

Sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesiyle çalışmalarımın desteğini eksik etmeyen, meslek hayatıma kazandırdığı iş disiplini ile bana örnek olan değerli hocam Prof. Dr. İsmail CÜRGÜL'e teşekkür ederim. Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. İbrahim UZMAN'a Takım Tezgahları Laboratuvar imkanlarını kullanmama olanak sağladığı için teşekkür ederim. Yrd. Doç. Dr. Tülin ŞAHİN, Yrd. Doç. Dr. A. Armağan ARICI, Yrd. Doç. Dr. Şenol ŞAHİN ve başta Doç. Dr. Volkan GÜNAY olmak üzere TÜBİTAK-MAM, Malzeme Enstitüsüne çalışmalarım sırasında vermiş oldukları destek nedeniyle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve yakınlarıma teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bana kılavuzluk eden ve sürekli cesaretlendiren danışmanım Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	x
SEMBOLLER.....	xi
ÖZET .....	xii
İNGİLİZCE ÖZET .....	xiii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Polimer Kompozitlerin ve Metallerin Karşılaştırılması.....	3
1.2. Mekanik Bağlantıların Avantaj ve Dezavantajları.....	4
1.3. Yapıştırılmalı Bağlantıların Üstünlükleri.....	7
1.4. Bağlantıların Tasarımı.....	7
1.4.1. Bağlantı tipleri.....	8
1.4.2. Mekanik birleştirmeli bağlantı tasarımı .....	9
1.5. Polimer Kompozitlerin Hasarlanma Mekanizmaları .....	12
1.5.1. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde hasar tipleri.....	12
1.5.1.1. Tabakalar arası hasar.....	12
1.5.1.2. Soyulma (debonding).....	14
1.5.1.3. Fiber mikro burkulması (microbuckling).....	15
1.5.1.4. Fiberin yerinden çıkması (pull-out) .....	16
1.5.1.5. Fiber kırılması.....	16
1.5.1.6. Matrisin çatlaması (cracking).....	17
1.5.1.7. Kompozitin mikro-çatlaması.....	18
1.5.2. Pimli bağlantılarda yönelme düzenine bağlı olarak oluşan hasarlar .....	18
1.5.2.1. (0°) <sub>s</sub> yönelmeye sahip kompozit tabakada hasar.....	18
1.5.2.2. (90°) <sub>s</sub> yönelmeye sahip kompozit tabakada hasar.....	19
1.5.2.3. (45°/-45°) <sub>s</sub> yönelmeye sahip kompozit tabakada hasar.....	20
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....	21
2.1. Statik Yükleme Şartlarında Sürekli Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Pim ile Yük Taşıma Performansları .....	21
2.2. Sürekli Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerde Kimyasal Ortamın Etkisi.....	24
2.2.1. Kimyasal ortamda cam fiber degradasyonu.....	24
2.2.2. Kimyasal ortamda fiber/matris ara yüzey degradasyonu.....	28
2.2.2.1. Sürekli cam fiber takviyeli polimer kompozitlerde ara yüzey degradasyonu.....	30
2.2.2.2. Sürekli karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerde ara yüzey degradasyonu .....	30
2.2.3. Kimyasal ortamda polimer matris degradasyonu.....	32
2.2.3.1. Polimer matrise çözücünün (solventin) etkisi .....	34
2.3. Dinamik Yükleme Koşullarının Sürekli Fiber Takviyeli Polimerik Kompozitlere Etkisi .....	35
2.4. Termal Çevrimlerin ve Su absorpsiyonun Sürekli Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlere Etkisi.....	39

2.4.1. Sürekli karbon fiber takviyeli kompozitlerde termal çevrimlerin ve su absorpsiyonunun yarattığı etki .....	43
2.4.2. Sürekli cam fiber takviyeli kompozitlerde termal çevrimlerin ve su absorpsiyonunun yarattığı etki .....	47
2.5. Hidrotermal Çevrimlere Maruz Bırakılmış Polimerik Kompozitlerin Dinamik Mekanik Isıl Analizi (DMTA) .....	49
BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	52
3.1. Kullanılan malzemeler .....	52
3.2. Deney metodları ve deney programı .....	55
3.2.1. Statik yükleme altında pim ile yük taşıma testi .....	55
3.2.2. Hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde bekletilmiş cam/PPS kompozitin pim ile yük taşıma testi.....	58
3.2.3. Hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde bekletilmiş karbon/PPS kompozitin pim ile yük taşıma testi.....	60
3.2.4. Amonyum Hidroksit (NH <sub>4</sub> OH) çözeltisinde bekletilmiş cam/PEI kompozitin pim ile yük taşıma testi .....	61
3.2.5. Dinamik yüklemenin pim ile yük taşıma kapasitesine etkisi.....	62
3.2.6. Hidrotermal yaşlandırmaya tabi tutulmuş kompozitlerin tabakalar arası kayma dayanımı (TAKD) ve pim ile yük taşıma testi .....	64
3.2.7. Hidrotermal çevrimlere maruz bırakılmış polimerik kompozitlerin dinamik mekanik termal analizi (DMTA).....	66
BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI .....	71
4.1. Farklı Geometrik Parametrelere Sahip Polimerik Kompozitlerin Statik Yükleme Şartlarında Pim ile Yük Taşıma Performanslarının Değerlendirilmesi .....	71
4.1.1. Karbon/PPS kompozitlerin pim ile yük taşıma performansları .....	71
4.1.2. Cam/PPS kompozitlerin pim ile yük taşıma performansları.....	82
4.2. Kimyasal Ortama Maruz Bırakılmış Polimerik Kompozitlerin Statik Yükleme Şartlarında Pim ile Yük Taşıma Performanslarının Değerlendirilmesi .....	97
4.2.1. Cam/PPS kompozitlerde asit ortamın pim ile yük taşıma performansına etkisi....	97
4.2.2. Cam/PEI kompozitlerde baz ortamın pim ile yük taşıma performansına etkisi... 108	
4.2.3. Karbon/PPS kompozitlerde asit ortamın pim ile yük taşıma performansına etkisi .....	115
4.3. Dinamik Yükleme Maruz Kalan [(0 <sup>0</sup> /90 <sup>0</sup> )] <sub>3s</sub> Yönlenmeye Sahip Karbon/PPS Kompozitin Pim ile Yük Taşıma Performanslarının İncelenmesi .....	121
4.4. Termal Çevrimlerin ve Su Absorpsiyonunun Polimer Matrisli Kompozitlere Etkisi .....	136
4.4.1. Karbon/PPS kompozit malzemelerde oluşan etki.....	136
4.4.2. Cam/PEI ve cam/ PPS kompozit malzemelerde oluşan etki.....	142
4.5. Hidrotermal çevrimlere maruz bırakılmış polimerik kompozitlerin dinamik mekanik ısıl analiz (DMTA) sonuçları .....	149
BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	154
5.1. Sonuçlar .....	154
5.2. Öneriler .....	159
KAYNAKLAR .....	160
KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER.....	169
ÖZGEÇMİŞ .....	171

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: İsveç hava kuvvetlerine ait JAS39 tipi uçaktaki kompozit yapılar koyu gri renk ile belirtilmiştir.....	2
Şekil 1.2: Temel bağlantı konfigürasyonları: a) bir cıvata ile birleştirilmiş tek bindirmeli bağlantı b) tek bindirmeli bağlantı c) çift bindirmeli bağlantı .....	9
Şekil 1.3: Pim ile yüklenen delik etrafında oluşan gerilme dağılımları.....	10
Şekil 1.4: Pimli bağlantılarda tipik hasar mekanizmaları .....	11
Şekil 1.5: Sürekli fiber takviyeli kompozit tabakalarda kırılma durumları: a) tabakalar içi kırılma; b) tabakalar arası kırılma; c) tabaka kalınlığı boyunca oluşan kırılma.....	14
Şekil 1.6: Fiber/matris ara yüzeyinde soyulma mekanizması.....	15
Şekil 1.7: Fiberlerde mikro burkulma .....	15
Şekil 1.8: Fiberlerin yerinden çıkma mekanizması.....	16
Şekil 1.9: Fiberde oluşan kırılma .....	17
Şekil 1.10: Matriste meydana gelen çatlama .....	17
Şekil 1.11: Kompozit tabakada oluşan mikro çatlaklar .....	18
Şekil 1.12: $(0^{\circ})_s$ yönlenmeli kompozit tabakada pimin bası etkisiyle oluşan hasar.....	19
Şekil 1.13: $(90^{\circ})_s$ yönlenmeli kompozit tabakada pimin bası etkisiyle oluşan hasar.....	19
Şekil 1.14: $(45^{\circ}/-45^{\circ})_s$ yönlenmeli kompozit tabakada pimin bası etkisiyle oluşan hasar .....	20
Şekil 2.1: Fiber ve matris arasındaki ara faz bölgesinin şematik gösterimi.....	29
Şekil 2.2: Fiber/matris ara yüzeyini gösteren GEM fotoğrafı.....	31
Şekil 2.3: Çözülme ve plastikleşme mekanizmasının şematik gösterimi .....	35
Şekil 2.4: Kompozitlerde yorulma-ömür diyagramı .....	37
Şekil 2.5: Sıcaklık değişimleri esnasında fiber/matris etkileşimini anlayabilmek için geliştirilen model.....	40
Şekil 3.1: $[(0^{\circ}/90^{\circ})_s]$ oryantasyonuna sahip kompozit levhanın yapısı.....	53
Şekil 3.2: $[(0^{\circ}/90^{\circ})/(+/-45^{\circ})_s]$ oryantasyonuna sahip kompozit levhanın yapısı .....	54
Şekil 3.3: $[(45^{\circ}/-45^{\circ})_s]$ oryantasyonuna sahip kompozit levhanın yapısı .....	55
Şekil 3.4: Instron 4411 universal elektromekanik test cihazı .....	56
Şekil 3.5: Numune geometrisi ve pim ile çekme testi düzeneği .....	57
Şekil 3.6: Yataklama dayanımının tanımı.....	58
Şekil 3.7: Kompozit levhaların delinmesinde kullanılan matkap uçları: a) standart b) modifiye edilmiş .....	59
Şekil 3.8: Scaltec SBC 31 hassas terazi .....	60
Şekil 3.9: Sinüzoidal dalga formundaki yükleme şekli.....	63
Şekil 3.10: Pim ile birleştirilmiş kompozitlerin dinamik yüklemelerinde kullanılan test düzeneği: (a) şematik çizim (b) fotoğraf .....	63

Şekil 3.11: Kısa kiriş testi düzeneği.....	65
Şekil 3.12: TA Instruments firmasına ait DMTA Q800 tipi cihaz.....	67
Şekil 3.13: Dinamik mekanik ısıl analizler esnasında kullanılan üç nokta eğme testi düzeneği ve bu düzeneğe tespit edilmiş numune.....	68
Şekil 3.14: Uygulanan frekans (f) değerinde sinüzoidal değişime sahip gerinim ( $\epsilon$ ) ile gerilme ( $\sigma$ ) arasındaki faz açısı, ( $\delta$ ), farkı.....	69
Şekil 3.15: Depolama modülü $E^I$ , kayıp modül $E^{II}$ , dinamik modül $E^*$ ve kayıp faktör $\tan \delta$ arasındaki ilişki.....	69
Şekil 3.16: Tipik DMTA diyagramı.....	70
Şekil 4.1: Değişik hasar tiplerinde elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri: (a) yataklama tipi hasar, (b) kayma tipi hasar, (c) çekme tipi hasar.....	71
Şekil 4.2: $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$ ve $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$ oryantasyonlarında elde edilen yataklama kuvvetinin karşılaştırılması (W/D = 4, D=5).....	72
Şekil 4.3: $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$ ve $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$ oryantasyonlarında elde edilen kuvvetlerin karşılaştırılması (W/D = 2, D=10 sabit).....	73
Şekil 4.4: $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$ oryantasyonuna sahip kompozitte W/D oranına bağlı kuvvet değişimleri (D = 10).....	74
Şekil 4.5: $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$ oryantasyonuna sahip kompozitte W/D oranına bağlı kuvvet değişimleri (D = 5).....	75
Şekil 4.6: $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$ oryantasyonunda meydana gelen dayanım değerlerinin karşılaştırılması (D = 10).....	75
Şekil 4.7: $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$ oryantasyonuna sahip kompozitte W/D oranına bağlı kuvvet değişimleri (D = 5).....	76
Şekil 4.8: $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$ oryantasyonuna sahip kompozitte W/D oranına bağlı kuvvet değişimleri (D = 10).....	76
Şekil 4.9: $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$ ve $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$ yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri (W/D=4, E/D=2, D=5).....	77
Şekil 4.10: $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$ ve $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$ yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri (W/D=2, E/D=2, D=10).....	78
Şekil 4.11: $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$ yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri (E/D=2, D=10).....	79
Şekil 4.12: $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$ yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri (E/D=2, D=10).....	79
Şekil 4.13: $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$ yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri (W/D=4, E/D=2).....	80
Şekil 4.14: $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$ kompozitte pim ile yükleme testi sonucunda elde edilen hasarlar. a,b ve c-yataklama tipi hasar (E/D=2, W/D=2, D=10) (a=ön görünüş, b=üst görünüş, c=yan görünüş), d- çekme tipi hasar (E/D=1, W/D=2, D=10), e- kayma tipi hasar (E/D=1, W/D=2, D=10).....	81
Şekil 4.15: $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$ ve $[(0^\circ/90^\circ)/(+/-45^\circ)]_{2s}$ yönlenme düzeninde oluşan yüklerin kıyaslanması (W/D=2, D=10).....	82
Şekil 4.16: $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$ ve $[(0^\circ/90^\circ)/(+/-45^\circ)]_{2s}$ yönlenme düzeninde oluşan yüklerin kıyaslanması (W/D=4, D=10).....	83
Şekil 4.17: $[(0^\circ/90^\circ)/(+/-45^\circ)]_{2s}$ yönlenme düzenine sahip kompozitte elde edilen yataklama yükü değerleri (D=5).....	84

Şekil 4.18: $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ yönlenme düzenine sahip kompozitte W/D oranına bağlı yataklama yükü değerleri (D=5) .....	84
Şekil 4.19: $[(0^0/90^0)]_{4s}$ yönlenme düzenine sahip kompozitte elde edilen yataklama yükü değerleri (D=5).....	85
Şekil 4.20: $[(0^0/90^0)]_{4s}$ yönlenme düzenine sahip kompozitte W/D oranına bağlı yataklama yükü değerleri (D=5) .....	85
Şekil 4.21: $[(0^0/90^0)]_{4s}$ ve $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ yönlenme düzenine sahip kompozit plakalarda E/D oranına bağlı olarak değişen yataklama yükü değerleri.....	86
Şekil 4.22: $[(0^0/90^0)]_{4s}$ yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri (W=40) .....	87
Şekil 4.23: $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri (W=20).....	87
Şekil 4.24: $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ ve $[(0^0/90^0)]_{4s}$ yönlenme düzenine sahip levhaların yük- yer değiştirme eğrileri (W=40) .....	88
Şekil 4.25: $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ ve $[(0^0/90^0)]_{4s}$ yönlenme düzenine sahip levhaların yük- yer değiştirme eğrileri (W=20) .....	90
Şekil 4.26: $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri (W=20).....	90
Şekil 4.27: $[(0^0/90^0)]_{4s}$ yönlenme düzenine sahip kompozitte oluşan hasarlar: a- yataklama+çekme tipi hasar (E/D=2, W/D=2, D=10), b- kayma tipi hasar (E/D=1, W/D=4, D=10), c- yataklama tipi hasar (E/D=2, W/D=4, D=10), d- yataklama tipi hasar (E/D=4, W/D=8, D=5).....	91
Şekil 4.28: $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ yönlenme düzenine sahip kompozitte oluşan hasarlar: a-yataklama+çekme tipi hasar (E/D=2, W/D=2, D=10), b- kayma tipi hasar (E/D=1, W/D=4, D=10), c- yataklama tipi hasar (E/D=2, W/D=4, D=10), d- yataklama tipi hasar (E/D=4, W/D=8, D=5).....	92
Şekil 4.29: Pim ile birleştirilmiş polimer kompozitlerde hasar oluşumunun şematik gösterimi.....	93
Şekil 4.30: $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ yönlenmeye sahip cam/PPS kompozitte meydana gelen hasar: a) Çekme tipi hasar b) Pimin yukarıya hareketi nedeniyle çatlağın ilerlemesi ve fiberlerde oluşan kırılmalar .....	95
Şekil 4.31: $[(0^0/90^0)]_{4s}$ yönlenmeye sahip cam/PPS kompozitte meydana gelen hasar: a) Çekme düzleminde oluşan hasar b) Çekme yükü etkisiyle oluşan fiber/matris ara yüzey ayılmaları ve fiber kırılmaları.....	96
Şekil 4.32: Asit ortamda bekletilen numunelerde gerçekleşen % ağırlık artışı .....	97
Şekil 4.33: Korozyonsuz (a) ve korozyonlu (b) malzemelerin deney sonrası görüntüleri.....	98
Şekil 4.34: Pimin bası zorlamasına maruz bıraktığı malzeme kesiti. ....	101
Şekil 4.35: Şekil 4.33'teki numunelerin "B" bölgelerinin sağ tarafından alınan görüntüler.....	103
Şekil 4.36: $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ yönlenme düzenine sahip cam/PPS kompozit levhaların kuvvet- yer değiştirme eğrileri.....	105
Şekil 4.37: $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$ yönlenme düzenine sahip cam/PPS kompozit levhalarda korozyon süresine bağlı hasar yükleri.....	106
Şekil 4.38: %37'lik hidroklorik asit çözeltisinde bekletilen malzemelerin renk değişimi.....	108



Şekil 4.39: $[(0^0/90^0)]_{4s}$ yönlenme düzenine sahip cam/PEI kompozit levhaların kuvvet- yer değiştirme eğrileri.....	110
Şekil 4.40: Amonyum Hidroksit ortamda bekletilen numunelerde gerçekleşen % ağırlık kaybı .....	111
Şekil 4.41: $[(0^0/90^0)]_{4s}$ oryantasyona sahip cam/PEI kompozit plakalarda korozyon süresine bağlı hasar yükleri.....	111
Şekil 4.42: Malzemelerin deney sonrası görüntüleri: a) korozyonsuz b) korozyonlu ...	113
Şekil 4.43: %10'luk amonyum hidroksit ( $NH_4OH$ ) çözeltisinde bekletilen numunelerde oluşan hasarlar ve renk değişimi .....	114
Şekil 4.44: Orjinal ve korozyonlu (%37 HCl asit) kompozit levhalarda E/D oranına bağlı olarak değişen yük değerleri .....	116
Şekil 4.45: Korozyonsuz ve 6 ay süre ile % 37 HCl asit çözeltisinde bekletilmiş kompozit plakaların pim ile yükleme sonrasında yük- yer değiştirme eğrileri ve hasar yükleri (W/D=4, W/D=8, D=5).....	117
Şekil 4.46: Korozyonsuz ve 6 ay süre ile % 37 HCl asit çözeltisinde bekletilmiş kompozit levhaların pim ile yükleme sonrasında yük yer değiştirme eğrileri ve hasar yükleri (W/D=2, W/D=4, D=10).....	118
Şekil 4.47: D=5 mm olması durumunda W/D oranına bağlı olarak değişen maksimum yük değerleri.....	119
Şekil 4.48: D=10 olması durumunda W/D oranına bağlı olarak değişen maksimum yük değerleri .....	119
Şekil 4.49: %37'lik hidroklorik asit çözeltisinde 6 ay bekletilen numunelerde oluşan renk değişimi (a-korozyonsuz, b-korozyonlu).....	121
Şekil 4.50: Statik ve dinamik ( $10^3$ çevrim)+statik (d+s) yüklemeye maruz kalmış kompozit levhalarda E/D oranına bağlı olarak değişen yük değerleri.....	122
Şekil 4.51: Statik ve dinamik+statik yüklenmiş kompozit levhaların pim ile yükleme sonrasında yük- yer değiştirme eğrileri (W/D=4, W/D=8, D=5).....	123
Şekil 4.52: Statik ve dinamik+statik yüklenmiş kompozit levhaların pim ile yükleme sonrasında yük yer değiştirme eğrileri ve hasar yükleri (W/D=2, W/D=4, D=10).....	124
Şekil 4.53: Kesit alınmış numunede yataklama düzlemi .....	125
Şekil 4.54: Yataklama düzlemine ait fotoğraf.....	125
Şekil 4.55: Yataklama düzleminde köşegen doğrultusunda oluşan hasar .....	126
Şekil 4.56: Pim deliği kenarı ve numune kenarına ait fotoğraf.....	127
Şekil 4.57: Pim deliği kenarına ait fotoğraf.....	127
Şekil 4.58: Yataklama düzleminde ve pim deliği kenarında oluşan hasar.....	128
Şekil 4.59: Çekme tipi hasarın etkili olduğu düzlem.....	129
Şekil 4.60: $0^0$ 'lik kompozit katmanda çekme düzleminde fiber yönlenmesi doğrultusunda uygulanan tekrarlı yük etkisiyle meydana gelen yorulma hasarının şematik gösterimi .....	129
Şekil 4.61: Taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiş hasara uğramış numunelerin kırılma yüzeylerine ait fotoğraflar. Fiber/matris ara yüzey dayanımına bağlı olarak gelişen hasarlar; a) Statik yükleme sonrası güçlü ara yüzey: düzlemsel kırılma, b) tekrarlı+statik yükleme sonrası zayıf ara yüzey: fırça ucu şeklinde yüzey kırılması.....	131
Şekil 4.62: Yükleme etkisiyle enine fiber yönlenmesine sahip olan katmanlarda oluşan ayrılmaların birleşmesiyle meydana gelen enine çatlakların şematik gösterimi.....	132

Şekil 4.63: Enine katmanda meydana gelen fiber/matris ara yüzeyindeki ayrılmaların birleşerek enine çatlakları oluşturma mekanizması; a) aksenal yüklemeye maruz çapraz katlı kompozit tabaka, b) 90 <sup>0</sup> 'lik katmanda meydana gelen enine çatlaklar c) fiber/matris ara yüzey ayrılmaları sonucunda oluşan çatak .....	133
Şekil 4.64: Enine çatlakların ve tabakalar arası delaminasyonların neden olduğu gerilme konsantrasyonları sonrasında 0 <sup>0</sup> 'lik katmanda oluşan fiber kırılmaları ...	134
Şekil 4.65: D=10 olması durumunda W/D oranına bağlı olarak değişen maksimum yük değerleri .....	134
Şekil 4.66: D=5 mm olması durumunda W/D oranına bağlı olarak değişen maksimum yük değerleri.....	135
Şekil 4.67: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen a) Tabakalar arası kayma dayanımı değerleri b) Eğme modülü değerleri .....	138
Şekil 4.68: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen yataklama yükü değerleri .....	138
Şekil 4.69: [(0 <sup>0</sup> /90 <sup>0</sup> )] <sub>3s</sub> yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri .....	139
Şekil 4.70: Kısa kiriş kayma testi sonrasında orijinal numunenin kırılma davranışı.....	140
Şekil 4.71: 100 kere termal çevrime tabi tutulmuş numunenin kısa kiriş kayma testi sonrasında kırılma davranışı .....	141
Şekil 4.72: Orijinal numunenin fiber/matris ara yüzey mukavemetini ifade eden TEM fotoğrafı.....	141
Şekil 4.73: 100 kere termal çevrime tabi tutulmuş numunenin fiber/matris ara yüzey mukavemetini ifade eden TEM görüntüsü.....	142
Şekil 4.74: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen a) Tabakalar arası kayma dayanımı değerleri b) Eğme modülü değerleri .....	144
Şekil 4.75: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen yataklama yükü değerleri .....	144
Şekil 4.76: [(0 <sup>0</sup> /90 <sup>0</sup> )] <sub>4s</sub> yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri	145
Şekil 4.77: [(0 <sup>0</sup> /90 <sup>0</sup> )] <sub>4s</sub> yönlenme düzenine sahip sürekli cam fiber takviyeli PEI matrisli orijinal numunenin fiber/matris ara yüzey mukavemetini ifade eden TEM görüntüsü .....	145
Şekil 4.78: 100 kere termal çevrime tabi tutulmuş [(0 <sup>0</sup> /90 <sup>0</sup> )] <sub>4s</sub> yönlenme düzenine sahip sürekli cam fiber takviyeli PEI matrisli numunenin fiber/matris ara yüzey mukavemetini ifade eden TEM görüntüsü.....	146
Şekil 4.79: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen a) Tabakalar arası kayma dayanımı değerleri b) Eğme modülü değerleri .....	148
Şekil 4.80: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen yük değerleri.....	148
Şekil 4.81: [(0 <sup>0</sup> /90 <sup>0</sup> )+45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> )] <sub>4s</sub> yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri .....	148
Şekil 4.82: (0 <sup>0</sup> /90 <sup>0</sup> ) <sub>4s</sub> yönlenme düzenine sahip Cam/PEI kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin depolama modülü (E <sup>I</sup> ) değerlerinin karşılaştırılması .....	149
Şekil 4.83: (0 <sup>0</sup> /90 <sup>0</sup> ) <sub>3s</sub> yönlenme düzenine sahip karbon/PPS kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin depolama modülü (E <sup>I</sup> ) değerlerinin karşılaştırılması .....	150
Şekil 4.84: (0 <sup>0</sup> /90 <sup>0</sup> ) <sub>4s</sub> yönlenme düzenindeki Cam/PEI kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin kayıp modül (E <sup>II</sup> ) değerlerinin karşılaştırılması.....	151

Şekil 4.85: $(0^0/90^0)_{3s}$ yönlenme düzenindeki karbon/PPS kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin kayıp modül ( $E^H$ ) değerlerinin karşılaştırılması.....	152
Şekil 4.86: $(0^0/90^0)_{4s}$ yönlenme düzenine sahip cam/PEI kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin tan delta ( $\tan \delta$ ) değerlerinin karşılaştırılması .....	152
Şekil 4.87: $(0^0/90^0)_{3s}$ yönlenme düzenine sahip karbon/PPS kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin tan delta ( $\tan \delta$ ) değerlerinin karşılaştırılması .....	153

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1: Polimer kompozitlerin ve metallerin bağlantıları ile ilgili bazı mekanik ve fiziksel özelliklerin karşılaştırılması .....	3
Tablo 1.2: Mekanik bağlantıların avantaj ve dezavantajları .....	6
Tablo 1.3: Yapıştırma bağlantılarının avantajları .....	7
Tablo 2.1: Polimerlerin kimyasal degradasyonuna neden olan ortamlar .....	33
Tablo 3.1: Test edilen numune boyutları .....	55
Tablo 3.2: Kullanılan asit ortam ve deney süresi .....	60
Tablo 3.3: Kullanılan korozif ortam ve deney süresi .....	60
Tablo 3.4: Test edilen numune boyutları .....	61
Tablo 3.5: Kullanılan korozif ortam ve deney süresi .....	61
Tablo 3.6: Test edilen numune boyutları .....	62
Tablo 4.1: Korozif ortamda bekleme sürelerine bağlı olarak malzemelerin maksimum yüke göre taşıma kapasitelerindeki değişim miktarları (%).....	107
Tablo 4.2: Korozif ortamda bekleme sürelerine bağlı olarak malzemelerin maksimum yüke göre taşıma kapasitelerindeki değişim miktarları (%).....	112

## SEMBOLLER

$\sigma$	: Gerilme (kN/mm <sup>2</sup> )
$\epsilon$	: Gerinim (mm)
$\tau$	: Kayma gerilmesi (kN/mm <sup>2</sup> )
D	: Pim deliği çapı (mm)
E	: Delik ekseninin serbest kenara olan mesafesi (mm)
E*	: Kompleks modül (MPa)
E <sup>I</sup>	: Depolama (elastik) modül (MPa)
E <sup>II</sup>	: Kayıp modül (MPa)
f	: Frekans (f)
L	: Destekler arası mesafe (mm)
P	: Yık (kN)
S <sub>T</sub>	: Tabakalar arası kayma dayanımı (MPa)
t	: Numune kalınlığı (mm)
T	: Sıcaklık (°C)
Tan $\delta$	: Mekanik kayıp faktörü
W	: Numune genişliği (mm)

## Alt indisler

c	: Kompozit
	: Çekme
g	: Camsı geçişi
k	: Kayma
m	: Matris
maks.	: Maksimum
s	: Dizilme dzeneni
ya	: Yataklama

## Kısaltmalar

ASTM	: American Society of Mechanical Engineers
G	: Çevresel Gerilme atlamaı
DMTA	: Dinamik Mekanik Termal Analiz
GEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
KKKT	: Kısa Kiriş Kayma Testi
PC	: Poly (Carbonate)
PEI	: Poly (Etherimide)
PET	: Poly (Tereftalan etylen)
PPS	: Poly (Phenylene sulphide)
TAKD	: Tabakalar Arası Kayma Dayanımı
TEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

# POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN PİM İLE YÜK TAŞIMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

**Taner YILMAZ**

**Anahtar Kelimeler:** Polimer Kompozitler, Pimli Bağlantılar, Dinamik Yükleme, Mekanik Özellikler, Çevresel Etkiler, DMTA.

**Özet:** Bu çalışmada farklı fiber yönlenme düzenlerine ve farklı polimer matrislere sahip polimer kompozitlerin pim ile yük taşıma özellikleri incelenmiştir.

Yük taşıma performanslarına bağlantı geometrisinin etkileri incelenmiştir. Fiber tipi, yönlenme düzenleri ve polimer matrisin türünün yanı sıra bağlantı geometrisi ile ilgili parametrelerin bağlantı performansına etkileri incelenmiştir. Bağlantının gerçekleştirildiği geometrik parametrelerin değişimi ile yük taşıma kapasitelerindeki ve hasar oluşum mekanizmalarındaki değişimler incelenmiştir.

Pim bağlantılarının statik yükleme koşulları dışında, dinamik yükleme şartlarında bağlantıların performansları ve hasarlanma mekanizmaları incelenmiştir.

Diğer yandan pimli bağlantıların termal çevrimlere ve suya maruz kalmaları ve kimyasal sıvılarla etkileşimleri durumunda yük taşıma performanslarındaki değişimler incelenmiştir. Polimer kompozitlerin, özellikle, fiber/matris ara yüzeyindeki özelliklerini kötüleştirmeye ve dayanım değerlerini azaltmaya yol açan zorlanma şartları altındaki bağlantılarının yük taşıma ve hasarlanma mekanizmalarındaki değişimleri incelenmiştir. Bu tür zorlanma şartları altındaki, çok katlı polimer kompozitlerin, tabakalar arası kayma dayanımları ve özellikle matris ve fiber/matris ara yüzeyindeki bağın viskoelastik özelliklerindeki değişimler, DMTA (Dinamik Mekanik Termal Analiz), ve deneyler ile incelenerek yük taşıma performansı ile malzeme özellikleri arasındaki değişim ilişkilendirilmiştir.

# LOAD BEARING PROPERTIES OF PIN CONNECTED POLYMER COMPOSITES

**Taner YILMAZ**

**Key words:** Polymer Composites, Pinned Connections, Dynamic Loading, Mechanical Properties, Environmental Effects, DMTA.

**Abstract:** In this study, load bearing properties of pin connected polymer composites having different fiber orientations and polymer matrices, have been investigated.

Effects of joint geometry on load bearing capacity have been investigated. In addition to the fiber type, fiber orientation, and type of the polymer matrices, effects of the parameters related with joint geometry are investigated for load bearing performance of the pin connected composites. Load bearing capacities and changes in failure formation mechanisms related to variations in geometric parameters are investigated.

Not only at static loading conditions, but also the failure mechanisms at dynamic loading conditions have been investigated.

On the other hand, load carrying capacities of pin connected polymer matrix composites after they are exposed to different environmental conditions such as thermal cycles in water bath, and in different chemical baths such as strong acids or strong bases have been investigated. Variations in load carrying and failure mechanisms of polymer composites, especially at fiber/matrix interface, when the composite material is exposed to conditions that worsen the fiber/matrix interface have been investigated. Changes in interlaminar shear strength and viscoelastic properties of fiber/matrix interface have been investigated by DMTA (Dynamic Thermal Mechanical Analysis) and experiments. Obtained results have been used to relate changes in material properties to load bearing performance of multilayered polymer composites under this type of loading conditions.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yapıyı oluşturan elemanlar arasında yük iletimini gerçekleştirmek için elemanların birbiri ile birleştirilmesi gerekir. Yapı elemanlarının birleştirilmeleri esnasında kullanılan her yöntemin bir takım dezavantajları vardır. Bu nedenle tasarımı yapan kişi mümkün olduğu kadar birleştirme yapmaktan kaçınmaktadır. Ne yazık ki, malzeme boyutlarındaki sınırlamalar, üretim kısıtlamaları ve kolaylık, taşıma yada yapı içindeki hacimlere kolay erişebilme gerekliliği nedeniyle birleştirme elemanı kullanılmadan yapı üretmek çok nadir rastlanan bir durumdur. Bağlantı noktaları, potansiyel olarak yapılardaki en zayıf noktalardır.

Polimer esaslı parçaların birleştirilmesinde kullanılan mekanik bağlantılar, yapıyı oluşturan plaka ve parçaların birleştirme elemanları ile (cıvata, pim, perçin vb.) bir araya getirilerek elde edilir. Birleştirilecek olan malzemeler dışında bağlantıyı temin eden ek parçaya da bağlama elemanı adı verilir. Yapıyı zorlayan kuvvetler, bağlantıyı oluşturan elemanların her birine etki eder ve bu yükler bileşenden bileşene transfer olur. Yükün bir panelden diğerine transfer olması birleştirme elemanının kendi özelliğinden veya birleştirilen malzemelerin yüzeyinde bulunan pürüzlerin sürtünme etkisiyle mikroskobik mertebede birbirine bağlanmalarından kaynaklanır. Mekanik bağlamada, bileşenler arasında birincil veya ikincil mertebede atomsal veya moleküler bağlar söz konusu değildir. Buna rağmen yüksek sıkma kuvveti ve sürtünme etkisi ile bölgesel olarak bu tip bağlar oluşabilir. Diğer birleştirme proseslerinde olduğu gibi mekanik birleştirmede de amaç küçük yapısal elemanların bir araya getirilerek esas yapının oluşturulmasıdır. Diğer birleştirme prosesleri ile karşılaştırıldığında mekanik bağlamanın bazı avantaj ve dezavantajları olduğu görülür.



Fiber takviyeli polimer kompozitlerde olan gelişmeler uçak iskeleti yapılarının evrimleşmesindeki en önemli adımlardan biri olmuştur. Özellikle uçak konstrüksiyonlarında kompozit malzemeler oldukça geniş kullanım alanına sahiptir (Şekil 1.1). Uçak yapımında kullanılan kompozit elemanların birleştirilmesinde sıklıkla cıvata ve perçin bağlantıları kullanılmaktadır.



Şekil 1.1: İsveç hava kuvvetlerine ait JAS39 tipi uçaktaki kompozit yapılar koyu gri renk ile belirtilmiştir (Schön ve Nyman, 2002)

Geleneksel alüminyum alaşımları ile karşılaştırıldığında polimer kompozitlerin kullanımı önemli miktarda ağırlık kazancı sağlamaktadır. Buna ek olarak, polimer kompozitlerin korozyona, yorulmaya, darbeye, iklimik etkilere, termal zorlanmalara vb. pek çok alanda avantajları vardır. Birleştirme metodolojisi açısından bakıldığında, polimer kompozit konstrüksiyonun en önemli avantajlarından biri karmaşık parçaların yekpare olarak üretilebilmesidir. Bu nedenle polimer kompozitlerden imal edilen gövdeler daha az sayıda parçadan ve daha az sayıda birleştirme noktası kullanılarak üretilebilirler (Baker, 1997).

Metalik parçaların birleştirilmesi için kullanılan ana yöntemler olan mekanik ve yapıştırımlı bağlama yöntemleri polimer kompozitler için de uygulanmaktadır. Mekanik bağlantılarda yapıları meydana getiren bileşenler arasındaki yük transferi birleştirme elemanları nedeniyle oluşan sürtünme sayesinde gerçekleşmektedir. Temel olarak yük iletim elemanları (pim, cıvata vb.), mekanik ve yapıştırımlı

bağlantılarda bağlantı doğrultusu boyunca kesme gerilmesine maruz kalmaktadır, fakat gerçek gerilme dağılımı daha kompleksdir (Baker, 1997).

### 1.1. Polimer Kompozitlerin ve Metallerin Karşılaştırılması

Polimer kompozitlerin ve metallerin birleştirme performansları Tablo 1.1' de sunulmuştur.

Tablo 1.1: Polimer kompozitlerin ve metallerin bağlantıları ile ilgili bazı mekanik ve fiziksel özelliklerin karşılaştırılması (Okutan, 2001)

<b>Tabakalı polimer kompozitler</b>	<b>Metaller</b>
<u>Kırılma öncesi lineer elastik davranır</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Yükleri dağıtmak için sınırlı yetenekleri vardır</li> <li>➤ Göreceli olarak düşük tokluk</li> <li>➤ Düşük şiddetli gerilmelere duyarlı</li> <li>➤ Darbelerle duyarlı</li> </ul>	<u>Kopmadan önce akma gerçekleşir</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Yüksek tokluk</li> <li>➤ Düşük şiddetli gerilmelere duyarlı</li> </ul>
<u>Sıcaklık/nem altında çalışmaya duyarlı</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Polimer matrisin özellikleri nedeniyle basma ve kayma dayanımı düşük</li> </ul>	<u>Sıcaklık/nem altında çalışmaya duyarlı</u>
<u>Kalınlık boyunca düşük dayanım</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Yönlenme doğrultusunda etki etmeyen yüklere karşı dayanıksız</li> <li>➤ Değişik hasar prosesleri etkili</li> </ul>	<u>Kalınlık boyunca yüksek dayanım</u>
<u>Düzlem içindeki özellikler yöne aşırı bağımlıdır</u>	<u>Özellikler yöne duyarlı değildir (izotropik)</u>
<u>Yorulmaya karşı dayanıklıdır</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Basma zorlamaları kritik durum yaratır</li> <li>➤ Gerilme yığılmalarına daha az duyarlı</li> </ul>	<u>Yorulmaya meyillidir</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Çekme zorlamaları kritik durum yaratır</li> <li>➤ Gerilme yığılmalarına duyarlı</li> </ul>
<u>Korozyona karşı dayanıklı</u>	<u>Korozyona meyilli</u>
<u>Sürtünmeye karşı dirençli</u>	<u>Sürtünmeye karşı duyarlı</u>
<u>Düşük termal genişleme katsayısı</u>	<u>Yüksek termal genişleme katsayısı</u>

## 1.2. Mekanik Bağlantıların Avantaj ve Dezavantajları

Mekanik bağlama elemanları ile birleştirmenin sahip olduğu pek çok avantaj söz konusudur. Bu avantajlar aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmış olup ayrıca Tablo 1.2’ de özetlenmiştir.

Mekanik bağlama elemanları ile yapılan birleştirmelerin sökülebilir olması, sökme ve takma esnasında bileşenlerin hasar görmemesi önemli bir avantajdır. Bağlantıların sökülebilir olması, meydana gelen hasarların tamiratında, yapıyı oluşturan bileşenlerin bakımında, yapının şeklinin değiştirilmesinde ve yapıya yeni bir elemanın eklenmesi hususunda avantajlar sağlar. Mekanik bağlama uygun bir şekilde yapıldığında parçalar arasındaki bağıl harekete olanak tanır. Mekanik bağlamanın önemli bir diğer avantajı da yapıyı oluşturan bileşenler arasında bağıl hareket söz konusu iken sistemde yapısal bütünlüğün sağlanmasıdır ki bu olay sistemin tasarlanan fonksiyonu yerine getirebilmesi için büyük önem taşır. Birleştirme sonrası yapıyı oluşturan parçaların malzemelerinde kimyasal veya mikro yapısal değişim meydana gelmemektedir. Bunun sebebi ise yapıyı oluşturan parçaların bir arada tutulması için gerekli olan bağlantının tamamen mekanik olmasıdır.

Mekanik bağlama birbirinden farklı olan malzemelerin birleştirilmesine olanak tanıdığı gibi, belli bir hasara kadar da tolerans sağlar. Farklı malzemelerin yapıştırma ile birleştirilmesinin mümkün olmadığı hallerde mekanik bağlama ön plana çıkar. Böylece malzemeler arasında kimyasal uyumluluk daha az önem taşır. Mekanik birleştirme elemanlarıyla bağlamada sadece yük altında temas söz konusudur. Mekanik bağlamanın basit olması ve çok özel bir hazırlık gerektirmemesi önemli bir avantajdır. Diğer taraftan ise bağlantıda ölçü tamlığının sağlanması ve istenmeyen parçacıkların bölgeden uzaklaştırılması gerekir. Ayrıca mekanik bağlamada maliyet oldukça düşük olup kaynak ve yapıştırma gibi yöntemlerle kıyaslandığında sınırlı operatör becerisinin yeterli olduğu görülür. Sonuçta mekanik bağlama, birkaç istisna dışında, genellikle yüksek otomasyona son derece uygundur. Birleştirme elemanı olarak zımbaların, perçinlerin, çivilerin ve vidaların kullanılması ile son derece süratli bir birleştirme sağlanabilmektedir.

Mekanik birleştirmelerin bütün bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da söz konusudur. İlki ve en önemlisi mekanik baēlantılarda özellikle açılan delik etrafında baēlama elemanı tarafından oluşturulan gerilme yığılmalarıdır. Yorulmaya maruz yapılarda gerilme yığılmaları son derece önemlidir. İkinci bir dezavantaj, mekanik baēlamanın bazı malzemelere uygulanamıyor olmasıdır. Uygulanamamasının sebebi daha önce de bahsedildiēi gibi gerilme yığılmalarıdır. Uygulanan gerilme altında, viskoelastik davranış gösteren malzemelerde (bazı sünek polimerler), baēlanan elemanlardaki gerilme yığılmaları açılan deliklerde Şekil deēiřimine neden olur. Bu davranış genellikle akma olarak adlandırılır. Seramik veya cam gibi doēal ve gevrek malzemelerde birleştirme elemanının delik etrafında oluřturduēu gerilme yığılmaları özellikle de temas noktasında tolere edilemeyen gerilmelere neden olur ki bu da kırılmalara sebebiyet verir.

Mekanik baēlamada üçüncü dezavantaj ise baēlantı bölgesinin dış ortama açık olmasıdır. Bundan dolayı baēlantı bölgesi nemden ve sudan etkilenmekte, sızıntıları engelleyememekte ve böylece baēlantı bölgesinde korozyona zemin hazırlanmaktadır. Birleştirilen malzemelerin farklı elektrokimyasal özellikleri ile birlikte artık gerilmeler de baēlantının özelliklerini kötü yönde etkilemektedir. Mekanik baēlamada bir başka dezavantaj da bazı sistemlerde sarf edilen iřçiliēin fazla olmasıdır. Kaynak, lehimleme veya yapıştırma gibi diēer birleştirme prosesleri ile karřılařtırıldıēında mekanik baēlantılar daha aēırdır. Ayrıca baēlantılarda titreşimlerden, esnemelerden ve termal zorlanmalardan kaynaklanan gevşemeler olasıdır.

Tablo 1.2: Mekanik bağlantıların avantaj ve dezavantajları (Okutan, 2001)

<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
➤ Bağlantının çözülebilir olması.	➤ Belirgin gerilme birikimleri söz konusu.
➤ Sınırlı bir bağıl hareket toleransının olması.	➤ Talaş kaldırarak işlenmesi sorunlu olan malzemelerde kullanımı sınırlı.
➤ Birleştirilen malzemelerin mikro yapı ve kimyasal kompozisyonlarında değişim olmaması.	➤ Akışkan sızdırmazlığı konusunda sorunlu olması.
➤ Farklı malzemelerin birleştirilebilmesi.	➤ Daha ağır bir konstrüksiyon oluşması.
➤ Sınırlı bir hasar toleransının bulunması.	➤ Bağlantıların çözülebilmeme riski.
➤ Bağlantının basit olması ve herhangi bir özel hazırlık gerektirmemesi.	➤ Montaj işçiliğinin yüksek olması.
➤ Düşük maliyet ve basit üretim yöntemi.	
➤ Otomasyona uygunluk.	
➤ Bağlantının kalite kontrolünün kolaylığı.	
➤ Çevrenin ve yorulmaya neden olan yüklemenin etkilerine karşı dayanıklıdır.	
➤ Yüksek güvenilirlik.	

Mekanik olarak gerçekleştirilen bağlantılarda verim birçok parametreye; birleştirilen malzemelere, tasarıma, boyutlara, bağlama elemanlarının sayısına ve yerleşim şekline ve geometrilerine vb. bağlıdır. Diğer taraftan, kaynak ile gerçekleştirilen bağlantıların verimi mekanik bağlamadan daha yüksektir. Lehimleme ile yapılan bağlantılarda verimin yüksek yada düşük olması kullanılan dolgu malzemesinin mukavemetine bağlıdır. Lehimleme ve yapıştırma ile gerçekleştirilen bağlantıların verimi mekanik bağlantıların veriminden daha düşük olmaktadır.

### 1.3. Yapıştırırmalı Bağlantıların Üstünlükleri

Yapıştırma bağlantılarının avantajları Tablo 1.3'te sunulmuştur.

Tablo 1.3: Yapıştırma bağlantılarının avantajları (Baker, 1997)

<b>Yapıştırırmalı bağlantıların avantajları</b>
➤ Yapıştırılmış bölgede düşük gerilme yığılmaları söz konusudur
➤ Sağlam bir bağlantıdır
➤ Göreceli olarak hafif
➤ Korozyona dayanıklı
➤ Karşılıklı düzgün yüzeyler

Mekanik ve yapıştırırmalı bağlantı metotları arasında seçim yaparken her birinin avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurulmalıdır. Birleştirilecek malzemelere ve kullanım yerine göre en uygun birleştirme tekniğinin seçilmesi gerekir.

### 1.4. Bağlantıların Tasarımı

Bağlantıların, tasarım sürecinin önemli ve ayrılmaz bir parçası olarak düşünülmesi gerektiği son derece açıktır. Yapılarda bağlantı noktaları kritik bir öneme sahiptir. Bağlantı metodu olarak yapıştırırmalı yada mekanik bağlantı yöntemi seçilebilir. Birçok durumda ise mekanik bağlantı yönteminin seçilmesinin sebebi sökölüp takılabilir bir yapıya sahip olmasıdır.

Polimer kompozit yapılarda bağlantıların olduğu her durumda önemli bir ağırlık sınırlamasıyla karşı karşıya kalınır. Ayrıca zamanından önce oluşan hasarlar da çok sık görülür. Bu durumun sebepleri arasında lineer elastik olan fiberlerin düşük uzama kapasitesi, kritik bölge olan fiber/matris ara yüzeyi ve civata deliğinde meydana gelen gerilme yığılmaları yer almaktadır. Sonuç olarak verimli bir kompozit yapının tasarlanabilmesi için bağlantı bölgesinin davranışının göz önüne alınması gerekir.

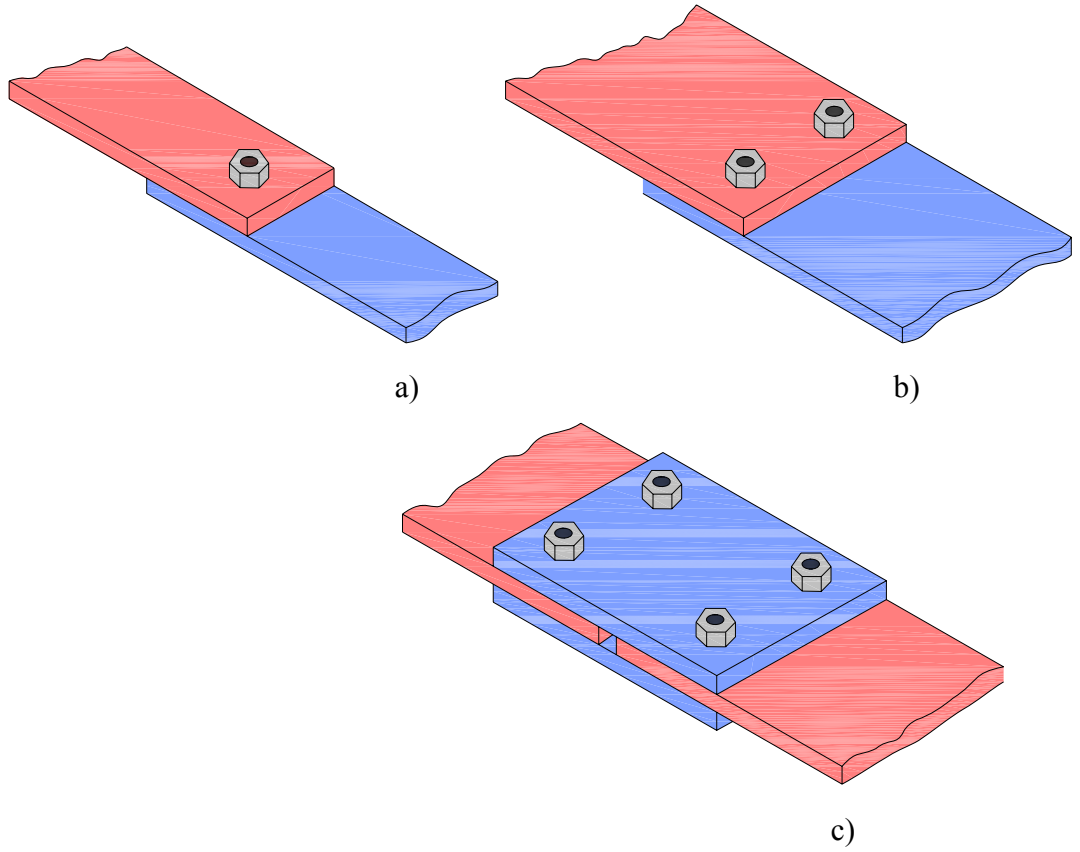
Birçok durumda tasarımı gerçekleştiren kişi mekanik birleştirme ve yapıştırma bağlantıları arasında tercih yapmak zorunda kalır. Bu kararı verirken tasarımcının dikkate alması gereken temel noktalar aşağıda verilmiştir:

- Bağlantı ile iletilecek yükün büyüklüğü
- Tasarımın geometrik sınırlamaları
- Tasarımın ağırlık sınırlamaları
- Bağlantıdan istenilen güvenilirlik
- Bağlantı bölgesinin maruz kalacağı çevre koşulları
- Bağlantı bölgesinin sökülmesi ve yeniden bağlanması gibi işlemlerin gerekliliği
- Üretim ve birleştirme muayenesinin maliyeti

#### **1.4.1. Bağlantı tipleri**

Temelde, kompozit bağlantılarda iki çeşit bağlantı kullanılır: bunlar yapıştırımlı bağlantılar ve mekanik bağlantılar olarak bilinen pimli, perçinli veya cıvatalı bağlantılardır. Şekil 1.2’de farklı mekanik bağlantı konfigürasyonları gösterilmiştir.

Metaller ile karşılaştırıldığında polimer kompozitlerin sağladığı önemli bir avantaj olarak uygun fiber tipinin ve oryantasyonun seçilmesi ile mekanik özelliklerin belirlenebilmesidir. Bu önemli bir avantajdır fakat bağlantılarda bazı problemlere sebep olabilir. Bu problemlere örnek olarak tamir işlemlerinin zorluğu, anizotropik katmanların ve kompleks yapıların oluşması verilebilir. Buna ek olarak polimer kompozitlerin kalınlık boyunca gerilme dağılımları farklı ve yataklama dayanımları belli bir alana odaklanmış yüklemeler altında düşüktür (Matthews, 1989).

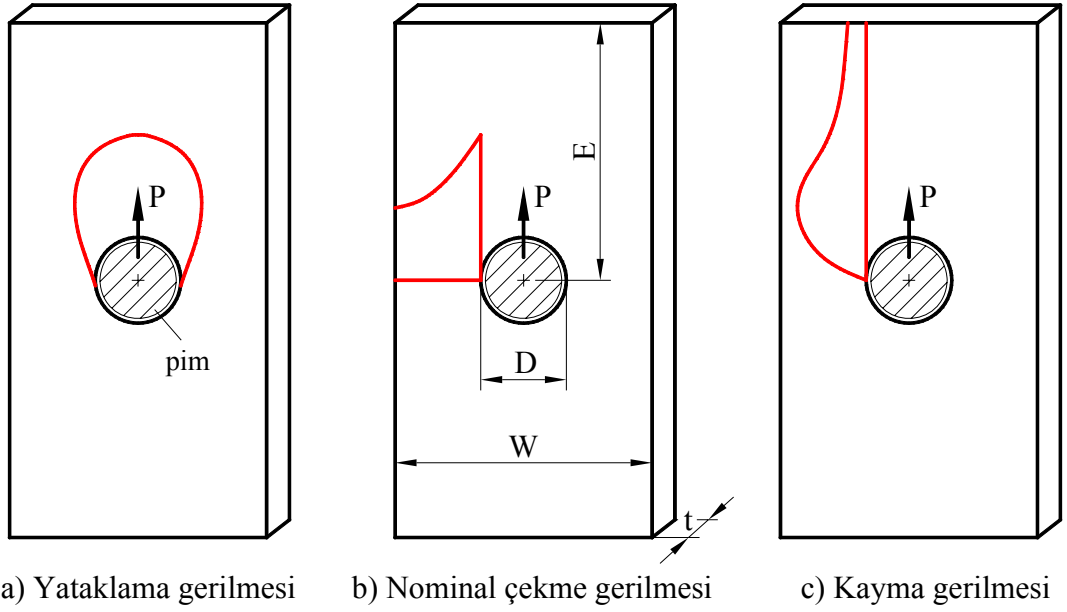


Şekil 1.2: Temel bağlantı konfigürasyonları: a) bir cıvata ile birleştirilmiş tek bindirmeli bağlantı b) tek bindirmeli bağlantı c) çift bindirmeli bağlantı

#### 1.4.2. Mekanik birleştirmeli bağlantı tasarımı

Mekanik bağlantılarda amaç bir elemandan diğer bağlantı elemanına yük iletimini düzgün bir şekilde gerçekleştirmektir. Mekanik bağlantılarda yük, bağlantı elemanı (pim, cıvata, perçin vb.) aracılığıyla delik yüzeyine transfer edilerek bir parçadan diğerine aktarılır (Baker, 1997).

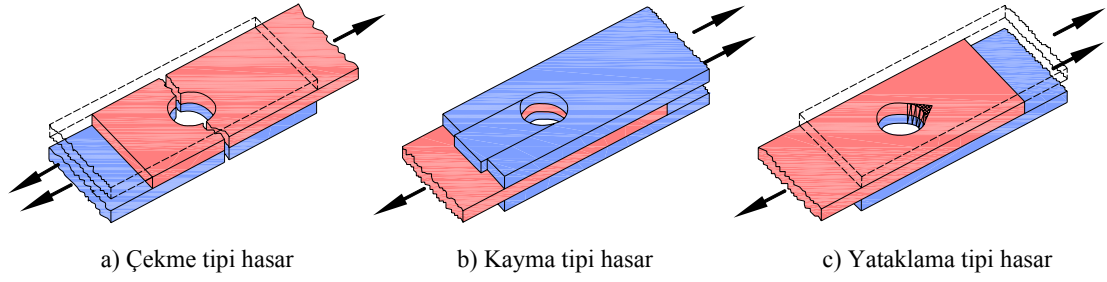




Şekil 1.3: Pim ile yüklenen delik etrafında oluşan gerilme dağılımları (Eckold, 2001)

Şekil 1.3'te pim ile yüklenen delik çevresindeki gerilme dağılımları gösterilmiştir. Delik çevresinde değişik mertebede gerilme değerleri söz konusudur. Şekilden de görüldüğü gibi en yüksek gerilme değeri yük transferi doğrultusunda elde edilmektedir. Bağlantı performansının şiddetle geometrik parametrelere bağlı olduğu rapor edilmiştir. Yeterince geniş olan bağlantılar yataklama tipi hasara uğramaktadır. Bağlantı genişliğinde meydana gelen azalma hasar tipinin değişmesine ve çekme tipi hasarın meydana gelmesine neden olmaktadır. Delik çapında ve serbest kenarın delik eksenine olan mesafesinde yapılan değişimler benzer etkiye sahiptir (Eckold, 2001).

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda mekanik bağlantılarda üç temel hasar mekanizması ile karşılaşılmıştır: çekme, kayma ve yataklama tipi hasar (bu üç mekanizmanın birleşimi şeklinde oluşan hasar da söz konusu olabilmektedir). Yukarıda bahsedilen hasar mekanizmaları Şekil 1.4'te gösterilmiştir (Lim ve diğ. 2006).



Şekil 1.4: Pimli bağlantılarda tipik hasar mekanizmaları (Lim ve diğ. 2006)

Pim ile birleştirilmiş numunelerin dayanımlarını hesaplayabilmek için aşağıdaki ifadeler tanımlanmıştır;

Nominal Çekme Dayanımı:

Çekme tipi hasara uğrayan numunelerdeki gerime;  $\sigma_{\xi} = \frac{P_{\xi}}{(W - D) \cdot t}$  şeklindedir. Bu eşitlikte “P” bileşeni pim ile aktarılan yük, “W” numune kesitinin genişliği, “D” delik çapı ve “t” ise numunenin kalınlığıdır.

Yataklama Dayanımı:

Kompozit malzemenin yataklama dayanımı  $\sigma_{ya} = \frac{P_{ya}}{D \cdot t}$  şekilde ifade edilmektedir.

Kayma Dayanımı:

Bu durumdaki dayanım ise  $\tau_k = \frac{P_k}{2 \cdot E \cdot t}$  olacak şekilde tanımlanmıştır. İfadedeki “E” delik ekseninin serbest kenara olan mesafesi olup, genellikle kenar mesafesi olarak isimlendirilmektedir (Boyutlar için Şekil 1.3 b’ye bakınız).

Bağlantının performansı dört parametre grubu tarafından etkilenmektedir (Chen ve diğ. 1994).

- Malzeme parametreleri: fiber tipi, matris tipi, fiber oryantasyonu ve kompozit tabakaların dizilme düzeni.

- Geometrik parametreler: numune genişliği (W) veya numune genişliğinin delik çapına oranı (W/D), kenar mesafesi (E), kenar mesafesinin delik çapına oranı (E/D), numune kalınlığı (t), delik çapı (D) ve çoklu bağlantılarda bağlantı elemanları arasındaki mesafe (adım).
- Bağlama elemanı parametreleri: bağlama elemanı tipi, bağlama elemanı boyutu, sıkıştırma alanı, oluşturulan basınç, delik boyutu ve toleransı.
- Dizayn parametreleri: yükleme tipi (çekme, basma, yorulma vs.), yükleme yönü, bağlantı tipi (tek bindirmeli, çift bindirmeli), geometrik parametreler (delik çapı, numune genişliği vs.), çevre koşulları.

## **1.5. Polimer Kompozitlerin Hasarlanma Mekanizmaları**

Polimer kompozitlerin hasar mekanizmaları karmaşıktır. Matris ve fiberlerin kompozisyonundan, fiber tipinden, ara yüzey bağından, fiber oryantasyonundan, tabakaların diziliminden, pim-delik boşluk miktarından ve yükleme tipinden (örneğin, çok eksenli çekme, çok eksenli basma, tabakalar arası kayma v.s.) etkilendiği gibi bulunduğu ortamdan da etkilenir. Kompozitte mümkün olan hasar modları olarak, matris çatlakları, fiber kırılmaları, ara yüzey ayrılmaları ve delaminasyonlar karşımıza çıkar. Kompozitlerin yüke dayanımlarını fiber ve matris ile ilgili parametreler belirler. Gelen yükün fiber oryantasyonu ile yaptığı açı önemlidir. Örneğin, sürekli fiber takviyeli kompozit, fiberler yönünde tek eksenli gerilme altında ise fiberlerin ağırlıklı olarak yükü taşıyacağı açıktır.

### **1.5.1. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde hasar tipleri**

#### **1.5.1.1. Tabakalar arası hasar**

Anizotropik yapıları nedeniyle kompozitlerde hasar mekanizmaları oldukça karmaşıktır. Yükün tipine, uygulama doğrultusuna ve takviye elemanının yönlenme düzenine bağlı olarak kompozitlerde oluşan hasarlar farklılık gösterebilir. Sürekli

fiber takviyeli kompozitlerde tabakalar arası hasarlar üç temel mekanizma ile tanımlanabilir (Şekil 1.5) (Scheirs, 2000).

- tabaka içi (intralaminar) kırılma
- tabakalar arası (interlaminar) kırılma
- tabaka kalınlığı boyunca oluşan (translaminar) kırılma

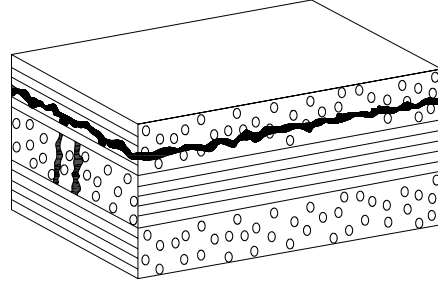
Kompoziti oluşturan tabakalar arasında meydana gelen hasar tabakalar arası kırılma olarak tanımlanmaktadır. Hasar tabaka içersinde ise tabaka içi kırılma söz konusudur. Kompoziti oluşturan tabakaların kalınlığı boyunca meydana gelen kırılmalar büyük miktarda fiber kırılmalarını da ihtiva etmektedir (Kim, 2001).

#### a) Tabakalar içi ve tabakalar arası kırılma

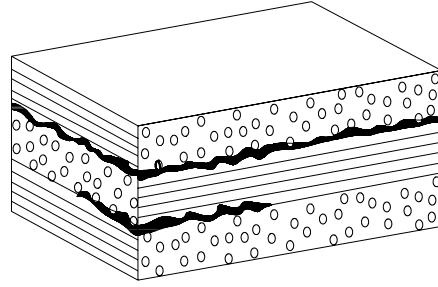
Hem tabakalar arası hem de tabaka içi kırılmalar fiber yönüne paralel olan düzlemde meydana gelir. Doğal olarak kırılma mekanizması matris kırılması veya fiber/matris ayrılması şeklindedir. Düzlemsel kayma ve çekme gerilmeleri fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalara ve matriste kırılmalara neden olur. Tabakalar içi hasarlar ağırlıklı olarak matrisin mekanik özellikleri ile ilişkilidir. Diğer yandan da fiber/matris ara yüzeyi de etkilidir. Fiber/matris ara yüzeyinden yada matris içersinden başlayan bir çatlakın ilerlemesi ile kırılma oluşur. Tabakalar arası hasar ise daha çok laminasyon hasarları şeklinde olup üretim prosesi parametrelerine son derece bağlıdır (Scheirs, 2000).

#### b) Tabaka kalınlığı boyunca oluşan kırılma

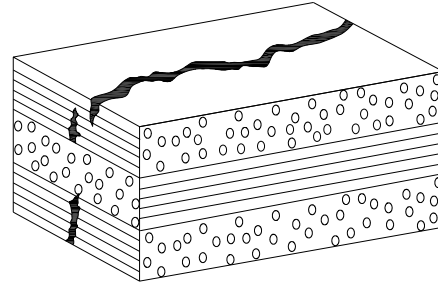
Sürekli fiber takviyeli kompozitlere bası gerilmesi uygulandığında fiberlerde mikro-burkulmalar meydana gelir. Fiberlerin mikro-burkulması tabaka kalınlığı boyunca oluşan kırılmanın bir nedenidir. Diğer yandan fiberlerin çekme nedeniyle kırılmaları neticesinde de bu tip hasarlar oluşmaktadır (Dowling, 1999).



(a)



(b)

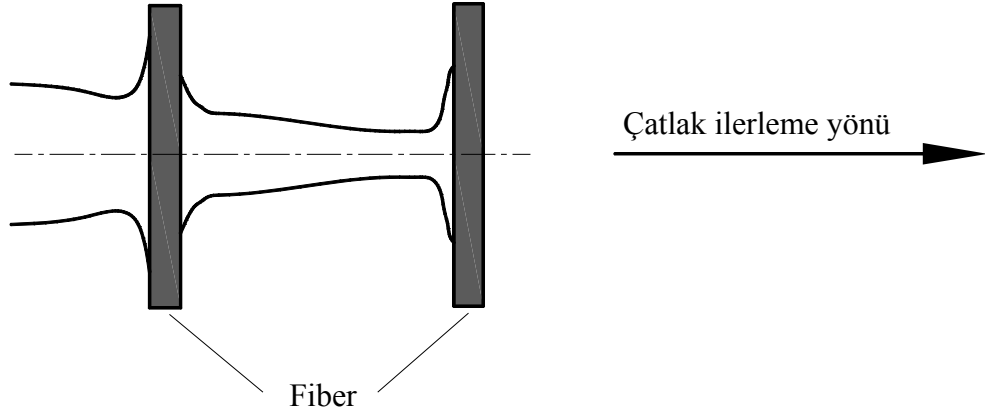


(c)

Şekil 1.5: Sürekli fiber takviyeli kompozit tabakalarda kırılma durumları: a) tabakalar içi kırılma; b) tabakalar arası kırılma; c) tabaka kalınlığı boyunca oluşan kırılma (Scheirs, 2000)

### 1.5.1.2. Soyulma (debonding)

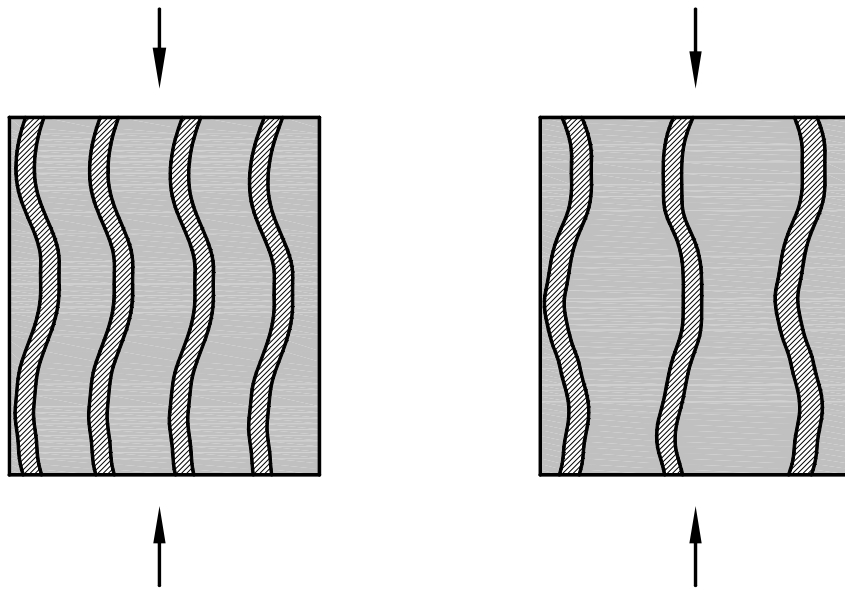
Soyulma fiber/matris ara yüzeyi boyunca meydana gelen ayrılma şeklinde oluşur. Çatlak ilerlerken karşılaştığı fiberi kıramadığı zaman fiber ile matrisin birleştiği ara yüzeyi soyarak ilerlemeye çalışır. Bu aşamada harcanan enerji ne kadar fazla ise malzemenin tokluğu okadar büyük olur (Şekil 1.6).



Şekil 1.6: Fiber/matris ara yüzeyinde soyulma mekanizması (Scheirs, 2000)

### 1.5.1.3. Fiber mikro burkulması (microbuckling)

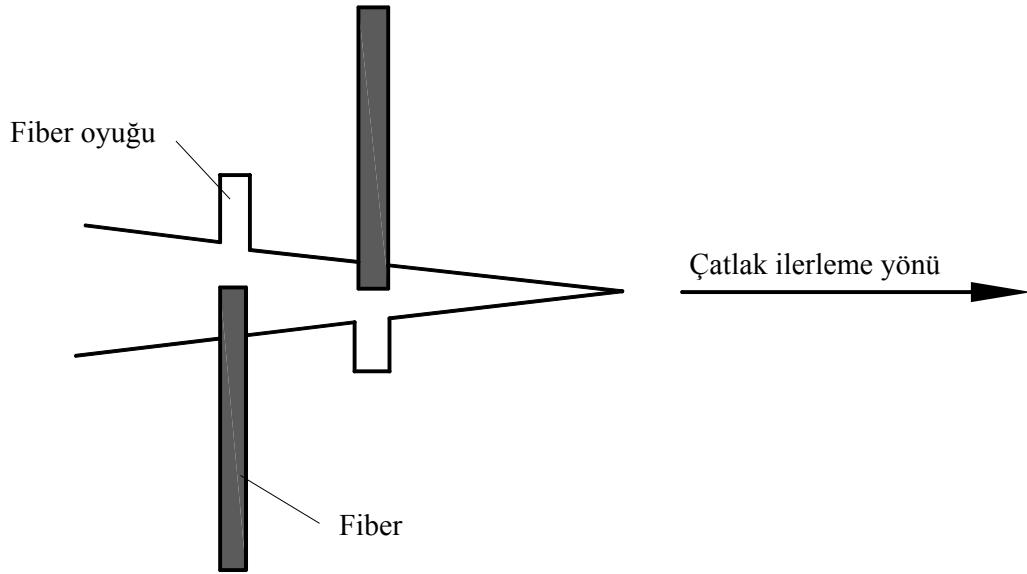
Bası etkisinde matris tarafından yeterince desteklenmeyen fiberlerin kırılması şeklinde gerçekleşir. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde kompozite baskı uygulandığında fiberlerin mikro-burkulması en yaygın rastlanan hasardır (Scheirs, 2000). Fiberler bası yükleri altında, Şekil 1.7'de gösterildiği gibi deforme olurlar. Özellikle pimin delik çeperine baskı yaptığı noktada bu tür hasarlara rastlamak olasıdır.



Şekil 1.7: Fiberlerde mikro burkulma (Gdoutos ve diğ. 2000)

#### 1.5.1.4. Fiberin yerinden çıkması (pull-out)

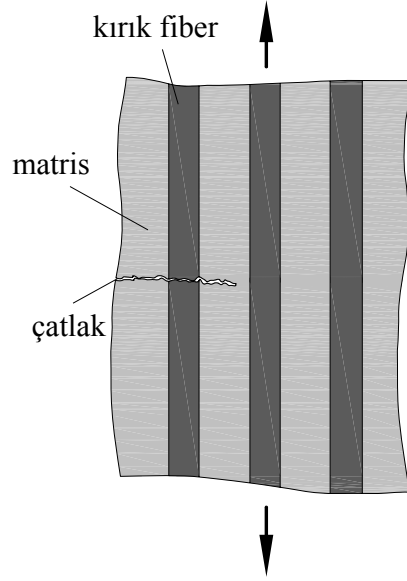
Fiberlerin yerinden çıkmasında ara yüzey dayanımının önemli bir etkisi vardır. Yerinden çıkmış fiberlerden oluşan bir yüzeyin taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile incelenmesi sonucunda fiberlerin yüzeyleri temiz görümlü ise ve matriste pürüzsüz ayrılma boşlukları varsa fiber/matris ara yüzey dayanımı düşük demektir. Fiberlerin yüzeylerinde matris kalıntıları varsa ve matriste fiberlerin yerinden çıkması ile oluşan boşluklarda deformasyonlar varsa fiber/matris ara yüzey dayanımı yüksek demektir. Fiber/matris ara yüzey bölgesindeki kalıntı gerilmeler ortaya çıkan çekme (shrinkage) kuvvetleri nedeniyle oluşmaktadır (Scheirs, 2000). Şekil 1.8'de açıklanan çıkma mekanizması ile fiber matris içersindeki yerinden çıkarken harcanan sürtünme enerjisi darbe dayanımını arttıran etki yaratmaktadır.



Şekil 1.8: Fiberlerin yerinden çıkma mekanizması (Scheirs, 2000)

#### 1.5.1.5. Fiber kırılması

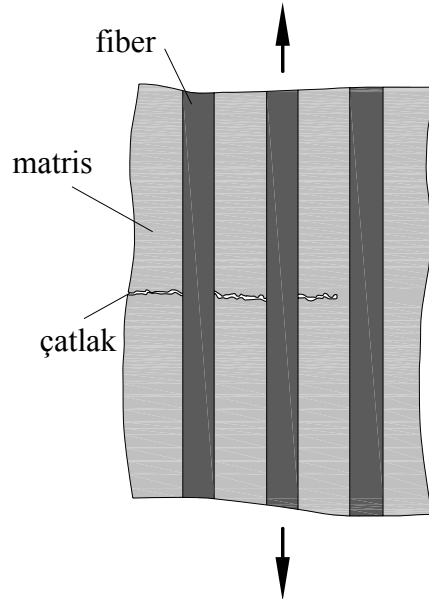
Fiber kırılması kompozitlerde en önemli enerji absorbe etme mekanizmaları arasındadır. Çekme zorlanması altında zorlanan fiberler genelde gevrek bir yapıya sahiptir. Fiberler az bir % uzama sonrası gevrek bir şekilde kırılmaktadır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9: Fiberde oluşan kırılma (Gdoutos ve diğ. 2000)

#### 1.5.1.6. Matrisin çatlaması (cracking)

Uygulanan yük etkisiyle matriste çatlak oluşumu kaçınılmaz olur (Şekil 1.10). Çatlağın ilerlemesi ancak yeni çatlak oluşumuna neden olan enerji kadar enerji matriste yayıldığında mümkün olur. Kompozitteki çatlak fiber/matris ara yüzeyinde oluşan soyulma ile başlayabilir.

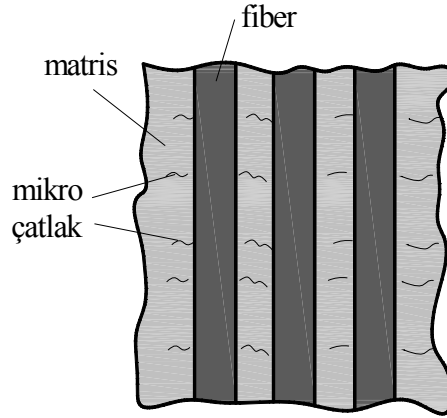


Şekil 1.10: Matriste meydana gelen çatlama (Gdoutos ve diğ. 2000)



### 1.5.1.7. Kompozitin mikro-çatlaması

Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin mikro çatlaması oldukça yaygın bir problemdir ve fiber/matris arasında termal genişleme sonucunda ortaya çıkmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıkta kompozitlerin pişirilmesinden sonra soğutma işlemi esnasında oluşur. Fiber/matris arasındaki lineer termal genişleme katsayısı farklılığı önemli mertebede gerilmelere (termal gerilmeler) neden olur. Çapraz katlı kompozitlerde katmanlar arasında makroskobik termal uyumsuzluklar olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Çapraz katlı laminatlar, tek yönlü laminatlara göre, termal genişlemede tabakalar arasındaki aşırı anizotropi nedeniyle daha yüksek kalıntı termal gerilmeler oluştururlar (Scheirs, 2000). Kompozit tabakada oluşan mikro çatlaklar Şekil 1.11’de sunulmuştur. Mikro çatlakların birleşmesiyle büyük çatlaklar meydana gelir ve bunun sonucunda da kompozit tabakada nihai hasar olan kırılma gerçekleşir.

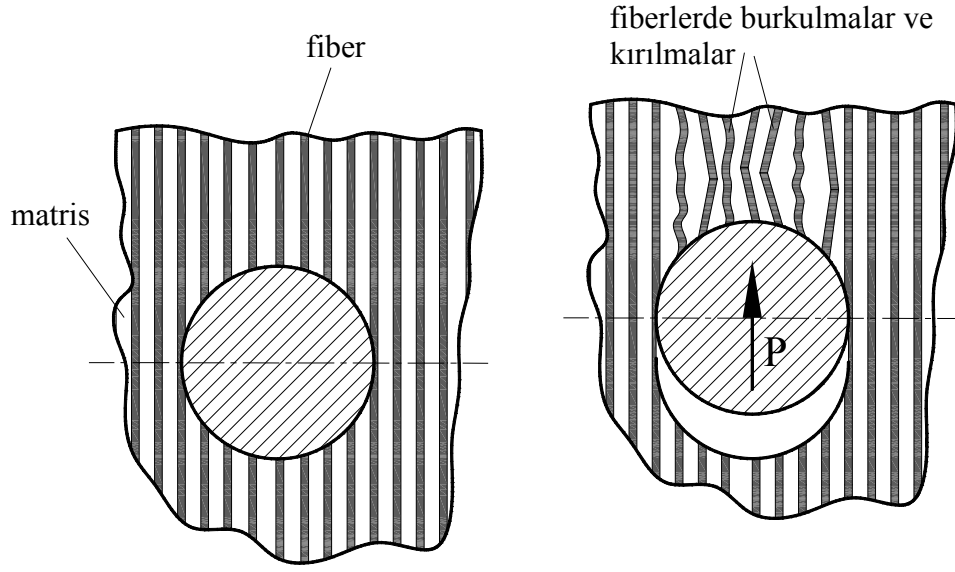


Şekil 1.11: Kompozit tabakada oluşan mikro çatlaklar (Gdoutos ve diğ. 2000)

### 1.5.2. Pimli bağlantılarda yönlenme düzenine bağlı olarak oluşan hasarlar

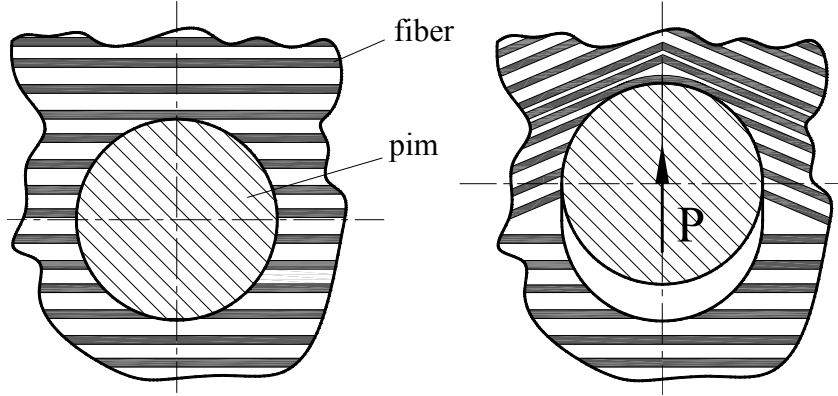
#### 1.5.2.1. (0°)<sub>s</sub> yönlenmeye sahip kompozit tabakada hasar

Pimin yukarıya doğru olan doğrusal hareketi sonucunda pim delik yüzeyine baskı uygulayarak bu bölgede fiberlerde kırılma ve burkulma gibi hasarların oluşmasına sebep olmaktadır. Pimin bası etkisi nedeniyle dairesel olarak açılan delik elips olacak şekilde deforme olmaktadır (Şekil 1.12).



Şekil 1.12:  $(0^\circ)_s$  yönlenmeli kompozit tabakada pimnin bası etkisiyle oluşan hasar

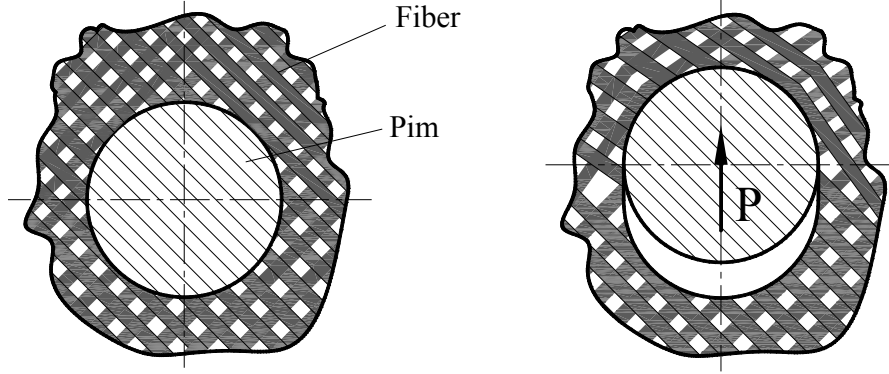
#### 1.5.2.2. $(90^\circ)_s$ yönlenmeye sahip kompozit tabakada hasar



Şekil 1.13:  $(90^\circ)_s$  yönlenmeli kompozit tabakada pimnin bası etkisiyle oluşan hasar

Şekil 1.13'ten görüldüğü gibi yükün uygulama doğrultusu ile fiberlerin yönlenme doğrultusu birbirine diktir. Uygulanan yük etkisiyle pimnin yukarıya doğru hareketi neticesinde fiberlerde bükülmeler ve kırılmalar oluşmaktadır.

### 1.5.2.3. $(45^\circ/-45^\circ)_s$ yönlenmeye sahip kompozit tabakada hasar



Şekil 1.14:  $(45^\circ/-45^\circ)_s$  yönlenmeli kompozit tabakada pim bası etkisiyle oluşan hasar

Uygulanan yükün pim vasıtasıyla kompozit tabakaya iletilmesi anında bası zorlanması nedeniyle pim ile delik yüzeyi arasında ezilmeler meydana gelir. Bunun yanında kompozit tabakanın sahip olduğu geometri nedeniyle katmanlar arasında kayma gerilmeleri oluşmaktadır, bunun sonucunda da tabakalar arası delaminasyonların ortaya çıkması kaçınılmaz olmaktadır (Şekil 1.14).

## **BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI**

### **2.1. Statik Yükleme Şartlarında Sürekli Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Pim ile Yük Taşıma Performansları**

Gelişmiş mühendislik uygulamalarında (özellikle uzay ve havacılık uygulamalarında) polimer kompozit malzemeler yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle geniş kullanım alanına sahiptir. Uçaklarda kullanılan kompozit levhalar genellikle ince kesitlidir ve büyük kuvvetlerin taşınabilmesi için tasarlanmışlardır. Kompozit levhaların birleştirilmesi için kullanılan yöntemlerden biri de perçin bağlantılarıdır. Uçakları meydana getiren kompozit yapı elemanları, uçağın servis ömrü boyunca değişken yüklemelere maruz kalmaktadır. Belirli bir servis ömrü sonunda kompozit elemanlarda hasar meydana gelir. Bu yüzden kompozit malzemelerin mekanik birleştirme elemanlarıyla birleştirilmesi sonucunda elde edilecek olan yapının güvenilir olabilmesi için malzemelerin yükleme altındaki davranışlarının bilinmesi gerekir. Perçinli bağlantılardaki ana hedef, uygulanan yükün, birleştirme bölgesinde yer alan levhaların birinden diğerine perçinin silindirik gövdesi vasıtasıyla iletilmesidir. Diğer yandan perçin deliklerinin varlığı ayrıca birleştirme bölgesinde gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Oluşan gerilme yığılmaları yükleme esnasında hasarın oluşmasında kaynak teşkil eder (Caprino ve diğ. 2002).

Perçinli bağlantıların sökülebilir olması, yapısının basit oluşu ve tamir edilebilir olması nedeniyle karmaşık gövde tasarımlarında kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Perçinli bağlantılarda levhaların taşıyabileceği emniyetli yüklerin ve oluşacak hasar tiplerinin belirlenmesi büyük önem taşır. Perçinli bağlantılar üzerine yapılan birçok araştırmada ortaya konulduğu gibi bağlantının performansına etki eden birleştirme geometrisi ile ilgili başlıca parametreler: pim çapı, “D”, kompozit levhanın genişliği, “W”, kompozit levhanın serbest kenarından delik eksenine olan

mesafesi, “E”, kenar uzaklığının pim çapına oranı, “E/D” ve tabaka genişliğinin pim çapına oranı, “W/D” dir.

Birçok araştırmacı perçinle birleştirilen kompozit levhaların dayanımını incelemiştir. Bu bağlantıların dayanımının, bağlantı geometrisi, fiber oryantasyonu, tabakaların oryantasyonu ve plaka kalınlığı boyunca gerçekleşen basınç dağılımı vb. parametrelere bağlı olduğu görülmüştür (Smith, 1980).

Lessard ve Shokrieh (1995), pim ile birleştirilmiş kompozit panellerde meydana gelen hasar türlerini araştırmışlardır. Bu araştırmacılar çalışmalarında, açılan delik çapının levha genişliğine oranının küçük olduğu,  $W/D < 3$ , yada deliğin kompozit levhanın uç tarafına çok yakın olduğu,  $E/D < 3$ , durumlarda yük taşıma kapasitesinin azaldığını tespit etmişlerdir. Chang ve Scott (1982), fiber takviyesi yapılmış farklı tabakalarda, farklı konfigürasyonlarda (farklı delik boyutları, delik pozisyonları ve levha kalınlıkları) olan levhaları incelemiştir. Yine Chang ve Scott (1984), çalışmalarını iki deliğin seri veya paralel olarak bulunduğu levhalar üzerine de genişletmişlerdir. Elde edilen sonuçlardan geometrik parametrelerin pim ile yük taşıma performansını yakından etkilediğini görmüşlerdir. Liu ve diğ. (1999), pim çapı ile kompozit levhanın kalınlığı arasındaki etkileşimi incelemiştir. Sonuçlar, küçük pimli kalın kompozitler ve geniş pimli ince kompozitler, benzer kompozit kalınlığı ve pim çapı boyutları olan bağlantılara göre daha düşük verimliliğe sahip olduğunu göstermiştir. Collings (1977), kat oryantasyonları, levha kalınlıkları ve cıvata sıkma momentleri gibi değişkenleri incelemiştir. Collings (1982) ayrıca bağlantı mukavemeti ile  $W/D$ ,  $E/D$ ,  $t/D$  parametreleri arasındaki ilişkileri inceleyerek yük taşıma performansının bu parametrelere bağlı olduğunu göstermiştir. Chen ve Chiu (1994) takviye tipinin, dokuma yapısının, numune genişliğinin delik çapına olan oranına ve delik merkezinin kenardan uzaklığının delik çapına olan oranın etkilerini belirlemişlerdir. Sıralanan bu özelliklerin yataklama dayanımını etkilediğini bulmuşlardır. Naby ve Hollaway (1993), ekstrüzyonla kalıplanmış olan kompozit malzemelerin pimli bağlantılarının davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak kritik “E” uzunluğunu elde etmişler ve bu “E” uzunluğunun “W” genişliği ile ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Khashada (1996) fiber hacim oranının yataklama mukavemetini etkilediğini bulmuştur. Herrington ve

Sabbaghian (1992), pim merkezinden numune kenarına olan mesafenin pim çapına oranı (E/D) ve numune genişliğinin pim çapına oranı (W/D)'nin yataklama dayanımını ve oluşan hasar tiplerini yakından etkilediğini bulmuşlardır. Hyer (1987), pim yüklemeli bağlantılarda pim elastikliğinin, pim ile delik arasındaki boşluğun ve sürtünmenin delik etrafındaki gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sıralanan özellikler delik çevresindeki gerilme yığılmasını ve dolayısıyla pim ile yük taşıma performansını etkilemiştir.

Maikuma ve Kubomura (1993),  $[0^0/\pm 45^0/90^0]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip karbon fiberli kompozit tabakaların yataklama dayanımının, pim merkezinden numune kenarına olan mesafenin pim çapına oranı (E/D)'nin 3'e eşit veya büyük olması halinde; ve numune genişliğinin pim çapına oranı (W/D)'nin 4'e eşit veya büyük olması halinde maksimum değerine ulaştığını göstermişlerdir. Aktaş ve Karakuzu (1999), sürekli karbon fiber takviyeli epoksi kompozit levhaların pimlerle bağlantısını inceleyerek bu bağlantılarda hasara neden olan yükü ve oluşan hasar tiplerini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, ideal hasar tipi olan yataklama tipi hasarın E/D ve W/D oranlarının 4 veya 4' ten büyük olduğu durumlarda meydana geldiğini bulmuşlardır. Fu-Kuo ve Scott (1984)  $[(0^0/45^0/-45^0/90^0)]_s$ ,  $[(0^0/45^0/-45^0)]_s$  ve  $[(0^0/90^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip grafit epoksi kompozit tabakalardaki yataklama dayanımı ve oluşan hasar tiplerini nümerik olarak araştırmıştır.  $[(0^0/45^0/-45^0/90^0)]_s$  yönlenme düzenine sahip kompozit plakalarda W/D=4 ve E/D=4 olması halinde en yüksek yataklama dayanımı değerleri elde etmişlerdir. Quinn ve Matthews (1977), karbon fiber takviyeli kompozit plakalardaki fiberlerin yönlenme düzeni, yataklama dayanımını belirgin bir şekilde etkilediğini göstermişlerdir. Collings (1982), karbon epoksi kompozitlerdeki yataklama dayanımının doğrudan tabaka kalınlığı ile orantılı olduğunu göstermiştir. Akay (1992), hidrotermal etkiye tabi tutulmuş tek yönlü ve örülmüş karbon fiber takviyeli epoksi matris kompozit tabakaların statik ve dinamik dayanımları üzerinde çalışmalar yapmıştır. Sonuçta bu etkinin kompozitin statik ve dinamik dayanımını azalttığını tespit etmiştir. Persson ve diğ. (1992), karbon fiber/epoksi matris kompozitlerde delik açma yöntemlerinin ve üretim kusurlarının statik dayanım ve yorulma ömrü üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Delik açma işlemi ile ilgili üretim

hatalarının pim yüklemeli bağlantılarda bağlantı mukavemetini ve yorulma dayanımını azalttığını tespit etmişlerdir.

Pyner ve Matthews (1979), tek delikli ve çok delikli cam fiber takviyeli kompozitlerin pimli bağlantılarının karşılaştırılmasını deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar bağlantı mukavemetinin, bağlantı yeri geometrisinin karmaşık hale gelmesiyle azaldığını göstermiştir.

## **2.2. Sürekli Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerde Kimyasal Ortamın Etkisi**

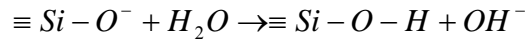
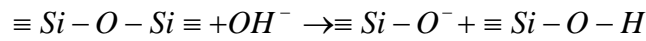
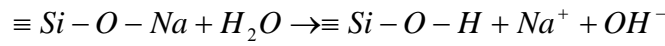
### **2.2.1. Kimyasal ortamda cam fiber degradasyonu**

Cam fiber takviyeli polieterimit kompozitler hafif olmaları nedeniyle spor ile ilgili ekipmanların yapımında, ticari ve askeri uygulamalarda oldukça yaygın kullanılmaktadır. Özellikle denizcilik alanında cam fiber takviyeli polimerler kargo, yolcu, sahil güvenlik gemilerinde, sörf tahtalarında, kanolarda ve yarış yatlarında, denizaltılarında ve kıyıda uzak petrol platformlarında geniş kullanım alanına sahiptir. Cam fiber takviyeli polimer kompozitler enerji santrallerinde ve su arıtma tesislerinde çeşitli kimyasalların depolanmasında ve taşınması esnasında da çok sık kullanılmaktadır. Birçok polimer asidik veya bazik ortamlar tarafından kimyasal degradasyona uğratılır (Scheirs, 2000). Cam fiber takviyeli polimerler yüksek mekanik özellikleri ve çevresel degradasyona olan dirençleri nedeniyle oldukça popülerdir. Diğer fiber takviyeli polimerler ile kıyaslandığında cam fiber takviyeli polimerlerin kalınlık boyunca (translaminar) olan mekanik özellikleri oldukça düşüktür. Dolayısıyla değişik yükleme koşulları altında polimer matriste ve cam fiberlerde çatlaklar bunun sonucunda da tabakalar arası delaminasyon hasarı oluşur (Mouritz ve diğ. 1997).

Cam fiber takviyeli kompozitlerde en fazla E-camı kullanılmaktadır. E-camının yapısında ağırlıkça %54.3 SiO<sub>2</sub>, %17.2 CaO, %15.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %8.0 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %4.7 MgO ve % 0.6 Na<sub>2</sub>O mevcuttur. Camın oksidanlara ve organik solventlere (bazik karakterleri nedeniyle aminler hariç) karşı olan dayanımı oldukça yüksektir. Yapısında yüksek miktarda Pb, Fe ve Al bulunmayan cam asit saldırılarına karşı da dayanıklıdır. Cam

ayrıca pH değeri nötr olan ortamlara karşı da dirençlidir. Cam bazik ortamlardan (pH değeri 9 dan büyük olan çözeltilerden) ve hidroklorik asit çözeltilerinden hızlı bir şekilde etkilenmektedir (Russell, 2001).

Alkali (bazik karakterli) metallerin (Na, K, Li gibi 1A grubu) cam ile yüksek derecede reaksiyona girme nedeni hidroksit iyonunun, OH<sup>-</sup>, etkisinden kaynaklanmaktadır. Hidroksit iyonu camın yapısını bir arada tutan siloksi bağlarını parçalayarak camın degradasyonuna neden olmaktadır. Camın maruz kaldığı ortam bazik veya asidik karakterli ise OH<sup>-</sup> iyonlarının oluşumu kaçınılmaz olur. Bunun sebebi camın yapısındaki alkali metal veya toprak alkali iyonların ayrışması ve bunun sonucunda OH<sup>-</sup> iyonlarının oluşmasıdır. Bu şekilde oluşan mekanizmalar aşağıdaki gibidir (Russell, 2001):



Sulu çözeltilerin cam yüzeyine olan saldırısı dört siloksi bağının tamamının parçalanmasına ve bunun sonucunda Si(OH)<sub>4</sub> monomerlerinin (küçük molekül) oluşmasına neden olur. pH derecesi yüksek olan çözeltilerin cama olan etkisi oldukça fazladır (Feng ve diğ. 1993).

Metcalf ve Schmitz (1982) korozyonun ortaya çıkmasında başlıca etkenin camdaki alkali metal iyonlarının (Na<sup>+</sup> ve K<sup>+</sup>) saldırı ortamının hidrojen iyonları (H<sup>+</sup>) ile olan reaksiyonu olduğunu göstermişlerdir. Diğer taraftan Metcalf ve Schmitz (1982) gerilmeli korozyonun iki aşamadan oluştuğunu ileri sürmüşlerdir: kuluçka dönemi, cam fiber ömrünün yaklaşık %95'ine karşılık gelen süre boyunca etkili olmaktadır ki bu dönem suyun kationlar (pozitif yüklü iyon) ile olan etkileşimi yani hidroksil konsantrasyonu (pH) tarafından kontrol edilmektedir. Kuluçka periyodunu silika ağlarının hızlı bir şekilde korozyonuna neden olan periyot takip etmektedir. Bu periyotta korozyon ve gerilme etkisiyle oluşan çatlaklar kritik boya ulaşırlar. Çatlakların kritik boya ulaşması hasarın gelişmesine neden olur. Vauthier ve diğ. (1995) çevresel yaşlanmaya maruz bırakılmış cam fiber takviyeli polimer



kompozitlerde meydana gelen fiber kırılmalarının yaşlanmamışlara nazaran çok daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Komai ve diğ. (1991) çevresel yaşlandırmaya maruz kalan fiberlerin degradasyonunu maruz kalınan sıvıda cam fiberlerin ihtiva ettikleri elementleri bularak kanıtlamışlardır.

Yüksek mukavemet ve işlenebilirlik gibi çekici özelliklere rağmen cam fiber takviyeli polimerler servis ortamının korozif etkilerine karşı dayanıksızdır. Uygulanan gerilme ve deformasyonla birleşen bozucu çevre şartları cam fiber takviyeli polimerlerin bozunmasını hızlandırır. Cam fiber takviyeli polimerlerde, daldırılmış haldeki yapıya sabit bir gerilme uygulanırsa gerilme korozyonu çatlak oluşur (Barker ve diğ. 1979). Gerilme korozyonu, fiber takviyeli kompozitlerin, zararlı sıvı ortamı varlığında mekanik ve kimyasal bozunumu olarak tanımlanır. Bu olay, zayıflatılmış asitlere maruz bırakılan fiberlerin kendiliğinden çatlaması, yada uygulanan gerilmeler altında kompozit levhalarının bozunması olarak karakterize edilir (Metcalf ve Schmitz, 1972). Hogg ve Hull (1980), cam fiberlerde, herhangi bir gerilme uygulanmasa bile ani kopmaların söz konusu olduğunu ve bu prosesin iki önemli aşamadan (iyon değişimi ve cam yüzeyinin dağlanması aşamaları) meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Her iki aşama da fiberlerde önemli derecede boyutsal değişimlere sebep olur ve bunun sonucunda fiberlerde oluşan lokal yüzey gerilmeleri de zamansız (erken) deformasyona sebep olur. Lewis ve Bedder (1984), asitli ortamlarda cam fiber takviyeli kompozit malzemelerde çatlak gelişimi ve yıkımın aşağıdakiler tarafından etkilendiğini belirtmişlerdir:

- fiber yoğunluğu
- yük ile fiber arasındaki açı
- levha düzeni (oryantasyon)
- kompozit elemanlarının dayanımı (fiber, matris, fiber-matris ara yüzeyi)

Cam fiber takviyeli polimer kompozitlerde gerilmeli korozyon çatlakları korozif çevreye ve yüke maruz kalınması sonucunda meydana gelmektedir. Malzeme içersinde çatlakların başlaması ve ilerlemesi cam fiberlerin asit tarafından zayıflatılmasına bağlıdır. Çatlak ucundaki fiber yüzeylerinin asit ile kimyasal etkileşimi ve asidin yapıya difüzyonu sonucunda fiberlerin dayanımında dramatik bir

düşüş meydana getirir. Bu olay daha düşük gerilme değerinde ortaya çıkar ve düzlemsel kırılmaya neden olur. Malzemenin tokluğunda ve yorulma direncinde hızlı bir düşüş ile birlikte fiberlerin tamamı çatlak düzleminde kırılmakta ve fiberlerin yerinden çıkması (pull-out) işi hemen hemen sıfır olmaktadır (Haris, 1994). Korozif çevrenin varlığı, fiberlerin normal hasar dayanımından çok daha düşük bir değerde hasara uğramasına sebebiyet verir. Asidin malzemede mevcut olan mikro çatlaklardan ve matris içersindeki boşluklardan akarak fiberlere ulaştığı rapor edilmiştir (Caddock ve diğ. 1990). Bu boşluk ve çatlaklar çatlak ucunun ilerisindeki bölgede gerilmenin kuvvetlenmesi sonucunda oluşur ki bu da gerilmeli korozyon çatlağının gelişmesine sebep olur (Hogg ve Dull, 1983). Büyüyen çatlağın uç kısmından başlayarak fiberlerin dayanımı azalır ve bunun sonucunda hasar oluşur. Fiberlerde hasar, adım adım ve her bir fiberin kırılması arasında oluşan gecikme periyodu ile meydana gelir (Price ve Hull, 1987). Bu gecikme periyodu asidin fiber yüzeyine ulaşması ve fiberlerin dayanımını azaltması için geçen süre şeklinde tanımlanabilir. Çatlağın keskinliği ve düzgünlüğü, kırılma yüzeyinin geometrisi, tek yönlü sürekli fiber takviyeli, çapraz katlı veya rasgele dağılımlı fiber takviyeli kompozitlerde gerilmeli korozyon çatlağının büyüklüğünü karakterize eder. Bütün durumlarda hasar prosesi fiberler ve fiber yığınları boyunca oluşan çatlakların ilerlemesini kapsamaktadır (Hogg, 1990).

Carswell ve Roberts (1980) cam fiber takviyeli poliesteri su ve asit içeren ortamlara maruz bırakarak çevresel yaşlandırmanın etkilerini araştırmışlardır. Asitli ortamda oluşan ilk matris çatlağından sonra çatlak oluşumu hızla artmakta ve böylece kompozitin hasarı kaçınılmaz olmaktadır. Hofer ve diğ. (1987) cam/epoksi kompozitlerde matris çatlakları boyunca nüfuz eden nemin kompozitin dayanımını, elastik modülünü ve fiber/matris ara yüzey adhezyonunu hızlı bir şekilde etkilediğini göstermişlerdir. Bu olay matriste çatlak oluşum hızını arttırmakla beraber kompozitin servis ömrünü kısaltmaktadır.

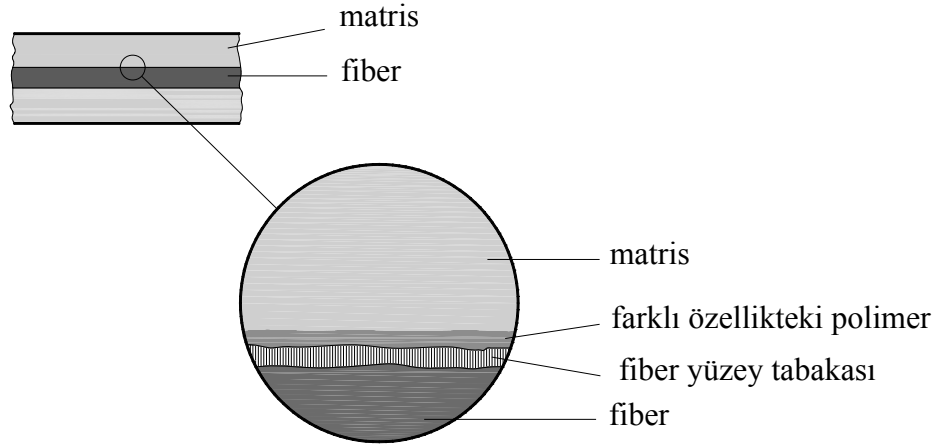
Güçlü kimyasal çözeltiler, cam yüzeyinde meydana gelen iyon hareketleri (proton iyonlarının metal iyonları ile yer değiştirmesi) nedeniyle cam fiber dayanımında degradasyona neden olur. Asitler ve bazlar polimer matrisin depolimerizasyonunu

(polimerleri oluşturan manomerlerin birbirinden ayrılması) ve siloksi bağlarının bu ortamlarda ayrışmasını hızlandırmaktadır.

### **2.2.2. Kimyasal ortamda fiber/matris ara yüzey degradasyonu**

Çevresel yaşlandırma sırasında kompozitte oluşabilecek hasar mekanizmalarına fiber/matris ara yüzey bölgesinin etkisi kaçınılmazdır. Çevresel yaşlandırma esnasında malzemeye dıştan bir kuvvet etki etmemesi halinde dahi fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalar oluşabilir. Kimyasal yaşlandırmaya maruz kalan tek yönlenme düzenine sahip kompozitlerin mekanik dayanımı farklı yönlenme düzenine sahip olanlara nazaran daha yüksektir. Bu oluşum kompoziti oluşturan fiberlerin yönlenme düzenine bağlıdır. Farklı fiber oryantasyonuna sahip kompozit geometrik olarak daha karmaşık yapıdadır bu yüzden sulu çözeltinin ara yüzey bölgesine olan etkisi bu yönlenme düzeninde daha fazladır. Daha önce yapılan çalışmalarla fiber/matris ara yüzeyinin fiber takviyeli kompozitlerin çevresel yaşlandırma performansına olan etkisi gösterilmiştir. Fiber/matris ara yüzey bölgesi akışkan girişi etkisiyle hasara uğrarsa fiberler yapıyı güçlendirme fonksiyonlarını yitirirler. Bundan dolayı metristeki çatlakların gelişimi çok daha kolay olmaktadır (Liao ve diğ. 1999).

Fiber, matris ve fiber/matris ara yüzey ilişkisini daha iyi anlayabilmek için ara faz olarak adlandırılan fiber ve matris arasında yer alan ve farklı mekanik özelliklere sahip üç boyutlu bir bölge tanımlanmıştır. Bu bölgenin yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Drzal, 1993). Geliştirilen bu modele göre ara faz bölgesinin özellikleri fiberden başlayarak fiber/matris ara yüzeyi boyunca (burada ara yüzey farklı özellikteki polimer ve fiber yüzey tabakası arasındaki sınır olarak tanımlanmıştır) polimer matrise kadar değişmektedir. Termoplastik malzemelerde ara faz bölgesi transkristallerden oluşmaktadır. Tanımlamaların daha anlaşılır olması için iki boyutlu ara yüzey ve üç boyutlu ara faz yerine ara yüzey terimi tek başına kullanılmaktadır.



Şekil 2.1: Fiber ve matris arasındaki ara faz bölgesinin şematik gösterimi (Drzal, 1993)

Ara yüzey kompozitin özelliklerini kontrol etmede kritik bir bölgedir. Kompozite uygulanan yük matristen fibere doğru ara yüzey bölgesi boyunca iletilmektedir. Ara yüzeyin hasar anında deformasyona uğrayarak enerji absorbe etmesi oldukça önemlidir (Madhukar ve Drzal, 1993). Yüksek performanslı fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerde fiber matristen daha yüksek modül değerine sahiptir. Kompozitin belirli bir gerilme değerine kadar yüklenmesi esnasında fiber matristen daha fazla yük taşımaktadır. Saldırgan çevre koşullarında ara yüzey bölgesinin yüksek hasar toleransına ve dayanımına sahip olması gerekir, çünkü hasarın gelişimi ara yüzey bölgesi tarafından kontrol edilmektedir. Herhangi bir fiberde kırılma meydana geldiğinde bu bölgeye komşu olan fiberler de yüksek gerilme konsantrasyonlarına maruz kalır (Heuvel ve diğ. 1998). Bu yüzden ara yüzey bölgesi özelliklerinin değişimi kompozitin yük taşıma kapasitesini yakından etkilemektedir. Fiber/matris ara yüzey bağının güçlü olması yüksek gerilme konsantrasyonlarına neden olmakta ve hasar anında düzlemsel bir kırılma söz konusu olduğundan fiber/matris ayrılması ve fiberin ara yüzey boyunca sıyrılması gibi enerji absorbe eden mekanizmaların oluşması engellenmiş olmaktadır. Böylece gevrek kırılmanın oluşumu kaçınılmaz olur. Ara yüzeyin esnek bir yapıda olması gerilme konsantrasyonlarını belirgin mertebede azaltmaktadır. Bu tip ara yüzeye sahip kompozitte fırça ucuna benzer kırılma yüzeyi elde edilmektedir. Bu tip kırılma yüzeyine sahip kompozitlerin sünekliği ve tokluğu ara yüzeyde enerji absorbe eden mekanizmalar nedeniyle yüksektir.

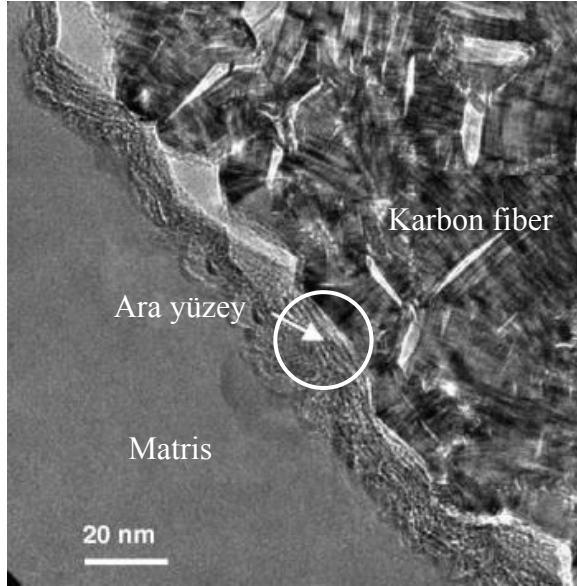
### **2.2.2.1. Sürekli cam fiber takviyeli polimer kompozitlerde ara yüzey degradasyonu**

Cam fiberlerde sıvılar tarafından oluşturulan hasar cam ile sıvı arasındaki fiziksel veya kimyasal etkileşimler nedeniyle başlamaktadır. Oluşan hasar sıvı tipine, sıvı konsantrasyonuna, ve fiberin kimyasal bileşimine bağlıdır. Yapılan çalışmalar cam/epoksi ara yüzey bölgesinin sulu ortamdaki kompozitin dayanımını oldukça etkilediği görülmüştür (Wagner ve Lustiger, 1994). Akışkan saldırısı sonucunda cam fiber/polimer matris ara yüzey bölgesi hasara uğrayarak fiber ile matris birbirinden ayrılabilir. Fiber ile matris arasındaki bağ güçlendirildiğinde, özellikle kimyasal bağ ile (kimyasal ajanların kullanılması ile), korozyon prosesi gecikme eğilimine girerek mekanik özelliklerdeki kayıplar azalır. Akışkan absorpsiyonunun matriste oluşturduğu zararlı etki, fiber/matris ara yüzey bölgesinde oluşan hasarın kompozitin mekanik özellikleri üzerinde bırakmış olduğu olumsuz etkiden daha azdır. NaOH ve HCl gibi ortama maruz bırakılmış E-camı/vinilester kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinde ani düşüşler meydana gelmektedir. Cam fiber takviyeli polimerlerin sulu çözeltilerde ve suda yaşlandırılması sonrasında fiber/matris ara yüzey bölgesinde ayrılmalar oluşmuştur. Sulu çözeltilerin etkisinin suya nazaran oldukça fazla olduğu görülmüştür (Liao ve diğ. 1999).

### **2.2.2.2. Sürekli karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerde ara yüzey degradasyonu**

Otomotiv ve havacılık uygulamalarında metal yerine karbon fiber takviyeli polimerlerin kullanılması gün geçtikçe artmaktadır (Browne ve diğ. 1997). Bu uygulamalarda kullanılan karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin başlıca faydaları arasında ağırlık kazancı, daha düşük maliyet ve azaltılmış parça sayısı yer almaktadır. Bu uygulamalarda termoplastiklerin kullanılmasının en önemli sebebi doğal tokluk özellikleridir. Yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılan malzemelerin saldırgan ortamlara karşı (yağlar, yakıtlar, solventler, asitler ve bazlar) dayanıklı olması gerekir. Bundan dolayı yüksek performanslı termoplastiklerin kimyasallara maruz kalması sonucunda ortaya çıkacak etkilerin anlaşılması önemlidir.

Karbon fiberlerin kimyasallara olan direnci cam fiberlere nazaran daha yüksektir. Genellikle karbon fiberlerin sulu ortamlarda çözünmesi ve bozunması oldukça düşüktür. Bunun yanında karbon fiberler mükemmel mekanik ve termal özelliklere de sahiptir. Karbon fiberlerin kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmasında başlıca engel maliyettir. Kimyasal bozunmaya karşı yüksek dirence sahip olmalarına rağmen karbon fiber takviyeli kompozitler galvanik korozyona ve diğer elektro kimyasal etkilere karşı oldukça duyarlıdır. Bunun sebebi karbon fiber takviyeli polimerlerin deniz suyu gibi elektriği ileten ortamlarda metallerle olan temasıdır (Russell, 2001). Şekil 2.2’de karbon fiber/polimer matris ara yüzeyini gösteren geçirimli elektron mikroskobu (GEM) fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 2.2: Fiber/matris ara yüzeyini gösteren GEM fotoğrafı (Stevens ve diğ. 2005)

Hidroklorik asit (pH=1) gibi güçlü asitlerin sulu çözeltileri ara yüzeyde meydana gelen korozyon nedeniyle polimer matrisli kompozitte hızlandırılmış degradasyona neden olur. Asidik veya bazik çözeltilerin etkisine karşı en büyük dirence karbon fiberler sahiptir. Buna rağmen metallerin bulunduğu ortamda elektrik ileten maddelerin varlığı galvanik korozyonu hızlandıran etki yaratır (Russell, 2001).

### 2.2.3. Kimyasal ortamda polimer matris degradasyonu

Polimer malzemelerin kimyasal bozunmalarına, plastik sıhhi tesisat borularının veya depolama tanklarının bakımı sırasında kullanılan güçlü dezenfektan sıvılar tarafından bozunmaları, elastomerik contaların organik sıvılarla temas ederek kabarmaları ve mikro organizmaların salgıladıkları kimyasalların bozucu etkileri gibi farklı alanlardaki etkileşimler örnek verilebilir. Ayrıca, polimerlerin kimyasal bozunmaları asit ve baz etkilerini de içermektedir (Fried, 2003).

Güçlü oksitleyici sıvıları depolamak için kullanılan depolama tanklarının üretiminde sıklıkla polimer matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Polimerlerin kimyasal dayanımını, kimyasalların konsantrasyonu, temas süresi ve sıcaklığı gibi birçok faktöre bağlı olduğu kadar polimerin kimyasal yapısı ve morfolojisine de bağlıdır. Çeşitli kimyasal ürünlerin etkilerini anlamak için plastik üreticileri ürünlerini belirli kimyasallara temas ettirerek değerlendirme ihtiyacı duyarlar (Jones, 2001).

Su veya sulu çözeltiler gibi polar solventlerin polimerler üzerindeki esas etkisi C-O veya C-N gibi bağların kırılmasına neden olan çözünme reaksiyonları ile açıklanabilir. Oluşan çözünme reaksiyonları genellikle değişim reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlar esnasında molekülün bir atomu veya atom grubu başka atom veya atom grubuyla yer değiştirir. Dolayısı ile bunun gibi reaksiyonlar, asitler özellikle de bazlar tarafından hızlandırılmaktadır (Schnabel, 2001). Polar solventlere maruz bırakılan polimerlere olan saldırı temas yüzeyi ve suda ayrışma mertebesi ile sınırlıdır (Schnabel, 2001). Tablo 2.1 polimerlerin kimyasal degradasyonuna neden olan ortamları göstermektedir (Scheirs, 2000). Sulu ortamların pH derecesi fiberlerin korozyonu ve bunun sonucunda kompozitin degradasyon kinetiği üzerinde önemli etkiye sahiptir (Gentry ve diğ. 1998).

Tablo 2.1: Polimerlerin kimyasal degradasyonuna neden olan ortamlar (Scheirs, 2000)

<b>Polimer</b>	<b>Kimyasal ortam</b>
Poliasetal	Asitler
PET	Bazlar
Poliiolefin	Oksitleyici asitler
<b>PEI</b>	Alkaliler
PC	Aminler
<b>PPS</b>	Oksitleyici ajanlar, asitler

Polimer matrisin sulu çözeltilerde çözünmesi yapıdaki boşlukları ve dolayısı ile absorpsiyon kapasitesini arttırmaktadır. Bununla birlikte ara yüzey bölgesinde oluşan çatlaklar ve ayrılmalar geniş alanların açılmasını sağlayarak hidrolitik etkiyi hızlandırmaktadır. Matriste meydana gelen degradasyon fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalara bu ayrılmalar neticesinde de korozif ortam fiberlerde korozyona neden olmaktadır (Russell, 2001).

Güçlü kimyasallar oksidasyon ve hidroliz gibi prosesler ile polimeri geri dönüşü mümkün olmayacak şekilde bozabilmektedir. Bu prosesler, polimerlerde zincir kırılmasına ve çapraz bağlanmaya neden olmaktadır. Polimerler su, glikol, aminler ve bunlara benzer özellikteki çeşitli kimyasal ajanlar tarafından bozunmaya oldukça duyarlıdır. Bu kimyasalları içeren ortamlara maruz bırakılan polimerlerde hasar meydana gelebilmektedir.

Polimerlerde çevresel gerilme çatlama (ÇGÇ) yaygın bir hasardır, malzeme yüzeyinde oluşan çatlaklar buna örnek olarak verilebilir. Sadece dış kuvvetlerle ÇGÇ oluşmaz aynı zamanda artık gerilmeler nedeniyle ortaya çıkan iç kuvvetlerle de meydana gelebilir (Bonten ve Berlich, 2001).

Kimyasal bozunma için, gevrekleşme (moleküler ağırlık kaybını gösterir), yüzey çatlakları, yüzeyde oyuk izleri, kabarma, çarpılma, renk solması, boşluk oluşumu, fiber/partikül takviyesinin çıkması önemli göstergelerdir.

Polimerik malzemeler kaynar suya, buhara, asidik veya bazik çözeltilere maruz kaldıklarında hidrolize uğramaktadır. Poliesterler, polikarbonatlar ve polyethermidler gibi polimerlerin tümü tekrarlanan birimlerinde hidroliz edilebilir bağlarla birleşmiş



gruplar içermektedir. Dolayısıyla, neme ve yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında moleküler ağırlıklarında şiddetli bir düşme eğilimi baş gösterir ve sonuç olarak da ilgili özelliklerini kaybedebilirler (Fried, 2003).

### **2.2.3.1. Polimer matrise çözücünün (solventin) etkisi**

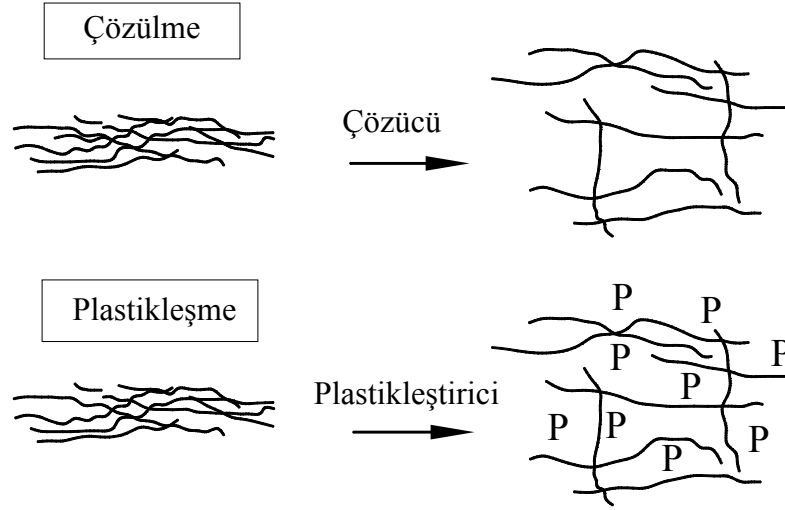
Polimerler kimyasal ve çevresel etkilere karşı metallere nazaran daha dayanıklı olabilmektedir. Ayrıca, asit ve bazlardan metallere kıyasla daha az etkilenmektedirler (Ezbeşir ve diğ. 1999). Polimerler, yüksek molekül ağırlıklarına sahip olduklarından dolayı genellikle zor çözünürler. Bununla beraber, her polimerin belirli bir çözücüsü vardır. Polimerlerin bu çözücülerin etkisi altında çözülmesi yavaş olmakla beraber şekil ve boyutlarında değişiklikler meydana gelmektedir (Akkurt, 1991).

Kimyasal ajanın mükemmel bir çözücü olduğu durumda, emme (absorbsiyon) ve yumuşama (plastikleşme) meydana gelmektedir. Yumuşama, boyut genişmesi, çarpılma, mukavemet ve rijitliğin azalması ile camsı duruma geçiş sıcaklığının azalması gibi etkiler meydana getirmektedir.

Çözücü etkisi kısmi bozunma veya şişmeye neden olsa bile bağlar kopmayabilmektedir. İşlenme tekniğinden kaynaklanan yüzey farklılıkları, dış yüzey çatlakları, iç gerilmeler sonucu oluşan çatlaklar polimerlerin direncini olumsuz etkileyen faktörlerdir.

Amorf polimerlerde çözücü molekülleri, polimerin boş hacimlerine doğru kolaylıkla nüfuz edebilmektedir. Çözücü molekülleri, polimer içerisindeki bölgesel hareketlere yardımcı olmakta ve camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) genellikle düşmektedir. Daha fazla çözücü, polimere yayındığında polimer zincirleri arasındaki moleküller arası kuvvetler azalır ve bu olay kimyasal reaksiyonların yer almadığı ve moleküler ağırlığın korunduğu fiziksel kabarmaya neden olur (Şekil 2.3). Kristalleşme nedeniyle polimerin boş hacimleri azaldığında çözücü atağına direncin arttığı görülmektedir. Polimer, çözücülerden çıkarılıp kurummasına izin verildiğinde ise orijinal boyutlarına geri dönmektedir (Scheirs, 2000 ). Bu olayda kabarma tersinir olarak bilinmekte ve tamamen kimyasal bozunma olmasa bile yine de eleman

hasarına katkıda bulunabilmektedir. Örneğin, plastikleştirici içeren polimerler çözücü tarafından çözüldüğünde ürünün özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır.



Şekil 2.3: Çözülme ve plastikleşme mekanizmasının şematik gösterimi (Scheirs, 2000 )

### 2.3. Dinamik Yükleme Koşullarının Sürekli Fiber Takviyeli Polimerik Kompozitlere Etkisi

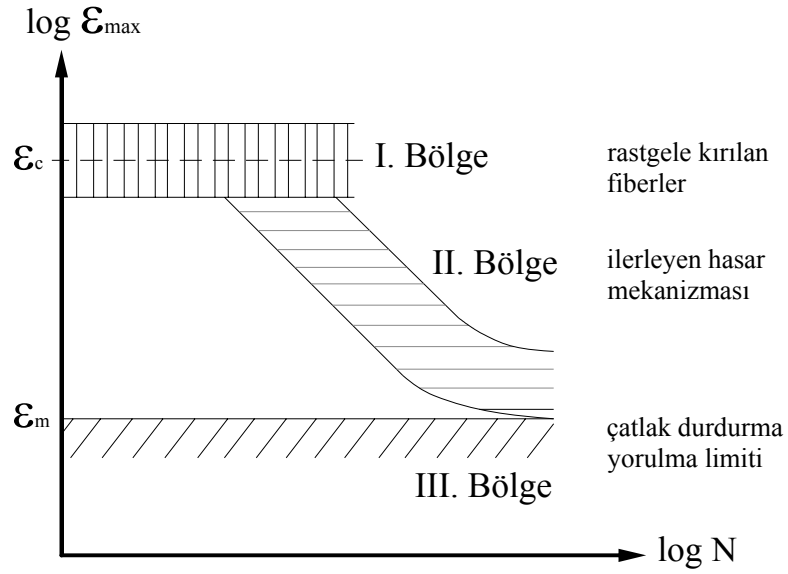
Fiber takviyeli kompozit malzemeler uçak ve otomobil yapılarında, spor ekipmanlarının yapımında spesifik mukavemet, spesifik modül ve titreşimleri sönmüleme özellikleri nedeniyle oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Kompozitler yapı elemanı olarak kullanıldığında, yapının tamamı kompozitten yapılamayacağı için başka malzemeler ile birleştirilmesi gerekliliği ortaya çıkar (Lim ve diğ. 2006).

Polimer kompozitlerin değişik uygulamalarda yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi için dinamik yüklemeler altında davranış biçimlerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Pim ile birleştirilmiş kompozitlerin statik ve dinamik yükleme koşullarında delik etrafında gerilme konsantrasyonlarının oluşması kaçınılmazdır (Aktaş, 2005).

Tekrarlanan yüklemeler yorulma hasarının gelişmesini sağlar bunun sonucunda da yapı işlevini yerine getiremez olur. Yorulma, tekrarlanan yüklemeler sonucunda malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen azalma olarak tanımlanabilir. Cıvatalı bağlantıların ana görevi yapıyı oluşturan parçalar arasında yük transferini gerçekleştirmektir. Kompozit plakalarda cıvata deliklerinin varlığı yüksek gerilme konsantrasyonlarına neden olmaktadır. Bu yüzden de bu bölgeler dinamik yüklemeler etkisiyle hasarın oluşması için kaynak teşkil eder. Kompozitlerde deliklerin açılması esnasında tabakalar arası delaminasyonların oluşması yorulma prosesini etkileyerek ömrü azaltmaktadır. Yorulma prosesini etkileyen faktörler arasında delikte meydana gelen aşınmalar, pimin kompozit ile olan temas yüzeyinde oluşan hasar ve delme etkisiyle delik etrafında oluşan delaminasyonlar sıralanabilir. Bu gibi hasarlar tekrarlı yüklemeler altında deliğin deformasyonuna neden olarak yorulma performansını azaltmaktadır. Bu nedenle kompozit bağlantının dinamik davranışı kompozit yapının verimliliğini ve bağlantının enerji absorpsiyonunu yakından etkileyecektir (Starikov ve Schön, 2001).

Hem kompozitler hem de homojen malzemeler için yorulma, yapıların servis süreleri boyunca en sık karşılaştıkları hasar tipidir. Kompozit malzemelerin yorulma davranışları S-N eğrileri ile karakterize edilmektedir. Kompozitlerde  $0^0$  yönlenme düzenine sahip katmanlar, farklı açılarda yönlenmiş katmanlara kıyasla yorulmaya karşı daha büyük dirence sahiptir. Bununla birlikte hasarın gerçekleştiği uzama miktarı diğer oryantasyonlara göre daha fazladır (Gamstedt ve diğ. 1999).

Fiber yönlenme doğrultusunda yüklenen sürekli fiber takviyeli kompozitlere ait temel yorulma-ömür diyagramı Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi bu diyagram üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Her bir bölgede kompozitler üzerinde etkili olan farklı hasar mekanizmaları söz konusudur. Diyagramın basit bir şekilde anlaşılabilmesi için bu üç bölge I, II ve III şeklinde numaralanmıştır. Kompozit malzemeler için yorulma-ömür değerleri bu diyagram üzerinden belirlenmektedir.



Şekil 2.4: Kompozitlerde yorulma-ömür diyagramı (Gamsted ve Östlund, 2001a)

I. bölgedeki uzama seviyesi genellikle statik yükleme sonucunda hasara neden olan uzama düzeyi ile çakışmaktadır. Çünkü polimer matrisli kompozit malzemelerde yükün tamamı nerdeyse fiberler tarafından taşınmaktadır. Bu bölgede etkili olan hasar mekanizmaları statik hasara neden olan mekanizmalar ile benzer niteliktedir. Bölgede gelişen hasar mekanizmaları düzensiz olduğundan ilk yükleme çevrimi sonrasında oluşan hasar dağılımındaki değişimi tespit etmek nerdeyse imkansızdır. Statik yükleme sonucunda oluşan hasar prosesi, fiber dayanımı ve fiberlerin kırılması sonrasında oluşan gerilme dağılımı tarafından kontrol edilmektedir. Birinci bölgedeki gerilme dağılımı ana merak konusu değildir, çünkü bu bölgedeki ömür kısadır ve burada oluşan uzama hasara neden olan statik uzama değerleriyle hesaplanabilir. I. Bölgede hasar gelişimi çevrim sayısından bağımsızdır (Gamsted ve Östlund, 2001a).

II. bölge hasar oluşumunun devam ettiği gelişme bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Burada oluşan hasar mekanizmaları bu bölgenin eğiminden sorumlu fiber köprülü çatlaklar (fiber bridged cracking) (Gamsted ve Östlund, 2001a) ve gelişen soyulmadır (Dharan, 1975), (Lorenzo ve Hahn, 1986), (Gamstedt, 2000b). Yorulma duyarlılığı genellikle yorulma-ömür diyagramındaki II. Bölgenin eğimi ile tanımlanmaktadır. Bu eğim bölgede gelişen hasar mekanizmalarının yoğunluğunu ifade etmektedir.

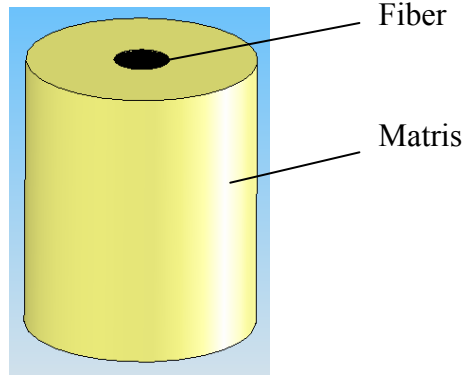
Kompozit malzemelerde yorulma limiti üzerindeki gerilmelere ve uzamalara izin verilmemektedir. Teorik yorulma limiti altındaki yüksek yük çevrim sayılarında,  $10^8$  veya  $10^9$  çevrim, ve oldukça uzun yükleme sürelerinde kompozit bağlantılarda hasar meydana gelmez. Yorulma-ömür diyagramında bu bölge III. Bölge olarak tanımlanmıştır. Buradaki uzama miktarları oldukça küçük olduğundan bölgede hasar gelişmez ve malzeme tekrarlı yükleme esnasında tamamen elastik davranış sergiler. Bu bölgede hasarın ilerlemesi kompozitin doğal heterojen yapısı tarafından engellenerek durdurulmaktadır.

Yorulma-ömür diyagramında dikkatlerin II. Bölgede meydana gelen hasar mekanizmaları üzerinde yoğunlaştırılması gerekir, çünkü bu bölge yapının ömrü üzerinde oldukça etkilidir. Gerçekleştirilen çeşitli araştırmalarla II. Bölgede meydana gelen yorulma degradasyonunun oluşmasında etkili en önemli hasar mekanizmasının fiber/matris ara yüzey ayrılmaları olduğu gösterilmiştir. Fiber/matris ara yüzey mukavemeti karbon fiber takviyeli kompozitlerde dayanımı etkileyen temel özelliktir (Drzal ve Madhukar, 1993).

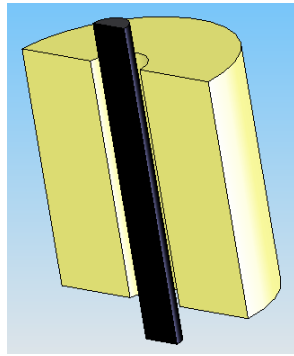
Herrington ve Sabbaghion (1993) cıvata ile birleştirilmiş karbon-epoksi kompozitlerin yorulma davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırmacılar kompozit plakanın yorulma dayanımının yataklama dayanımı değerinin %67'sine tekabül ettiğini hesaplamışlardır. Xiaoxue ve diğ. (1999) ise çapraz katlı karbon/epoksi kompozitlerin yorulma ömürlerini etkileyen faktörleri istatistiksel model kullanarak araştırmışlardır. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $60^\circ$  yönlenmeye sahip sürekli fiber takviyeli kompozit tabakaların yorulma ömürleri hesaplanmıştır. Starikov ve Schön (2002), mekanik olarak birleştirilmiş karbon fiber takviyeli kompozitlerin dinamik yüklemeler altındaki hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Cıvata ile birleştirilmiş kompozit tabakalarda uygulanan yük etkisiyle delik etrafında farklı hasarların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca cıvata ile delik arasındaki sürtünmenin, cıvatadaki ön gerilmenin ve delikte oluşan aşınmanın bağlantının yorulma performansına önemli etkisi olduğunu bulmuşlardır.

#### **2.4. Termal Çevrimlerin ve Su absorpsiyonun Sürekli Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlere Etkisi**

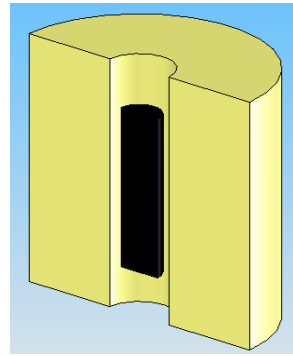
Bütün malzemeler sıcaklık değişimleri esnasında genişir veya büzülür. Çelik gibi malzemelerle dizayn edilmiş yapılar termal etkiyle meydana gelen yer değişimlerine izin vermektedir. Termal yorulma, dıştan zorlanan yapılara ancak yapının serbestçe genişmesi veya büzülmesi mümkün olmadığı durumlarda zarar verebilir. Polimer matrisli kompozitlerde ise malzemenin yapısı gereği termal etki altında içten zorlanma söz konusudur. Kompozitler iki farklı bileşenden oluşmaktadır: matris ve fiber, bu bileşenlerin mekanik özellikleri ve termal genişleme katsayıları birbirinden farklıdır. Termal çevrimler esnasında termal genişleme katsayılarına bağlı olarak hem fiber hem de matris genişir veya büzülür. Kompozitlerin yapısı gereği sıcaklık dalgalanmaları fiber/matris ara yüzeyinde gerilme artışına neden olmaktadır. Bu istenmeyen gerilmeler fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalar oluşturmaktadır. Gerilmelere kaynak olarak belirli sıcaklık değerleri arasında yapılan ani soğutma veya ani ısıtma işlemleri gösterilebilir. Bu gerilmeler ara yüzeyde ayrılmalara ve tabakalar arası kayma dayanımı değerlerinde düşüş meydana getirmektedir. Düşük yapışma dayanımı yüksek miktarda fiber/matris ara yüzey ayrılmalarına sebep olmaktadır (Jang, 1999). Bu gerilmeler aşağıda açıklananlarla azaltılabilir: a) Sünek matrisin plastik deformasyonu; b) Gevrek fiberin çatlaması veya kırılması; c) Fiber/matris ara yüzeyinin hasara uğraması. Termal gerilmeler yorulma çatlaklarını oluşturarak ilerlemesini sağlar (Spera, 1975). Dolayısı ile bu bahsedilenler kompozitin yapısal bütünlüğünü etkileyerek malzemenin ömrünü kısaltır.



a) Fiber-matris modeli



b) Soğutma prosesi



c) Isıtma prosesi

Şekil 2.5: Sıcaklık değişimleri esnasında fiber/matris etkileşimini anlayabilmek için geliştirilen model.

Sıcaklık değişimleri esnasında fiber/matris etkileşimini anlayabilmek için bir model geliştirilmiştir. Şekil 2.5 a'da gösterilen fiber ve matrisi temsil eden geometrik şekillerden oluşan bu model analiz edilmiştir. Fiber ve matris birbirine yapışık halde olmazsa sıcaklık değişimleri esnasında termal genişleme katsayılarına bağlı olarak serbestçe radyal ve aksenal yönde genişler veya büzülür. Fiber ve matrisin yapışık

olması halinde ise termal çevrimin soğutma prosesi esnasında model eksenel yönde çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bunun sebebi matrisin fiberden daha fazla büzülmesidir (Şekil 2.5 b). Isıtma prosesi esnasında ise matris fibere nazaran daha fazla genişler dolayısı ile model eksenel basma gerilmelerine maruz kalır (Şekil 2.5 c). Serbest yüzeyin varlığı eksenel gerilmelerin ortadan kalkmasına neden olur. Sonuç olarak fiber/matris ara yüzeyinde soğutma prosesi esnasında çekme, ısıtma prosesi esnasında ise basma şeklinde radyal gerilmeler oluşmaktadır. Matris malzemesinin toplam elastik davranışı yanında, termal çevrim esnasında meydana gelen genişleme ve büzülme kompozitin uzunluğunu değiştirmez, fakat eksenel gerilmeler matrisin elastik limitini aşarsa matriste plastik deformasyonların oluşması kaçınılmaz olur.

Polimerik kompozitlerde hidrotermal yaşlandırmaya karşı direnç aşağıda sıralanan maddelere bağlı olarak değişir:

- Fiber özellikleri
- Fiberlerin yönelme düzeni
- Fiber/matris ara yüzey dayanımı
- Matris morfolojisi
- Hidrotermal çevrim sayısı
- Ortam sıcaklığı

Birçok polimer suyu absorbe etmektedir. Nem absorpsiyonu polimerlerin özelliklerinin değişimine neden olduğu bilinmektedir. Suyun polimere olan zararlı etkisi su moleküllerinin hidrojen bağları ile polimer zincirlere bağlanması şeklinde ortaya çıkar. Absorbe edilen su, yapıyı yumuşatan madde olarak davranır, yani polimer zincirleri arasındaki mesafeyi arttıran etki yaratır. Güçlü polar gruplara sahip polimer zincirler su moleküllerine hidrojen bağları ile bağlanmaktadır. Polar gruplara örnek olarak keton grubu (C=O) veya sülfon grubu (O=S=O) verilebilir. Polar grup, artı ve eksi yükleri olan ve böylece karşı yüklerle karşılaşınca kolayca ona bağlanan gruptur. Polimerlerde ve polimer kompozitlerde nem absorpsiyonu olgusu oda ve üstündeki sıcaklıklarda birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu sıcaklık aralıklarında yapıya absorbe edilen su malzemenin modülünü ve camsı geçiş



sıcaklığını ( $T_g$ ) azaltmaktadır fakat buna karşı olarak malzemenin kırılma direncini ve darbe dayanımını arttırmaktadır (yumuşatma veya plastikleşme etkisi). Bu etkiler suyun polimer zincirleri arasında bir ara halka oluşturması şeklinde açıklanabilir. Böylece polimer zincirler birbirinden uzaklaşmış olur (Baschek ve diğ. 1998).

Yapıda nem etkisiyle gerilmelerin varlığı genleşmeye sebep olmaktadır. Bunun sonucunda da malzemenin hasar toleransı ve yapısal dayanımı azalmaktadır. Fiber takviyeli polimerik kompozitlerin ömür performansı ve yapısal bütünlüğü fiber/matris ara yüzeyinin stabilitesi ile yakından ilişkilidir. Nem, polimerik kompozit malzemelere yayılım ve/veya kapiler prosesiyle nüfuz etmektedir. Fiber ve matris arasındaki etkileşimler oldukça karmaşık bir olgudur. Polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinde su absorpsiyonu sonucunda tersinir ve tersinmez etkileşimler olur. Plastikleşme ve kabarma (swelling) su absorpsiyonunun neden olduğu istenmeyen oluşumlardır. Plastikleşme; plastik deformasyona neden olmaktadır ve malzemenin camsı geçiş sıcaklığını ( $T_g$ ) düşürmektedir. Kabarma; yapıya absorbe edilen sıvı genleşme kuvvetleri oluşturur, bu kuvvetlerin etkisiyle polimer zincirleri, dolayısı ile yapı zorlanır. Bu iki hasar mekanizmasının kapilariteye neden olduğuna inanılır. Polimer kompozitlerde nem absorpsiyonu nedeniyle oluşan plastikleşme ve hidroliz polimer matrisin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin değişimine neden olmaktadır. Matris tarafından absorbe edilen nem miktarı takviye edici faz olan fiberin absorbe ettiği miktardan daha fazladır. Dolayısıyla fiber ile matris arasında hacimsel genleşme bakımından uyumsuzluk söz konusudur. Bu olay kompozit malzemede lokal gerilme ve zorlanma alanlarının oluşumuna sebebiyet verir.

Yabancı maddelerin (örneğin su) ara yüzey bölgesine penetrasyonu sonucunda oluşan kimyasal reaksiyonlar ve/veya meydana gelen plastikleşme ara yüzey bölgesinin hasarına neden olur (Iglesias ve diğ. 2002). Oluşan gerilmeler matristen fiberlere doğru ilerlemekte ve kırılmış fiberlerde gerilme konsantrasyonu artmaktadır. Sağlam olan fiberlere komşu olan bölgelerde gerilmelerin dağılımı fiber/matris ara yüzey dayanımı tarafından kontrol edilmektedir (Anagnostopoulos ve diğ. 2005). Fiber takviyeli polimer kompozitler servis süreleri boyunca değişik hidrotermal koşullar altına kullanılmaktadır. Yapıya absorbe edilen nem yapıdaki gerilme

dağılımını değiştirdiği gibi ara yüzeyin degradasyonuna da neden olur. Bunun için hidrotermal davranışların anlaşılması yapı performansının tahmin edilmesi açısından önemlidir (Tang ve diğ. 2005).

Tabakalı kompozitlerin hidrotermal yaşlandırılması esnasında su moleküllerinin difüzyonundan başka farklı hasar mekanizmaları da etkisini göstermektedir. Bu mekanizmalar arasında 1- makro moleküler zincirlerin hidrolizi yani düşük moleküler ağırlıklı zincirlerin oluşumu; 2- Hidrofilizasyon (suya karşı olan aktiflik, su severlik) derecesinin yüksek olması yapıya olan su absorpsiyon miktarını arttırmakta bunun sonucunda matriste kısmi ve/veya geniş kapsamlı şişme (swelling) ve plastikleşme (yumuşama) oluşmakta; 3- Ara yüzeyde meydana gelen dekohezyon (madde moleküllerini birleştiren kuvvetin ortadan kalkması, yapışma etkisinin son bulması) kompozitte degradasyona neden olur. Hidrofilizasyon derecesi arttıkça su absorpsiyon hızı artmakta fakat suda ayrışan madde miktarı da arttıkça absorpsiyon hızı azalmaktadır (Camino ve diğ. 1996).

#### **2.4.1. Sürekli karbon fiber takviyeli kompozitlerde termal çevrimlerin ve su absorpsiyonun yarattığı etki**

Karbon fiber takviyeli kompozitler günümüzde yüksek performans gerektiren yerlerde (uzay ve havacılık sanayinde, iletişim uydularında, otomotiv sanayinde ve denizcilik endüstrisinde) geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bu kompozitler su altında değişik koşullarda çevrenin saldırısına uğrarlar. Bundan dolayı değişik sıcaklıklar altında nem ve/veya su absorpsiyonunun karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler üzerinde bırakmış olduğu etki önemli bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkar çünkü malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri büyük ölçüde bu etkiye bağlıdır (Hussain ve Niihara, 1999).

Kompozit malzemelerin özelliklerinden tam olarak yararlanmak için değişik koşullar altındaki davranışlarını belirlemek gerekir. Başlıca çevresel saldırılar sıcaklık, nem, radyasyon ve/veya farklı türdeki kimyasallarla ilişkilidir (Selzer ve Friedrich, 1996). Bu faktörler karbon fiber takviyeli kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini

yakından etkilemektedir (Haque ve diğ. 1991). Atmosferde mevcut olan nemden dolayı suyun etkisini dikkate almak gerekir.

Kompozit malzemelerde termal gerilmelerin oluşumu birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Kompoziti oluşturan bileşenlerin (fiber-matris) birbirinden bağımsız genleşmelerini dikkate alırsak, matrisin fiberden daha fazla genleştiğini görürüz. Dolayısı ile farklı termal genleşme katsayıları nedeniyle oluşan aksenel yükler fiber/matris ara yüzey bağına hasara uğratar (Abedian ve Szyszkowski, 1997).

Karbon fiber takviyeli kompozitler özellikle uçak gövdelerinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Çalışma süreleri boyunca uçaklar atmosferik ortama maruz kalmaktadır. Kompozit malzemeler nem ve değişik atmosferik koşullar altında kullanıldığından çevrenin saldırısına uğrar. Dolayısı ile yapının değişik sıcaklıklar altında nem veya su absorbe etmesi sürekli karbon fiber takviyeli polimerik kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini oldukça fazla etkilemektedir. Bu nedenle bu konu üzerine yapılan araştırmalar ilgi çekicidir. Nemin veya suyun malzeme yapısına absorbe olması sonucunda tabakalar arası kayma dayanımında (TAKD) düşüş meydana getirir ki buda polimer matrisin ve fiber/matris ara yüzeyinin degradasyonuna (bozunma) neden olur (Hussain ve Niihara, 1999).

Diğer taraftan uçuş boyunca farklı yükseklikler etkisiyle uçak gövdesi değişik sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Bu sıcaklıklar  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  altında olabildiği gibi uçağın inişi esnasında  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine de çıkabilmektedir. Bu termal çevrimler uçağın kullanım ömrü boyunca devam etmektedir. Polimer matrisin ve karbon fiberlerin termal genleşme katsayıları birbirinden oldukça farklıdır. Bu farklılık nedeniyle termal çevrimler mekanik yüklemelere neden olmaktadır ki bu yüklemeler özellikle fiber/matris ara yüzeyinde etkilidir. Termal çevrimler sonucunda farklı genleşme katsayıları nedeniyle kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu gerilmeler matriste mikro çatlaklara ve fiber/matris ara yüzey degradasyonuna neden olmaktadır (Shin ve diğ. 2000).

Bechela ve diğ. (2003) karbon fiber takviyeli kompozit tabakaları sıvı nitrojene daldırdıktan sonra oda sıcaklığına almışlardır. Araştırmacılar bu işlemi 400 kez

tekrarlamıştır. Mikro-çatlak yoğunluğu ve kompozitin modülü gibi değerler termal çevrimlerin fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Kompozit malzemenin yüzeyine yakın katmanlarda geniş ölçüde mikro çatlaklara, iç katmanlarda ise daha az miktarda çatlaklara rastlanmıştır. Bununla birlikte termal çevrime maruz kalma mekanik yüklemeye etkisi yaratır böylece karbon fiber takviyeli kompozitin mekanik ve geçirgenlik özellikleri değişir (Nettles ve Biss, 1996).

Karbon fiber takviyeli kompozitlerin üretim prosesi esnasındaki termal şartlar bu kompozitlerin kırılma davranışlarında baskın rol oynamaktadır, kırılma davranışları ayrıca fiber/matris ara yüzey dayanımıyla da yakından ilişkilidir (Bianchi ve diğ. 1997). Fiber/matris ara yüzey mukavemetinin, fiberin matristen sürtünerek çıkması gibi enerji kayıplarına izin verebilecek kadar zayıf olması gerekir.

Fiber/matris ara yüzey mukavemeti her iki bileşenin termomekanik ve fiziko-kimyasal etkileşimleri ile yakından ilişkilidir. Fiber ve matrisin farklı termal genişleme katsayıları nedeniyle ortaya çıkan gerilmeler fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalara neden olmaktadır ki bu ayrılmalar kırılma tipini yakından etkilemektedir. Fiber/matris arasındaki fiziko-kimyasal reaksiyonlar çatlağın ilerlemesini ve yön değiştirmesini kontrol eden bir evrenin oluşumuna neden olmaktadır. Bu reaksiyonlar ayrıca daha geniş ara yüzey ayrılmalarına ve kırılma dayanımı düşüşlerine neden olabilir. Bunun için kompozitlerin mekanik özelliklerini ve fiber/matris ara yüzey mukavemetini açıklayabilmek için kalıntı termal gerilmelerle birlikte karbon fiber ve matris arasındaki fiziko-kimyasal reaksiyonları da dikkate almak gerekir (Bianchi ve diğ. 1997).

Farklı oryantasyona sahip sürekli karbon fiber takviyeli kompozitlerin üretilmesi esnasında meydana gelen sıcaklık değişimleri kompoziti oluşturan katmanlar arasındaki farklı termal genişleme katsayıları nedeniyle termal gerilmelerin oluşmasını sağlar. Sıcaklığın periyodik değişimi termal gerilmelerde de periyodik değişime neden olur. Periyodik termal gerilmeler kompozitin kalınlığı boyunca çatlakların (transverse cracking) oluşmasını sağlar. Bunun sonucunda kompozitin mekanik özellikleri kötüleşir. Kalınlık boyunca oluşan çatlaklara malzemenin yapısı,

sıcaklık değişimleri ve fiber oryantasyonu gibi etkenler neden olur (Kobayashi ve diğ. 2003).

Matrisin yapısında bulunan düşük moleköl ağırlıklı katkı maddeleri göç ederek fiber yüzeyinde veya yüzeye yakın bölgede zayıf bir sınır katmanı oluşturmaktadır. Aktive edilmiş karbon yüzeyi polimer matrisin polar moleküllerini kendine doğru çeker. Bu olay yüksek yoğunluklu çapraz bağlı sınır tabakanın gelişmesini sağlar. Bu mikro yapısal değişim oluşan sınır tabaka boyunca çatlak başlangıcına ve ilerlemesine neden olur. Birçok uygulamada matris malzemesinin ve fiber/matris ara yüzeyinin çevresel degradasyona olan duyarlılığı ortaya çıkmaktadır (Hough ve diğ. 2005).

Sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlerin karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin davranışları üzerindeki (depolamadan-çalışma koşullarına kadar olan aralıkta) etkileri bilmek önemlidir (Patel ve Case, 2002). Bu araştırmacılar nem, sıcaklık ve hidrotermal yaşlandırmanın karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerde değişik hasar mekanizmalarına neden olduğunu bulmuşlardır. Fiziksel görünümdeki değişim, kırılma yüzeyleri ve nem absorpsiyon davranışı malzemenin hidrotermal yaşlandırma prosesinden etkilendiğini göstermiştir.

Yapıştırma görevi gören matris ile fiber arasındaki mikro yapısal farklılık fiber/matris ara yüzeyi boyunca ayrılmalara neden olur. Fiber/matris ara yüzey mukavemeti kalıntı gerilmelerin varlığı ile yakından ilişkilidir. Bu kalıntı gerilmeler mikro boşluklara ve çatlaklara da neden olmaktadır. Ara yüzey degradasyonuna neden olan mekanizmalar arasında, hidrotermal yaşlandırma etkisiyle ara yüzey bağında meydana gelen azalma ve absorbe edilen su etkisiyle oluşan osmotik basıncın neden olduğu çatlaklar sıralanabilir. Aynı miktarda nem absorpsiyonuna rağmen kompozit malzemenin yüksek sıcaklıktaki TAKD düşük sıcaklıklara göre çok daha azdır. Bunun sebebi olarak yüksek sıcaklıklardaki su moleküllerinin kinetik enerjilerinin fazla olması ve malzeme yüzeyine yüksek hızlarda çarpmaları gösterilebilir. Sıcaklık, absorpsiyon kinetiğinin yapısını değiştiren önemli bir parametredir. Fiber/matris ara yüzey kimyasını ve kompozitin yapısal bütünlüğünü su alma kinetiği ve tabakalar arası kayma dayanımı testi ile belirlemek mümkündür. Kompozitler ısı etkisi altında neme maruz kaldıklarında yapılarında hidrotermal

kuvvetlerin ve kalıntı gerilmelerin oluşması kaçınılmaz olur ki bu olgular tabakalı kompozitlerin hasara uğramasında önemli rol oynar . Bunun için yukarıda bahsedilen etkilerin dizayn ve ömür hesabı yapılırken ihmal edilmemesi gerekir. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitte nemin difüzyonu matris etkili bir olgudur (Hough ve diğ. 2005).

#### **2.4.2. Sürekli cam fiber takviyeli kompozitlerde termal çevrimlerin ve su absorpsiyonun yarattığı etki**

Polimerik yapıların hidroskopik (nem çekme) özellikleri nedeniyle, yapısal bütünlüklerinin hidrotermal çevre ile olan etkileşiminin tam anlamıyla bilinmesini zorunlu kılar. Polimer matrisli kompozitlerin hidrotermal çevreye maruz kalması malzemenin camsı geçiş sıcaklığının azalmasına neden olduğu gibi aynı zamanda plastikleşmeye sebebiyet vererek özellikle matris ağırlıklı dayanım özelliklerinin azalmasına neden olur (Meurs ve diğ. 1996). Fiber takviyeli kompozitlerin performansı fiber/matris ara yüzey fazı tarafından kontrol edilmektedir (Gu ve diğ. 2000). Fiber/matris adezyonu ara yüzey mukavemetine doğrudan etki eder. Hidrotermal yaşlandırma matris degradasyonuna, fiber/matris ara yüzey ayrılmasına ve tabakalar arası delaminasyonlara neden olur. Fiber ve matris arasındaki adezyon tabakalı kompozitin mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Polimerik kompozitlerin çevresel etkilere maruz kalması matrisin plastikleşmesine, kimyasal ve mekanik degradasyonuna neden olur. Bu yüzden oluşan gerilmelerin ara yüzey boyunca iletilmesi kısıtlanır. Plastikleşme matris malzemesinin modülünü azaltır. Kimyasal degradasyon fiber/matris ara yüzey bağlarının hidrolizi (suda ayrışma) sonucunda ortaya çıkar. Mekanik degradasyon ise absorbe edilen su moleküllerinin matriste şişkinlik yaratması ve bunun sonucunda yapıda zorlanmaların ortaya çıkması şeklinde tanımlanabilir (Hong ve diğ. 1995). Bu zorlanmalar sonucunda matris fiberden uzaklaşarak fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalar oluşturur. Polimer kompozitlerde yaygın olarak kullanılan takviye elemanı olarak karşımıza cam fiberler çıkar. Cam fiberlerin en önemli dezavantajlarından biri matris malzemesiyle olan zayıf adezyonudur. Fiber/matris ara yüzey dayanımını ve tabakalar arası kayma dayanımını tespit etmede kısa-kiriş kayma testi (short-beam shear test) kullanılmaktadır (Jang, 1994).

Cam fiber takviyeli polimer kompozitler kullanıldıkları alanlarda değişik sıcaklıklara maruz bırakılmaktadır. Cam fiber takviyeli polimerik kompozitlerde hidrotermal çevrimlerden dolayı meydana gelen degradasyonun derecesini ve yapısını belirlemek, kullanım alanlarını daha da genişletmek için daha fazla araştırmanın yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Fiber ve matris arasındaki etkilenmiş ara yüzey bölgeleri fiber takviyeli kompozitlerin bütün mekanik özelliklerini kontrol etmektedir. Ara yüzey özellikleri üretim koşulları ile yakından ilişkilidir. Fiber/matris ara yüzeyinde oluşan üniform (aynı) olmayan genleşmeler ve büzölmeler üretim koşullarının ve çevresel etkilerin sonucudur (Ray, 2004).

Srivastava (1998), cam fiber takviyeli kompozitlerde çevresel etkilerin çekme dayanımına, kayma dayanımına ve modüle olan etkisini araştırmıştır. Araştırmacı, nemli ortama maruz kalınması durumunda malzeme dayanımının ve modülünün etkilendiğini bulmuştur. Nem penetrasyonunun ve yüksek sıcaklığın sinerjik (her ikisinin birleşik etkisi) etkisi matrisin yapısını yakından etkilemektedir.

Yüksek sıcaklık ve uzun süreli hidrotermal yaşlandırma cam fiber takviyeli kompozitlerin dayanım ve modül değerlerini oldukça düşürmektedir. Düşük sıcaklıktaki yaşlanma ile kıyaslandığında yüksek sıcaklıklarda cam fiber takviyeli kompozitlerde oluşan degradasyon çok daha etkilidir. Yüksek sıcaklıklarda fiber/matris ara yüzey bölgesinde meydana gelen ayrılmalar, matrisin plastikleşmesi ve oluşan çatlaklar bu etkinin kanıtıdır (Dewimille ve Bunsell, 1983). Daha önce yapılmış olan çalışmalarla fiber/matris ara yüzey bölgesinin cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin çevresel yaşlandırılması esnasında oluşan hasar mekanizmalarını kontrol eden etkisi olduğu belirtilmiştir. Wagner ve Lustiger (1994), fiber/matris ara yüzey enerjisinin 95°C de ve 336 saat süreyle suya maruz kalınması sonucunda azaldığını göstermişlerdir. Schultheisz ve diğ. (1996), e-cam/epoksi kompozitlerde hem fiberin hem de ara yüzey bölgesinin degradasyonunu, kompozitin 25 ve 75°C de 4000 saat suda bekletilmesiyle oluştuğunu göstermişlerdir. Bradley ve diğ. (1995), cam/vinilester kompozitlerde fiber/matris ara yüzey hasarının 90 gün boyunca deniz suyunda yaşlandırma sonrasında oluştuğunu belirtmişlerdir.

Zayıf ara yüzey bağından dolayı cam fiber/polimer matris kompozitlerde oluşan ayrılmaların etkisi yapı için oldukça yıkıcıdır. Düşük ara yüzey dayanımına sahip tabakalarda yüksek miktarda ara yüzey ayrılmaları oluşur ki bu ayrılmalar kompozit tabakada farklı hasar mekanizmalarının gelişmesini sağlar. Matris çatlakları makroskobik hasar biçimi olarak karşımıza çıkar ve sonradan delaminasyon hasarına neden olur. Polimer matrisli tabakalı kompozitlerde ara yüzey bağı geniş ölçüde delaminasyon hasarına neden olacak kadar zayıf değildir (Jang, 1999).

## **2.5. Hidrotermal Çevrimlere Maruz Bırakılmış Polimerik Kompozitlerin Dinamik Mekanik Termal Analizi (DMTA)**

Yapılan çalışmalarla oldukça büyük miktarda deneysel veri biriktirilerek hidrotermal yaşlandırmanın kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini oldukça fazla etkilediği ve performansı azalttığı kanıtlanmıştır (Chateauinois ve diğ. 1994).

Polimer matrisli kompozitlerde camsı geçiş sıcaklığının ( $T_g$ ) ölçülmesi oldukça önemlidir çünkü bu sıcaklık kompozit yapıların kritik servis sıcaklıklarını, dizayn parametrelerini ve uygulama alanlarını belirlemektedir. Hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılan malzemenin  $T_g$ 'si azaldığından malzemenin servis sıcaklığında değişim meydana gelmektedir. Bu değişim su/polimer etkileşimi nedeniyle matriste plastikleşmeye neden olmaktadır.  $T_g$  değişikliğine neden olan sorumlu mekanizmaların tanımlanmasıyla değişik çevre koşulları altında  $T_g$ 'de meydana gelen azalma tahmin edilebilir (Zhou ve Lucas, 1999).

Polimer kompozitlerin yapısında var olan nem polimer matrisin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde önemli ölçüde değişime neden olmaktadır. Polimer kompozit sistemlerde nemin yarattığı etkiyi iki farklı mekanizma ile açıklamak mümkündür. Bu mekanizmalar matriste plastikleşme ve fiber/matris ara yüzeyinde meydana gelen degradasyondur (Lee, 1991). Polimer matrisin nem absorbe etmesi matriste plastikleşme etkisi yaratarak  $T_g$  sıcaklığını düşürmektedir. Kompozit yapısında mevcut olan suyun dışarı atılmasıyla bu etki tersinir bir özellik kazanmaktadır, fakat yüksek sıcaklıklarda neme maruz kalınması tersinir olmayan etkiler de yaratmaktadır. Bu etkiler arasında matriste meydana gelen kimyasal degradasyon ve



fiber/matris ara yüzey ayrılmaları sıralanabilir. Sıralanan etkiler, karmaşık polimer zincirlerinde boşlukların oluşmasını, zincirlerin genişmesini ve polimer matriste mikro çatlakların meydana gelmesini sağlamaktadır (Shen, 1981).

Kompozit malzemelerin nemi absorbe etmesi sıcaklık, fiber hacim oranı, takviye edici fazın yönelme düzeni, fiberin özelliği (geçirgenliği, kutupsallığı, yoğunluğu gibi), nem ile temasta olan yüzey alanı ve nemin yayılma gücü gibi faktörlere bağlıdır (Thomason, 1995). Nem absorpsiyonu polimer zincirleri bir arada tutan bağların hidrolizine ve ayrıca mikro çatlakların ve mikro boşlukların oluşmasına neden olur. Hidrotermal yaşlandırmada termal çevrim sayısı su absorpsiyonunu hızlandıran etki yaratmaktadır. Buna sebep olarak fiber ve matris arasındaki farklı termal genişleme katsayıları nedeniyle oluşan kalıntı gerilmelerin sebep olduğu kohezyon ve ara yüzeydeki ayrılmalar gösterilebilir (Costa ve diğ. 2005).

Kompozit malzemelerde nem penetrasyonu temel mekanizma olan difüzyon (yayılma) tarafından kontrol edilmektedir (Costa, 2002). Bu mekanizma suyun matrise ve fiberlere kadar uzanan doğrudan difüzyonunu içermektedir, yalnız bu oluşumun fiberlere olan etkisi çok daha azdır. Kompozitlerde nem absorpsiyonuna neden olan ve yaygın olarak bilinen mekanizmalar arasında kapilarite yer almaktadır. Kapilarite, su moleküllerinin fiber/matris ara yüzeyi boyunca olan akışını ve buna müteakip ara yüzeyden matrise olan difüzyonu kapsamaktadır. Mikro çatlakların ve mikro boşlukların sayısında meydana gelen artış polimer yapının su almasını kolaylaştırmakta ve suyun bu bölgelerde depolanmasına neden olmaktadır (Shen, 1981).

Su moleküllerinin polimerin yapısına olan difüzyonu sonrasında malzemede genişleme veya şişme etkisi meydana gelir bu nedenle polimer zincirleri birbirinden uzaklaşmak zorunda kalır. Zincirlerin ayrılmasındaki artış moleküller arasındaki bağ kuvvetlerinde azalmaya neden olmakta bunu müteakip malzeme daha yumuşak ve sünek hale gelmektedir ve dolayısı ile modül düşmektedir (Lee ve diğ. 1993).

Nemin ve ısıl çevrimlerin aynı anda yarattığı etki hidrotermal yaşlandırma olarak adlandırılır. Bu olgu sonucunda polimer kompozitin mekanik ve morfolojik

özelliklerini azaltan matris degradasyonu, fiber/matris ara yüzey ayrılmaları ve delaminasyon gibi mekanizmalar ortaya çıkar (Andreopoulos ve Tarantili, 1998).

Fiber/matris ara yüzey mukavemeti uygulanan gerilmenin fiberlere transfer olma derecesini belirlemektedir. Fiber/matris ara yüzey dayanımı fiber ve matris arasındaki temas alanına ve ayrıca temas yüzeyindeki adezyon derecesine bağlıdır. Bu nedenle optimum kompozit özellikleri ara yüzey ile yakından ilişkilidir. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin istenilen seviyede olabilmesi için fiber/matris ara yüzeyinde optimum adezyon arzulanmaktadır (Shen, 1981).

Birçok araştırmacı değişik tipte fiberlerle takviye edilmiş polimer sistemleri araştırmasına rağmen takviye edici faz olan fiber ile matris arasındaki ara yüzey bağına daha az dikkat çevirmişlerdir. Fiber ve matris arasındaki adeziv bağ boşluk ve porozite olgusunu etkilediğinden ara yüzeyin verimliliğini yakından ilgilendirmektedir.

## BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 3.1. Kullanılan Malzemeler

Gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan malzemeler Ten Cate (Nijverdal / Hollanda) firmasından 450 x 450 x 2 mm boyutlarında sıcak preslenmiş plakalar halinde temin edilmiştir. Ten Cate firması halen Boeing firmasının malzeme tedarikçisidir. Boeing uçaklarında Ten Cate ürünü kompozitler gövde ve kaporta malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yapıyı oluşturan bu malzemeler diğer kompozitler ve metal aksam ile civata ve perçin yardımıyla gerçek uygulama şartlarında birleştirilmektedirler.

$[(0^{\circ}/90^{\circ})]_{3s}$  karbon/PPS kompozit:  $[(0^{\circ}/90^{\circ})]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip sürekli karbon fiber takviyeli PPS (polifenilensülfid) matrisli kompozit plakada fiber hacim oranı %51'dir. Plakalar toplam 6 tabakadan oluşmaktadır ve birim tabaka kalınlığı 0.31 mm'dir. Her bir tabakanın birim ağırlığı 479 g/m<sup>2</sup>'dir. Kompozit levhaların ticari kodu CF0286'dır.

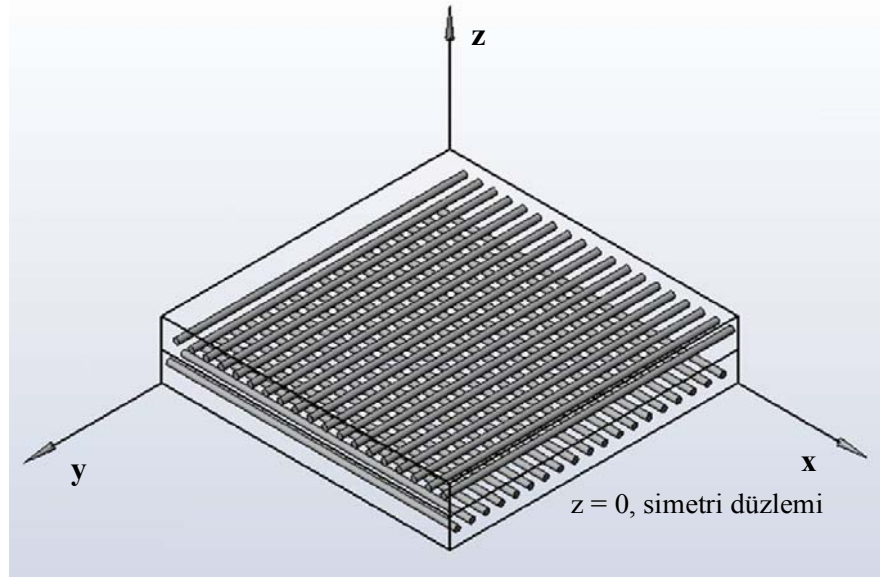
$[(45^{\circ}/-45^{\circ})]_{3s}$  karbon/PPS kompozit:  $[(45^{\circ}/-45^{\circ})]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip sürekli karbon fiber takviyeli PPS matrisli kompozit plakada fiber hacim oranı %51'dir. Plakalar toplam 6 tabakadan oluşmaktadır ve birim tabaka kalınlığı 0.31 mm'dir. Her bir tabakanın birim ağırlığı 479 g/m<sup>2</sup>'dir. Kompozit levhaların ticari kodu CF0286'dır.

$[(0^{\circ}/90^{\circ})]_{4s}$  cam/PPS kompozit:  $[(0^{\circ}/90^{\circ})]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip sürekli cam fiber takviyeli PPS kompozit plakalar hacimce %48 oranında fiber içermektedir. Kompozit plakalar toplam 8 kat tabaka ihtiva etmektedir. Birim tabaka kalınlığı ve birim tabaka ağırlığı sırasıyla 0.25mm ve 475g/m<sup>2</sup>'dir. Kompozit plakaların ticari kodu GF0303' tür.

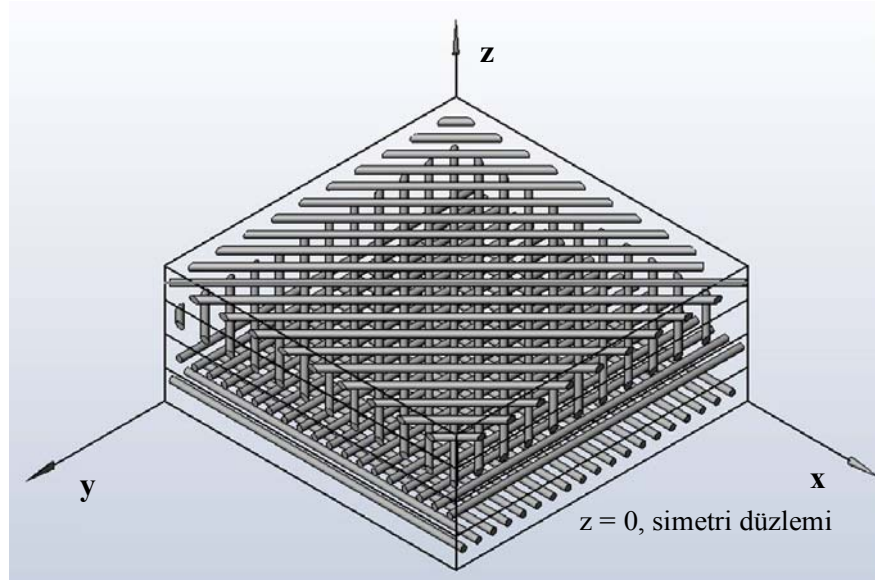
$[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  cam/PPS kompozit:  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip sürekli cam fiber takviyeli kompozit plakalar hacimce %48 oranında fiber içermektedir. Kompozit plakalar toplam 8 kat tabaka ihtiva etmektedir. Birim tabaka kalınlığı ve birim tabaka ağırlığı sırasıyla 0.25mm ve  $475\text{g/m}^2$ 'dir. Kompozit plakaların ticari kodu GF0303' tür.

$[(0^0/90^0)]_{4s}$  cam/PEI kompozit:  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  oryantasyona sahip sürekli cam fiber takviyeli PEI (polieterimit) matrisli kompozit plakalar %48 oranında fiber içermektedir. Plakalar toplam 8 tabakadan oluşmaktadır ve birim tabaka kalınlığı 0.25 mm'dir. Her bir tabakanın birim ağırlığı  $475\text{ g/m}^2$ 'dir. Kompozit levhaların ticari kodu GI0303 şeklindedir.

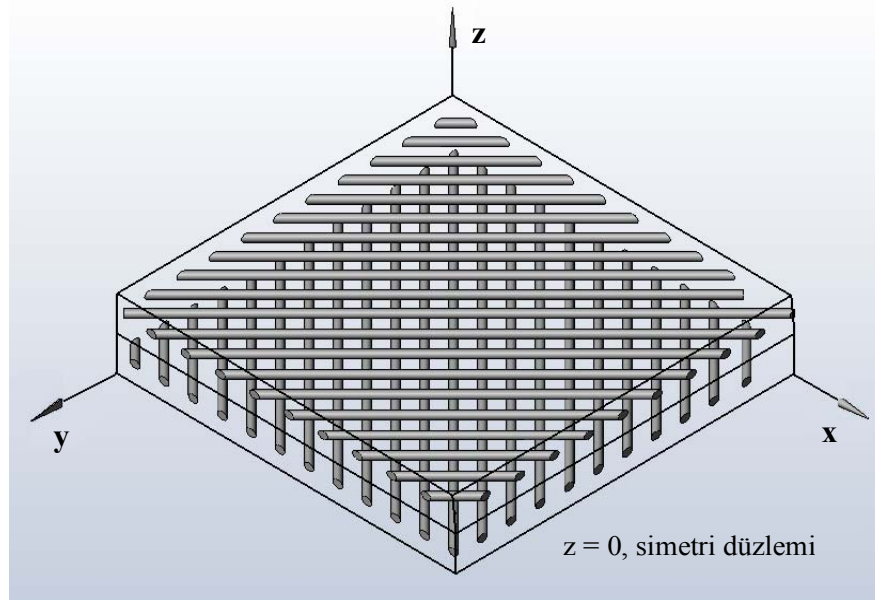
Aşağıdaki şekillerde kompozit malzemelerdeki fiberlerin yönlenme doğrultuları gösterilmiştir.



Şekil 3.1:  $[(0^0/90^0)]_s$  oryantasyonuna sahip kompozit levhanın yapısı



Şekil 3.2:  $[(0^0/90^0)/(\pm 45^0)]_s$  oryantasyonuna sahip kompozit levhanın yapısı



Şekil 3.3:  $[(45^0/-45^0)]_s$  oryantasyonuna sahip kompozit levhanın yapısı

## 3.2. Deney Metotları ve Deney Programı

### 3.2.1. Statik yükleme altında pim ile yük taşıma testi

2 mm kalınlığında olan her bir levhadan, Tablo 3.1’de gösterilen değişik uzunluk ve genişliklere sahip dikdörtgen şeklindeki numuneler elmas kaplı disk şeklindeki testere ile kesilmiştir. Delikler yüksek hız çeliğinden imal edilmiş üç kesici ağız bulunan matkap ile delinmiştir. Delme işlemi esnasında oluşacak tabakalar arası ayrılmaları minimize etmek için numuneler, matkap ucunun çıktığı yüzeyde tahta blok ile desteklenmiştir. Bağlantı bölgesine uygulanan yükün kompozit levhalara iletilmesi için, Ck45 çeliğinden bağlantı elemanı ve pim kullanılmıştır. Test edilen numuneye uygulanan çekme yükü, “P”, pim vasıtasıyla kompozit tabakaya iletilmektedir. Uygulanan “P” yükü numune eksenini ve doğrultusu ile paraleldir. Pim dayanımı, kompozit panellerin dayanımından çok daha fazladır. Bu nedenle pim hasarı ihmal edilmiştir. Pim, kompozit numuneye açılan delikten boşluksuz olarak geçirilmektedir. Her bir malzeme grubu için numuneler aşağıdaki tabloda (Tablo 3.1) belirtilen geometrik parametrelere uygun olarak hazırlanmıştır: W/D oranı 2, 4 ve 8 olacak şekilde sabit tutularak E/D oranları 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 olacak şekilde değiştirilmiştir. Deneyler, yükleme kapasitesi 5 kN olan Instron 4411 universal test cihazında (Şekil 3.4) ASTM D953 standardında belirtilen 1 mm / dak’lık çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Pim ile yük taşıma testi düzeneği ve numune boyutları Şekil 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.1: Test edilen numune boyutları

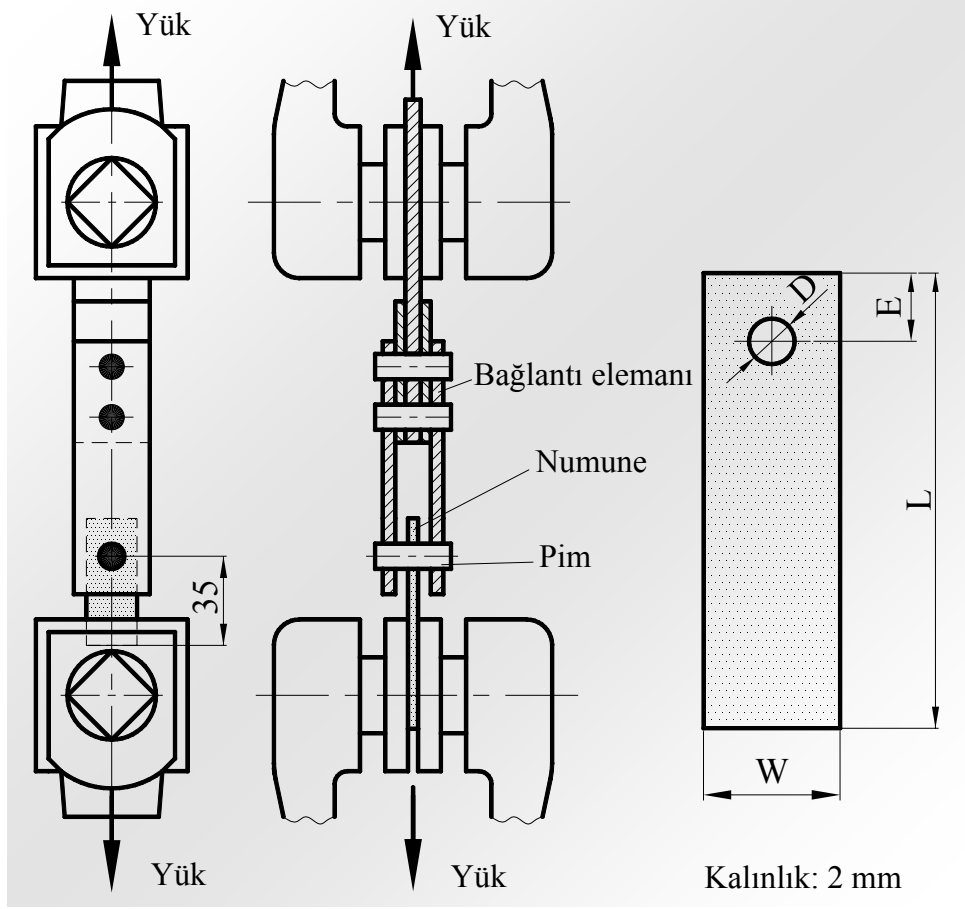
L (mm)	W (mm)	D (mm)	W/D	E/D
90, 120	20, 40	5, 10	2, 4, 8	1, 2, 3, 4, 5, 6

Delik yatay eksenini ile sıkıştırılan kenar arasındaki mesafe ve numune kalınlığı sırasıyla 35 ve 2 mm olacak şekilde sabit tutulmuştur. Yükleme başlangıcından son hasarın oluşumuna kadar geçen sürede, numune geometrisinin (numune genişliğinin, pim çapının ve delik pozisyonunun) hasar tipini nasıl etkilediği gözlemlenmiştir. Farklı yönelme düzenine sahip kompozitlerde oluşan hasar tipleri için yük-yer

değiştirme eğrileri çizilmiştir. Her bir geometrik parametre için minimum beş adet numune test edilerek ortalamaları dikkate alınmıştır.



şekil 3.4: Instron 4411 niversal elektromekanik test cihazı



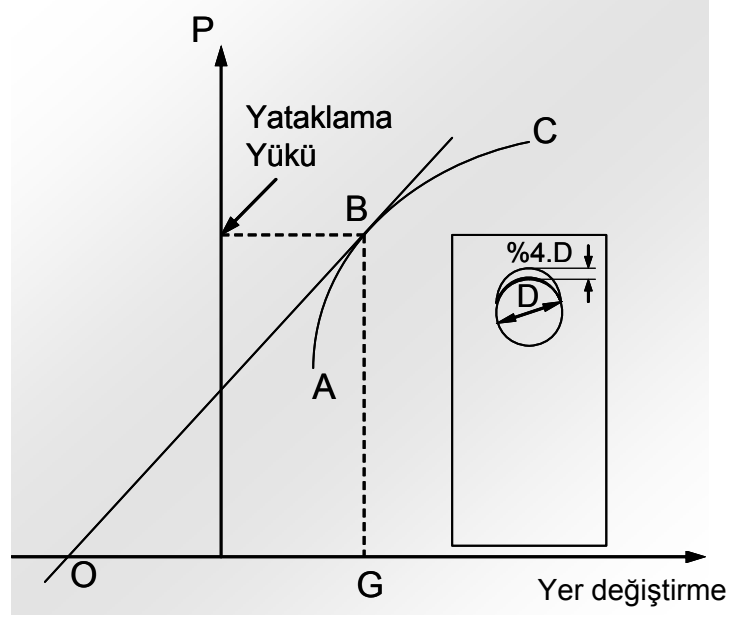
Şekil 3.5: Numune geometrisi ve pim ile çekme testi düzeneği

Testler ASTM D-953 standardına uygun olarak oda sıcaklığında (20°C’de) gerçekleştirilmiştir. Yataklama dayanımı, delik çapında %4’lük deformasyona neden olan gerilmenin değeri olarak tanımlanır. Şekil 3.6’da görülen yük-yer değiştirme eğrisinde OB doğrusu AC eğrisine B noktasında teğettir. Yükün sıfır olduğu eksen (yatay eksen) oluşan OG mesafesi 0.04D’ ye eşit olmaktadır. B teğet noktasına karşılık gelen yük değeri yataklama yükü ( $P_{ya}$ ) olarak tanımlanmıştır (Aktaş, 2005). Dolayısıyla yataklama dayanımı aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$\sigma_{ya} = \frac{P_{ya}}{D.t} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte yer alan  $\sigma_{ya}$ ,  $P_{ya}$ ,  $D$  ve  $t$  sırasıyla; yataklama dayanımı, yataklama yükü, delik çapı ve numune kalınlığıdır.





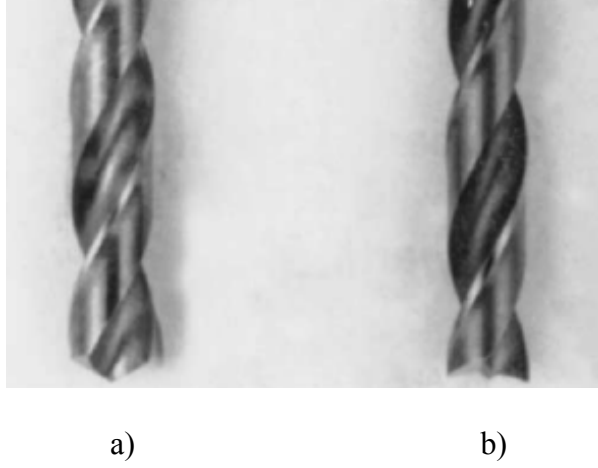
Şekil 3.6: Yataklama dayanımının tanımı (Aktaş, 2005)

### 3.2.2. Hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde bekletilmiş cam/PPS kompozitin pim ile yük taşıma testi

$[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip 8 katlı sürekli cam fiber takviyeli PPS matrisli kompozit plakalar kullanılmıştır. Test edilecek olan numuneler aşağıda verilen geometrik parametrelere uygun olarak hazırlanmıştır: Daha önceki deneysel çalışmalardan “çekme” türü hasar verdiği bilinen geometrik parametreler kullanılmıştır. Kullanılan geometrik parametreler sırasıyla;  $W/D=2$ ,  $E/D=2$  ve  $D=10$  şeklindedir. Hasar modu ve değerleri bilinen bu parametreler sabit tutularak malzemenin korozyon ortamından ne şekilde etkilendiği, malzeme performansının zamanın fonksiyonu olarak nasıl değiştiğinin incelenmesi hedeflenmiştir.

2 mm kalınlığındaki kompozit plakalar 55 x 20 x 2 (mm) boyutlarında dikdörtgen şeklinde elmas kesici disk ile kesilmiştir. Kesme işlemi esnasında kompozit malzeme, kenarlarında delaminasyonları ve bölgesel çatlakları önlemek üzere itina ile tezgaha tutturulmuştur. Delme işlemi esnasında delik kenarında çapak oluşumunu minimize eden üç kesici ağız bulunan yüksek hız çeliğinden imal edilmiş matkap kullanılmıştır (Şekil 3.7). Düzgün dairesel deliklerin delinebilmesi için matkap

ekseninin delme süresince malzemeye dik olmasına ve numuneye hasar vermeden çalışılmaya özen gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Kompozit levhaların delinmesinde kullanılan matkap uçları: a) standart b) modifiye edilmiş

Çalışmada kompozit malzemeler hidroklorik asit çözeltisinde bekletilmişlerdir. Literatürde bu ortamın PPS malzeme mikroyapısını ve mekanik özellikleri olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Chevron phillips chemical company, 2004). Asit ortamın özelliği ve malzeme ile etkileşim süresi Tablo 3.2’de görülmektedir. Malzemeler yukarıda belirtilen deney standardı boyutlarında hazırlanarak 1’er litrelik cam konserve kavanozu içerisindeki asit ortam içerisine daldırılmışlardır. Her hafta düzenli olarak malzemelerin ağırlık kazançları tespit edilmiştir. 40 deney numunesi aynı kavanoz içerisine konmuştur. 16 hafta süresince muhtelif zamanlarda 5’er numune kavanozlardan alınmıştır. Malzeme içerisinde absorbe edilen sıvının yapı dışına çıkması için numuneler 48 saat süre ile 25 °C sıcaklıktaki fırında bekletilmişlerdir. Bu malzemelerin ağırlıkları belirli zamanlarda ölçülerek ağırlık kayıpları takip edilmiştir. Malzemelerin ağırlıkları, laboratuvar koşullarında 0.0001 gr hassasiyetindeki Scaltec SBC 31 terazisi ile ölçülmüştür (Şekil 3.8). Beş adet aynı boyutlarda kesilmiş numunelerin toplam ağırlığındaki değişim takip edilmiştir. Ağırlık ölçümleri yapılırken dikkat edilmesi gereken nokta kavanozdan çıkarılan malzemenin yüzeyinin iyice kurulanmasıdır. Aksi takdirde malzemenin yüzeyinde kalan sıvı film tabaka da ağırlık değerine eklenerek yanlış sonuç elde edilmesine neden olur. Kurulama işlemi için numune üzerine kalıntı bırakmayan kağıt havlu kullanılmıştır. Ağırlık ölçümlerinin yapılmasının ardından pim ile yük taşıma testleri

gerçekleştirilmiştir. Deneyler 5 kN çekme kapasitesi olan Instron 4411 universal test cihazında 1 mm/dak'lık çekme hızında yapılmıştır.

Tablo 3.2: Kullanılan asit ortam ve deney süresi

Sıvı Ortam	Etkileşim Süresi	Karışım (hacmen)
Saf su+Hidroklorik Asit	1-2-3-4-6-12-16 hafta	%37 Hidroklorik Asit %67 Saf Su



Şekil 3.8: Scaltec SBC 31 hassas terazi

### 3.2.3. Hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde bekletilmiş karbon/PPS kompozitin pim ile yük taşıma testi

$[(0^{\circ}/90^{\circ})]_{3s}$  oryantasyona sahip sürekli karbon fiber takviyeli PPS Kompozit malzemeler hidroklorik asit (HCl) çözeltisi içerisinde bekletilerek bu ortamın pim ile yükleme performansına olan etkisi araştırılmıştır. Kullanılan asidik ortamın özelliği ve malzemenin bu ortam ile etkileşim süresi Tablo 3.3'te görülmektedir.

Tablo 3.3: Kullanılan korozif ortam ve deney süresi

Sıvı Ortam	Etkileşim Süresi	Karışım (hacmen)
Saf su+Hidroklorik Asit (HCl)	6 ay	%37 Hidroklorik Asit %63 Saf Su

Kompozit plakaların pim ile yük taşıma performansları ASTM D953 standardına uygun şartlarda oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyi gerçekleştirilecek numuneler Tablo 3.4'te verilen geometrik parametrelere göre hazırlanmıştır. Korozi ortamda bekletilme süresi sabit tutularak farklı geometrik parametrelere sahip olan numunelerin pim ile yük taşıma özelliklerinin bu ortamdan nasıl etkilendiğinin ve malzeme performansının geometrik parametrelerin fonksiyonu olarak nasıl değiştiğinin araştırılması hedeflenmiştir.

Tablo 3.4: Test edilen numune boyutları

L (mm)	W (mm)	D (mm)	W/D	E/D
40, 45, 55, 65, 75, 95	20, 40	5,10	2, 4, 8	1, 2, 4, 6

#### 3.2.4. Amonyum Hidroksit (NH<sub>4</sub>OH) çözeltisinde bekletilmiş cam/PEI kompozitin pim ile yük taşıma testi

Çalışmada kompozit malzemeler Amonyum Hidroksit çözeltisinde bekletilmişlerdir. Literatürde bu ortamın polimer malzemedeki mikroyapıyı ve mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Browne ve diğ. 1997). Bu ortamın özelliği ve malzeme ile etkileşim süresi Tablo 3.5'te görülmektedir. Malzemeler 1'er litrelik cam kavanozda tutulan bazik ortam içerisine daldırılmışlardır. Her ay düzenli olarak malzemelerin ağırlık değişimleri tespit edilmiştir. 40 deney numunesi aynı kavanoz içerisine konmuştur. 8 ay süresince muhtelif zamanlarda 5'er numune kavanozlardan alınmıştır. Ağırlık ölçümlerinin yapılmasının ardından pim ile yük taşıma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu malzemelerin ağırlıkları belirli zamanlarda ölçülerek ağırlık kayıpları takip edilmiştir. Her ölçüm için 5 numunenin ortalaması alınmıştır. Numunelerin geometrik parametreleri sırasıyla; W/D=2, E/D=2 ve D=10 şeklindedir.

Tablo 3.5: Kullanılan korozi ortam ve deney süresi

Sıvı Ortam	Etkileşim Süresi	Karışım (hacmen)
Saf su+Amonyum Hidroksit (NH <sub>4</sub> OH)	1-3-4-5-6-7-8 ay	%10 Amonyum Hidroksit %90 Saf Su

### 3.2.5. Dinamik yüklemenin pim ile yük taşıma kapasitesine etkisi

Bu çalışmada  $[(0^\circ/90^\circ)]_s$  karbon fiber takviyeli PPS kompozitlerin dinamik yükleme sonrası sahip olduğu statik yükleme şartlarındaki pim ile yük taşıma kapasitesi araştırılmıştır. Numuneler ilk önce dinamik daha sonra da statik yüklemeye tabi tutulmuştur, elde edilen değerler sadece statik yüklemeye tabi tutulmuş numunelerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yorulma ömrü ve hasar mekanizmaları geometrik parametreler dikkate alınarak incelenmiştir.

Deneyi gerçekleştirilecek numuneler Tablo 3.6’da verilen geometrik parametrelere göre hazırlanmıştır. Her bir geometrik parametre için minimum beş adet numune test edilmiştir.

Tablo 3.6: Test edilen numune boyutları

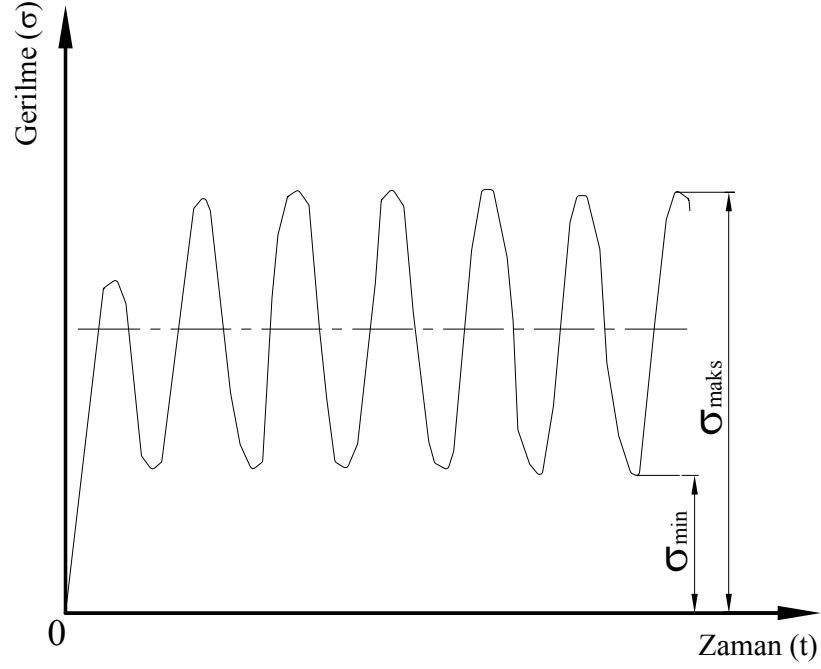
L (mm)	W (mm)	D (mm)	W/D	E/D
40, 45, 55, 65, 75, 95	20, 40	5,10	2, 4, 8	1, 2, 4, 6

Dinamik yüklemeler ASTM STP 749 standardına göre oda sıcaklığında sinüzoidal dalga formunda gerçekleştirilmiştir. Testler yük kontrol fonksiyonu olan Dartec servohidrolik bilgisayar kontrollü 600 kN çekme kapasitesine sahip cihazda pozitif-pozitif yükleme modunda 1 Hz’lik frekans ile yapılmıştır. Bahsedilen yükleme tipine ait grafik Şekil 3.9’da verilmiştir. Dinamik yüklemelerde kullanılan test düzeneği ise Şekil 3.10’da görülmektedir. Cihazın yazılımı, test edilen numuneye yükleme boyunca aynı maksimum ve minimum yüklerin uygulanmasını temin eder. Bu çalışmada bütün yorulma testleri için kullanılan gerilme oranı  $R=0,1$ ’dir; burada  $R$ ,  $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  oranıdır. Hesaplamalarda, dinamik yükleme esnasında  $10^3$  çevrim sonunda

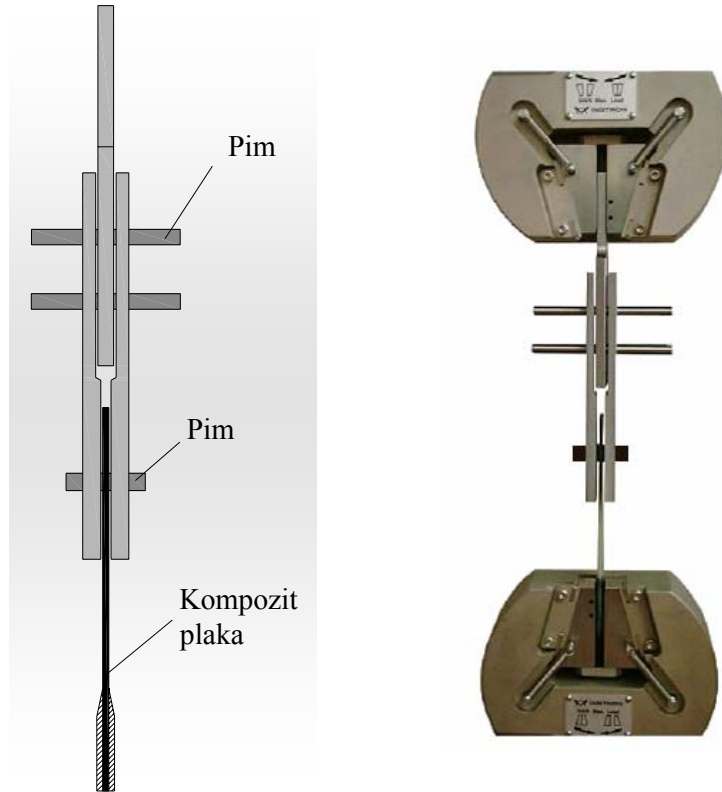
pim deliğinde 0,04.D’lik uzamaya neden olmayan  $\frac{\sigma_0}{\sigma_{ya}}$  oranı dikkate alınmıştır. Bu

terimin payı ( $\sigma_0$ ) uygulanan maksimum gerilmeyi, terimin paydası ( $\sigma_{ya}$ ) ise yataklama dayanımını (bearing strength) göstermektedir. Daha önce gerçekleştirilen deneylerden her bir geometrik parametre için malzemenin statik yükleme koşullarındaki yataklama dayanımı değerleri bilindiğinden yorulma dayanıklılık

limiti, yorulma ömrünü mümkün kılmak için, bu değerlerin %60'a ( $\sigma_0 = 0,6 \cdot \sigma_{ya}$ ) karşılık gelen gerilme değerlerinden seçilmiştir. Yorulma testi başladıktan sonra istenilen çevrim sayısına ( $10^3$  çevrim) ulaşılan kadar test devam etmiştir.



Şekil 3.9: Sinüzoidal dalga formundaki yükleme şekli



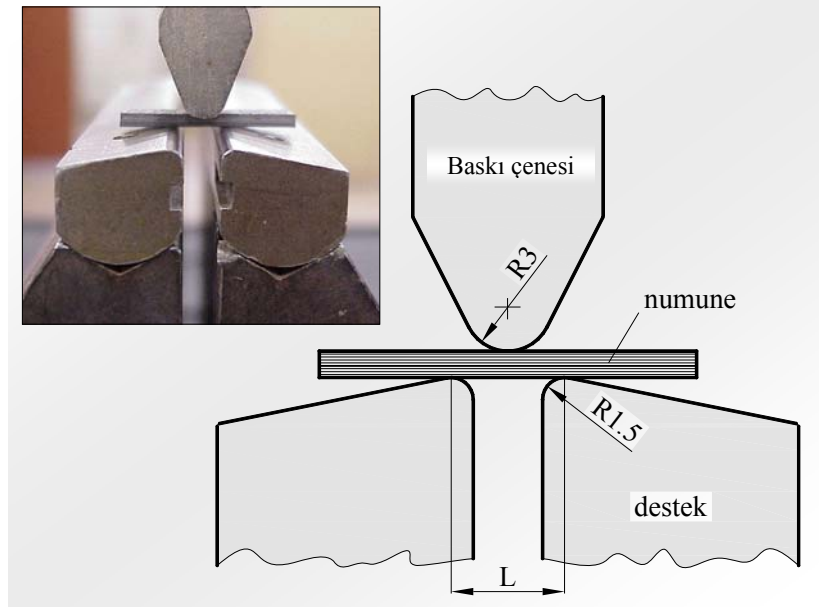
Şekil 3.10: Pim ile birleştirilmiş kompozitlerin dinamik yüklemelerinde kullanılan test düzeneği: (a) şematik çizim (b) fotoğraf

Dinamik yüklemeler sonrası malzemelerin statik yük taşıma performansları ASTM D953 standardına göre oda sıcaklığında 20°C gerçekleştirilmiştir. Deneyler bilgisayar kontrollü yükleme kapasitesi 5 kN olan Instron 4411 üniversal test cihazında yapılmıştır. Numunelere 1 mm/dak'lık çekme hızında yük uygulanmıştır.

### **3.2.6. Hidrotermal yaşlandırmaya tabi tutulmuş kompozitlerin tabakalar arası kayma dayanımı (TAKD) ve pim ile yük taşıma testi**

Hidrotermal yaşlandırma için sıcaklıkları kontrol edilebilen iki kabin kullanılmıştır. Birinci kabin kaynar (100°C) su ile ikinci kabin ise buzlu su ile doldurulmuştur. Kısa kiriş kayma testi ve pim ile statik yükleme testi numuneleri metal kafes içine yerleştirilerek birinci kabin içine daldırılmıştır. 100°C deki kaynar suda 1 dakika bekletilen numuneler bu ortamdan çıkartılarak hızlı bir şekilde buzlu suyun (0°C) bulunduğu kabine daldırılmıştır. Bu ortamda 1 dakika bekletilen numuneler tekrar kaynar suyun bulunduğu ortama daldırılmışlardır. Bu işlem yaklaşık 2 dakikalık zaman diliminde gerçekleşmekte ve 1 termal çevrime karşılık gelmektedir.

Kompozitin tabakalar arası kayma dayanımı değerlerini elde etmek için kısa-kiriş-kayma testi yükleme kapasitesi 5 kN olan Instron 4411 test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASTM D2344-84'e göre gerçekleştirilen testlerde 12x6x2 mm boyutlarındaki kompozit numuneler kullanılmıştır. Destekler arası mesafe, "L", [(0°/90°)]<sub>3s</sub> karbon/PPS kompozitler için 8 mm, [(0°/90°)]<sub>4s</sub> cam/PEI ve [(0°/90°/+/-45°)]<sub>2s</sub> cam/PPS kompozitler için 12 mm olup, "L" aralığının kompozit numunenin kalınlığına oranı karbon/PPS kompozitte 4, cam/PEI ve cam/PPS kompozitlerde ise 6'dır. Deneyler 1 mm / dak'lık basma hızında gerçekleştirilmiştir. Standartta belirtildiği gibi baskı ucunun ve destek uçlarının çapları sırasıyla 6 mm ve 3mm'dir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Kısa kiriş testi düzeneği

Her bir parametre için 10 adet numune test edilmiştir ve hesaplamalarda 10 adet numunenin aritmetik ortalaması kullanılmıştır. Tabakalar arası kayma dayanımı değerleri aşağıda verilen eşitlikle hesaplanmıştır.

$$S_T = \frac{0,75 \cdot P_{maks}}{W \cdot t} \quad (3.2)$$

Eşitlikteki  $S_T$ ,  $P_{maks}$ ,  $W$  ve  $t$  sırasıyla tabakalar arası kayma dayanımı, maksimum yük, numune genişliği, numune kalınlığı şeklinde tanımlanmıştır.

Hidrotermal çevrime maruz bırakılan numunelerin statik yükleme altında pim ile yük taşıma testleri ASTM D953 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler 5 kN çekme kapasitesi olan Instron 4411 üniversal test cihazında 1 mm/dk'lık çekme hızında yapılmıştır. Her bir parametre için 5 adet numune test edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalardan yataklama tipi ve kayma tipi hasar verdiği bilinen geometrik parametreler kullanılmıştır. Bu geometrik parametreler sırasıyla  $E/D=2$ ,  $W/D=1$ ,  $D=10$  ve  $E/D=1$ ,  $W/D=4$ ,  $D=5$  şeklindedir. Hasar modu ve değerleri bilinen bu parametreler sabit tutularak malzemenin hidrotermal ortamdan nasıl etkilendiği ve



yük taşıma kapasitesinin termal çevrim sayısının fonksiyonu olarak incelenmesi hedeflenmiştir.

JEOL/EO JSM-6060 taramalı elektron mikroskop (TEM) kullanılarak kısa-kiriş-kayma testi sonucunda kırılan numunelerin yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca TEM görüntüleri ile hidrotermal çevrimlerle ve su absorpsiyonu ile yapıda oluşan değişimler belirlenmiştir.

Kısa kiriş testi ve statik yükleme testi numuneleri 25°C'lik fırında 48 saat boyunca kurutulmuş ve dengelenmiştir.

1, 5, 10, 25, 50 ve 100 termal çevrimden sonra 10 adet kayma testi numunesi ve 10 adet pim ile statik yükleme testi numunesi derlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı yüksek nem oranında iki farklı sıcaklıktaki hidrotermal yaşlandırmanın  $(0^{\circ}/90^{\circ})_{3s}$  karbon/PPS,  $[(0^{\circ}/90^{\circ})_{4s}]_{2s}$  cam/PEI ve  $[(0^{\circ}/90^{\circ}/+/-45^{\circ})_{2s}]_{2s}$  cam/PPS kompozitlerde tabakalar arası kayma dayanımına ve pim ile yük taşımada oluşan hasar davranışlarına olan etkisini tespit etmektir.

### **3.2.7. Hidrotermal çevrimlere maruz bırakılmış polimerik kompozitlerin dinamik mekanik termal analizi (DMTA)**

Hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış cam/PEI ve karbon/PPS kompozitlerin dinamik mekanik termal analiz yöntemi ile visko-elastik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Dinamik mekanik termal analizler için TA Instruments firmasının ürettiği DMTA Q800 tipi cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.12). 15x5x2 mm'lik ölçülere sahip numuneler 1Hz'lik frekansta, üç nokta eğme modunda (Şekil 3.13), 30-250°C sıcaklık aralığında ve 5°C/dak. ısıtma hızı ile test edilmiştir. Test esnasında ön yükleme için 0,5 N'luk yük kullanılmıştır. Bununla birlikte cam/PEI ve karbon/PPS kompozitler için zorlama oranları sırasıyla %15 ve %30 şeklinde seçilmiştir.

DMTA malzemenin viskoelastikliğini karakterize etmede kullanılan bir dinamik metoddur. Bu işlem sinüzoidal olarak değişen bir kuvvetin uygulanması ve bu

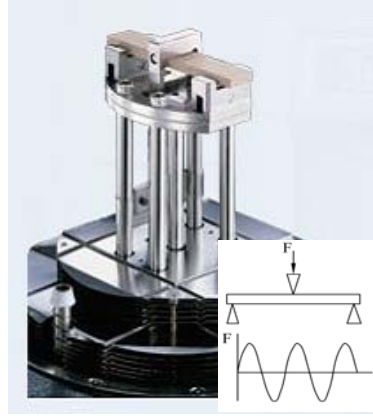
girdiye alınan yanıtın ölçülmesi şeklinde yapılmaktadır. Tamamen elastik malzemede sinüzoidal dalgalı gerilme ve oluşan şekil değişimi arasında faz farkı yoktur. Aynı tekrarlı gerilme viskoelastik katıya uygulandığında ise yük ile şekil değişimi arasında  $\delta$  açısı kadar bir faz kayması, yani girdi ile yanıt arasında faz farkı oluşmaktadır. Yük ile şekil değişimi arasındaki faz farkı malzeme viskoelastikliğinin ölçülmesini sağlamaktadır (Rudin, 1999). Malzemedeki değişim, malzeme yapısındaki moleküllerin hareketlerinin sıcaklıkla değişmesi ve modül değerlerindeki değişimden ibarettir. Belirli bir frekansta ( $\omega=2\pi f$ ) zamanın fonksiyonu olarak uygulanan gerilme aşağıda verilmiştir:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t + \delta), \quad (3.3)$$

bu eşitlikte  $\sigma_0$  uygulanan maksimum gerilmeyi,  $\delta$  ise faz açısını ifade etmektedir (Hatakeyama ve Quinn, 1999).



Şekil 3.12: TA Instruments firmasına ait DMTA Q800 tipi cihaz



Şekil 3.13: Dinamik mekanik ısı analizler esnasında kullanılan üç nokta eğme testi düzeneği ve bu düzeneğe tespit edilmiş numune

Belirli bir faz açısıyla,  $\delta$ , geciken gerinim  $\varepsilon$  ise:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t), \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Gerinim ile gerilme arasındaki faz farkı Şekil 3.14’te gösterilmiştir. (3.4) nolu eşitlikte  $\varepsilon_0$  maksimum gerinimi ifade etmektedir (Menard, 1999). Hook kanununda gerilme ve gerinim verileri dinamik modül (kompleks modül)  $E^*(\omega)$  ile ilişkilendirilmiştir.

$$\sigma(t) = E^*(\omega) \cdot \varepsilon(t) \quad (3.5)$$

Dinamik modül aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir:

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega), \quad (3.6)$$

eşitlikte aynı fazda olan gerçek kısım  $E' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right) \cos \delta$  ve farklı fazda olan sanal kısım

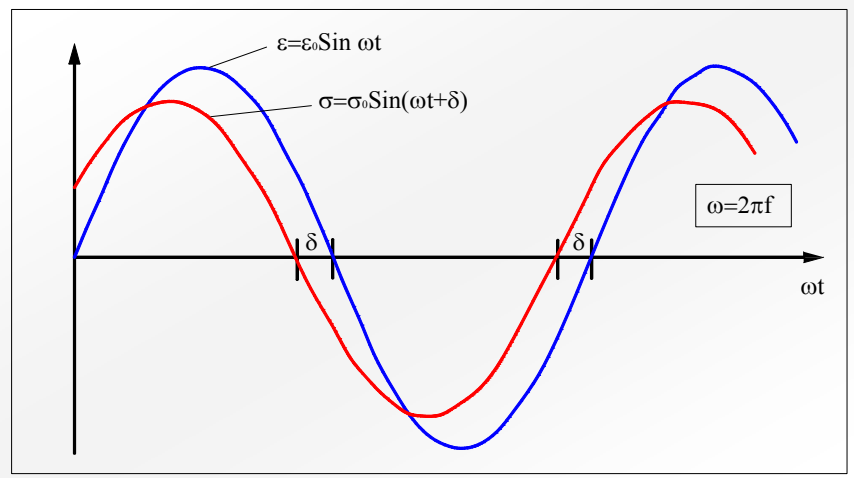
ise  $E'' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right) \sin \delta$  şeklinde ifade edilmiştir. Depolama modülü (gerinim ve gerilme

aynı fazda),  $E'$ , her bir çevrimde depolanan enerji ile orantılıdır (Li ve diğ. 2000).

Kayıp modül (gerinim ve gerilme farklı fazda),  $E''$ , ise her bir çevrimde kaybolan enerji ile orantılı olup malzemenin şekil değiştirmesi esnasında ısıya dönüşmektedir.

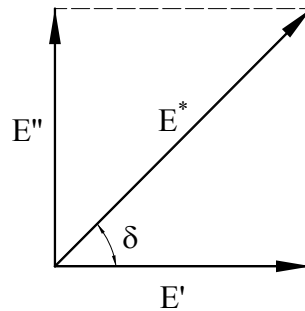
Depolama modülü malzemenin elastik davranışını karakterize etmektedir, kayıp modül ise malzemenin viskoz davranışını tanımlamaktadır (Hatakeyama ve Quinn, 1999). Viskoelastik malzemeler hem elastik hem de plastik özellik davranışı sergilemektedir. Kayıp enerjinin depolanan enerjiye oranı  $\tan\delta$  (kayıp faktör) olarak adlandırılan faz açısının tanjantıdır. Bu eşitlik  $\tan\delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)}$  şeklinde tanımlanmıştır.

Çok iyi bilinen modüller arasındaki bu ilişki Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Uygulanan frekans (f) değerinde sinüzoidal değişime sahip gerinim ( $\epsilon$ ) ile gerilme ( $\sigma$ ) arasındaki faz açısı, ( $\delta$ ), farkı

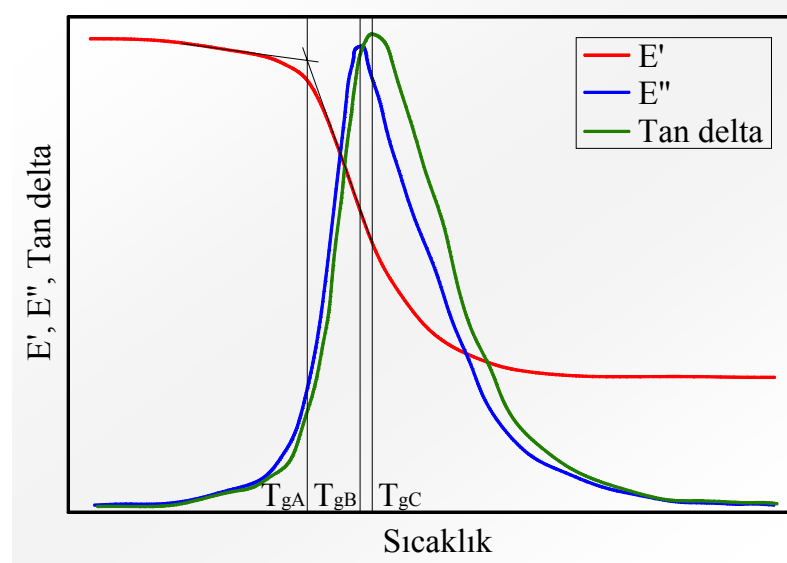
Şekil 3.14'te gerinim ( $\epsilon$ ) ile gerilme ( $\sigma$ ) arasındaki faz açısı farkı görülmektedir. Şekilde ilk önce gerilme değeri daha sonra belirli bir gecikme ile gerinim değeri sıfır olmaktadır. Viskoelastik malzemelerde elastik ve viskoz özellikler aynı anda etkilidir. Bu nedenle gerinim ile gerilme arasında  $\delta$  açısı kadar faz farkı söz konusudur ki bu açı  $90^\circ$ 'den küçük olmaktadır.  $\delta$  açısı değerleri sıcaklık ile belirgin bir şekilde değişmektedir.



Şekil 3.15: Depolama modülü  $E'$ , kayıp modül  $E''$ , dinamik modül  $E^*$  ve kayıp faktör  $\tan\delta$  arasındaki ilişki

DMTA yöntemi kullanılarak  $T_g$ 'nin belirlenmesinde kullanılan dinamik modül bileşenlerinin tespiti sabit oranla artan sıcaklık süresince yapılmaktadır. DMTA yönteminde numunelerin değişik modlarda test edilmesi mümkündür. Bu test yöntemleri arasında tek tarafı ve iki tarafı destekli kiriş, üç nokta eğme, burulma, kayma, çekme ve basma modları yer almaktadır. Sıralanan bu ölçüm düzeneklerinin seçimi malzemeye ve arzu edilen yükleme şekline göre yapılmaktadır. Kompozit malzemelerin DMTA analizinde en sık üç nokta eğme testi yöntemi kullanılmaktadır, çünkü tek veya çift tarafı destekli kiriş yönteminin neden olduğu bileşik yüklemeler bu yöntemde görülmez. Bununla birlikte bu düzenek oldukça katı olan malzemeler için dahi ölçülebilir gerinimler üretebilmektedir (Li ve diğ. 2000).

DMTA analizi ile elde edilen sonuçlar; depolama modülü, kayıp modül ve  $\tan\delta$ , sıcaklığın fonksiyonu şeklinde ele alınmaktadır. Tipik DMTA eğrileri Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Camı geçiş sıcaklığı bu eğrilerin herhangi birinden, depolama modülü eğrisinin ilk büküm noktasından ( $T_{gA}$ ), kayıp modül eğrisinin tepe noktasından ( $T_{gB}$ ) veya tan delta ( $\tan\delta$ ) eğrisinin tepe noktasından ( $T_{gC}$ ) bulunabilir. Yukarıda sıralanan her bir metot ile elde edilen ( $T_g$ ) değerleri birbirinden farklıdır (Li ve diğ. 2000). Bu farklılık  $T_g$  değerlerinde  $25^\circ\text{C}$ 'lik değişim yaratabilir (Menard, 1999). ASTM D 4065 standardı  $T_g$  değeri olarak kayıp modül eğrisinin tepe noktası olarak alınması gerektiğini belirtmektedir (ASTM, 2004).



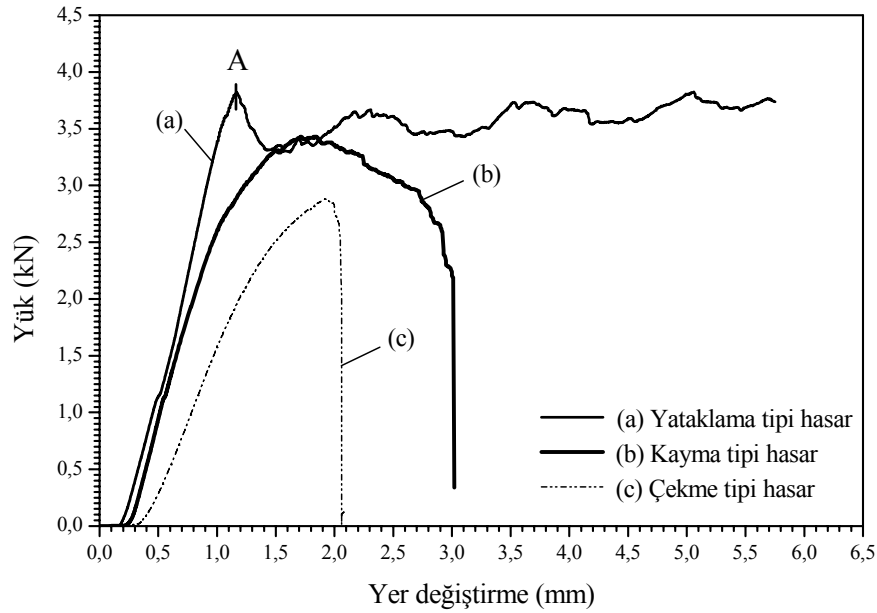
Şekil 3.16: Tipik DMTA diyagramı

## BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI

### 4.1. Farklı Geometrik Parametrelere Sahip Polimerik Kompozitlerin Statik Yükleme Şartlarında Pim ile Yük Taşıma Performanslarının Değerlendirilmesi

#### 4.1.1. Karbon/PPS kompozitlerin pim ile yük taşıma performansları

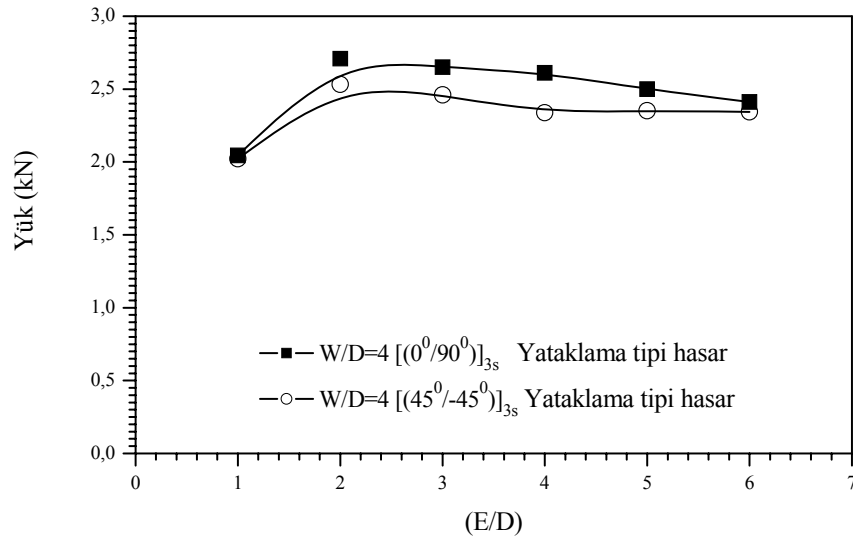
Testlerden elde edilen yataklama, çekme ve kayma tipi hasarlara ait örnek yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.1’de görülmektedir.  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  ve  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzenlerine ve değişik W/D ve E/D oranlarına sahip numunelerden elde edilen maksimum kuvvet değerleri de Şekil 4.2 ve 4.3’te verilmektedir.



Şekil 4.1: Değişik hasar tiplerinde elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri: (a) yataklama tipi hasar, (b) kayma tipi hasar, (c) çekme tipi hasar

Şekil 4.1’de yataklama tipi hasara ait eğride görüldüğü gibi, maksimum yük değerinin % 80-90 değerlerine kadar yükte lineer bir artış gözlenmiştir. Şekil 4.1’deki “A” noktasından sonra hasarın etkisiyle yükte ani bir düşüş meydana gelir.

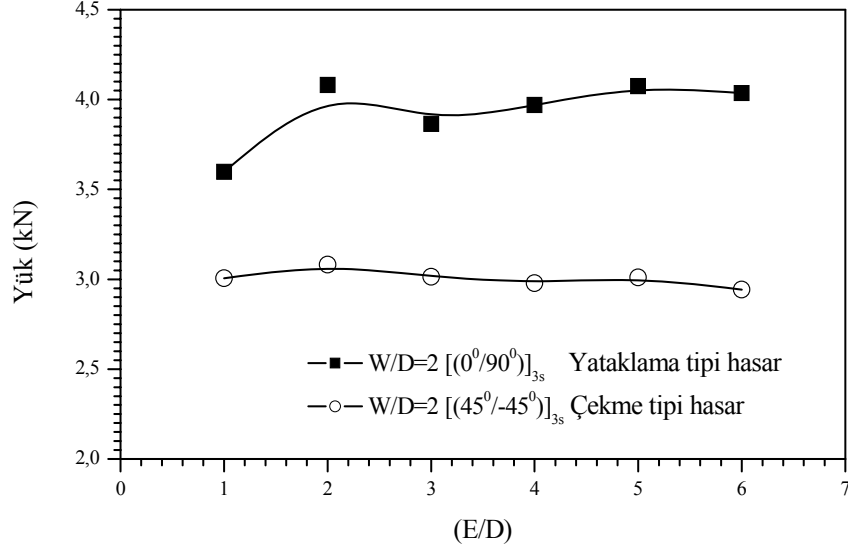
Levha içerisindeki ezilmeler, tabakalar arası delaminasyonlar, fiber kırılmaları, fiber/matris ara yüzey deformasyonları, fiber burkulmaları vb. nedenlerle kompozitin pim ile temas ettiği bölgede buruşma şeklinde bir hasar oluşur. Pim yüklemesinin etkisiyle meydana gelen yataklama tipi hasar uygulanan yük doğrultusunda pimin levhayı ezmesi şeklindedir. Çekme tipi hasarda ise, oluşan çatlakın ilerleme yönü uygulanan yük doğrultusuna diktir. Çekme tipi hasar kesit alanının minimum olduğu durumlarda ortaya çıkar. Bu tip hasara numune genişliğinin “W” küçük, kenarın delik eksenine olan mesafesinin “E” büyük olması halinde sık rastlanır. Numune genişliğinin arttırılması fakat delik ekseninin kenara olan mesafesinin küçük tutulması durumunda ise kayma tipi hasar oluşur. Kenar mesafesinin “E”, kısa olması hallerinde hasar hızlı bir şekilde yayılmaktadır. Oluşan hasarların tipik karakteristik farklılıkları çekme eğrisinde ilk hasarın meydana gelmesinden sonra ortaya çıkar. Çekme ve kayma tipi hasarlarda yük değerinin aniden sıfıra düştüğü gözlenmiştir. Yataklama tipi hasar ise en güvenli hasar modu olup, son hasar meydana gelene kadar malzeme giderek azalan miktarda yük taşımaya devam eder. Kopma öncesi hasar toleransı olan bir bağlantı tipi söz konusudur.



Şekil 4.2: [(45°/-45°)]<sub>3s</sub> ve [(0°/90°)]<sub>3s</sub> oryantasyonlarında elde edilen yataklama kuvvetinin karşılaştırılması (W/D = 4, D=5)

Şekil 4.2 ve 4.3'te yapılan deneyler sonucunda, [(45°/-45°)]<sub>3s</sub> ve [(0°/90°)]<sub>3s</sub> yönlenme oryantasyonlarına ve değişik W/D ve E/D oranlarına sahip numunelerin pim ile yük taşıma performansları görülmektedir. Bu oryantasyonlarda optimum

geometriyi elde etmek için, kenar mesafesinin pim çapına oranı (E/D) ve numune genişliğinin pim çapına olan oranı (W/D), deneyler esnasında sistematik olarak değiştirilmiştir.



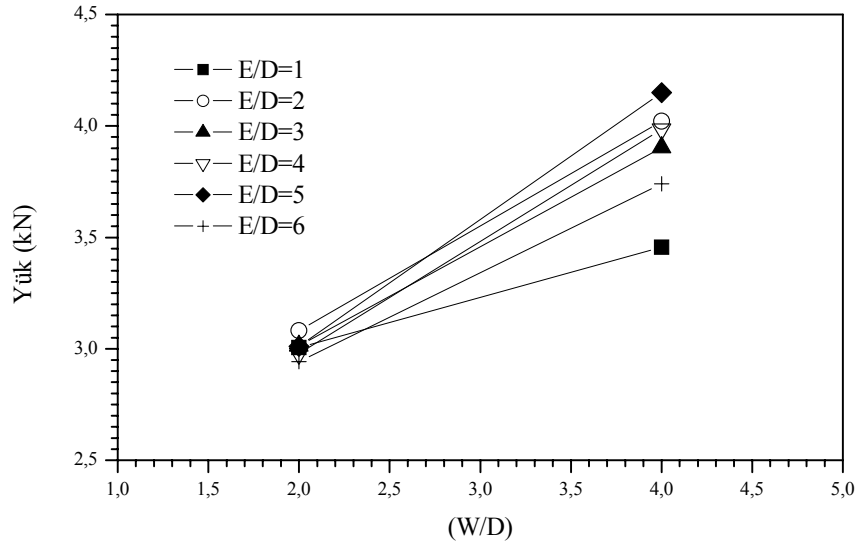
Şekil 4.3: [(45°/-45°)<sub>3s</sub> ve [(0°/90°)<sub>3s</sub> oryantasyonlarında elde edilen kuvvetlerin karşılaştırılması (W/D = 2, D=10 sabit)

Elde edilen deney sonuçlarından (Şekil 4.2 ve 4.3) her iki tipteki oryantasyonda, [(45°/-45°)<sub>3s</sub> ve [(0°/90°)<sub>3s</sub> (E/D) oranının 2' ye eşit olması halinde levhanın taşıdığı kuvvetin değeri maksimum olmaktadır. W/D = 4 ve pim çapı D = 5 olması durumunda her iki oryantasyonda [(45°/-45°)<sub>3s</sub> ve [(0°/90°)<sub>3s</sub>, kompozit tabakalarda yataklama tipi hasar oluşmaktadır. [(0°/90°)<sub>3s</sub> oryantasyona sahip kompozitlerde yataklama kuvveti, [(45°/-45°)<sub>3s</sub> oryantasyonuna kıyasla daha fazladır (Şekil 4.2). Şekil 4.3' te ise W/D =2 ve pim çapı D = 10 olması halinde yük-yer değiştirme eğrisindeki değişimler yer almaktadır. [(45°/-45°)<sub>3s</sub> ve [(0°/90°)<sub>3s</sub> oryantasyonlarında farklı modlarda hasarların meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.3'te [(0°/90°)<sub>3s</sub> oryantasyonuna sahip olan kompozit tabakaların [(45°/-45°)<sub>3s</sub> oryantasyonuna sahip tabakalara kıyasla yaklaşık 1.5 kat daha fazla yük taşıdığı görülmektedir.

Şekil 4.4'te [(45°/-45°)<sub>3s</sub> oryantasyonuna sahip kompozit malzemenin W/D oranına bağlı olarak değişen performansları görülmektedir. W/D oranlarının artması kuvvet taşıma kapasitelerinde artışa neden olmaktadır. [(45°/-45°)<sub>3s</sub> oryantasyonundaki ve

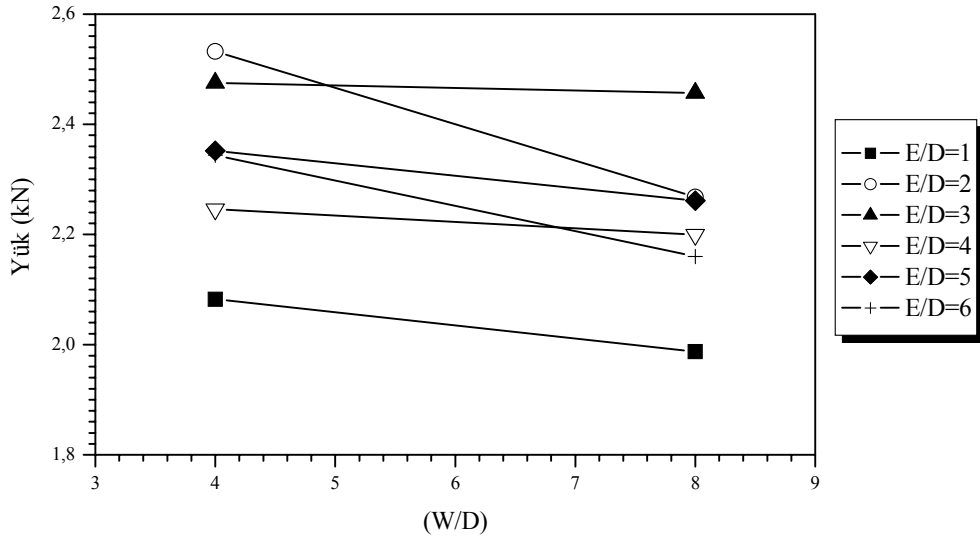


D = 10 mm'lik pim çapına sahip numunelerde yük değerlerinde artış meydana gelirken Şekil 4.5' te gösterilen  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  oryantasyonundaki malzemelerde D = 5 mm'lik pim çapına sahip numunelerde yük taşıma değerlerinde düşme meydana gelmektedir. Şekil 4.6'da ise E/D oranına bağlı olarak değişen yük taşıma değerleri verilmektedir. W/D oranının iki olması halinde test edilen levhalarda numunenin dar olması nedeniyle çekme tipi hasar meydana gelmektedir. Bağlantı uygulanan yüke karşı yeterli derecede direnç gösteremediği için böyle bir hasarın oluşması arzu edilmez. W/D oranının dört olması halinde ise bağlantıda yataklama tipi hasar oluşur. Bu tip bağlantılarda meydana gelebilecek en iyi hasar tipi yataklamadır (ezilme). Bu tipteki hasar daha fazla yüke maruz kalarak numunenin deforme olmasını sağlamaktadır.

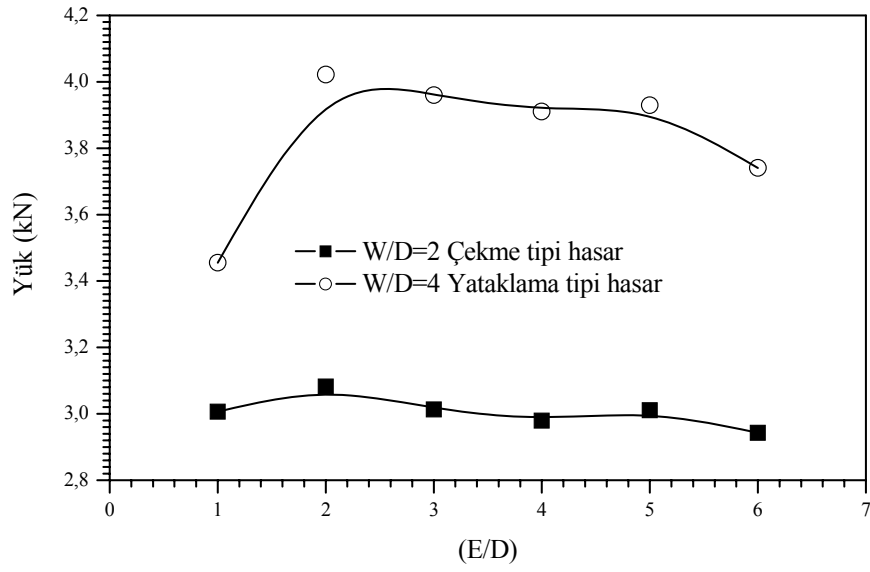


Şekil 4.4:  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna sahip kompozitte W/D oranına bağlı kuvvet değişimleri (D = 10)

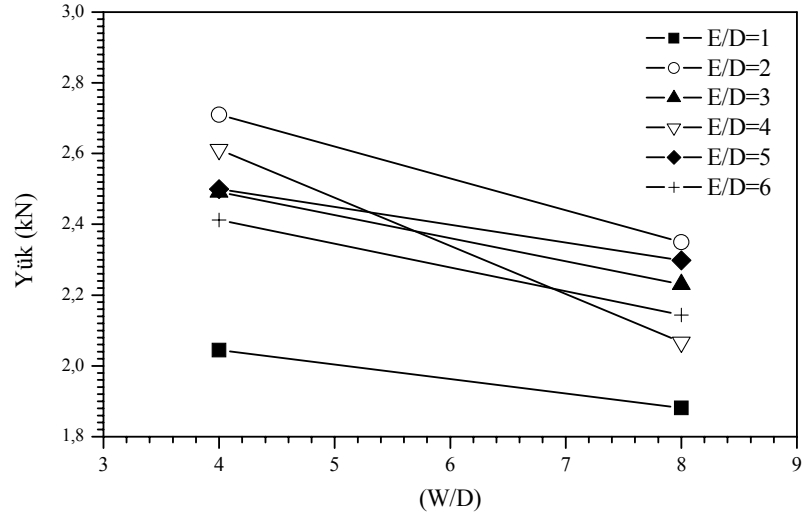
Şekil 4.7'de gösterildiği gibi  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna sahip numunelerde D=5 mm delik çapı için W/D oranı arttıkça elde edilen yük değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek kuvvet değerleri E/D oranının ikiye eşit olması halinde elde edilmiştir. Dolayısı ile kritik E/D oranı ikidir. E/D oranının bir olması durumunda en küçük kuvvet değerleri söz konusudur.  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna sahip numunelerde D=10 mm delik çapı için W/D oranının artmasıyla yük taşıma değerlerindeki değişim Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5: [(45°/-45°)]<sub>3s</sub> oryantasyonuna sahip kompozitte W/D oranına bağlı kuvvet değişimleri (D = 5)

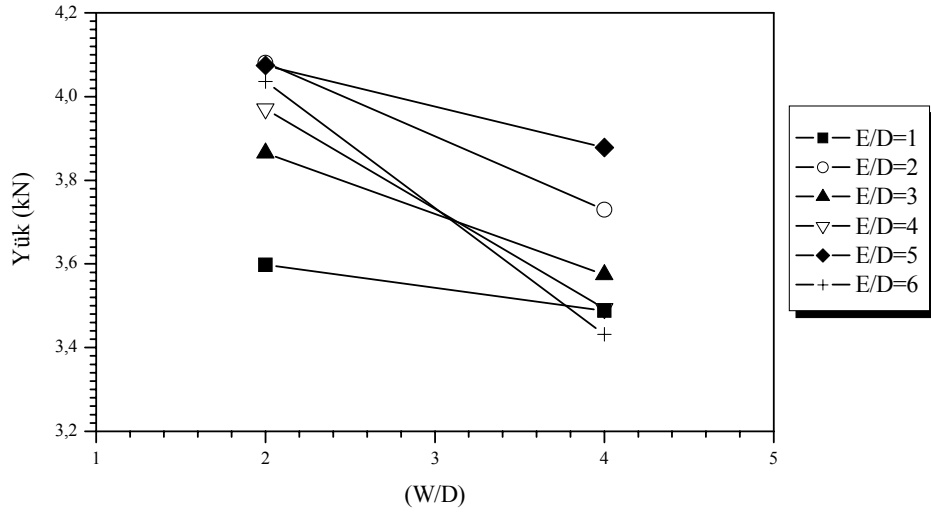


Şekil 4.6: [(45°/-45°)]<sub>3s</sub> oryantasyonunda meydana gelen dayanım değerlerinin karşılaştırılması (D = 10)



Şekil 4.7:  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna sahip kompozitte W/D oranına bağlı kuvvet değişimleri (D = 5)

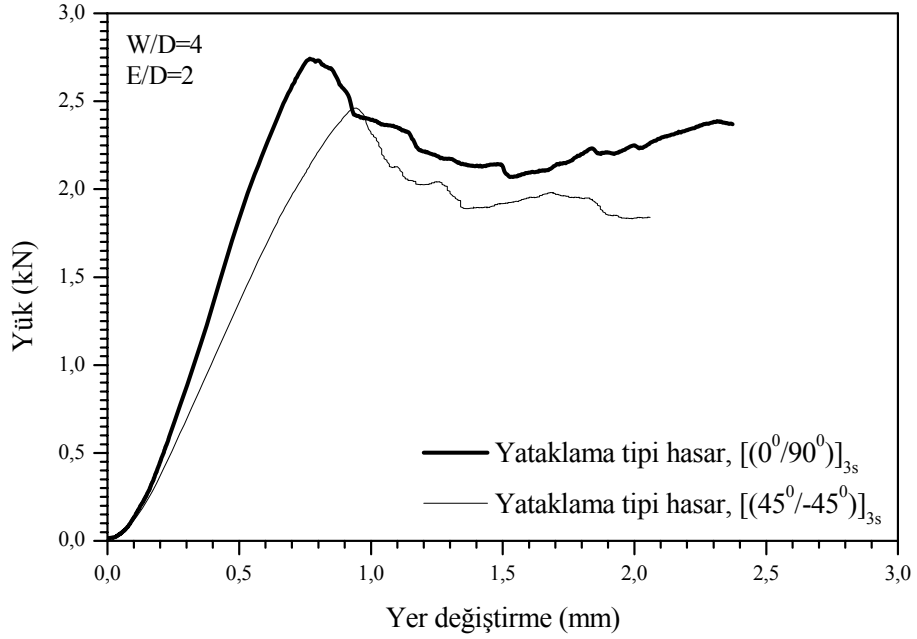
$[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  oryantasyonunda hem 5 hem 10 mm delik çapları için de W/D oranının artması ile yük taşıma kapasitesinin düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 4.8:  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna sahip kompozitte W/D oranına bağlı kuvvet değişimleri (D = 10)

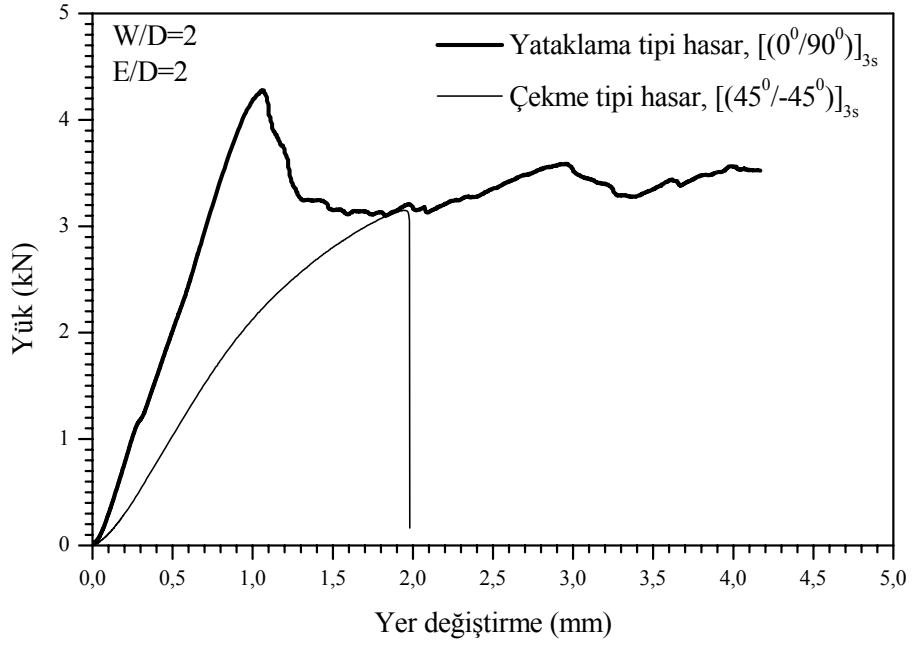
Şekil 4.9'da aynı W/D=4 ve E/D= 2 oranlarına sahip  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  ve  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzeninde olan kompozit levhaların yük-yer değiştirme eğrileri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenmeye sahip kompozitin eğrisinin elastik bölgedeki eğimi  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenmeye sahip olanın eğiminden daha büyüktür. Ayrıca  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenmeye sahip malzeme daha

büyük yataklama dayanımı göstermektedir. Yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan test boyunca absorbe edilen enerjiyi vermektedir. Bahsedilen bu alanlar kıyaslandığında  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenmeye sahip kompozit numunenin hem elastik hem de plastik bölgede absorbe ettiği enerji  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenmeye göre daha fazladır.



Şekil 4.9:  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  ve  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri (W/D=4, E/D=2, D=5)

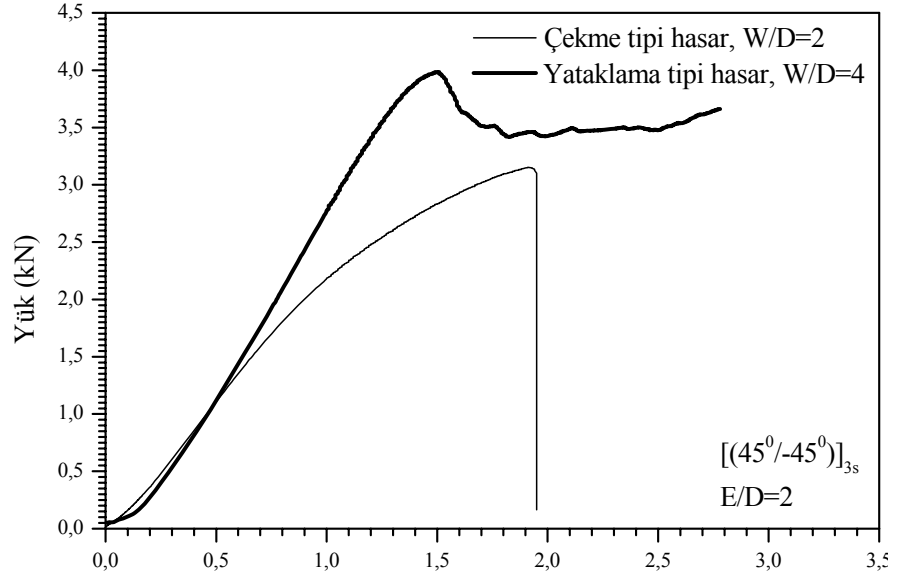
Şekil 4.10'da aynı W/D=2 ve E/D=2 oranlarına sahip  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  ve  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzeninde olan kompozit levhaların yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir.  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenmeye sahip kompozitin Şekil 4.9'daki duruma benzer şekilde eğrinin elastik bölgedeki eğimi  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenmeye göre daha fazladır. Yine aynı şekilde  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzeni daha büyük yataklama dayanımı değerleri vermektedir. Deneyler esnasında numunelerin absorbe ettiği enerjiler arasında belirgin bir farklılık söz konusudur.  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenmeye sahip numunelerin  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenmeye kıyasla daha fazla enerji absorbe etmesi sürpriz değildir. Yataklama veya çekme tipi hasara uğrayan numuneler test boyunca farklı mertebede enerji absorbe etmektedir. Çekme tipi hasarda küçük yer değiştirme sonrasında dahi ani hasar oluşumu söz konusu olup, yeterli derecede enerji absorpsiyonu olmadan yük aniden azalmıştır.



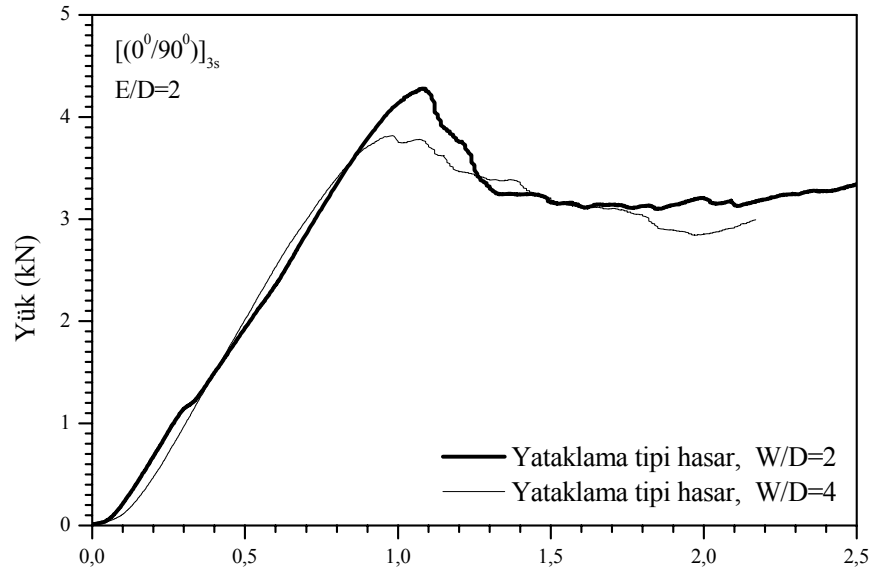
Şekil 4.10:  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  ve  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri ( $W/D=2$ ,  $E/D=2$ ,  $D=10$ )

Şekil 4.11'de aynı  $E/D=2$  oranına sahip  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenmedeki kompozit numunelerin yük-yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir.  $W/D=4$  olması halinde numunelerde yataklama tipi hasar meydana gelmiştir. Diğer taraftan  $W/D=2$  olması durumunda ise çekme tipi hasar söz konusudur.  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenmede büyük  $W/D$  oranlarında bağlantı daha güvenli olup çok daha büyük hasar toleransına sahiptir. Ayrıca test esnasında absorbe edilen enerji değeri daha fazladır.

Şekil 4.12'de aynı  $E/D=2$  oranına sahip  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzenindeki kompozitlerin yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekil 4.11'den farklı olarak dar numuneler ( $W/D=2$ ) geniş numuneler ile kıyaslandığında ( $W/D=4$ ) daha yüksek yataklama yükü değerleri vermektedir.



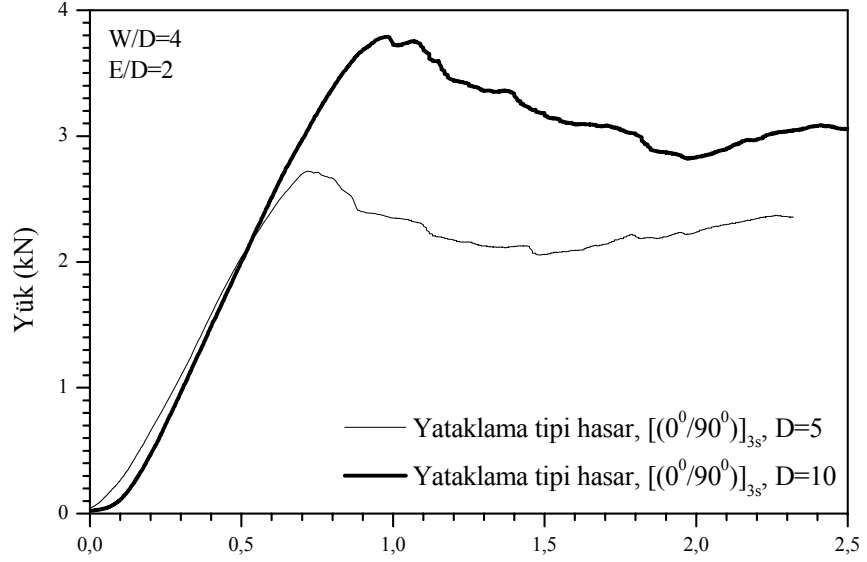
Şekil 4.11:  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri (E/D=2, D=10)



Şekil 4.12:  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri (E/D=2, D=10)

Şekil 4.13'te W/D=4 ve E/D=2 oranlarına sahip  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenmedeki kompozit levhaların yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Pim çapının bağlantı dayanımı

performansı üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Daha geniş pim çapına sahip bağlantılar daha büyük yataklama yükü değerlerine ve deformasyon enerjilerine neden olmaktadır.



Şekil 4.13:  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip levhaların yük-yer değiştirme eğrileri (W/D=4, E/D=2)

Test edilen numunelerde meydana gelen hasar tiplerine ait makro görüntüler Şekil 4.14'te verilmektedir. Şekil 4.14 a, b ve c' de  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna sahip numunelerde yataklama (ezilme) tipi (E/D=2, W/D=2, D=10) (a=ön görünüş, b=üst görünüş, c=yan görünüş) hasarlar görülmektedir. Şekil 4.14 d' de ise  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip test numunesindeki çekme tipi (E/D=1, W/D=2, D=10) hasar gösterilmiştir. Şekil 4.14 e' de ise  $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$  yönlenmeye sahip numunede kayma tipi (E/D=1, W/D=2, D=10) hasar görülmektedir.



a)



b)



c)



d)



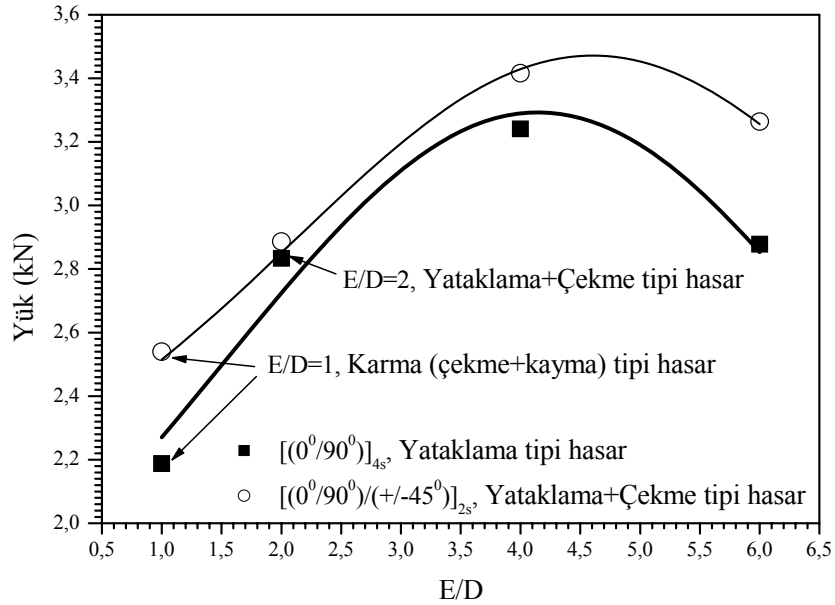
e)

Şekil 4.14:  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  kompozitte pim ile yükleme testi sonucunda elde edilen hasarlar. a,b ve c-yataklama tipi hasar ( $E/D=2$ ,  $W/D=2$ ,  $D=10$ ) (a=ön görünüş, b=üst görünüş, c=yan görünüş), d- çekme tipi hasar ( $E/D=1$ ,  $W/D=2$ ,  $D=10$ ), e- kayma tipi hasar ( $E/D=1$ ,  $W/D=2$ ,  $D=10$ )

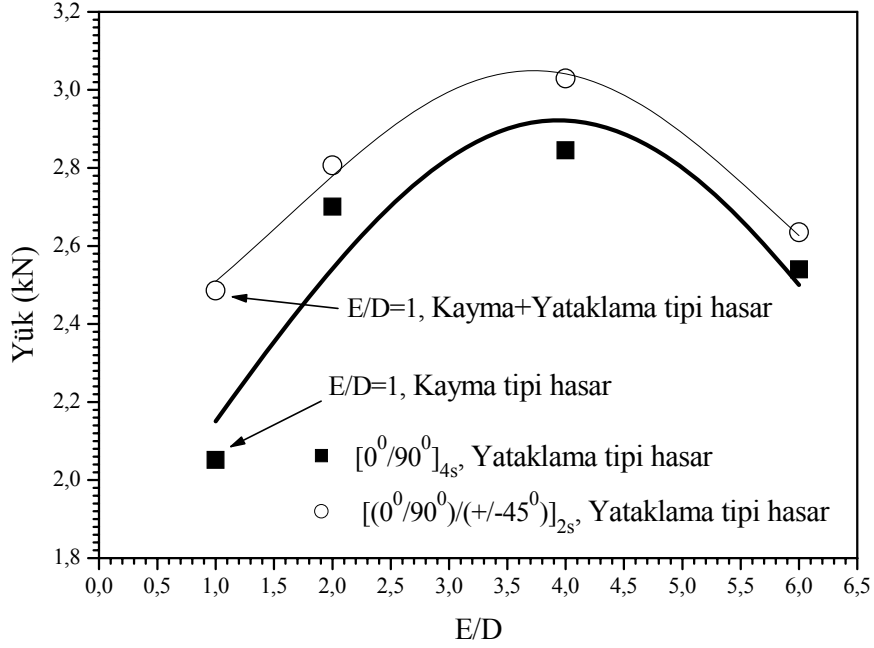


#### 4.1.2. Cam/PPS kompozitlerin pim ile yük taşıma performansları

$[(0^0/90^0)]_{4s}$  ve  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine ve değişik W/D ve E/D oranlarına sahip cam/PPS (fiber hacimsel oranı: % 48) kompozit malzemeler için elde edilen yük değerleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu oryantasyonlar için optimum geometrik parametrelerin elde edilebilmesi için pim merkezinden numune kenarına olan mesafenin pim çapına oranı (E/D) ve numune genişliğinin pim çapına oranı (W/D) testler esnasında sistematik olarak değiştirilmiştir. Her iki şekilden de görüldüğü üzere  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip levhaların yataklama yükü değerleri,  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip olanlara kıyasla daha yüksektir. Her iki yönlenme düzeninde maksimum yük değeri E/D=4 olması halinde elde edilmiştir. W/D oranının artırılmasının bağlantının yük taşıma kapasitesini azalttığı görülmüştür (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16). Her iki yönlenme düzeninde E/D=1 ve W/D=2 olması halinde çekme+kayma tipi hasar meydana gelmiştir.  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzeninde E/D=2 ve W/D=2 olması durumunda yataklama +çekme tipi hasar oluşmuştur (Şekil 4.15).  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzeninde E/D=1 ve W/D=4 olması durumunda kayma +yataklama tipi hasar,  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzeninde E/D=1 ve W/D=4 olması halinde ise kayma tipi hasar oluşmuştur (Şekil 4.16).

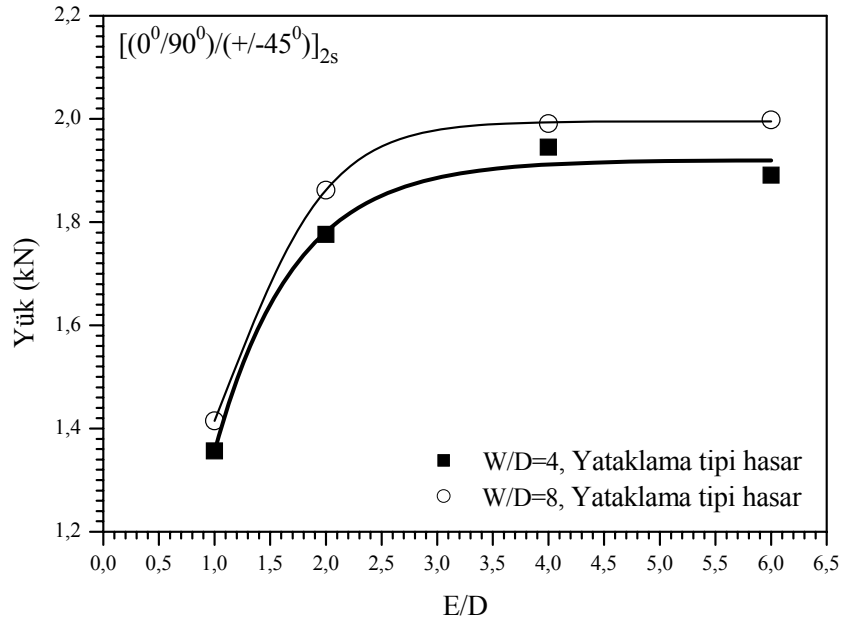


Şekil 4.15:  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  ve  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzeninde oluşan yüklerin kıyaslanması (W/D=2, D=10)

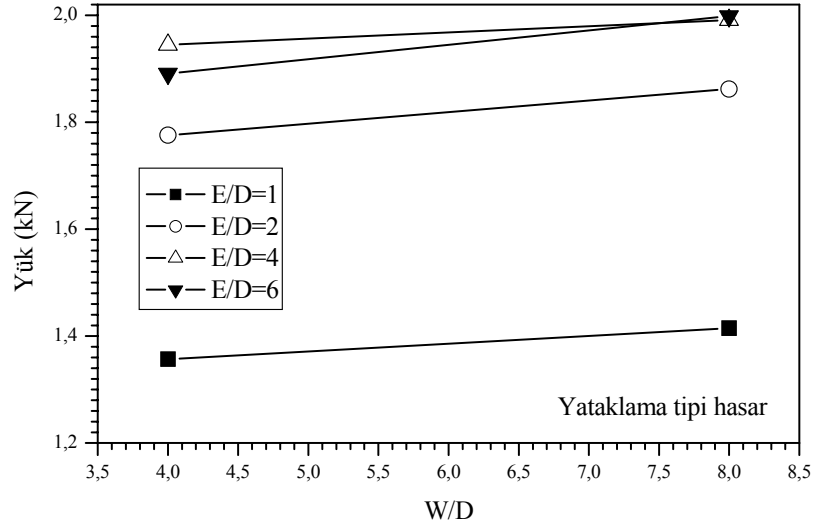


Şekil 4.16:  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  ve  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  yönlenme düzeninde oluşan yüklerin kıyaslanması ( $W/D=4$ ,  $D=10$ )

Şekil 4.17'de  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip kompozitte E/D oranına bağlı olarak elde edilen yataklama yükü değerleri görülmektedir. Bu yönlenme düzeninde  $D=5$  olması halinde her bir E/D oranı için yataklama tipi hasar oluşmuştur. Şekilden de görüldüğü üzere en büyük yük değerleri E/D oranının 4'e eşit olması halinde elde edilmiştir. Daha yüksek E/D değerlerinde ise belirgin bir değişim meydana gelmemiştir. Dolayısı ile bu sonuca bağlı olarak kritik E/D oranı 4 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.18'de ise  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip kompozitte W/D oranına bağlı yataklama yükü değerleri verilmiştir. Bu şekilde ifade edilen en önemli nokta  $D=5$  olması halinde W/D oranında meydana gelen artışın yataklama yükü değerlerine de artış olarak yansımalarıdır. Bu durum sadece  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip kompozit ve şekilde verilen geometrik parametreler için geçerlidir.



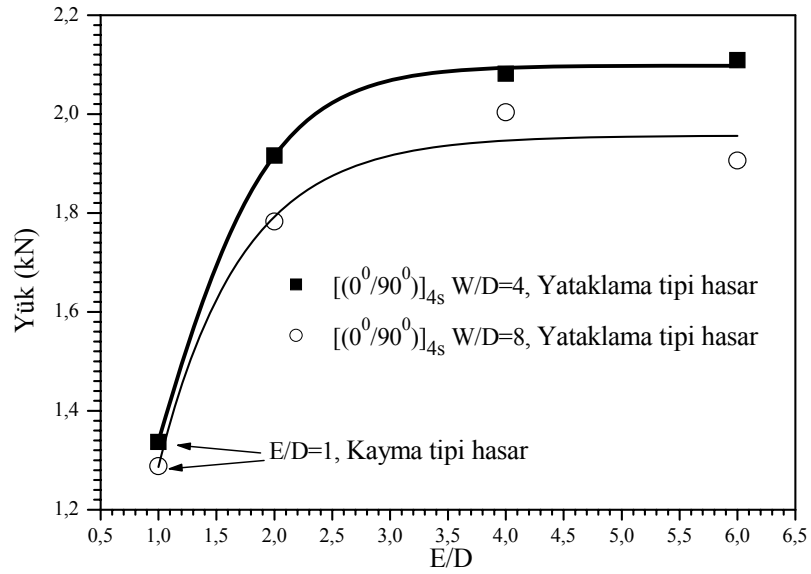
Şekil 4.17:  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip kompozitte elde edilen yataklama yükü değerleri (D=5)



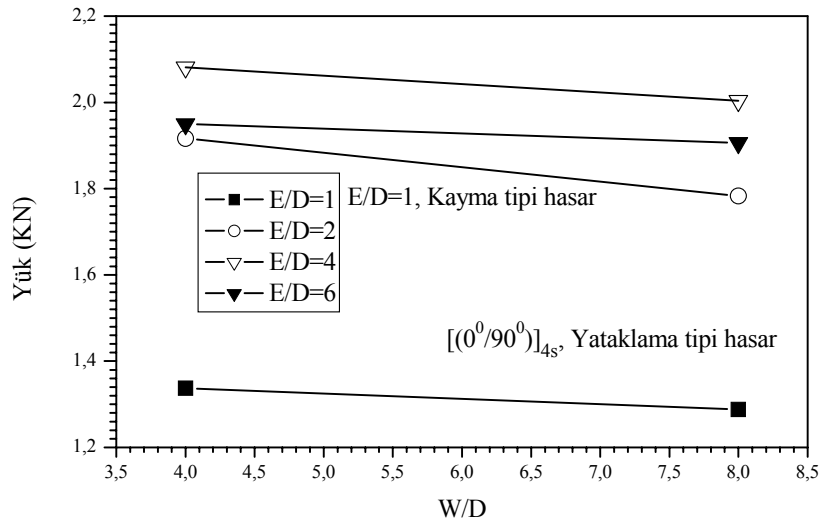
Şekil 4.18:  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip kompozitte W/D oranına bağlı yataklama yükü değerleri (D=5)

Aşağıdaki şekilde  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  oryantasyonuna sahip kompozitte E/D oranına bağlı olarak değişen yükler verilmektedir. E/D=1, D=5 ve W=20 veya 40 olması halinde her iki durum için bağlantı bölgesi kayma şeklinde oluşan hasara maruz kalır. Minimum yataklama yükü değerleri E/D=1 olması halinde elde edilmiştir. Diğer E/D oranları için hasar yataklama şeklinde orta çıkmıştır (Şekil 4.19). Şekil 4.20'de  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip kompozitte W/D oranına bağlı yataklama yükü

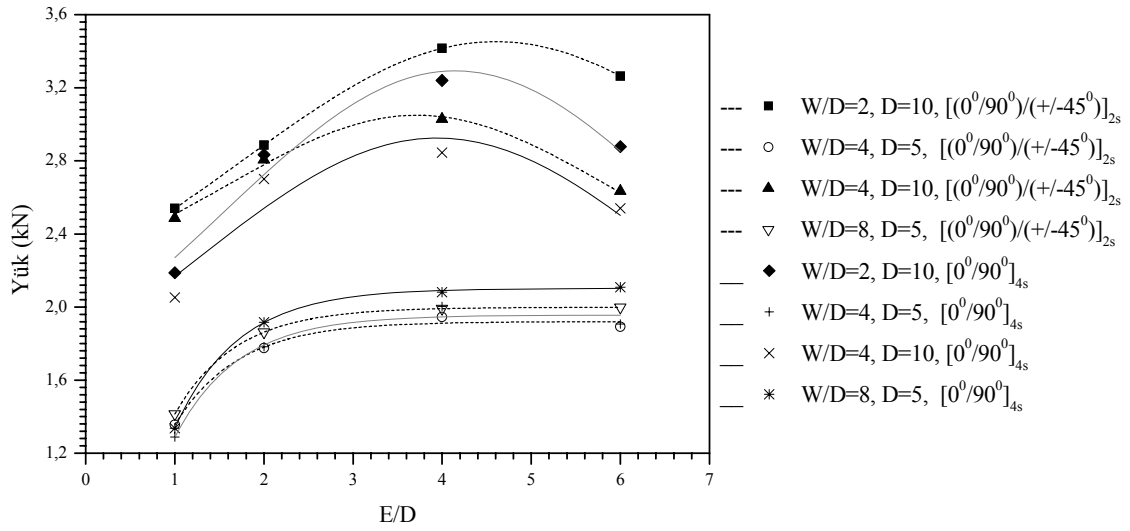
değerleri  $D=5$  olması halinde verilmektedir. Bu grafikte göze çarpan nokta  $W/D$  oranlarındaki artışın yataklama yükü değerlerinde azalmaya neden olmasıdır. Sonuçta  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlendirme düzenine sahip kompozitte  $D=5$  olması durumunda  $W/D$  oranındaki artış yataklama yükü değerlerinde artışa,  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlendirme düzenine sahip kompozitte  $D=5$  olması halinde ise  $W/D$  oranındaki artış yük değerlerinde azalmaya neden olmuştur (Şekil 4.18 ve Şekil 4.20).



Şekil 4.19:  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlendirme düzenine sahip kompozitte elde edilen yataklama yükü değerleri ( $D=5$ )



Şekil 4.20:  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlendirme düzenine sahip kompozitte  $W/D$  oranına bağlı yataklama yükü değerleri ( $D=5$ )

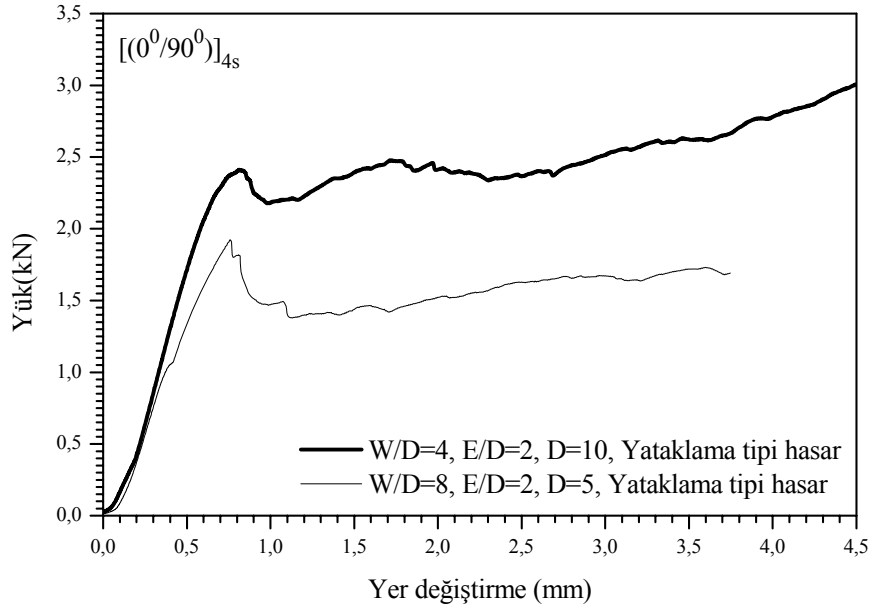


Şekil 4.21: [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)]<sub>4s</sub> ve [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)/(+/-45<sup>0</sup>)]<sub>2s</sub> yönlenme düzenine sahip kompozit plakalarda E/D oranına bağlı olarak değişen yataklama yükü değerleri

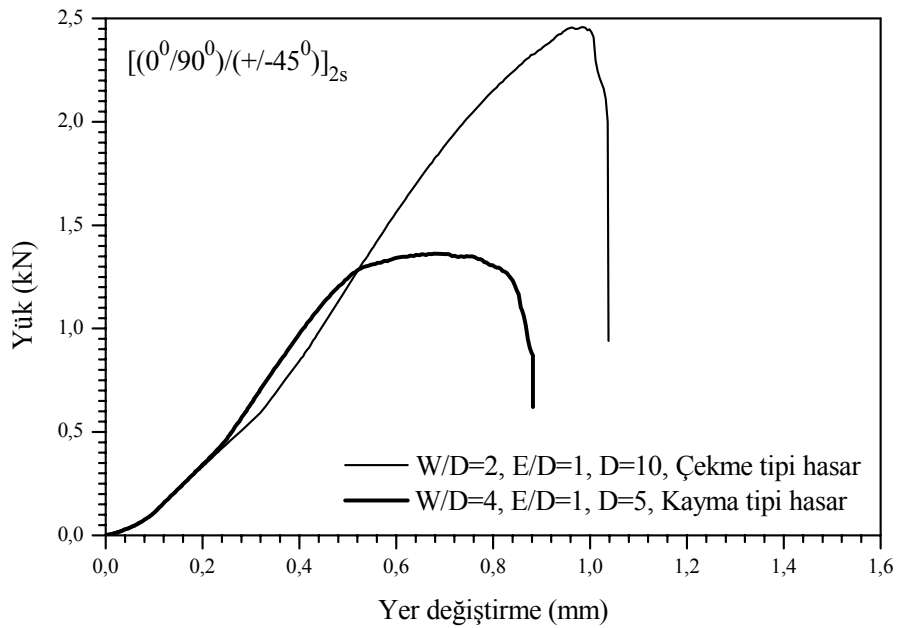
Yukarıdaki şekilde her iki yönlenme düzenine sahip [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)]<sub>4s</sub> ve [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)/(+/-45<sup>0</sup>)]<sub>2s</sub>) PPS matrisli sürekli cam fiber takviyeli kompozitlerde araştırılan her bir parametre için elde edilen yataklama yükü değerleri verilmiştir. [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)/(+/-45<sup>0</sup>)]<sub>2s</sub> yönlenme düzenine, E/D=4, W/D=2 ve D=10 geometrik parametrelere sahip kompozit plakaların bağlantı bölgelerinde maksimum yataklama yükü değerleri elde edilmiştir. Minimum yataklama yükü değerleri ise Şekil 4.21'den de görüldüğü üzere [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)/(+/-45<sup>0</sup>)]<sub>2s</sub> oryantasyonuna ve W/D=4 ve D=5 geometrisine sahip kompozitlerde görülmüştür. Her iki yönlenme düzeninde D=10 olması halinde yataklama yükü değerleri D=5 olması haline kıyasla daha yüksek olmuştur. Geometrik parametrelerin aynı olması halinde (D=10, W/D=2, W/D=4) [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)/(+/-45<sup>0</sup>)]<sub>2s</sub> oryantasyonundaki kompozitler [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)]<sub>4s</sub> yönlenmeye kıyasla yüklemelere karşı daha fazla direnç göstermektedir. D=5, W/D=4 ve W/D=8 durumlarında ise [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)]<sub>4s</sub> yönlenmeye sahip levhalar [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)/(+/-45<sup>0</sup>)]<sub>2s</sub> yönlenmeye sahip levhalara kıyasla daha rijit bağlantılar meydana getirir.

Şekil 4.22'de pim merkezinden numune kenarına olan mesafenin pim çapına oranı (E/D=4) ve numune genişliği (W=40) aynı fakat pim çapı (D=5, 10) farklı olan [(0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup>)]<sub>4s</sub> yönlenme düzenine sahip kompozit levhada elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. W/D=4 ve pim çapı D=10 olan kompozit levhanın yük-yer değiştirme eğrisinin plastik bölgedeki eğimi W/D=8 ve pim çapı D=5 olan

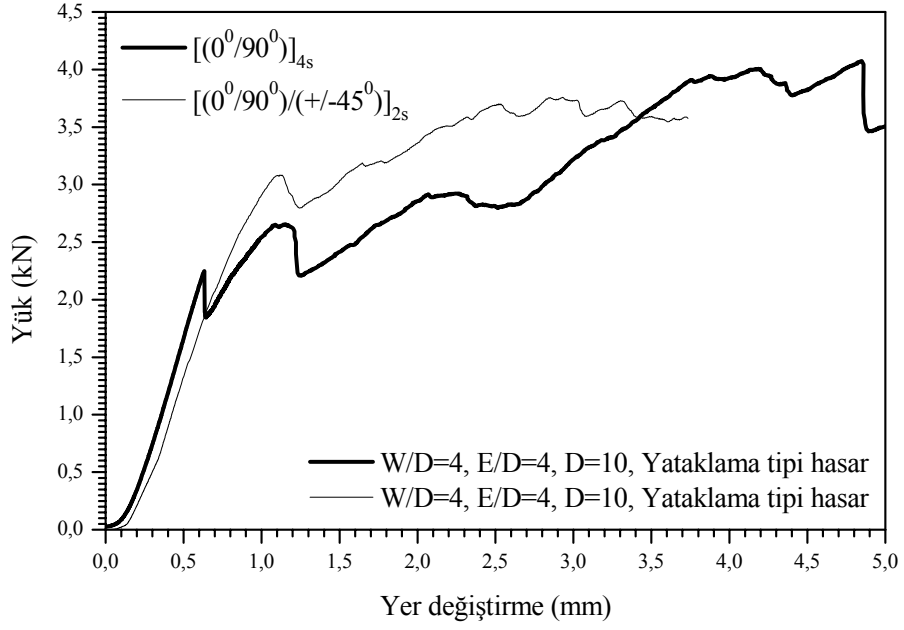
levhaya kıyasla daha yüksektir. Şekle dikkat edildiğinde  $D=10$  olması halinde  $D=5$ 'e kıyasla daha yüksek maksimum yataklama yükü değeri elde edilmiştir. Yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan test esnasında numunenin absorbe etmiş olduğu enerjiyi verir. Test edilen numunelerin absorbe ettikleri enerjileri arasında da belirgin bir farklılık mevcuttur.



Şekil 4.22:  $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri ( $W=40$ )



Şekil 4.23:  $[(0^\circ/90^\circ)/(\pm 45^\circ)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri ( $W=20$ )



Şekil 4.24:  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  ve  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip levhaların yük- yer değiştirme eğrileri (W=40)

Şekil 4.23'te  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine ve farklı pim çapına sahip (D=5, 10) pim ile yüklenmiş kompozit levhanın yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere numune genişliğinin ve E/D oranının aynı olmasına rağmen farklı pim çapı nedeniyle test edilen numunelerde farklı hasar tipleri ile karşılaşmıştır. D=5 olması durumunda kayma tipi, D=10 olması durumunda ise çekme tipi hasar oluşmuştur. Çekme tipi hasara uğramış numunenin absorbe ettiği enerji miktarı kayma tipi hasara uğramış olana kıyasla daha fazladır. Başlangıçta yük-yer değiştirme eğrileri düz bir çizgi şeklinde artmaktadır fakat ilk hasardan sonra numuneler tarafından desteklenen yük değerinde azalma olmuştur. Kesit alanının  $[(W-D).t, t]$ -numune kalınlığı] küçük olması halinde çekme tipi hasarın oluşumu kaçınılmaz olmuştur. Çekme ve kayma tipi hasarlarda yük değerinin aniden sifira düştüğü gözlenmiştir. Bu tip hasarlara uğrayan bağlantılar kopma öncesi hasar toleransına sahip değildir.

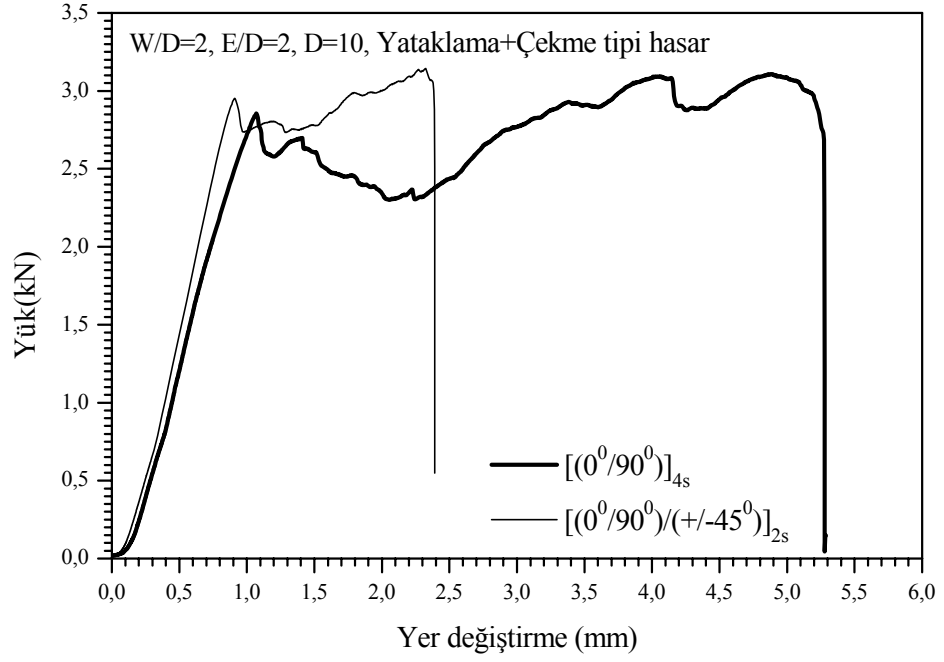
$[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  ve  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenine ve aynı geometrik parametrelere sahip kompozit levhaların yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.24'te verilmiştir. Elastik bölgede her iki levhaya ait eğrilerin eğimleri birbirine çok yakındır.  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip kompozit numunenin yataklama yükü değerleri  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenmeye göre daha yüksektir. Verilen

geometrik parametrelerde her iki yönlenme düzeninde bağlantı bölgesi yataklama tipi hasara maruz kalmıştır. Uygulanan yükün etkisiyle pim delik yüzeyini yük doğrultusunda ezerek yataklama tipi hasarın oluşmasına neden olmuştur. Bu tip hasar durumunda ilk hasar oluştuğundan sonra bile bağlantı yük taşımaya devam eder, yani yataklama tipi hasar kopma öncesi önemli bir hasar toleransına sahiptir.

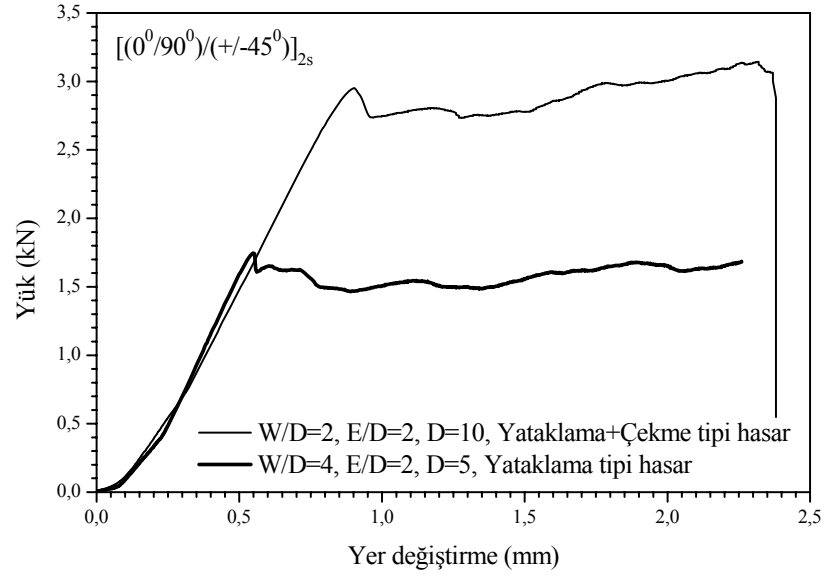
Şekil 4.25'te  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  ve  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenine ve  $W/D=2$ ,  $E/D=2$ ,  $D=10$  geometrik parametrelerine sahip kompozit levhaların yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir.  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip levhadaki ilk hasar daha büyük yük değerinde oluşmuştur. Her iki yönlenme düzeni için elastik bölgedeki eğimler neredeyse birbirine eşittir.  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  oryantasyona sahip kompozit  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenmeye kıyasla test esnasında yaklaşık iki kat daha fazla enerji absorbe etmiştir. Her iki yönlenme düzeni için yük ilk hasarın oluştuğu noktaya kadar lineer artış göstermiştir. Bu noktadan sonra yükte ani bir azalma olmasına rağmen bağlantı bölgesi tamamen hasara uğrayana kadar yük taşımaya devam etmiştir.

Şekil 4.26'da  $E/D$  oranının iki fakat farklı pim çapına sahip  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenindeki kompozitin yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi farklı pim çapına sahip bağlantılarda elastik bölgedeki eğimler aynıdır.  $D=10$  olması halinde bağlantı bölgesinde ilk hasarın oluştuğu yataklama yükü değeri  $D=5$ ' e göre yaklaşık iki kat daha büyüktür. Yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan test esnasında absorbe edilen enerjiyi vermektedir. Alanlar kıyaslandığında  $D=10$  için hem elastik hem de plastik bölgede absorbe edilen enerjiler  $D=5$ ' e göre daha fazladır.

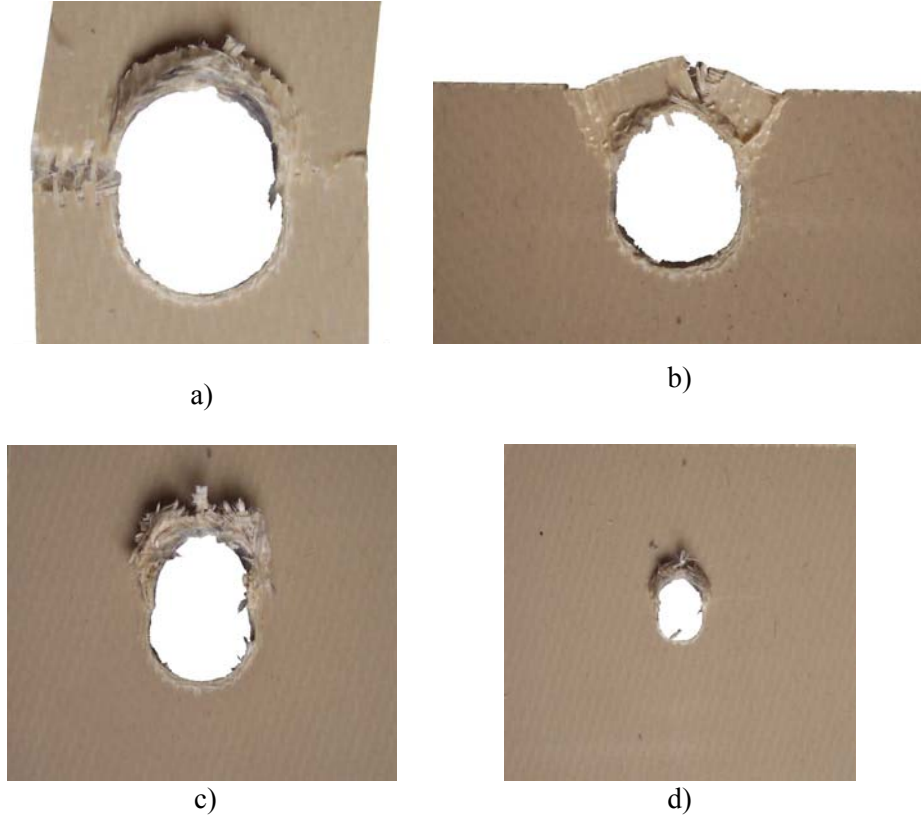




Şekil 4.25:  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  ve  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip levhaların yük- yer değiştirme eğrileri ( $W=20$ )

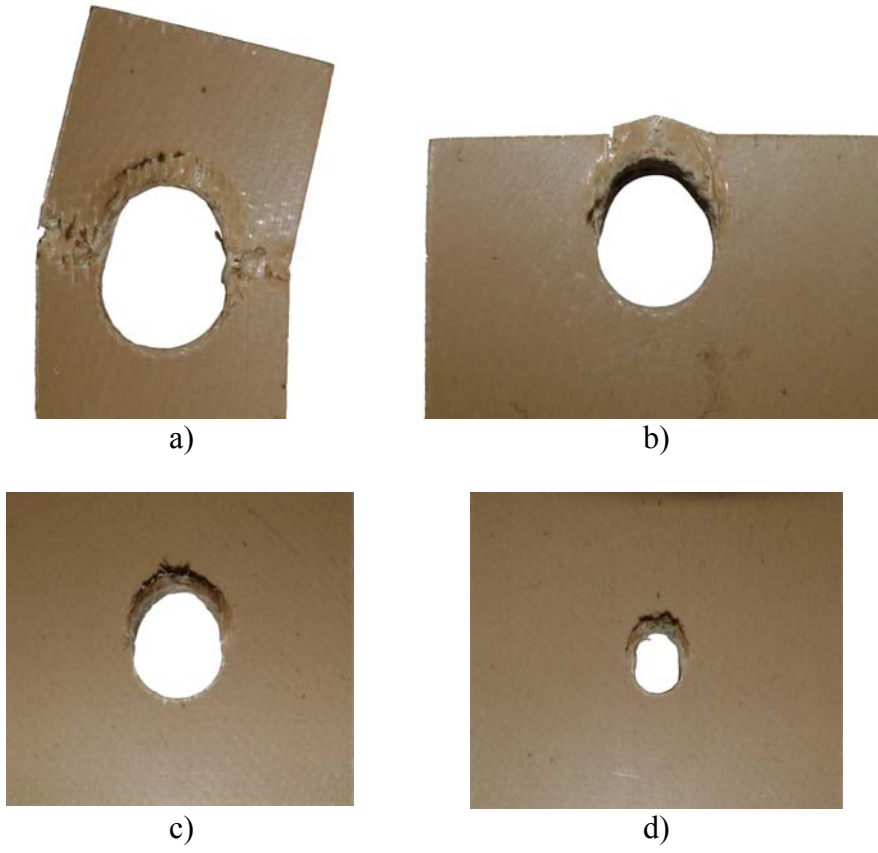


Şekil 4.26:  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri ( $W=20$ )

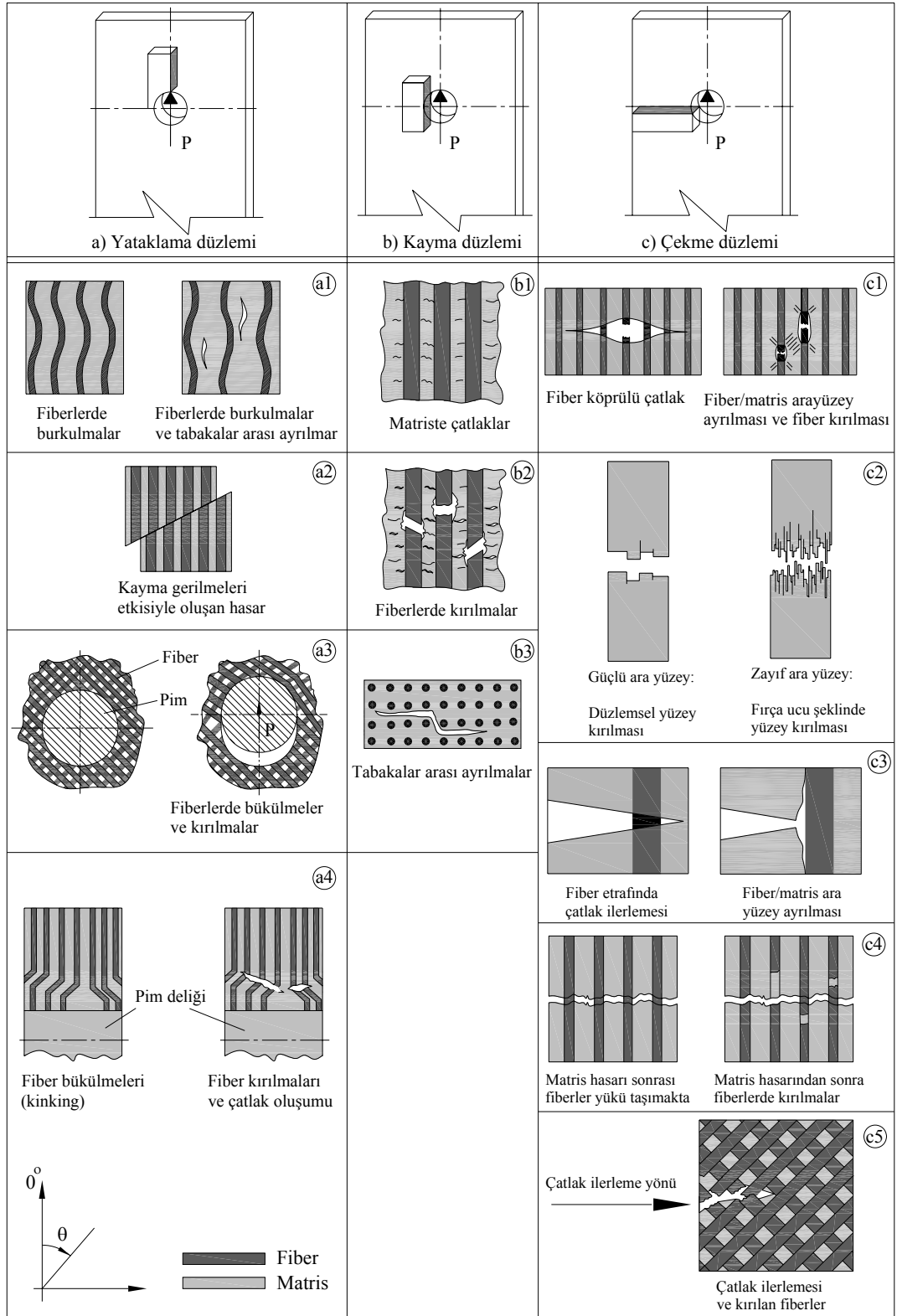


Şekil 4.27:  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip kompozitte oluşan hasarlar: a- yataklama+çekme tipi hasar ( $E/D=2$ ,  $W/D=2$ ,  $D=10$ ), b- kayma tipi hasar ( $E/D=1$ ,  $W/D=4$ ,  $D=10$ ), c- yataklama tipi hasar ( $E/D=2$ ,  $W/D=4$ ,  $D=10$ ), d- yataklama tipi hasar ( $E/D=4$ ,  $W/D=8$ ,  $D=5$ )

Şekil 4.27 ve şekil 4.28'de test edilen kompozit levhaların bağlantı bölgelerinde oluşan hasarlar görülmektedir. Şekil 4.27-a'da gösterilen  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenindeki kompozitte başlangıçta yataklama tipi hasar oluşmuş ve bağlantı belirli bir değere kadar yük taşımaya devam etmiştir. Bağlantıda oluşan yükün artması ile kesit, yükü daha fazla taşıyamayıp ani bir şekilde kopmuştur. Şekil 4.27-b'de kayma, c ve d'de ise yataklama tipi hasarlar görülmektedir. Şekil 4.28'de ise  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine ve farklı geometrik parametrelere sahip kompozit levhalarda oluşan yataklama+çekme, kayma ve yataklama tipi hasarlar sırasıyla 4.28-a, b, c ve d'de verilmektedir.



Şekil 4.28:  $[(0^0/90^0)/(\pm 45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip kompozitte oluşan hasarlar: a- yataklama+çekme tipi hasar ( $E/D=2$ ,  $W/D=2$ ,  $D=10$ ), b- kayma tipi hasar ( $E/D=1$ ,  $W/D=4$ ,  $D=10$ ), c- yataklama tipi hasar ( $E/D=2$ ,  $W/D=4$ ,  $D=10$ ), d- yataklama tipi hasar ( $E/D=4$ ,  $W/D=8$ ,  $D=5$ )



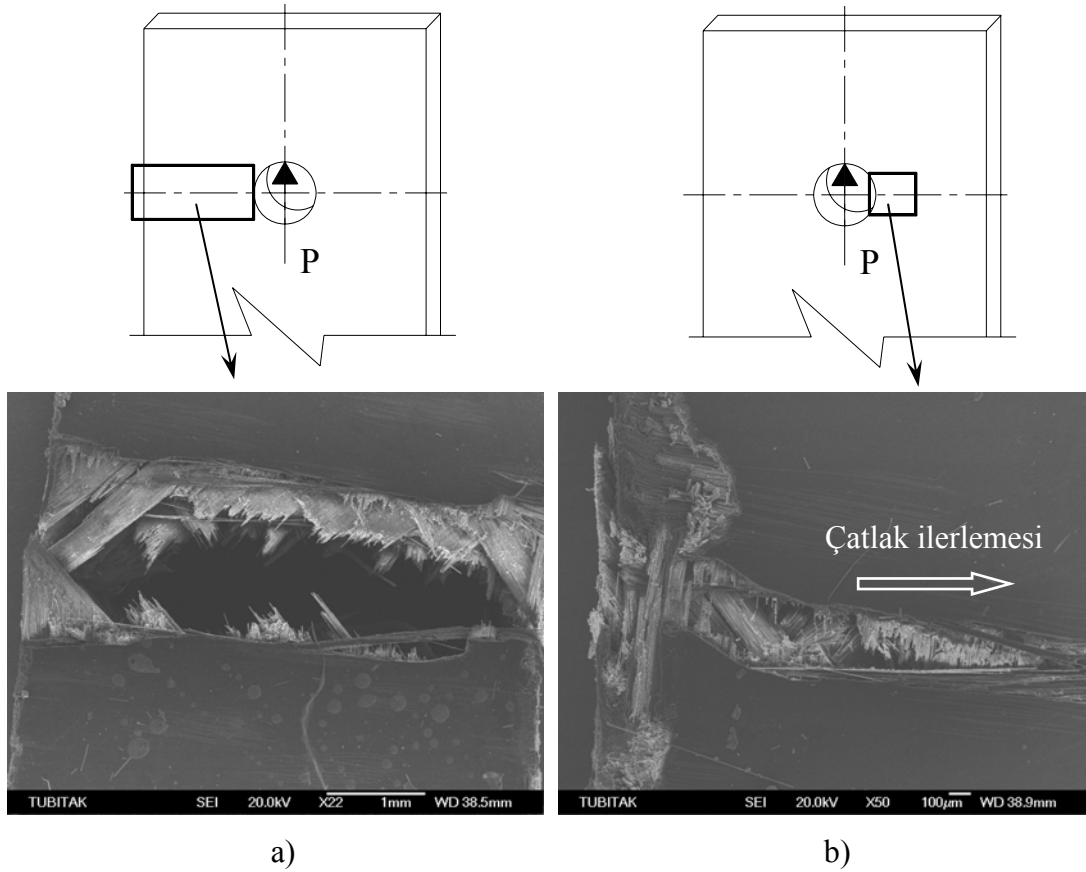
Şekil 4.29: Pim ile birleştirilmiş polimer kompozitlerde hasar oluşumunun şematik gösterimi

Pim ile birleştirilmiş polimer kompozitlerde yataklama düzleminde hasar oluşumu Şekil 4.29 a' da verilmiştir. Yataklama düzleminde yönlenme düzenine bağlı olarak farklı hasarların oluştuğu gözlenmiştir. Pimin yukarıya doğru hareketi nedeniyle oluşan basma gerilmesi fiberlerde burkulmalara ve tabakalar arası ayrılmalara neden olmuştur (Şekil 4.29 a1). Şekil 4.29 a2' de kayma gerilmeleri etkisiyle makaslama şeklinde oluşan hasar görülmektedir. Yönlenme düzeninin (+45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>) olması halinde pimin yükleme doğrultusundaki hareketi nedeniyle bu bölgedeki fiberlerde bükülmeler ve kırılmalar oluşmaktadır (Şekil 4.29 a3). Şekil 4.29 a4'te yine bası etkisiyle fiberlerde bükülmeler (kinking), fiberlerde kırılmalar ve çatlak oluşumu görülmektedir.

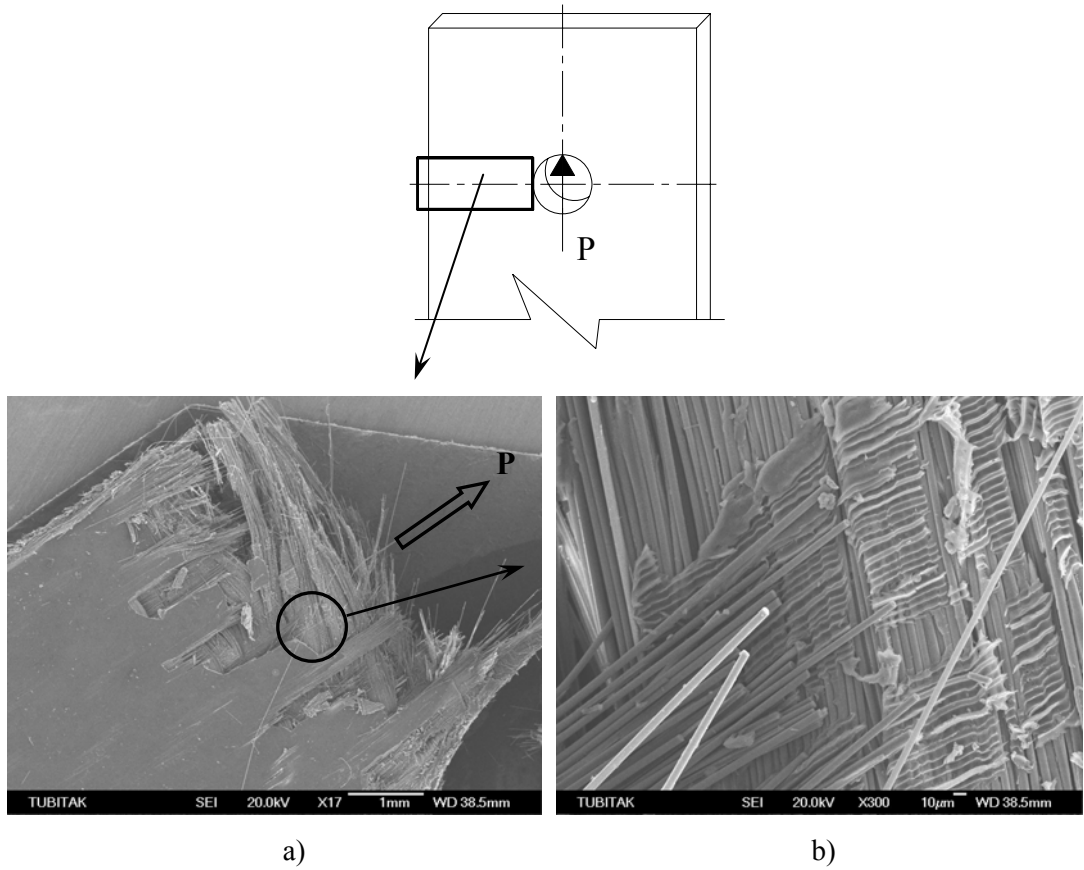
Şekil 4.29 b'de yönlenmeye bağlı olarak kayma düzleminde meydana gelen hasar mekanizmaları verilmiştir. Yükleme etkisiyle bu düzlemde oluşan kayma gerilmeleri matriste mikro çatlaklara, yükleme etkisinin artmasıyla çatlaklar büyüyerek gelişmekte ve bunun sonucunda fiberler kırılmaktadır (Şekil 4.29 b1 ve b2). Fiber kırılmaları matriste oluşan çatlaklarla başlar, bu çatlaklar yapıdaki fiberlerin stabilitesini bozarak fiberlerin burkulmasına neden olur. 0<sup>0</sup>'lik katmanda yukarıda bahsedilen hasarlar oluşurken 90<sup>0</sup>'lik katmanda ise Şekil 4.29 b3'te gösterildiği gibi tabakalar arası ayrılmalar ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.29 c1'de çekme düzleminde meydana gelen fiber köprülü çatlak (fiber bridged cracking), fiber/matris ara yüzey ayrılmaları ve fiber kırılması hasarları gösterilmiştir. Fiber/matris ara yüzey bağı güçlü ise matriste çatlak oluşumu fiber kırılmalarının olduğu bölgelerden başlamaktadır. Oluşan matris çatlakları fiberlerin yönlenme doğrultusuna ve yükün uygulanma doğrultusuna dik olacak şekilde gelişmektedir. Bu çatlaklar komşu olan fiberlere ulaştığında fiberlerin etrafını çevreleyerek ilerlemektedir. Fiber köprülü çatlak (fibre bridged cracking) mekanizması bu şekilde oluşmaktadır. Çatlakta açılmanın meydana gelmesi için fiberler boyunca matriste yukarı ve aşağı doğru kayma hareketinin gerçekleşmesi gerekir. Bu kayma hareketi fiber/matris ara yüzey ayrılmaları ve matristeki akma nedeniyle oluşmaktadır. Fiber/matris ara yüzeyinde meydana gelen ayrılmalar fiberdeki gerilme konsantrasyonunu oldukça etkilemektedir. Fiber köprülü çatlak 0<sup>0</sup>'lik yönlenmeye sahip katmanlarda çok sık rastlanmaktadır (Ritchie ve diğ. 1989),

(Luke ve diğ. 1996). Buna sebep olarak yüksek fiber hacim oranı, fiber/matris arasındaki yüksek ara yüzey dayanımı ve matrisin sünekliliği gösterilebilir. Şekil 4.29 c2’de fiber/matris ara yüzey mukavemetine göre gelişen yüzey kırılmaları gösterilmiştir. Yüksek fiber/matris ara yüzey dayanımına sahip kompozitlerin kırılma yüzeyleri düzlemsel (gevrek kırılma), zayıf ara yüzeye sahip kompozitlerde ise kırılma yüzeyi fırçaya benzer şekilde olup çıkıntılı fiberlerden oluşmaktadır. Şekil 4.29 c3’te fiber etrafında ilerleyen çatlak ve fiber/matris ara yüzey ayrılması gösterilmiştir. Şekil 4.29 c4’te matrisinde meydana gelen hasar, bu hasar sonrası fiberlerin yükü taşıması gösterilmiştir. Matris hasarından sonra fiberlerdeki kırılmalar da ayrıca gösterilmiştir. Şekil 4.29 c5’te (+45°/-45°) ise çatlak ilerlemesi ve bunun sonucunda kırılan fiberler görülmektedir.



Şekil 4.30:  $[(0^0/90^0)/(±45^0)]_{2s}$  yönlenmeye sahip cam/PPS kompozitte meydana gelen hasar: a) Çekme tipi hasar b) Pimin yukarıya hareketi nedeniyle çatlakın ilerlemesi ve fiberlerde oluşan kırılmalar



Şekil 4.31:  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenmeye sahip cam/PPS kompozitte meydana gelen hasar: a) Çekme düzleminde oluşan hasar b) Çekme yükü etkisiyle oluşan fiber/matris ara yüzey ayrılmaları ve fiber kırılmaları

Şekil 30 a'da  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenmeye sahip cam/PPS kompozitte pim ile yükleme esnasında çekme düzleminde meydana gelen hasar gösterilmiştir.  $+45^0$ ,  $-45^0$  ve  $90^0$  katmanlarda matriste çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca  $+45^0$  ve  $-45^0$  yönlenmeye sahip katmanlarda pimin yukarıya doğru hareketiyle oluşan kayma gerilmeleri etkisiyle delaminasyonlar meydana gelmiştir. Delaminasyonlar bu katmanlarda oluşan matris çatlaklarıyla ilişkilendirilebilir.  $90^0$ 'lik katmanda matriste çatlaklar ve fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalar söz konusudur. Bunların yanında fiberlerde meydana gelen kırılmalar da açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.30 b'de pimin ilerlemeye devam etmesi nedeniyle fiberlerde kırılmalar, matriste çatlaklar ve kompozit levhada meydana gelen kırılma görülmektedir.

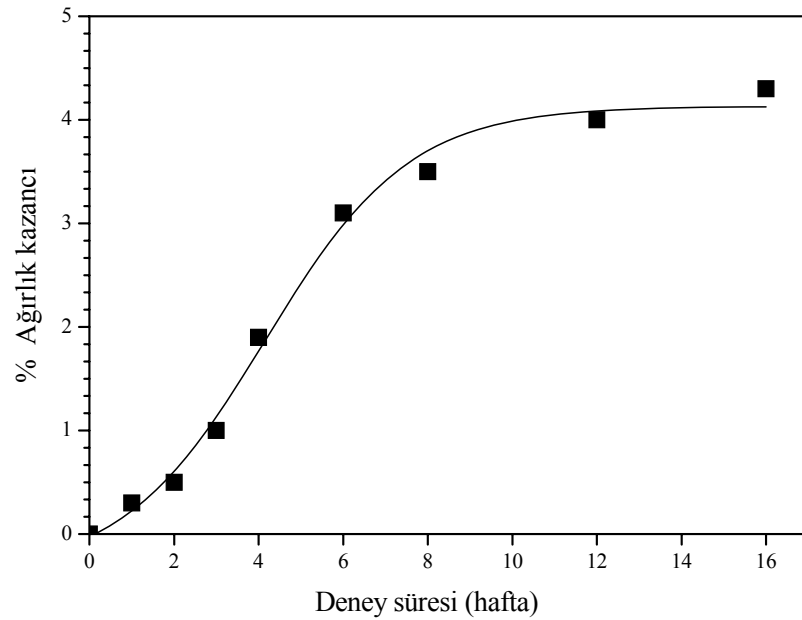
Şekil 4.31 a'da  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenmeye sahip cam/PPS kompozitin çekme düzleminde oluşan hasar gösterilmiştir. Fiber kırılmaları, fiber/matris ara yüzey ayrılmaları, matriste çatlaklar ve tabakalar arası ayrılmalar başlıca hasarlardır. Şekil

4.31 b’de zayıf ara yüzey mukavemeti nedeniyle fiber/matris ara yüzey ayrılmaları ve fiberlerin sürtünerek yerinden çıkması görülmektedir.

## 4.2. Kimyasal Ortama Maruz Bırakılmış Polimerik Kompozitlerin Statik Yükleme Şartlarında Pim ile Yük Taşıma Performanslarının Değerlendirilmesi

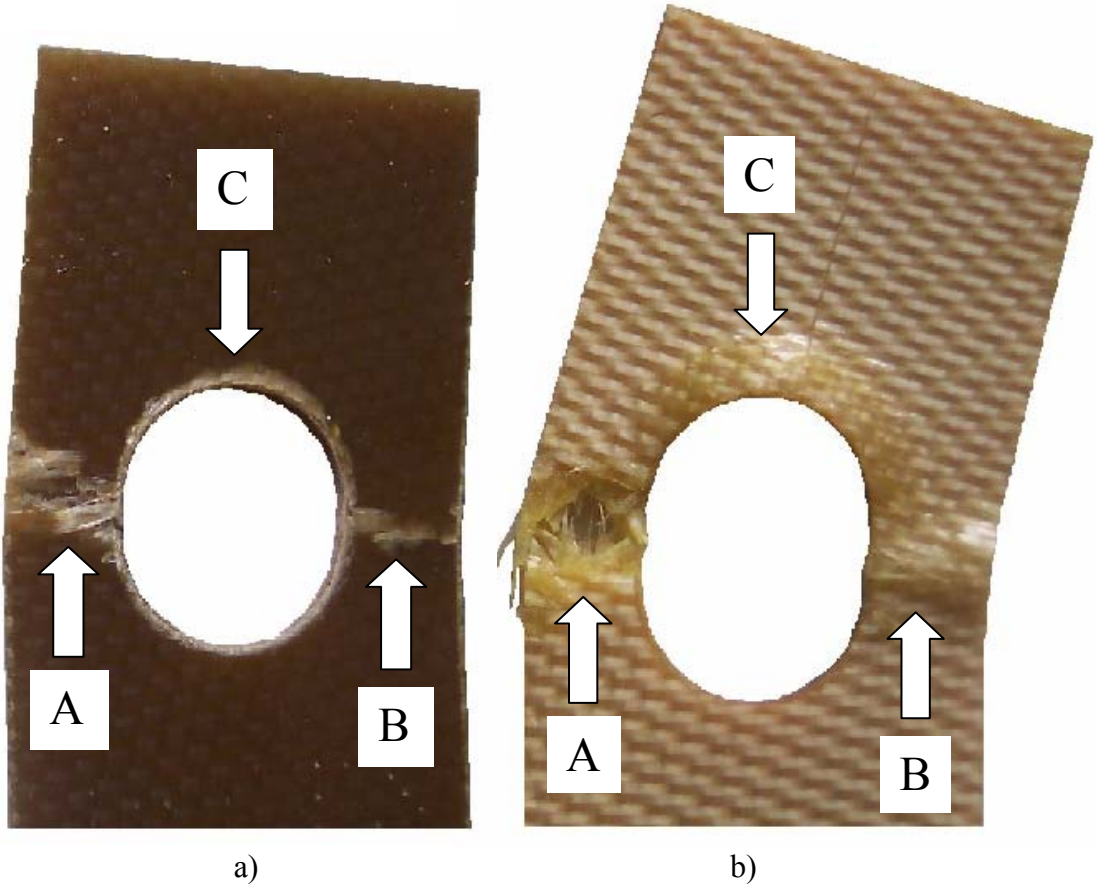
### 4.2.1. Cam/PPS kompozitlerde asit ortamın pim ile yük taşıma performansına etkisi

Malzemelerin sıvı ortamlarda bulunmaları halinde yapı içersine difüzyon ile giren miktarın zamanla değişimi önemlidir. Şekil 4.32’de görüldüğü gibi malzemenin asit ortamda bekletilmesi süresince ağırlık kazancı gerçekleşmektedir. Yaklaşık 6. haftadan sonra ağırlık kazancı hızında azalma görülmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi sıvı difüzyonu giderek doyuma yaklaşmaktadır. 16 hafta sonundaki artış % 4.3 miktarına ulaşmaktadır.



Şekil 4.32: Asit ortamda bekletilen numunelerde gerçekleşen % ağırlık artışı





Şekil 4.33: Korozyonsuz (a) ve korozyonlu (b) malzemelerin deney sonrası görüntüleri

Şekil 4.33 incelendiğinde pimin yukarı doğru “C” noktasına baskı yapması neticesi dairesel açılan deliğin elips şeklinde deforme olduğu görülmektedir. Korozyonsuz numune de hasar sonrası incelendiğinde “C” noktasında “ezilme” tipi hasarın oluşmadığı görülmektedir. Özellikle fiberlerin pimin bası etkisi nedeniyle burkulmaları, bası zorlanmaları neticesi kırılarak deforme olmaları ve katmanlar arası delaminasyonlar şeklinde bir hasar tespit edilmemiştir. Bunun yanı sıra Şekil 4.33 a’ da korozyonsuz numunede yük taşınması esnasında “A” bölgesinde çekme tipi hasar oluşmaktadır. Numunenin alt tarafı hareketsiz çeneye bağlı olduğundan pimin yukarı doğru hareketi sonrası “A” bölgesindeki hasar sonrası pim ilerlemeye devam etmekte, bu hareket “B” noktasında eğilme neticesi bası türü zorlanmaya neden olmaktadır. Buruşma olarak tanımlanabilecek, fiberlerin bası zorlanması sonrası burkulmaları ve delaminasyonlar neticesi oluşan hasar tipi tespit edilmiştir.

Korozyon sonrası (Şekil 4.33 b) malzemelerin hasar tipinde farklılık tespit edilmiştir. 16 hafta asit ortama maruz bırakılan numunenin hasar analizi yapıldığında korozyonsuz numuneden farklı mekanizmaların oluştuğu gözlenmiştir. Literatürde de belirtildiği gibi HCl asit özellikle fiber-matris ara yüzeyinde deformasyonlara neden olmaktadır (Chevron Phillips Chemical Company, 2004). Difüzyon yoluyla fiber matris ara yüzeyinde ilerleyen asit ortam fiberin yüzey özelliklerini olumsuz etkilemekte ve matris ile bağını zayıflatmaktadır. Bu özellikle fiberlerin matris içerisinde yeterince desteklenememesi, neticesinde de özellikle bası tipi zorlanmalarda daha kolay burkulmaları ve bası tipi hasarlara uğramaları riskini arttırmaktadır. Diğer yandan bu ara yüzey zayıflaması aynı zamanda malzemede delaminasyon riskini de arttırmaktadır. Farklı tabakalardan oluşan malzemede asit ortamın yarattığı etki fiber-matris ara yüzey bölgesinden sonra en zayıf ikinci bölge olan tabakalar arası bölgede dayanım değerleri düşmekte ve delaminasyonlar oluşabilmektedir.

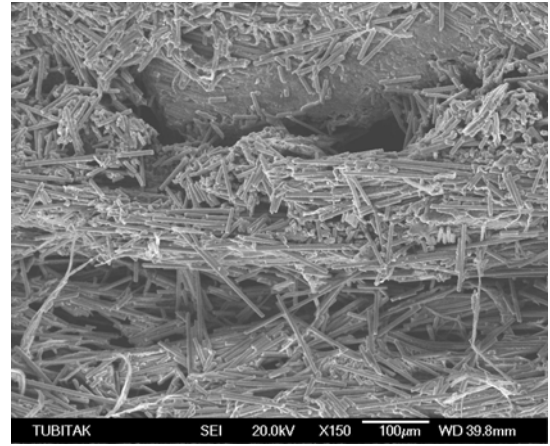
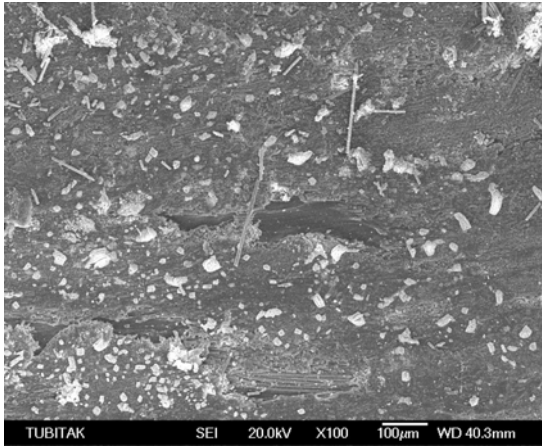
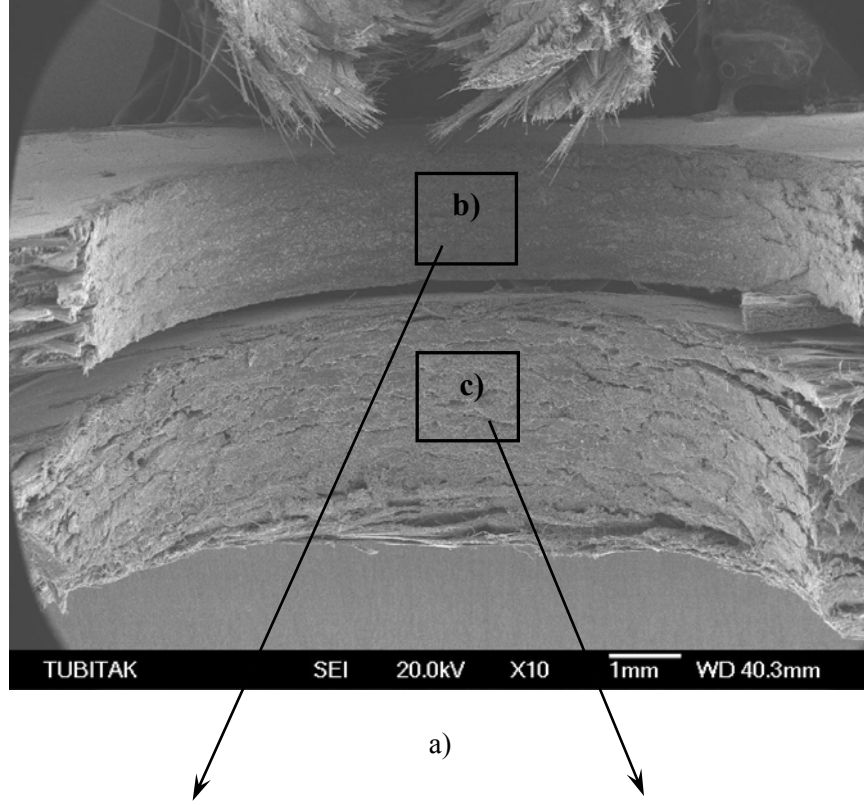
Şekil 4.33 b incelendiğinde daha fazla uzama neticesi korozyonsuz malzemeden daha belirgin ve daha geniş bir bölgenin çekme modunda hasara uğradığı “A” bölgesi görülmektedir. Diğer yandan “A” bölgesindeki çekme sonrası pimin ilerlemesi neticesi yükün uygulanmasındaki eksantrikliğin sonucu olarak “B” noktasında bası hasarı oluşmuştur. “B” bölgesindeki bu hasar Şekil 4.33 a’ daki korozyonsuz numune ile karşılaştırıldığında çok daha belirgin bir şişme/fıçılama şeklinde gerçekleşmektedir. “B” noktasındaki bu deformasyon malzemenin belirtilen nedenlerle ara yüzey ve tabakalar arası dayanımların azalmasına işaret etmektedir.

Korozyonlu malzemelerin hasar analizi yapıldığında farklı bir hasar tipi ile karşılaşılmaktadır. Bu “C” noktası ile belirtilen bölgede pimin etkisi ile malzemenin delik açılan yüzeyinde bası zorlanmalarına neden olduğu bölgedeki hasardır. Bu bölgedeki fiberlerin pimin konumuna göre buldukları yönlenme son derece önemlidir. Pimin hareket eksenine dik olarak yönelen fiberler eğilmeye zorlanırken, pim hareket eksenine doğrultusundaki fiberler burkulmaya/basıya zorlanacaklardır. Aradaki yönlenme derecelerinde ise fiberler eğilme/bası zorlanmaları arasında bir tipte hasar göreceklidir.

Korozyonsuz numunenin “C” bölgesi incelendiğinde bası zorlanmaları neticesi “yataklama” yada “ezilme” tipi hasara rastlanmamıştır. Malzeme bu noktada fiçilaşma ve şişme eğilimi göstermemiştir. Korozyonlu numunede ise bu bariz şekilde görülmektedir. Yarım ay şeklinde pimin malzemeye temas ettiği bölge boyunca kompozit malzemede yataklama (yığılma, ezilme) türü hasarlar tespit edilmiştir.

Literatürde çekme tipi hasardan ziyade bu şekilde “yataklama” türü hasar tercih edilmektedir. Birincisi çekme modunda hasar ansızın gerçekleşmekte ve kısa bir zaman sonra hasara ilişkin bir belirti vermeden ve daha düşük bir yükte gevrek bir kırılma sonrası hasar oluşmaktadır. Yataklama türü hasarda ise bası zorlanmaları etkisi ile malzemenin pim baskısı sonrası ezilerek deforme olması daha yüksek enerji absorpsiyonuna sebep olmakta ve bu ezilmenin süresinin uzaması hasar öncesi fark edilmesine, boşluk oluşumu, sızıntı vs gibi fiziksel bulgularla kendini belli edebilmektedir.

Literatürde de rastlandığı gibi çekme, kayma ve yataklama türü 3 temel hasarın dışında bunların karışımı şeklinde gerçekleşen hasarlar da söz konusudur. Örneğin korozyonlu numunelerde yataklama+çekme tipi hasar gerçekleşmiştir. Bu noktada şu detayı belirtmek önemlidir. Tek tipte gerçekleşen hasara ilişkin olarak malzemenin taşıdığı gerilmelerin ifade edilmesi kolay olmaktadır. Örneğin çekme türü hasarda malzeme genişliği ve kalınlığından, pimin çapı ve malzeme kalınlığını çıkardıktan sonra elde edilen kesit alanı dikkate alınarak oluşan çekme gerilmesi hesaplanabilmektedir. Yataklama tipi hasarda ise oluşan bası zorlanması malzemenin kalınlığı ve pim çapının çarpımı ile elde edilen alanın ezilmesi şeklinde hesaplanmaktadır. Bileşke hasar oluşması halinde ise kuvvetin hangi kesit alanına bölünmesi gerektiği net olarak belli olmadığından malzemelerin taşıdıkları gerilmeler yerine kuvvetlerle performanslarının kıyaslanmaları daha makul sonuçlar vermektedir.



b) Korozyonsuz numune

c) Korozyonlu numune

Şekil 4.34: Pimin bası zorlamasına maruz bıraktığı malzeme kesiti.

Şekil 4.34 a' da üst tarafta görülen malzeme korozyona uğramamış orijinal malzemedir. Pimin yukarı doğru hareketi esnasında bası zorlamalarına maruz

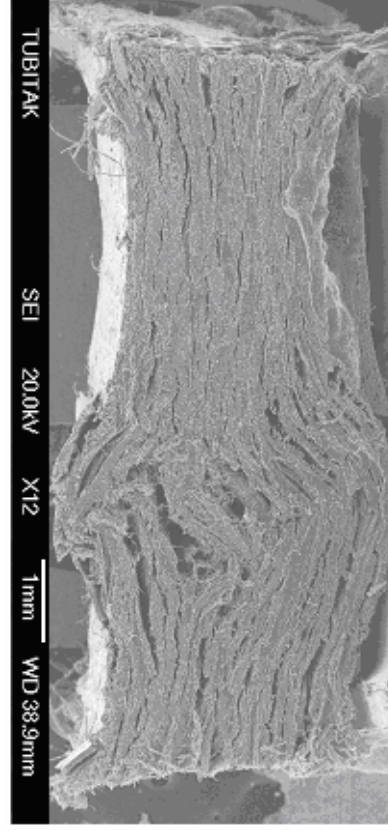
bıraktığı kesitte delaminasyonların ve yataklama türü hasarların oluşmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.34 a' da alt kısımda görülen malzeme ise korozyona uğramış malzemeye aittir. Asit absorpsiyonu sonrası malzeme kesitinde şişme (fiçilaşma) gerçekleştiği, pimin bası zorlaması sonrasında malzeme içerisindeki başta yükleme doğrultusunda bulunan fiberlerin flambaj (burkulma) zorlanmalarına maruz kalmaları neticesi malzemede kırılmış fiber ve deforme olmuş matrisin yığılması neticesi başta pimin delik ile ilk anda çizgisel temasta olduğu ilk bölge olmak üzere kesit kalınlığında artış söz konusu olmaktadır.

Şekil 4.34 b incelendiğinde korozyonsuz malzemede pimin bası zorlaması etkisi ile kırılmış fiber ve matris parçalarının malzeme yüzeyinde bulunduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra malzemenin yüzeyinde delaminasyonlar, burkulmuş ve kırılmış fiberlere ilişkin görüntüler tespit edilmemiştir. 16 haftalık korozyon sonrası Şekil 4.34 c' de görüldüğü gibi başta yükleme doğrultusuna paralel fiberler olmak üzere fiber hasarları, kırılmış fiberler tespit edilmiştir. Diğer yandan azalan delaminasyon direnci sonrası özellikle farklı oryantasyonlara sahip tabakalarda ayrılmalar ve deformasyonlar görülmüştür.

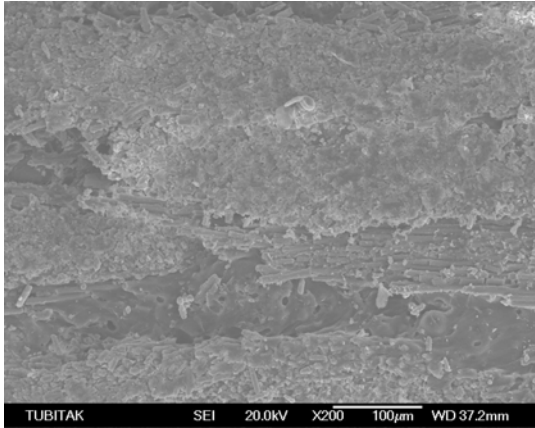
Şekil 4.35 a' daki fotoğraf Şekil 4.33'te görünen numunelerin "B" bölgelerinin sağ tarafından alınan görüntüyü şematize etmektedir. Şekil 4.33'te belirtilen mekanizmaya uygun olarak malzemede çekme sonrası "A" bölgesinde gerçekleşen kopma sonrası numunede eksantrik bir yükleme söz konusu olmaktadır. Hareketli çeneye bağlı olan pim malzemeyi yukarı doğru iterken malzemenin sağ tarafında "B" bölgesinde eğilme zorlanması oluşmaktadır. Numunenin en dış kısmında ise Şekil 4.35 a, b eğilme etkisinde basma zorlanmaları oluşmaktadır.



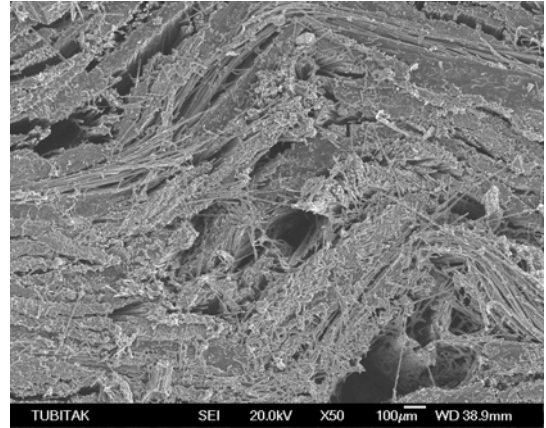
a) Korozyonsuz numune



b) Korozyonlu numune



c) Korozyonsuz numunenin orta bölgesi

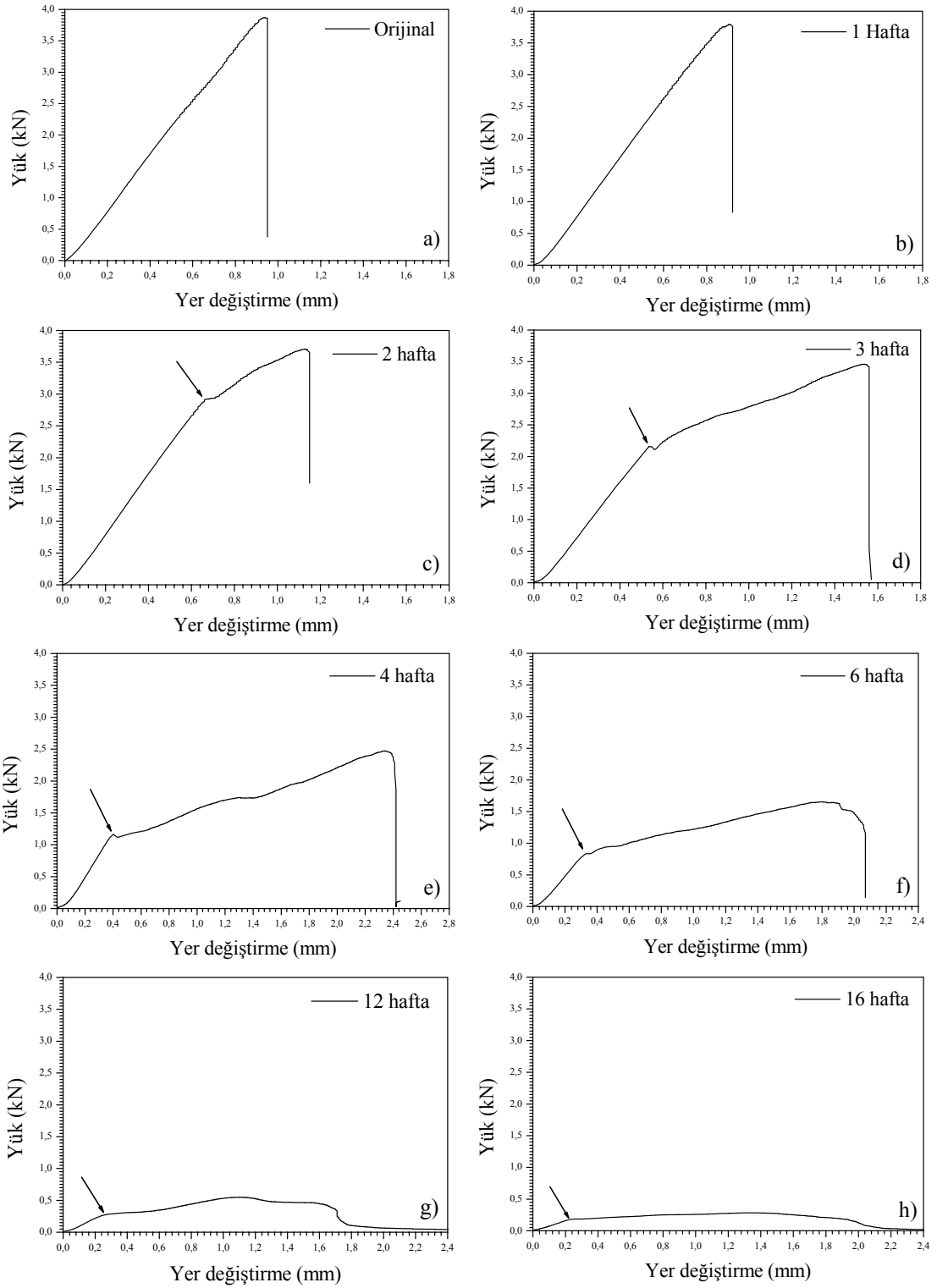


d) Korozyonlu numunenin orta bölgesi

Şekil 4.35: Şekil 4.33'teki numunelerin "B" bölgelerinin sağ tarafından alınan görüntüler

Korozyona uğramayan malzemelerde çekme zorlanması altındaki bölge düşük bir yer değiştirme sonrası kopmakta ve pim ile temasta bulunulan deplasman miktarı bu nedenle fazla olmamaktadır. Bu sebeple malzemenin sağ tarafında büyük bir eğilme zorlanması söz konusu olmamaktadır. Diğer yandan malzemenin yapısında delaminasyon direncinin ve fiber/matris ara yüzey mukavemetinin de yüksek olması nedeniyle eğilme kaynaklı bası zorlanmaları sonrası hasar oluşmamaktadır. Buna karşın korozyona uğrayan malzemelerde eğilmenin yol açtığı bası zorlanmaları neticesi malzemede çok ciddi deformasyonlar oluşmaktadır. Şekli 4.35 d' de görüldüğü üzere burkulma sonrası kırılan fiberlere (kinked fibres) rastlanmıştır. Bu tür hasarlar özellikle fiber/matris ara yüzeyinde azalmalar neticesi gerçekleşmektedir. Malzemede asit difüzyonu sonrası şişme ile birlikte malzemenin deformasyonu ve burkulma, delamine olan yapıların da etkisi ile kesit oldukça kalınlaşmış görülmektedir. Şekil 4.35 d' de malzemenin "A" bölgesinde kırılması sonrası malzemede deformasyonlar nedeniyle ayrıca pimin malzemeyi basıya zorlayarak ezmesi neticesi daha fazla deformasyon oluşmaktadır. Pimin bu deformasyonlar esnasında daha fazla malzeme ile temas halinde kalması basma bölgesinde daha büyük eğilmeye neden olmaktadır. Şekil 4.35 b ve d , Şekil 4.35 a ve c ile kıyaslanırken bu husus ta dikkate alınmalıdır.

Şekil 4.36'daki kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde orijinal numune ve 1 hafta beklemiş numunede kuvvet maksimum olduğu noktaya kadar lineer olarak artmakta, ardından hasar ani şekilde gerçekleşmektedir. Çekme tipinde gerçekleşen bu hasara kadar malzeme elastik şekil değiştirmekte ve yaklaşık 0.9 mm' lik bir yer değiştirme sonrası kopma gerçekleşmektedir. Şekil 4.36 c' de görüldüğü gibi asit ortamda kalmanın etkisi ile malzemede belirgin bir modül azalması söz konusu olmamakta fakat kuvvet daha küçük bir değerde lineer değişimden sapma göstermektedir. Korozyonsuz numunede gerçekleşmeyen pimin malzeme delik yüzeyini ezmesi bu noktada gerçekleşmektedir: Orijinal numunede 4 kN değerinde elde edilen maksimum kuvvet 3 kN değerine düşmektedir. Eğri bu noktadan sonra ezilmeye devam etmektedir. Bu esnada bağlantı bölgesi enerji absorbe etmeye devam etmektedir. Düşük bir eğimle deformasyon devam etmektedir ve ardından yine çekme modunda hasar gerçekleşmektedir.



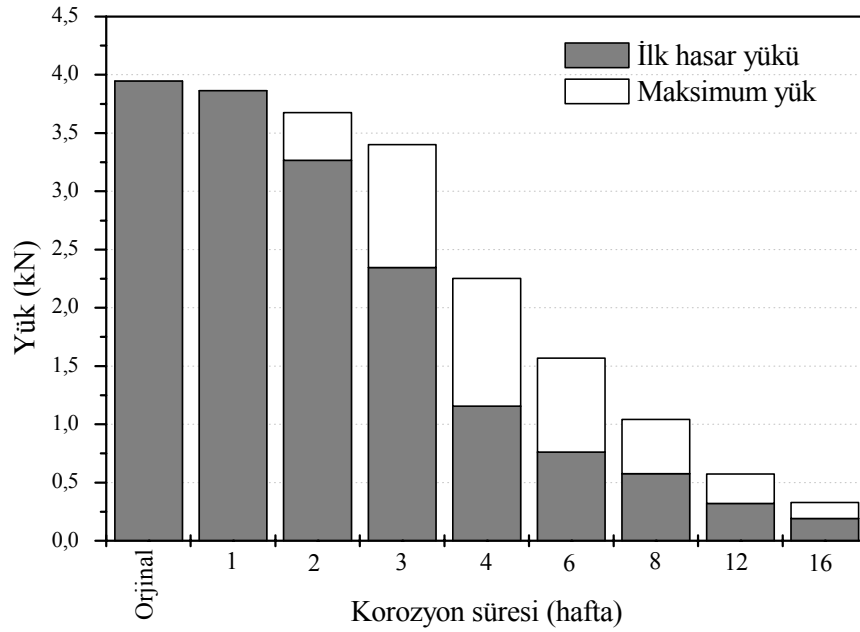
şekil 4.36:  $[(0^{\circ}/90^{\circ})/(\pm 45^{\circ})]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip cam/PPS kompozit levhaların kuvvet- yer değiştirme eğrileri

3 hafta ve üzerindeki bekleme sürelerinde lineer bölgeden ayrılma (ilk hasar) giderek daha düşük yüklerde ve yer değiştirme miktarlarında gerçekleşmektedir. Ezilme



devam ettikçe eğri altında kalan alan giderek artmaktadır. Bu bir yere kadar hasar toleransı sağlamaktadır.

Lineer bölgenin son noktasını plastik deformasyon olarak düşündüğümüzde tasarım parametresi olarak alacağımız değer asit ortama maruz kalma süresi arttıkça giderek azalmaktadır. 12 ve 16 haftalık değerler incelendiğinde bu değerler oldukça düşüktür. Diğer yandan modül değerlerinde de ciddi düşüşler söz konusudur.



Şekil 4.37:  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip cam/PPS kompozit levhalarda korozyon süresine bağlı hasar yükleri

Şekil 4.37’de korozyon süresine bağlı olarak değişen cam/PPS kompozit plakalarda hasara neden olan kuvvet değerleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere 1 hafta korozyona maruz kalmış malzemedde orijinal malzemedde olduğu gibi ilk hasar yükü maksimum hasar yükü ile aynı değerdedir. Şekil 4.36’da belirtilen, kuvvet-yer değişimi eğrisinde lineer değişimin sona erdiği ilk malzeme hasarının meydana geldiği nokta (ok ile ifade edilen noktalar) ilk hasar yükünü, malzemenin kırılıncaya kadar taşıdığı yük ise maksimum hasar yükünü ifade etmektedir. Grafikteki değerler numunelerin ilk hasar oluştuktan sonra 0.4 ila 1.1 kN değerlerine kadar malzemenin yataklama türü hasara uğraması ile birlikte (2 nci haftadan sonra) yataklama veya ezilme türü hasarın karakterine uygun olarak malzemenin taşıdığı yükte artış devam etmektedir. Bu süre içerisinde malzemenin gösterdiği en büyük dayanım değeri

maksimum hasar yükü olarak gösterilmektedir. Şekil 4.37 tüm bu kuvvet değerlerini aynı anda şematize etmektedir.

16 hafta korozyona maruz kalmış numunenin orijinal numuneye göre yük taşıma kapasitesi maksimum yükler dikkate alındığında % 91.7 azalmıştır. Korozi ortamda bekleme sürelerine bağlı olarak malzemelerin yük taşıma kapasitelerindeki değişim miktarları nümerik olarak Tablo 4.1’de verilmiştir. İlk hasar oluşuktan sonra, maksimum kuvvet olarak bahsedilen kuvvet değerleri 3 ve 4 hafta sonunda makul seviyelerde iken 4 ncü haftadan daha uzun periyotlarda bu değerlerde de ciddi düşüşler görülmektedir. Ezilme mekanizması da yük taşımakta tercih edilen ve hasara tolerans tanıdığı için tercih edilebilen bir hasar türü olmakla birlikte 6 ncı haftadan itibaren malzemenin sıvı absorpsiyonu neticesi bu değerlerinde de ciddi düşüşler gözlenmiştir.

Tablo 4.1: Korozi ortamda bekleme sürelerine bağlı olarak malzemelerin maksimum yüke göre taşıma kapasitelerindeki değişim miktarları (%)

<b>Korozyon süresi</b>	<b>Yük taşıma kapasitesi</b>
1 hafta	% 2 azalma
2 hafta	% 6.9 azalma
3 hafta	% 13.8 azalma
4 hafta	% 42.9 azalma
6 hafta	% 60.3 azalma
8 hafta	% 73.6 azalma
12 hafta	% 85.5 azalma
16 hafta	% 91.7 azalma

Polimer malzemelerde renk değişimi yapı içerisinde oluşan reaksiyonlar ve tepkimeler hakkında fikir vermektedir. Sıvı içinde çözünen bileşenler malzeme içerisinde geri dönüşü olmayan kayıplara neden olurlar. Asitli ortamın malzeme içerisinde reaksiyona girerek etkinliğini azalttığı katkı maddeleri, polimer zincirleri arasına girerek yapının şişmesine (swelling) neden olması, diğer yandan polimer zincirinde deformasyonlara yol açması olasıdır. Renk değişimi tüm bu mekanizmaların sonucunda ortaya çıkabilmektedir. Özellikle estetik beklentilerin olduğu kullanım yerlerinde renk değişimi bir şekilde hasar olarak algılanabilmektedir. %37’lik hidroklorik asit çözeltisinde bekletilen malzemelerde korozyon süresinin artması ile renginde değişim tespit edilmiştir. Şekil 4.38’de

%37'lik hidroklorik asit çözeltisinde bekletilen malzemelerin renklerinin değişimini gösteren fotoğraf görülmektedir. Şekil 4.38'de soldan sağa doğru sırasıyla orijinal, 1 hafta, 2 hafta, 3 hafta, 4 hafta, 6 hafta, 8 hafta, 12 hafta ve 16 haftalık korozyon sonunda numunelerin halleri görülmektedir.



Şekil 4.38: %37'lik hidroklorik asit çözeltisinde bekletilen malzemelerin renk değişimi

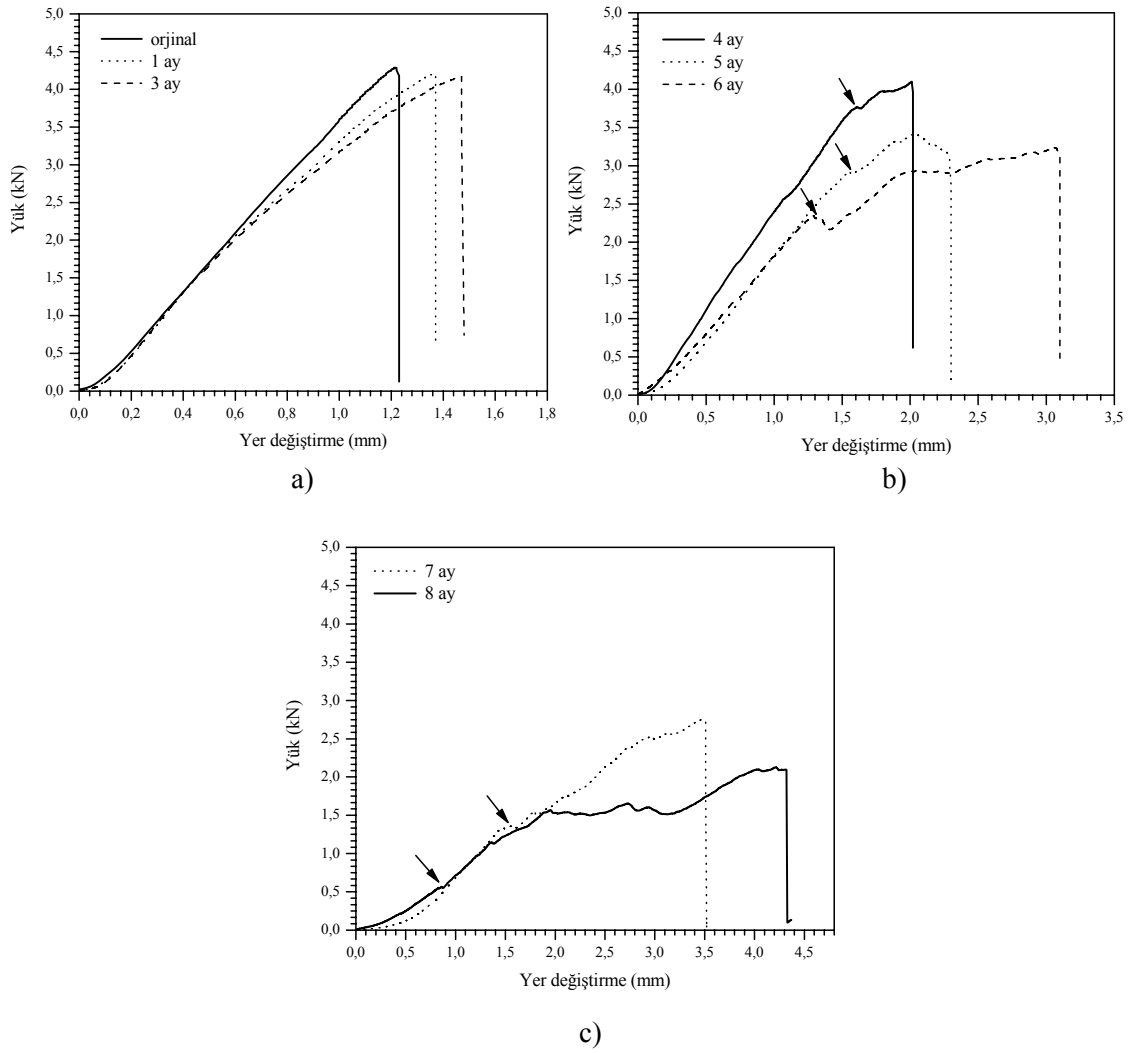
#### 4.2.2. Cam/PEI kompozitlerde baz ortamın pim ile yük taşıma performansına etkisi

Şekil 4.39'da korozyon süresine bağlı olarak malzemelerin yük-yer değiştirme eğrileri görülmektedir. 3 aya kadar korozyona tabi tutulmuş numunelerin yataklama yükü değerlerinde orijinal numune ile kıyaslandığında belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Ayrıca numunelerin kopma gerçekleşinceye kadar enerji absorbe

etme özelliklerindeki değişim oldukça azdır. Üç aya kadar olan etkileşim süresince hasar tipinde bir değişim gözlenmemiştir. Üç aylık etkileşim süresinin sonunda bağlantı çekme tipi hasara uğramaktadır. Orijinal numunede yük değerleri belirli bir maksimuma kadar lineer olarak artmakta ve ardından kırılma ani olarak gerçekleşmektedir. Bu esnada malzemede elastik şekil değişimi meydana gelmektedir. Şekil 4.39 a'dan da görüldüğü gibi 0.6 mm'lik yer değiştirme sonrasında 1 ve 3 ay korozyona maruz kalmış numunelerin modül değerlerinde bir miktar azalma gözlenmiştir. Malzemelerin bu ortamda üç aya kadar bekletilmeleri pim ile yük taşıma kapasitelerinde belirgin bir değişime neden olmamıştır.

Dört aylık korozyon ortamına maruz kalma süresi itibariyle bağlantının taşıyabileceği maksimum yük ve malzemenin modülü azalmaktadır. Beşinci ay itibariyle kuvvet orijinal numuneye kıyasla çok daha küçük bir değerde (ok ile gösterilen) yaklaşık 2.8 kN'da doğrusallıktan sapma göstermektedir. Bu noktadan itibaren delik yüzeyi pim tarafından ezilmektedir. İlk hasar gerçekleştikten sonra bağlantı bölgesi yük taşımaya devam etmektedir. Yük değeri belirli bir değere ulaştığında kırılma yine çekme tipi hasar sonrası ani olarak gerçekleşmektedir. Dört aylık korozyon süresi sonunda malzemenin kırılma davranışında kayda değer değişiklik gözlenmiştir. Bağlantı bölgesi yataklama+çekme tipi hasara uğramıştır (Şekil 4.39 b).

Korozyona maruz kalma süresi arttıkça ilk ve maksimum hasar yükleri azalmaya devam etmektedir. İlk hasar yüklerinin oluştuğu yer değiştirme değerlerinin giderek azalmasına rağmen son hasar yüklerinin oluştuğu yer değiştirme değerleri ise artmaktadır. Pim delik yüzeyini ezmeye devam ettiğinden yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan da giderek artmaktadır. Bu olay aslında hasar öncesi tolerans sağlamaktadır fakat buna karşın yük değerleri de oldukça düşmektedir (Şekil 4.39 c). Malzemelerin amonyum hidroksit içersinde bekleme süreleri arttıkça pim ile yük taşıma kapasiteleri ve modül değerleri belirgin bir şekilde azalmakta fakat buna karşın enerji absorbe etme özellikleri ise artmaktadır. Bu tip ortamlarda kullanılacak cam fiber takviyeli PEI matrisli kompozit malzemeler ile tasarım yapılacaksa kullanım süresi, çözeltinin derişimi gibi parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekir.

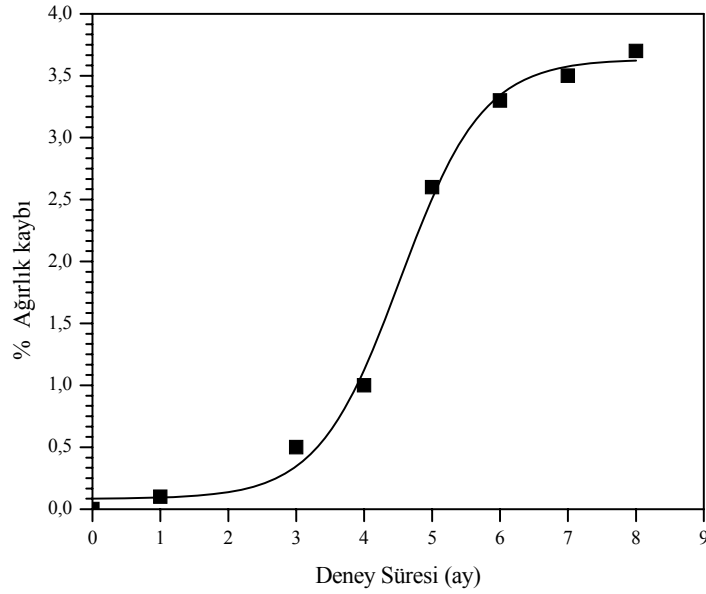


Şekil 4.39:  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip cam/PEI kompozit levhaların kuvvet- yer değiştirme eğrileri

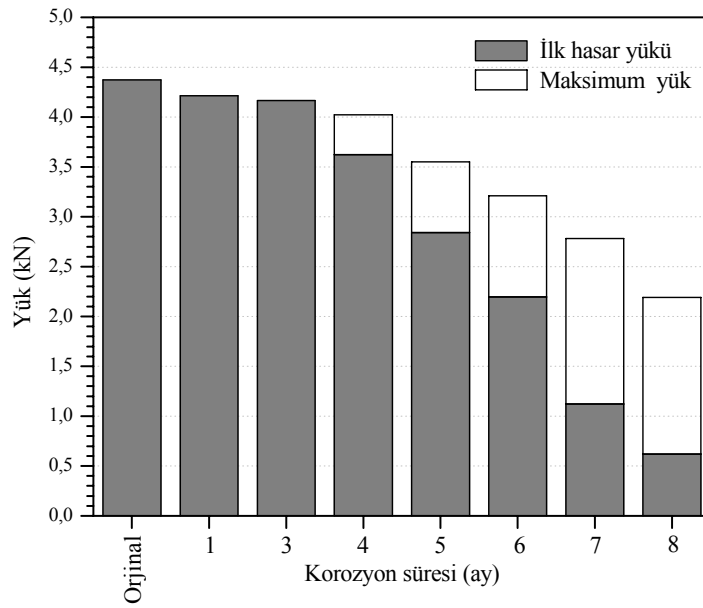
Şekil 4.40'ta amonyum hidroksit çözeltisinde bekletilen numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı değerleri görülmektedir. PEI amorf yapılı bir polimer olduğundan bu kimyasal ortamda çözünmesi kaçınılmazdır (Browne ve diğ. 1997). Amonyum hidroksit çözeltisi matris malzemesinin (PEI) yapısına absorbe olarak çözünmesine neden olur. PEI'nin çözünmesi, kimyasal çözelti içersinde çözünen madde miktarı dengeye ulaşıncaya kadar devam eder. 8 ay sonunda malzemedeki ağırlık kaybı % 3.7 değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.41'de korozyon süresi ile değişen hasar yükleri verilmiştir. Üç aya kadar olan korozyon süresinde ilk hasar yükü maksimum hasar yükü ile aynı değerdedir. Şekil 4.39'da ok ile belirtilen yük değerleri ilk hasar yükü olarak ifade edilmiştir. Bu

noktadan itibaren yük-yer değiştirme eğrisi doğrusallıktan sapma göstermiştir. Son hasar yükü ise bağlantının tamamen hasara uğrayıncaya kadar taşıdığı yük olarak tanımlanmıştır. İlk hasardan sonra bağlantı bölgesi 4. ay sonunda minimum değer olan 0.4 kN ve 7. ay sonunda maksimum değer olan 1.7 kN'luk yük taşımaya devam etmiştir.



şekil 4.40: Amonyum Hidroksit ortamda bekletilen numunelerde gerçekleşen % ağırlık kaybı



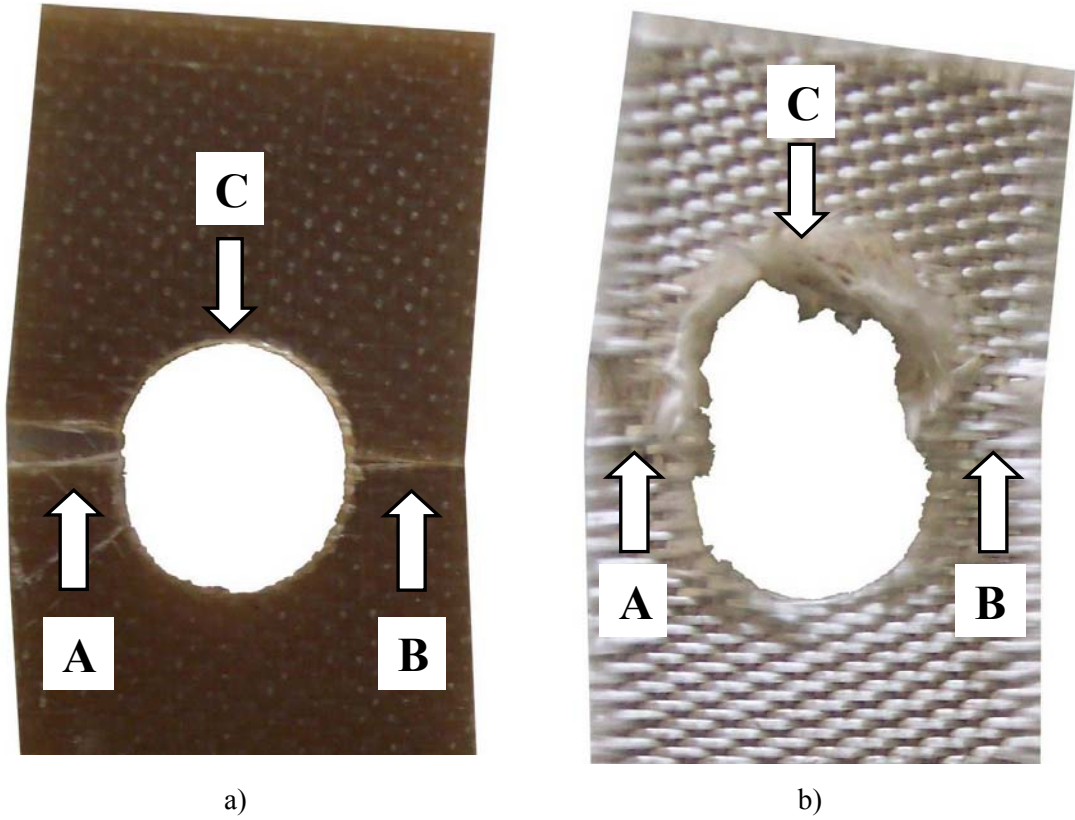
şekil 4.41:  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  oryantasyona sahip cam/PEI kompozit plakalarda korozyon süresine bağlı hasar yükleri

Tablo 4.2’de korozyon süresine bağı olarak bağlantının yük taşıma kapasitesindeki değışim miktarları verilmiştir. İlk üç aya kadar olan değerlerde kayda değer bir azalma tespit edilmemiştir, bağlantı orijinal numuneye yakın değerlerde yük taşımaya devam etmiştir. 5. ay sonunda 4. aya göre yük taşıma kapasitesi değerlerinde iki katından fazla azalma görülmüştür. Buna sebep olarak Şekil 4.40’ta görülen 4. ve 5. ay arasında malzemede meydana gelen maksimum ağırlık kaybı gösterilebilir. Bu zaman aralığında PEI matriste maksimum çözünme ve bunun sonucunda yataklama dayanımı değerlerinde maksimum azalma meydana gelmiştir. Sekiz aylık korozyona maruz kalma süresi sonunda yük taşıma kapasitesinde %49.9 değerinde azalma görülmüştür.

Tablo 4.2: Korozi ortamda bekleme sürelerine bağı olarak malzemelerin maksimum yüke göre taşıma kapasitelerindeki değışim miktarları (%)

<b>Korozyon süresi</b>	<b>Yük taşıma kapasitesi</b>
1 ay	% 3.6 azalma
3 ay	% 4.7 azalma
4 ay	% 8 azalma
5 ay	% 18.8 azalma
6 ay	% 26.6 azalma
7 ay	% 36.4 azalma
8 ay	% 49.9 azalma

Şekil 4.42’de görüldüğü gibi pim ile çekme testi uygulanan malzemede üç farklı hasar bölgesi oluşmaktadır. 8 ay korozyona maruz kalmış numunenin C bölgesinin incelenmesiyle uygulanan yük etkisiyle pimin bu bölgeyi ezmesi neticesinde zayıf fiber/matris ara yüzey bağı ve plastikleşme nedeniyle fiberlerde burkulma (buckling) ve kırılmalar sonucunda yataklama tipi hasarın oluştuğu görülmüştür. Orijinal numunede ise böyle bir hasara rastlanmamıştır.

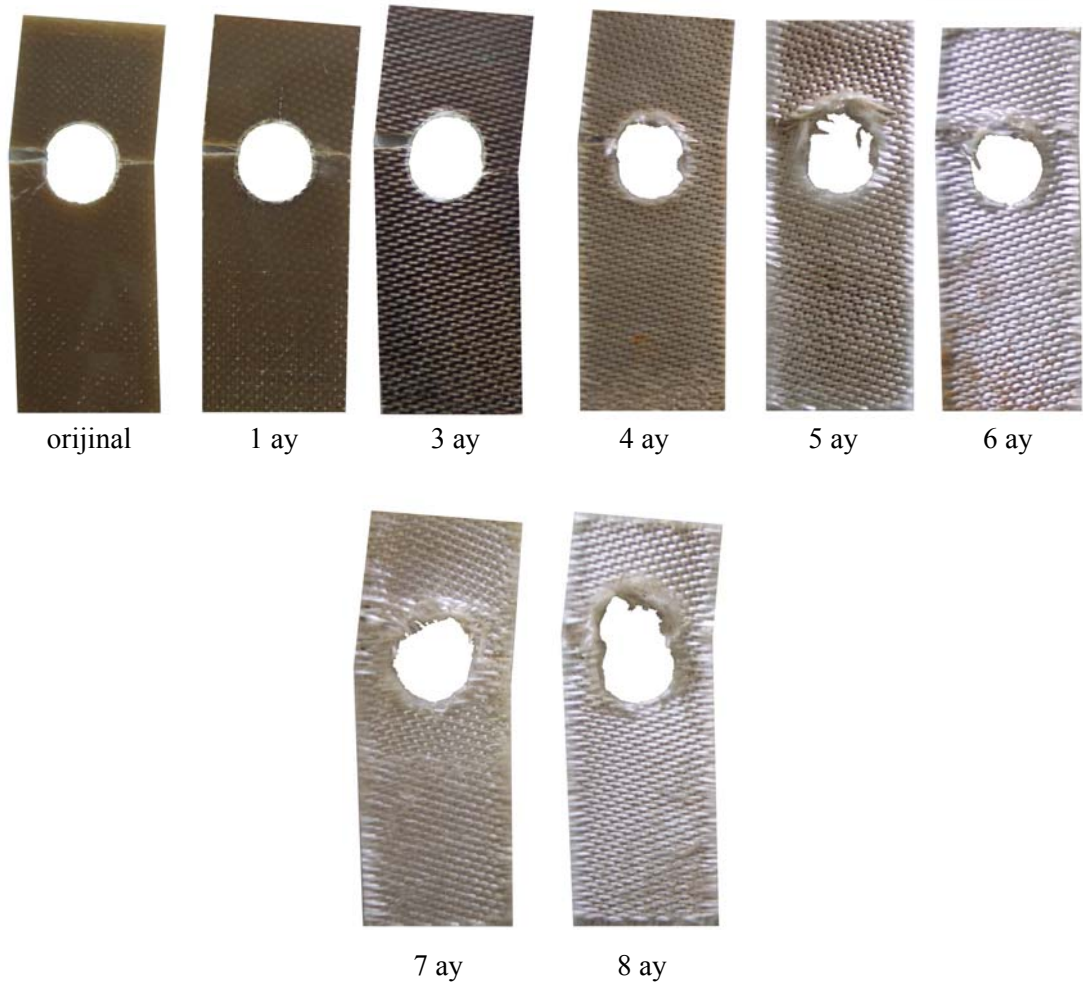


Şekil 4.42: Malzemelerin deney sonrası görüntüleri: a) korozyonsuz b) korozyonlu

Korozyonsuz ve korozyonlu numunelerin A bölgesinde çekme tipi hasar gerçekleşmiştir. Korozyonlu numunede meydana gelen plastikleşme ve ayrışma etkisiyle malzemenin tokluğu arttığından A bölgesinde daha fazla uzama söz konusudur. Bundan dolayı bu bölgede oluşan çekme tipi hasar daha geniş bölgeye yayılmakta ve daha belirgin bir hal almaktadır. A bölgesinde hasar oluştuğundan sonra üst çenenin hareketi etkisiyle pim ilerlemeye devam etmektedir. Bunun sonucunda ilerleme hareketi nedeniyle B bölgesinde bası zorlanmaları oluşmaktadır. Amonyum hidroksit çözeltisi matriste degradasyona, degradasyon da fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalara bu ayrılmalar neticesinde de korozif ortam fiberlerde korozyona neden olmaktadır (Browne ve diğ. 1995). Bu olgu sonucunda fiberler matris içerisinde desteklenemediğinden bası zorlanmaları etkisiyle daha kolay burkularak hasara uğrarlar. Korozyonsuz ve korozyonlu numunelerin hasar türleri birbirinden farklıdır. Korozyonsuz numunede çekme tipi, korozyonlu numunede ise yataklama+çekme tipi hasar gerçekleşmiştir. Literatürde de belirtildiği gibi yataklama+çekme tipi hasarın gerçekleşmesi konstrüktif açıdan tercih sebebidir. Pimin baskı uyguladığı bölgede ezilmenin meydana gelmesi daha yüksek enerji absorpsiyonuna sebep olarak hasar



öncesi tolerans sağlamaktadır. Korozyonlu numunede bu tip hasar çok düşük yüklerde dahi gerçekleşmektedir. Dolayısı ile cam fiber takviyeli PEI matrisli kompozitlerin amonyum hidroksit çözeltisi içeren ortamlarda kullanımı söz konusu olduğunda performanslarının azalacağını dikkate alarak tasarım yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.43: %10'luk amonyum hidroksit (NH<sub>4</sub>OH) çözeltisinde bekletilen numunelerde oluşan hasarlar ve renk değişimi

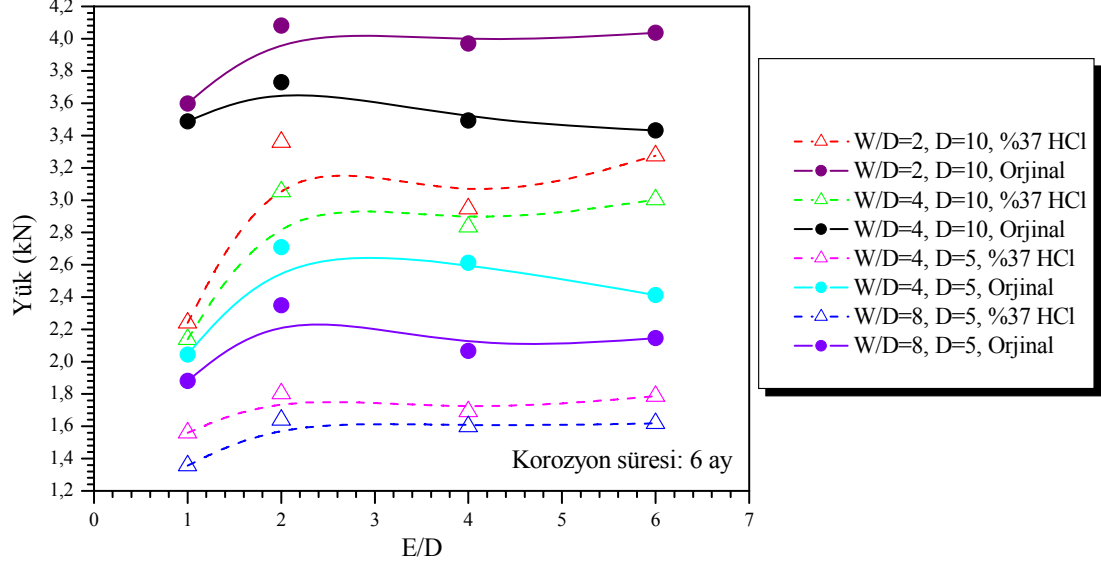
%10'luk amonyum hidroksit çözeltisinde bekletilen numunelerde korozyon süresinin artması ile renginde değişimler meydana gelmiştir. Şekil 4.43'te soldan sağa doğru sırasıyla numunelerin orijinal, 1 ay, 3 ay, 4 ay, 5 ay, 6 ay, 7 ay ve 8 aylık korozyon sonundaki halleri görülmektedir. Korozyona maruz kalma süresi arttıkça malzemenin yapısına daha fazla çözelti difüze olmuştur çünkü solventlere maruz bırakılan polimerlere olan saldırı temas süresi ve çözeltide ayrışma mertebesi ile ilişkilidir.

PEI matris amonyum hidroksit çözeltisinde yüksek çözünme derecesine sahip olduğundan kompozit yüzeyinde zamanla çatlaklar, boşluklar ve delikler oluşmaktadır bunun sonucunda da temas yüzeyi arttığından ayrışma süreci hızlanmaktadır. Solvent içinde ayrılan bileşenler malzeme içerisinde geri dönüşümü mümkün olmayan kayıplara neden olmaktadır. Bu olay daha fazla matris kayıplarına neden olmakta böylece yüzeye yakın bölgelerde fiberler ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla cam fiberlerin amonyum hidroksit çözeltisi ile teması kaçınılmaz olmaktadır. Amonyum hidroksit çözeltisinin yapısında bulunan hidroksit iyonu camın yapısını bir arada tutan siloksi bağlarını parçalayarak camın degradasyonuna da neden olmaktadır (Russell, 2001). Cam fiber takviyeli polieterimit matrisli kompozit malzemede meydana gelen renk değişimi yukarıda bahsedilen mekanizmaların sonucunda ortaya çıkabilmektedir.

#### **4.2.3. Karbon/PPS kompozitlerde asit ortamın pim ile yük taşıma performansına etkisi**

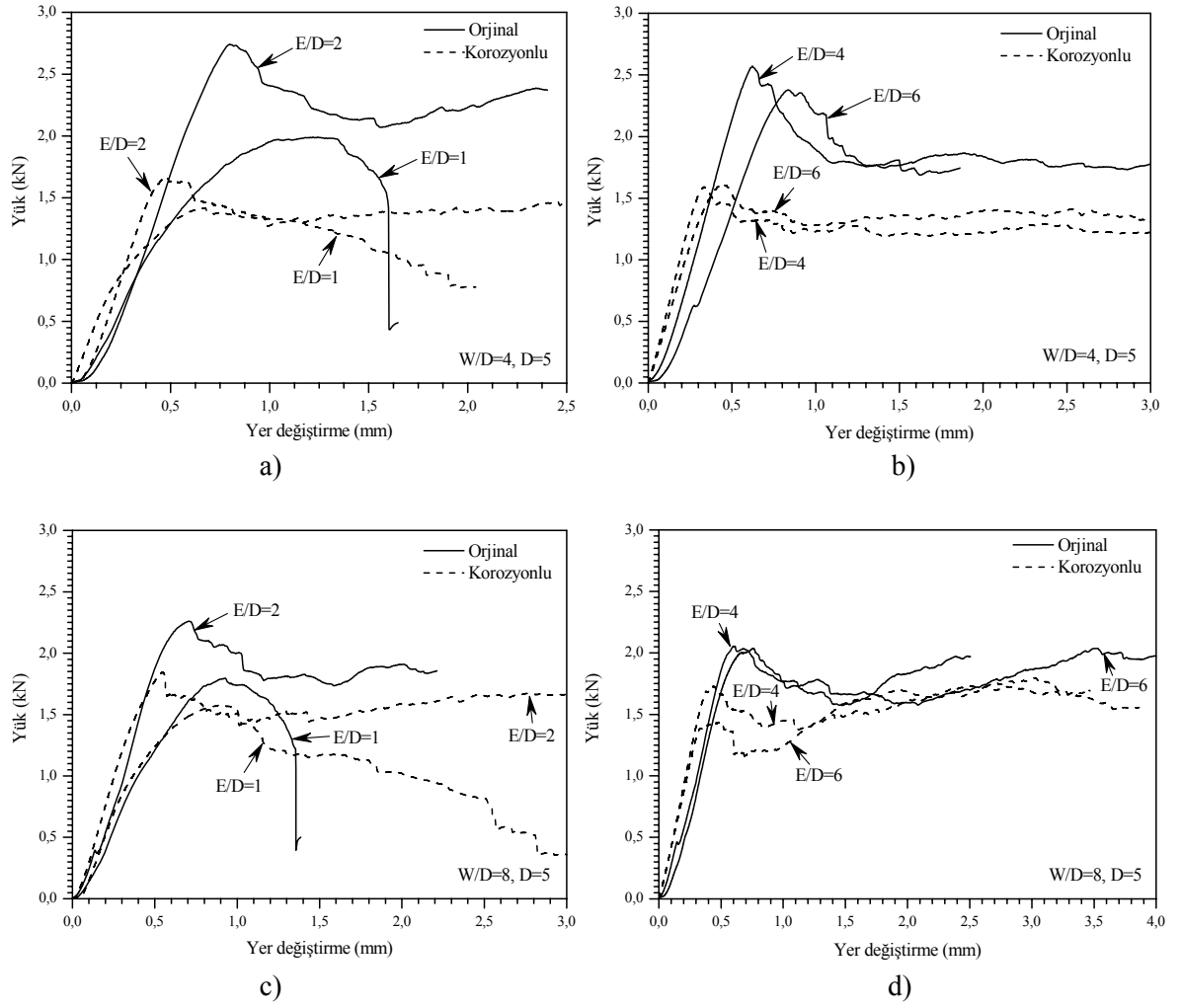
Şekil 4.44'te  $[(0^0/90^0)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip orijinal ve 6 ay süre ile hidroklorik asit (% 37 HCl) çözeltisinde bekletilmiş PPS matrisli sürekli karbon fiber takviyeli kompozitlerde incelenen parametreler için yataklama yükü değerleri verilmiştir. Korozyona maruz kalmış numuneler arasında E/D=2, W/D=2 ve D=10 mm geometrik parametrelere sahip olanlar aynı parametrelere sahip orijinal numunelerde olduğu gibi maksimum yataklama dayanımı göstermiştir. Dolayısıyla malzemenin böyle bir ortamda kullanımı söz konusu olduğunda yukarıda sıralanan geometrik parametrelerin kullanılması uygun olacaktır. Minimum yataklama yükü değerleri korozyona maruz kalmış ve E/D=1, W/D=8, D=5 mm geometrik parametrelili numunelerde görülmüştür. Bu nedenle belirtilen geometriye sahip kompozitlerin bu ortamda kullanılması sakıncalıdır. Orijinal numunelerde olduğu gibi korozyonlu numunelerin yataklama yükü değerlerinde E/D oranının artmasıyla belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Bütün geometriler göz önünde bulundurulduğunda bağlantı bölgesinin yüklemeye karşı gösterdiği maksimum direnç E/D=2 olması halinde gerçekleşmiştir. Dolayısıyla bu malzeme ile gerçekleştirilen bağlantı tipi için kritik E/D oranı ikidir. E/D=1 olması halinde kompozit malzemelerde kayma tipi hasar, E/D=2, 4, 6 olması durumunda ise yataklama tipi hasar oluşmuştur. Korozyonlu ve

korozyonsuz numunelerde  $D=10$  mm olması halinde elde edilen yataklama yükleri  $D=5$  mm'ye göre daha yüksek olmuştur.

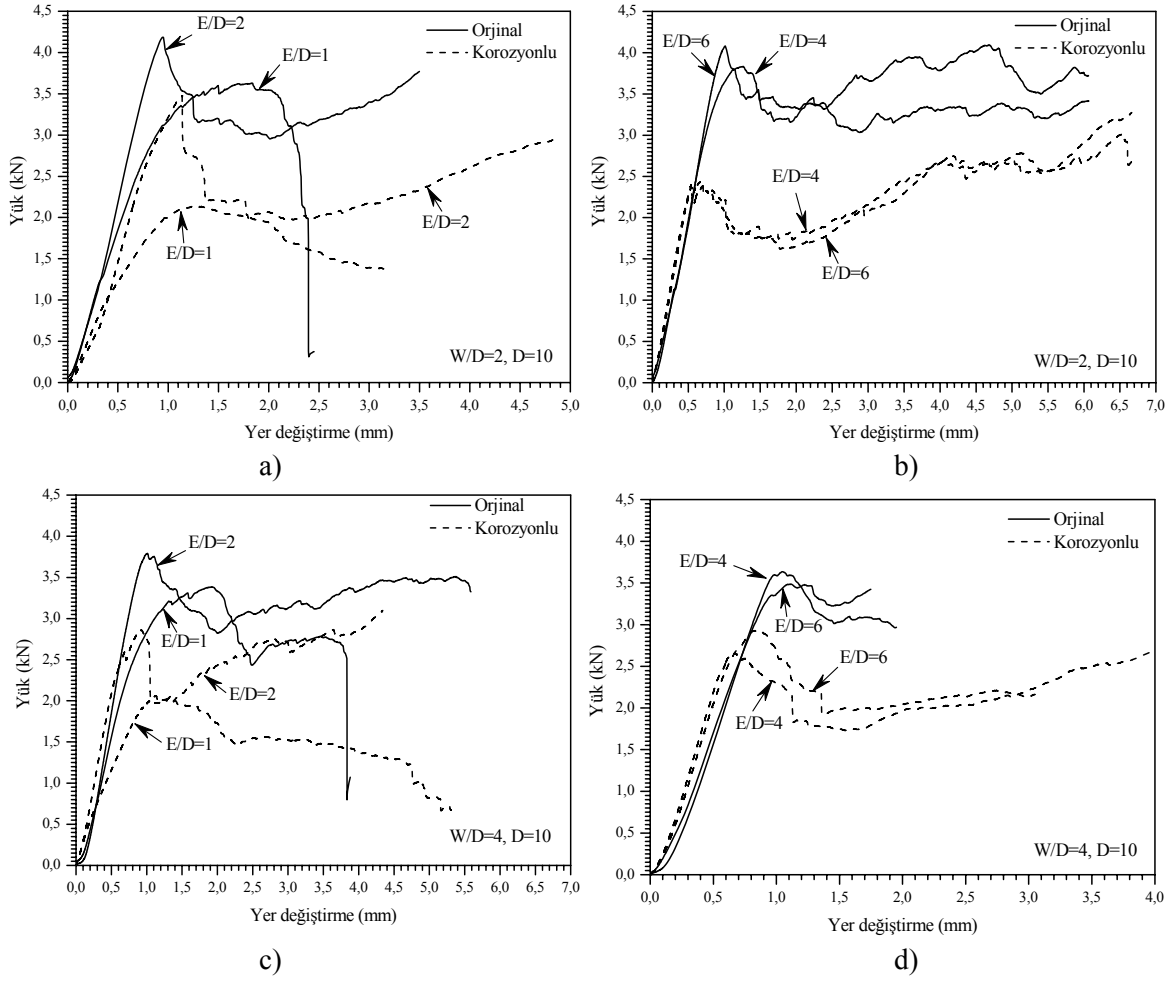


Şekil 4.44: Orijinal ve korozyonlu (%37 HCl asit) kompozit levhalarda E/D oranına bağlı olarak değişen yük değerleri

Şekil 4.45'te  $D=5$  mm olması halinde korozyonsuz ve korozyonlu numunelere ait pim ile yükleme sonrasında elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri ve hasar yükleri görülmektedir. Orijinal numunelerin deformasyonu esnasında daha yüksek mertebede enerji absorpsiyonu söz konusudur. Bundan dolayı orijinal numuneler korozyonlu numunelere kıyasla çok daha güvenli bir bağlantı tipine ve yüksek hasar toleransına sahiptir. Şekil 4.45 a' da ve 4.45 b' de  $W/D=4$  olması halinde E/D oranına bağlı olarak değişen yataklama yükü değerleri verilmektedir.  $E/D=1$  olması halinde orijinal ve korozyonlu numunede kayma tipi hasar meydana gelmiştir. E/D oranının artmasıyla hasar tipi değişerek yataklama tipi hasar oluşmuştur. Şekil 4.45 c ve 4.45 d' de ise  $W/D=8$  olması halinde elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri görülmektedir. Orijinal numunelerde olduğu gibi korozyonlu numunelerde de W/D oranında meydana gelen artış yataklama yükü değerlerinde azalmaya neden olmuştur.  $W/D=4$  ve  $W/D=8$  aynı zamanda  $E/D=1$  ve  $D=5$  mm olması durumunda bağlantı bölgesinde küçük yer değiştirmeler sonrasında hasar meydana gelmiştir. Korozyonlu numunelerde ise yer değiştirme miktarı yukarıda sıralanan geometrik parametreler için daha fazla olmuştur.

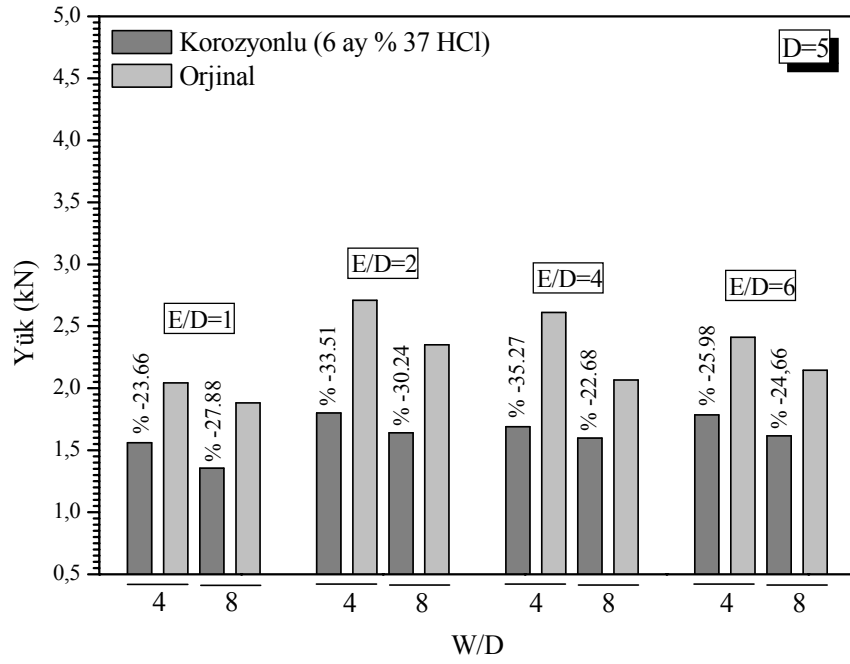


şekil 4.45: Korozyonsuz ve 6 ay süre ile % 37 HCl asit çözeltisinde bekletilmiş kompozit plakaların pim ile yükleme sonrasında yük- yer değiştirme eğrileri ve hasar yükleri (W/D=4, W/D=8, D=5)

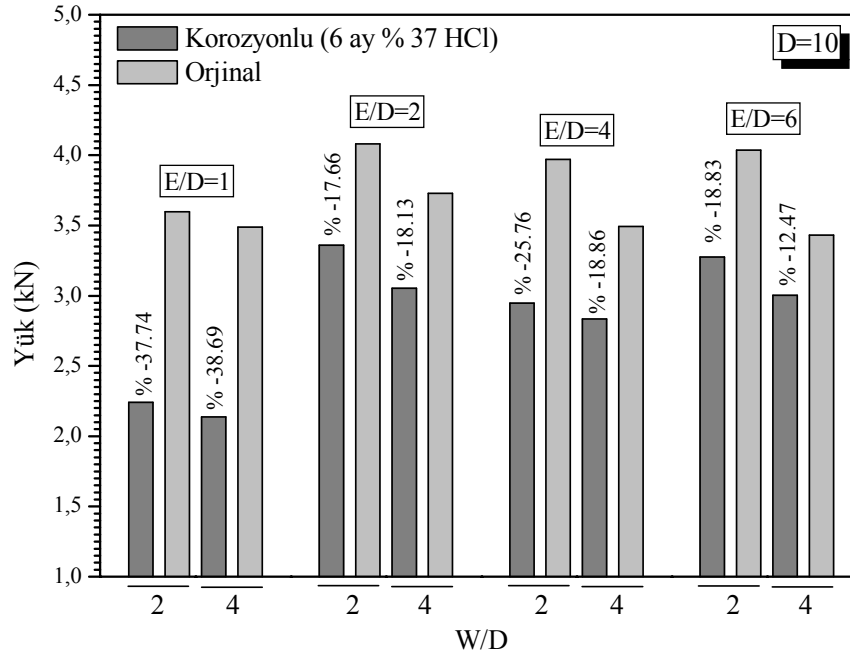


Şekil 4.46: Korozyonsuz ve 6 ay süre ile % 37 HCl asit çözeltisinde bekletilmiş kompozit levhaların pim ile yükleme sonrasında yük yer değiştirme eğrileri ve hasar yükleri (W/D=2, W/D=4, D=10)

Şekil 4.46'da pim çapının 10 mm olması durumunda korozyonsuz ve korozyonlu numunelerin pim ile yükleme sonrasında yük-yer değiştirme eğrileri ve hasar yükleri verilmiştir. Hidroklorik asit çözeltisi içerisinde bekletilen numunelerde zayıf fiber/matris ara yüzey mukavemeti nedeniyle orijinal numunelerle kıyaslandığında bağlantı bölgesinde daha düşük gerilmeler söz konusu olmaktadır. Asitli ortamın yataklama performansı üzerindeki yıkıcı etkisi yukarıdaki şekillerden açıkça görülmektedir. Asit çözeltisi fiber/matris ara yüzeyinde bozunmaya neden olduğundan polimer matrisli kompozitin deformasyonu kaçınılmaz olur. Dolayısıyla korozyonlu numunelerin yataklama performanslarında meydana gelen azalma yukarıda bahsedilen mekanizmalar ile açıklanabilir. Karbon fiberlerin kimyasal saldırılara karşı yüksek dirence sahip olması polimer kompozitte meydana gelen bozunmanın matris ağırlıklı bir olgu olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 4.47: D=5 olması durumunda W/D oranına bağlı olarak değişen maksimum yük değerleri



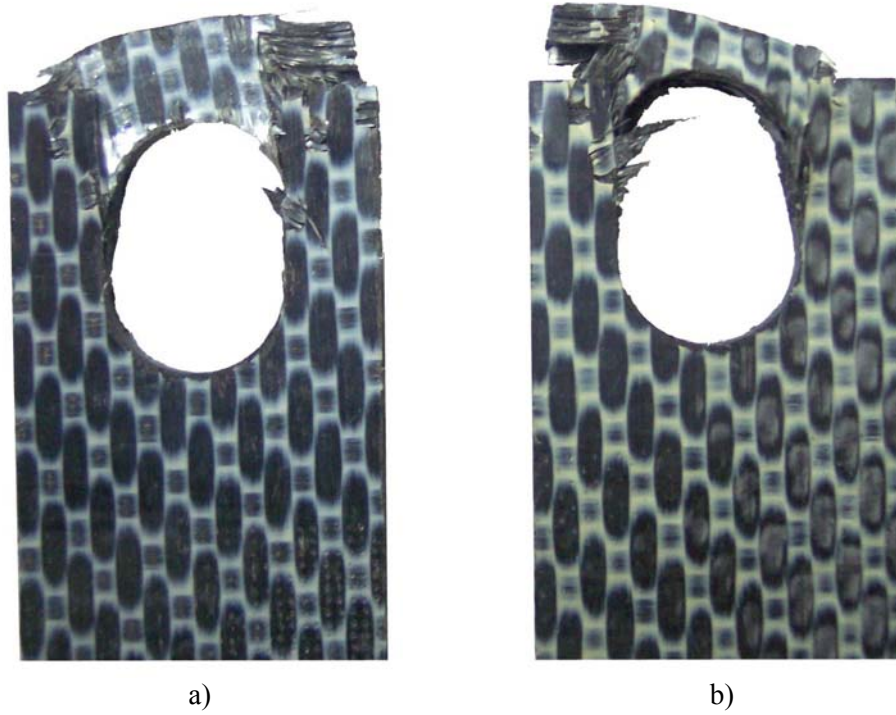
Şekil 4.48: D=10 olması durumunda W/D oranına bağlı olarak değişen maksimum yük değerleri

Şekil 4.47'de pim çapının 5 mm olması halinde W/D oranına bağlı olarak değişen maksimum yataklama yükü değerleri verilmiştir. Şekilde W/D oranının artmasıyla orijinal ve korozyonlu numunelerin yataklama yüklerinde azalma olduğu

görülmektedir. Orijinal ve korozyonlu numuneler için maksimum yataklama yükü değerleri  $W/D=4$  ve  $E/D=2$  olması halinde elde edilmiştir. Şekil 4.47’de korozyona maruz kalma sonucunda bağlantı bölgesinin yük taşıma kapasitesinde meydana gelen azalma oranları da ayrıca gösterilmiştir.  $E/D$  oranının 2’den büyük olacak şekilde arttırılması dahi yataklama dayanımında belirgin bir değişime neden olmamıştır. Hidroklorik asit çözeltisinde bekletilmiş numunelerin yük taşıma kapasitelerinde yaklaşık % 23-35 arasında azalma meydana geldiği saptanmıştır.

Pim çapının 10 mm olması durumunda  $W/D$  oranına bağlı olarak değişen maksimum yataklama yükü değerleri  $E/D$  oranı ile ilişkilendirilerek Şekil 4.48’de gösterilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi  $W/D$  oranının artmasıyla orijinal ve korozyonlu numunelerin yük taşıma kapasitelerinde azalma görülmüştür.  $D=10$  mm olması halinde yük taşıma kapasitesi değerleri ve deformasyon enerjileri  $D=5$ ’e göre korozyonsuz ve korozyonlu malzemeler için daha yüksek olmuştur. Korozyona maruz bırakılmış numunelerin yataklama yükü değerleri yaklaşık % 13-39 oranında azalmıştır. Bütün geometrik parametreleri ihtiva edecek şekilde yapılan değerlendirme sonucunda maksimum yataklama dayanımı değerleri korozyonsuz ve korozyonlu numuneler için  $W/D=2$ ,  $E/D=2$  ve  $D=10$  mm olması durumunda elde edilmiştir (Şekil 4.48).

% 37 yoğunluktaki hidroklorik asit çözeltisi içerisinde 6 ay bekletilen  $[(0^0/90^0)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip sürekli karbon fiber takviyeli PPS matrisli kompozit levhalarda Şekil 4.49’da görüldüğü gibi renk değişimi meydana gelmiştir. Malzemenin renginde meydana gelen solma kimyasal bozunmanın meydana geldiğini göstermektedir. Malzemedede oluşan kimyasal bozunma çözeltinin konsantrasyonu, malzemenin çözelti ile olan temas süresi ve polimerik malzemenin morfolojisi gibi faktörlere bağlıdır. Bu sıralanan özellikler PPS malzemesinin özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek pim ile yük taşıma performansını yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi negatif bir şekilde etkilemektedir.



Şekil 4.49: %37'lik hidroklorik asit çözeltisinde 6 ay bekletilen numunelerde oluşan renk değişimi (a-korozyonsuz, b-korozyonlu)

### 4.3. Dinamik Yükleme Maruz Kalan $[(0^0/90^0)]_3$ Yönlenmeye Sahip Karbon/PPS Kompozitin Pim ile Yük Taşıma Performanslarının İncelenmesi

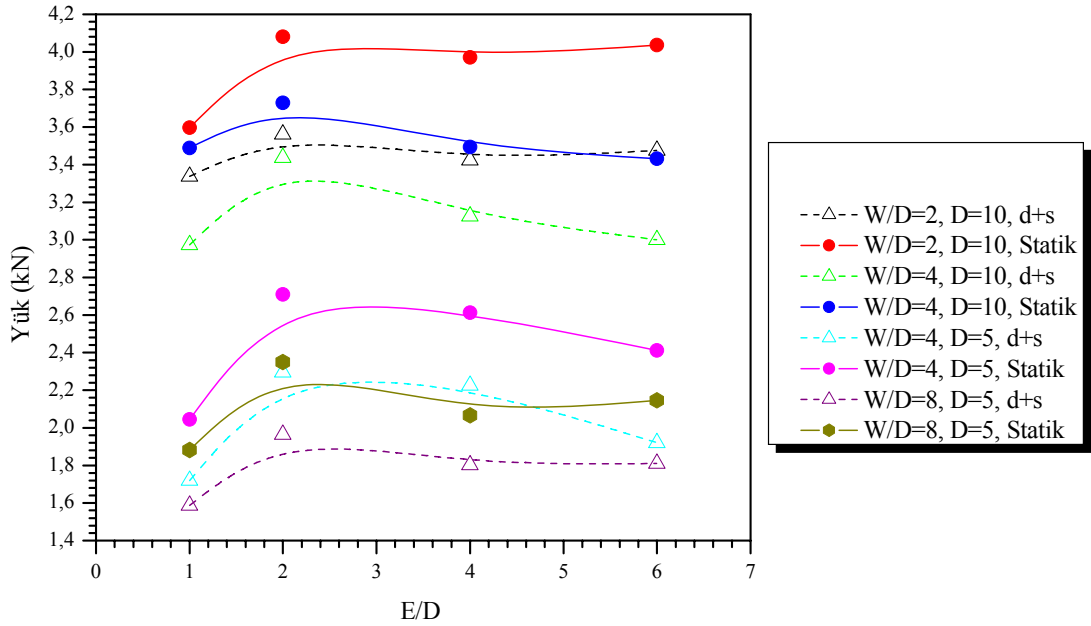
Daha önce gerçekleştirilen deneylerden her bir geometrik parametre için malzemenin statik yükleme koşullarındaki yataklama dayanımı değerleri bilindiğinden yorulma dayanıklılık limiti, yorulma ömrünü mümkün kılmak için, yataklama dayanımının %60'a ( $\sigma_0 = 0,6 \cdot \sigma_{ya}$ ) karşılık gelen değerden seçilmiştir. Bu araştırmada bütün

yorulma testleri için kullanılan gerilme oranı  $R=0,1$ 'dir; burada  $R, \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  oranıdır.

Şekil 4.50'de görüldüğü gibi dinamik+statik yüklemeye maruz bırakılmış kompozit levhaların yük taşıma kapasiteleri sadece statik yüklenmiş levhalar ile karşılaştırıldığında daha düşük yataklama yükü değerlerine sahiptir. Önceki verilerden elde edilen sonuçlar ışığında optimum geometrik parametrelerin  $W/D=2$ ,  $E/D=2$  ve  $D=10$  mm olduğu bilinmektedir. Bu durum hem dinamik yüklemeye hem de sadece statik yüklemeye maruz kalmış kompozit levhalar için geçerlidir. Dinamik+statik yüklemeye minimum yataklama yükü değerleri statik yüklemeye olduğu gibi  $W/D=8$ ,  $E/D=1$  ve  $D=5$  mm geometrik parametreleri numunelerde



görülmüştür. Şekil 4.50'ye dikkat edildiğinde  $E/D=2$  olması durumunda yataklama yükü değerlerinin maksimum olduğu görülmektedir.  $E/D$  oranının artmasıyla bu değerlerde belirgin bir değişim olmamıştır. Dolayısı ile  $[(0^0/90^0)]_{3s}$  yönlenmeye sahip karbon fiber takviyeli PPS plakalarda kritik  $E/D$  oranı 2'dir.

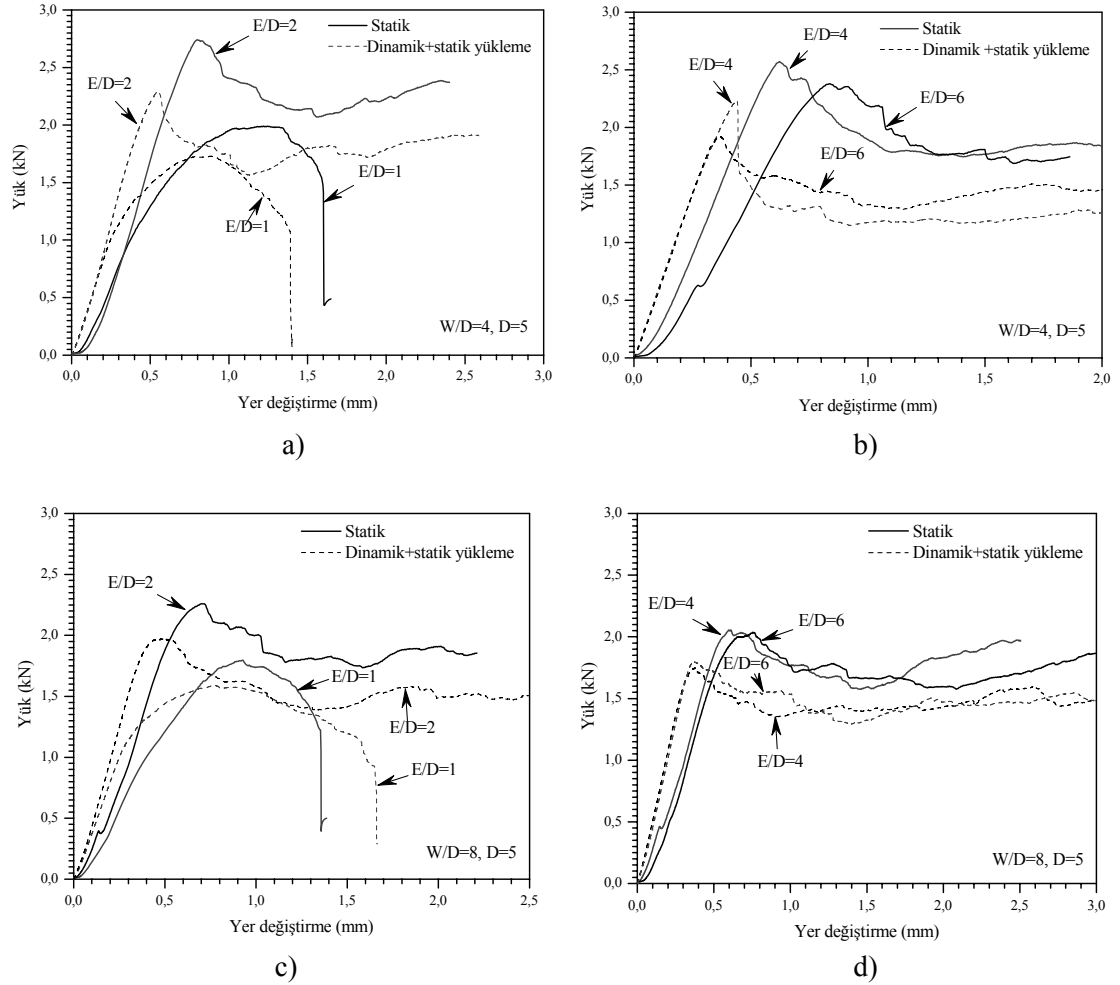


Şekil 4.50: Statik ve dinamik ( $10^3$  çevrim)+statik (d+s) yüklemeye maruz kalmış kompozit levhalarda  $E/D$  oranına bağlı olarak değişen yük değerleri

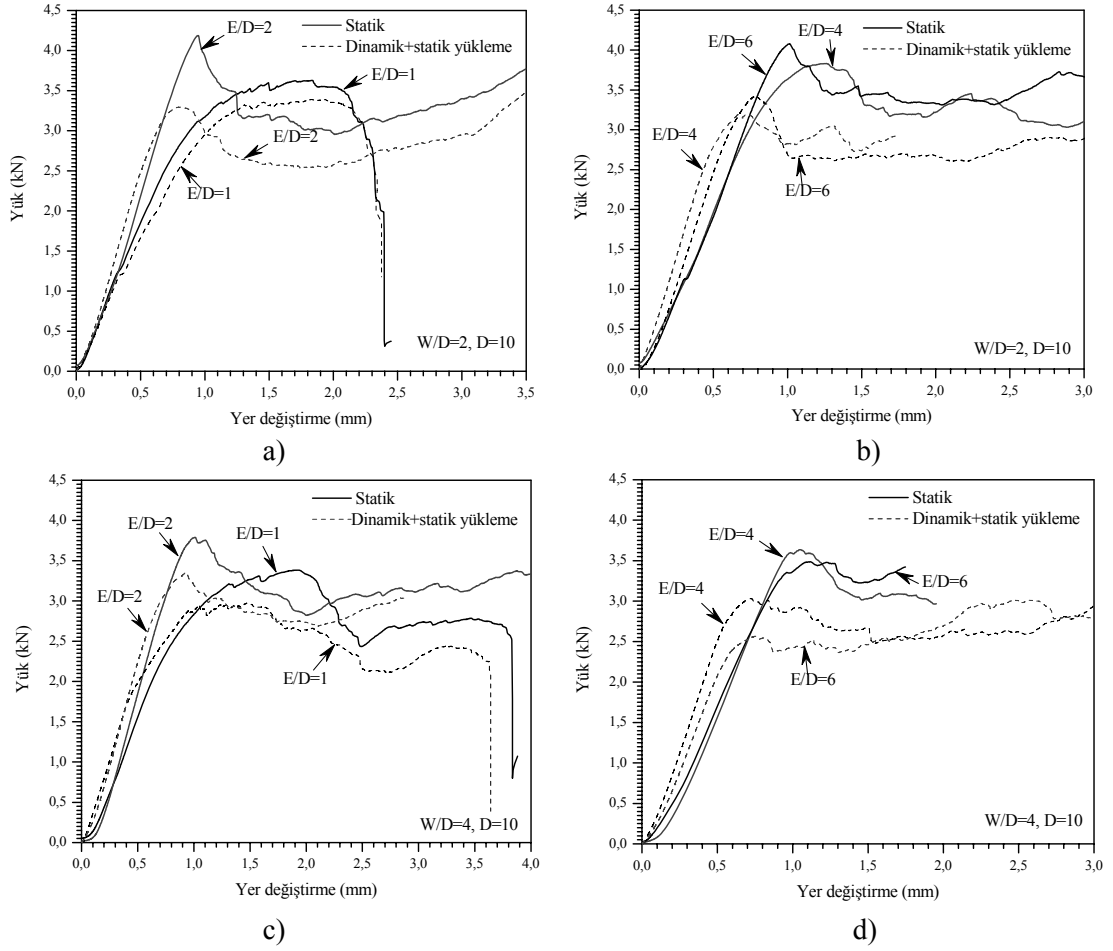
Şekil 4.51'de  $D=5$  mm olması halinde dinamik+statik ve sadece statik olarak yüklenmiş numunelere ait pim ile yükleme sonrasında elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri ve hasar yükleri görülmektedir. Sadece statik olarak pim ile yüklenmiş kompozit plakaların yük taşıma kapasiteleri yorulmaya maruz kalmış olanlara göre daha yüksek olup daha yüksek derecede enerji absorbe etmiştir. Bu durum bütün geometrik parametreler için geçerlidir. Her iki yükleme tipi için  $W/D$  oranında meydana gelen artış yataklama yükü değerlerinin azalmasına sebebiyet vermiştir.

Şekil 4.52'de pim çapının 10 mm olması durumunda dinamik+statik ve sadece statik olarak yüklenmiş numunelerin pim ile yükleme sonrasında yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Yorulmaya maruz kalmış numunelerin yataklama dayanımında meydana gelen azalma değişik hasar mekanizmaları nedeniyle oluşmaktadır. Yorulmaya sebep olan tekrarlı yüklemeler altında anizotropik yapıları nedeniyle kompozitler oldukça karmaşık hasar mekanizmalarına sahiptir. Birçok malzemede

yorulma hasarı olarak çatlak oluşumu karşımıza çıkar, fakat yorulma kompozit malzemelerde dört ana hasar mekanizmasına neden olmaktadır. Bu mekanizmalar arasında matriste çatlak oluşumu, fiberlerde kırılmalar, katmanlar arası delaminasyonlar ve fiber/matris ara yüzey ayrılmaları şeklindedir. Malzemelerdeki bu yorulma hasarları kompozitin dayanımını ve rijitliğini azaltan faktörlerdir.



Şekil 4.51: Statik ve dinamik+statik yüklenmiş kompozit levhaların pim ile yükleme sonrasında yük- yer değiştirme eğrileri ( $W/D=4, W/D=8, D=5$ )

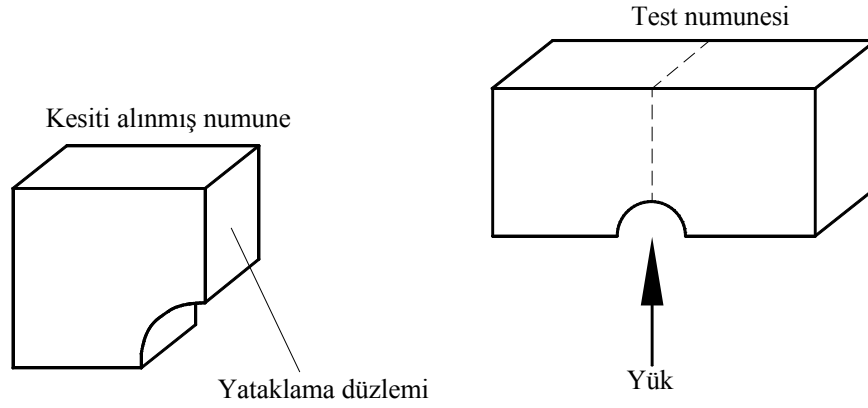


Şekil 4.52: Statik ve dinamik+statik yüklenmiş kompozit levhaların pim ile yüklenme sonrasında yük yer değiştirme eğrileri ve hasar yükleri ( $W/D=2$ ,  $W/D=4$ ,  $D=10$ )

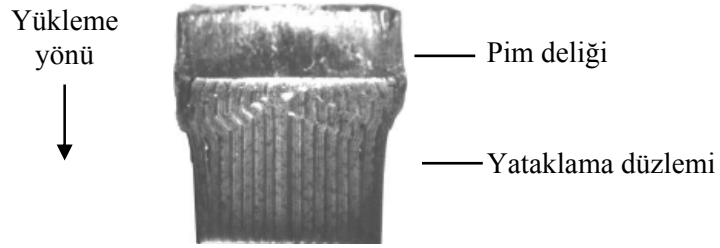
Şekillerden (Şekil 4.51 ve Şekil 4.52) de görüldüğü üzere dinamik yüklemeye maruz bırakılan deney numunelerinde hasar tipi değişmemiş fakat bağlantının yük taşıma kapasitesi dinamik yüklenme esnasında oluşan çeşitli hasar mekanizmaları nedeniyle azalmıştır. Şekil 4.51 ve Şekil 4.52 incelendiğinde bağlantı bölgesinde genelde yataklama tipi hasarın oluştuğu görülmektedir. Dolayısıyla hasar mekanizmalarının yataklama düzleminde etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Yorulmuş numunelerde meydana gelen yataklama tipi hasarın daha iyi anlaşılabilmesi için yataklama gerilmesinin maksimum olduğu yerden yani yataklama düzleminde numunenin kesiti alınmıştır (Şekil 4.53). Bu kesite ait fotoğraf Şekil 4.54'te gösterilmiştir. Fotoğrafta da görüldüğü üzere iki tip hasardan bahsedilebilir: düşey ve köşegen doğrultusunda oluşan hasarlar. Düşey doğrultuda

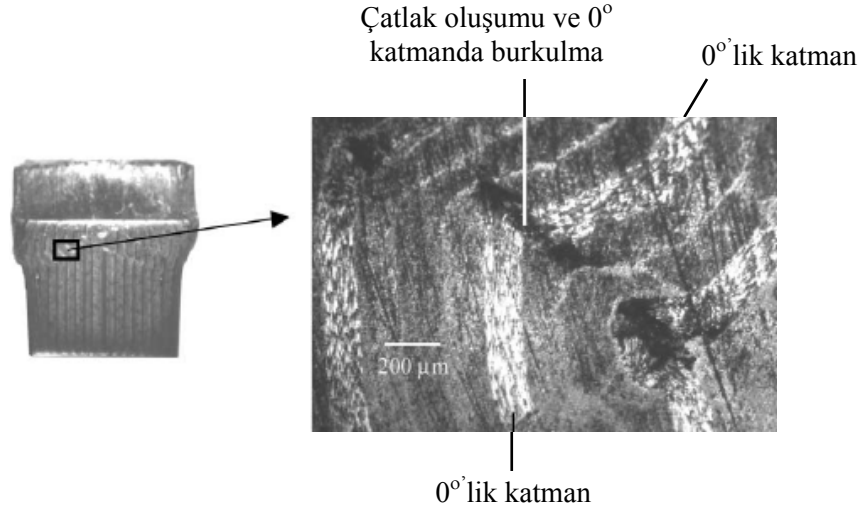
oluşan hasar tabakalarda meydana gelen ayrılmalardır. Bu ayrılmalar genelde  $0^{\circ}$ 'lik katmanda ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.55'te  $0^{\circ}$ 'lik katmanda köşegen doğrultusunda fiberlerde meydana gelen burkulmalar ve kırılmalar görülmektedir. Köşegen doğrultusunda oluşan hasarın numune kenarı ile kesiştiği bölgede malzemede yanıl genişleme oluşmaktadır. Fiberlerin burkulmasında meydana gelen artış malzemede yanıl genişlemeyi arttırmaktadır. Bu olgu yataklama tipi hasarın bir karakteristiği olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.53: Kesit alınmış numunede yataklama düzlemi

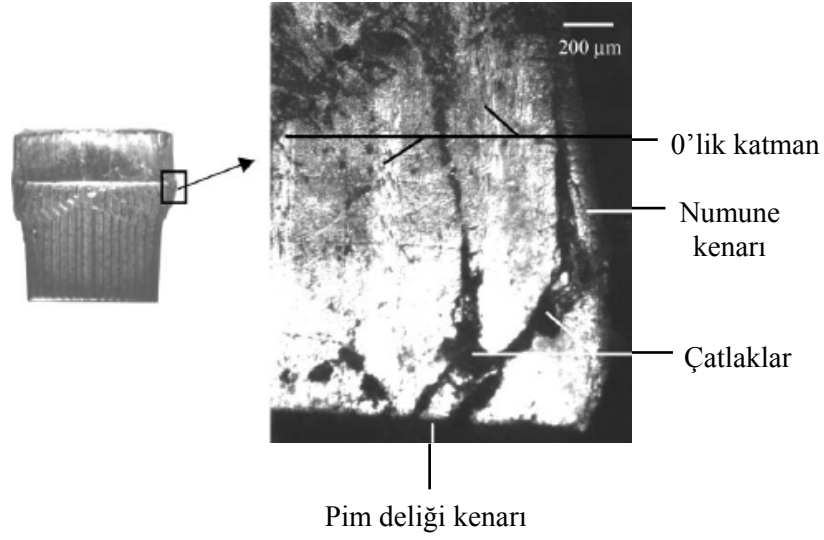


Şekil 4.54: Yataklama düzlemine ait fotoğraf (Jounts ve Johnson, 2002)

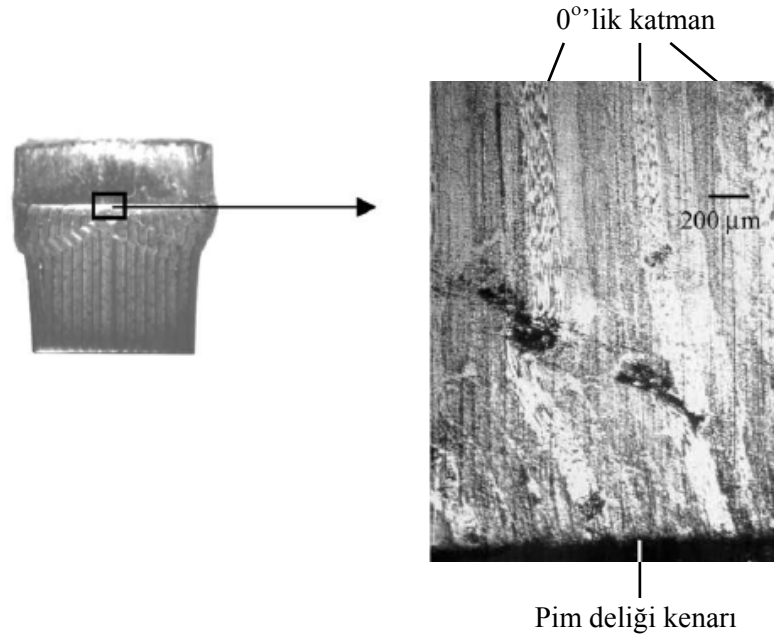


Şekil 4.55: Yataklama düzleminde köşegen doğrultusunda oluşan hasar (Joints ve Johnson, 2002)

Yorulma testi sonucunda ortaya çıkan hasar mekanizmaları  $0^{\circ}$ 'lik katmanda meydana gelen tabakalar arası ayrılmalar, fiberlerde oluşan burkulmalar ve kırılmalarıdır. Kompozitte meydana gelen tabakalar arası ayrılmalar katmanlar arasında boşluklara neden olup bası zorlanmaları etkisiyle katmanların stabilitesini azaltarak burkulmalara sebebiyet verir. Tabakalar arası ayrılma uzunluğunun veya sayısının artması ile kritik burkulma gerilmelerine ulaşılmakta ve katmanlar burkulmaktadır. Bunun sonucunda numunede yataklama tipi hasar oluşmaktadır (Joints ve Johnson, 2002). Yataklama düzleminde ve numunenin kenarında meydana gelen hasar numunenin ortasındaki hasar ile kıyaslandığında çok daha büyük olmaktadır. Numunenin kenarına ve orta bölgesine ait fotoğraflar Şekil 4.56 ve 4.57'de gösterilmiştir.



Şekil 4.56: Pim deliği kenarı ve numune kenarına ait fotoğraf (Jounts ve Johnson, 2002)

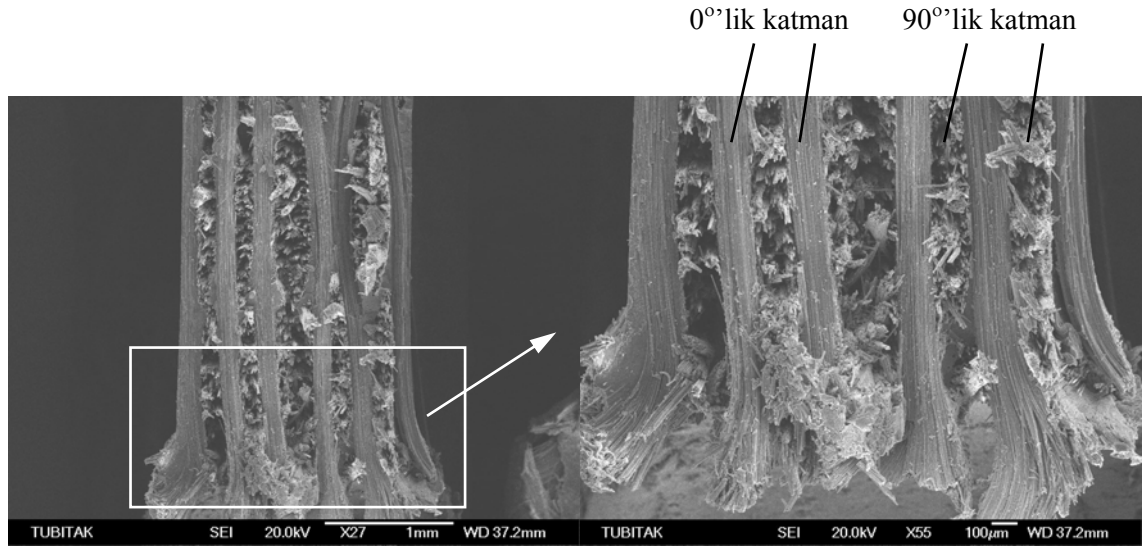


Şekil 4.57: Pim deliği kenarına ait fotoğraf (Jounts ve Johnson, 2002)

Numune kenarında meydana gelen çatlaklara ve tabakalar arası ayrılmalara numune ortasında rastlanmamaktadır. Numune kenarındaki hasarlara kaynak olarak iki neden gösterilebilir: 1) pimin bükülmesi 2) kenar etkileri. Bunlardan ilki, yük uygulandığında pim uçlarının yük doğrultusunda yukarıya doğru bükülmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu oluşum numune kenarındaki yataklama gerilmesini arttırmakta ve pim deliğinin dış katmanlarında yüksek mertebede hasara neden

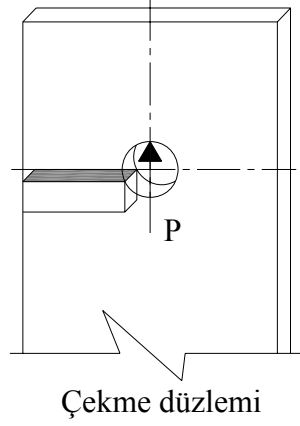
olmaktadır. Dış katmanlar yapıda daha az desteklendiğinden hasara karşı olan duyarlılıkları daha fazladır. Bu olgu ikinci neden olarak karşımıza çıkmaktadır.

Numunenin kenarında gözlemlenen hasarlar daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda rapor edilen hasarlarla benzerlik göstermektedir. Önceki araştırmalar kompozitte meydana gelen çatlak ve ezilmenin yataklama hasarının oluşmasında temel mekanizmalar olduğunu göstermiştir (Camanho ve diğ.1998). Sonuçta yorulmanın etkisiyle oluşan ve yorulma sonrası statik yüklenen numunelerde yataklama tipi hasara tabakalar arası ayrılmalar, katmanlardaki burkulmalar ve kırılmalar neden olmaktadır (Şekil 4.58).

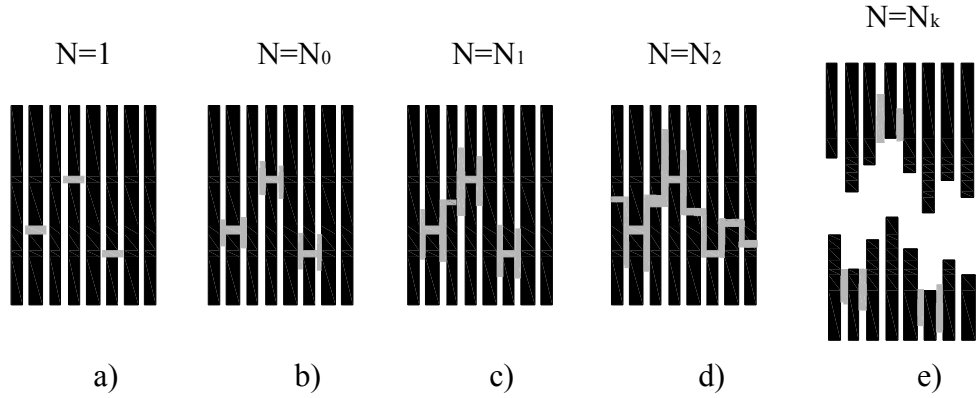


Şekil 4.58: Yataklama düzleminde ve pim deliği kenarında oluşan hasar

Yataklama tipi hasarın dışında numune geometrisine bağlı olarak dinamik+statik yükleme sonucunda bazı numunelerde yataklama+çekme tipi hasar da meydana gelmiştir. Çekme tipi hasara neden olan ve çekme düzleminde (Şekil 4.59) yer alan mekanizmalar aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 4.59: Çekme tipi hasarın etkili olduğu düzlem



Şekil 4.60: 0°'lik kompozit katmanda çekme düzleminde fiber yönelmesi doğrultusunda uygulanan tekrarlı yük etkisiyle meydana gelen yorulma hasarının şematik gösterimi (Gamstedt, 2000b)

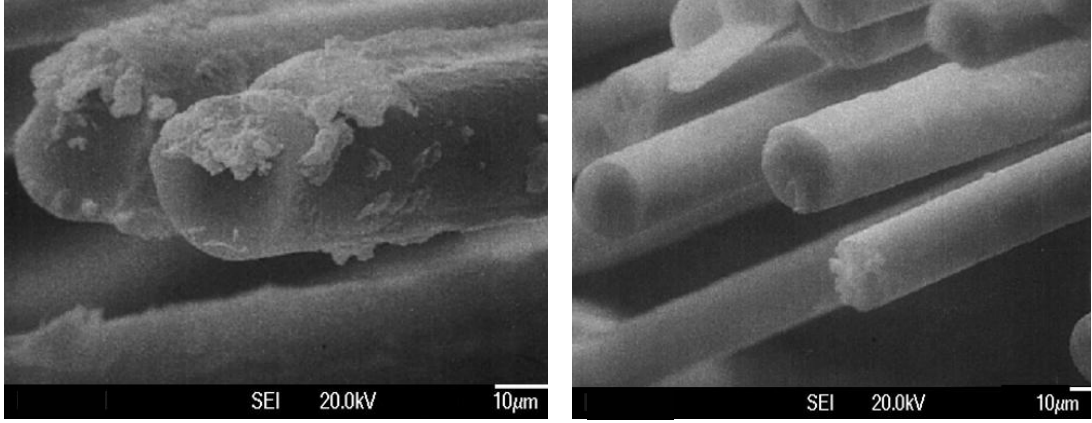
Şekil 4.60 a' da ilk yük uygulaması etkisiyle gevrek fiberlerde meydana gelen kırılmalar görülmektedir. Şekil 4.60 b' de fiberlerin kırılma noktalarından itibaren gerilme dağılımının yeniden düzenlenmesi ve uygulanan yük etkisi ile fiber/matris ara yüzey ayrılımlarının gelişmesi, Şekil 4.60 c' de aşırı yükleme sonucunda daha fazla miktarda fiber kırılmaları ve bunun sonucunda daha büyük fiber/matris ayrılımları, Şekil 4.60 d' de gelişerek ilerleyen ayrılımlar ve artan fiber kırılmaları bunun sonucunda oluşan çatlaklardaki birleşmeler ve Şekil 4.60 e' de numunedeki meydana gelen ayrılma şeklindeki hasar görülmektedir.

Uygulanan yük nedeniyle ara yüzeydeki ayrılımlar gelişerek artar bunun sonucunda da kırılmış fiberlere komşu olan fiberlerde sürekli gerilme yığılması değişimi söz konusu olmaktadır ( $N=N_0$ ). Yukarıda da bahsedildiği gibi bazı fiberlerde meydana



gelen aşırı gerilme etkisiyle zayıf kısımların hasara uğraması kaçınılmaz olur ( $N=N_1$ ). Sırasıyla bu olgu sonucunda daha fazla ayrılma oluştuğundan çatlaklar birleşerek gelişmektedir ( $N=N_2$ ). Sonuç olarak bütün fiberler kırıldığında ve fiber/matris ara yüzey ayrılmaları da sona erdiğinde numune tamamen kırılarak hasara uğrar ( $N=N_k$ ). Ara yüzey dayanımları yüksek olan karbon fiber/polimer matris kompozitler büyük kırılma davranışı sergilemektedir (Camanho ve diğ. 1998). Bu davranış ciddi çatlak oluşumuna neden olarak kompozitin hasar kinetiğini artırır. Polimer matrisli kompozitlerde ara yüzeyde meydana gelen gerilme transferi nedeniyle fiber köprü çatlakları (fibre bridged cracking, Şekil 4.29 c1) oluşumu meydana gelmektedir.

Karbon fiber takviyeli PPS kompozitte yorulma hasarı fiber kırıklarından veya iç yapı kusurlarından başlamaktadır. Uygulanan tekrarlı yüklemeler etkisiyle fiber-matris ayrılmaları nedeniyle çatlak dolambaçlı yol izleyerek hasar derecesinin artmasını sağlamaktadır. Şekil 4.61'da hasara uğramış numunelerin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Tekrarlı yüklemeler maruz kalmış numunelerin kırılma yüzeyleri daha karmaşık fırça ucuna benzer (dağınık fiberli) görünümündedir (Şekil 4.61 b). Statik yükleme etkisiyle hasara uğramış numuneler incelendiğinde, fiberlerin yüzeylerinde matris kalıntılarının varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 4.61 a). Güçlü fiber/matris ara yüzey mukavemeti nedeniyle dağınık fiber görünümü söz konusu değildir. Bu fraktografik farklılık karbon fiber/PPS kompozitte dinamik yükleme etkisiyle fiber/matris ara yüzey ayrılmalarının söz konusu olduğu sonucunu ortaya koyar.



a)

b)

Şekil 4.61: Taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiş hasara uğramış numunelerin kırılma yüzeylerine ait fotoğraflar. Fiber/matris ara yüzey dayanımına bağlı olarak gelişen hasarlar; a) Statik yüklem sonrası güçlü ara yüzey: düzlemsel kırılma, b) tekrarlı+statik yüklem sonrası zayıf ara yüzey: fırça ucu şeklinde yüzey kırılması

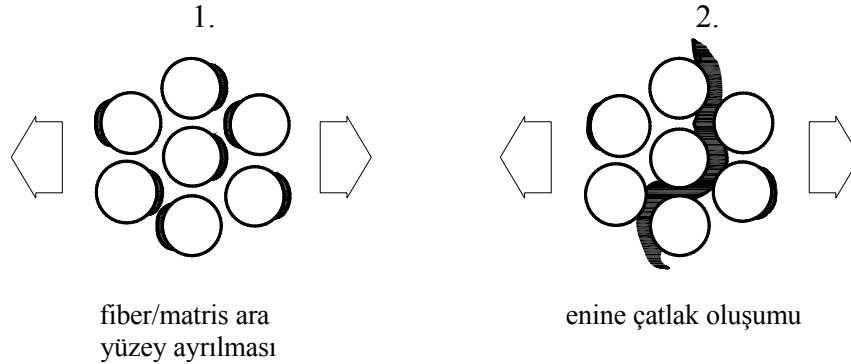
Kuvvetli fiber/matris ara yüzey bağı geniş bölgeye yayılmış ayrılmalara izin vermediğinden yorulma direncini arttıran etki yaratır. Bu nedenle yorulma-ömür diyagramında elde edilen eğri yatay eksene paralel olmaktadır. Buradan malzemenin sonsuz sayıda tekrarlanan ve birbirine eşit yüklere dayanıklı olacağı anlamı çıkar (Marston ve Neumeister, 1999).

$(0_n^0/90_m^0)_s$  yönlenme düzenine sahip karbon fiber takviyeli PPS kompozitlerde en önemli katman aksenal doğrultuda yüklenen boyuna katmandır. Aksenal yüklemelerde en büyük gerinime bu katman sahiptir. Kompoziti oluşturan katmanlar arasında maksimum rijitliğe sahip olmasıyla birlikte, belirli sayıda uygulanan tekrarlı yüklemelerde de en uzun yorulma ömrü göstermektedir. Birçok durumda çok yönlü fiber takviyeli kompozitlerin yorulma ömrünü belirleyen katman olarak karşımıza çıkar (Camanho ve diğ. 1998).

Kompozit tabakalar genellikle farklı fiber oryantasyonlarına sahip katmanlardan oluşmaktadır. Değişik uygulamalarda tek yönlü sürekli fiber takviyesi yanında yapılaraya etki eden aksenal olmayan yükleri karşılamak üzere farklı açılardaki yönlenmelerin kullanılması zorunlu olmaktadır. Yapıda yalnızca tek yönlü sürekli fiber takviyesinin kullanılması kompozit plakayı ayrılmalara karşı oldukça duyarlı hale getirmektedir. Bu nedenle aksenal olmayan yüklerin neden olacağı yapısal

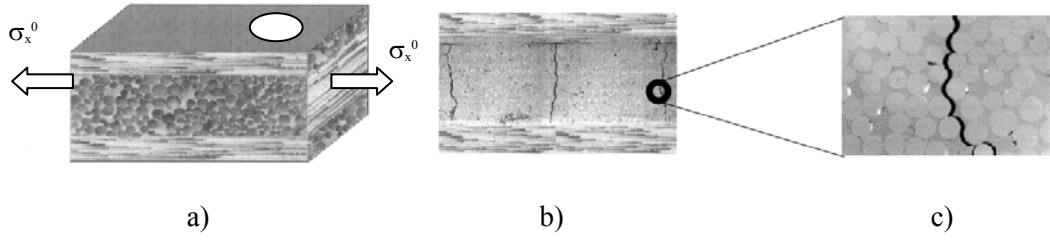
bütünlük kayıplarını engellemek için düşük miktarda da olsa genellikle enine fiber takviyesi de yapılmaktadır. Kompozit plakada yer alan enine katmanlar en düşük gerilme ve uzama değerlerinde hasara uğrar. Genellikle hasara neden olan mekanizmalar bu katmanlarda birikerek buradan daha kritik katmanlara doğru ilerlemektedir. Bazı uygulamalarda hasarların varlığı örneğin basınçlı kapları oluşturan kompozit plakaların enine katmanlarında oluşacak çatlaklar sızıntıya neden olacağından tolere edilemez. Dolayısı ile enine katman kompozit yapısında kritik bir eleman olduğundan bu katmandaki hasar mekanizmalarının incelenmesi önem kazanır.

Şekil 4.62’de enine çatlak oluşumu şematize edilerek gösterilmiştir. Birçok durumda ara yüzey dayanımı hem fiberin hem de matrisin dayanımından çok daha düşük olmaktadır, bu nedenle çatlak fiber/matris ara yüzeyinde oluşmaktadır. Malzemelerin elastik özelliklerindeki farklılık ara yüzey boyunca çatlak gelişimini hem statik hem de dinamik yüklemelerde arttırmaktadır.



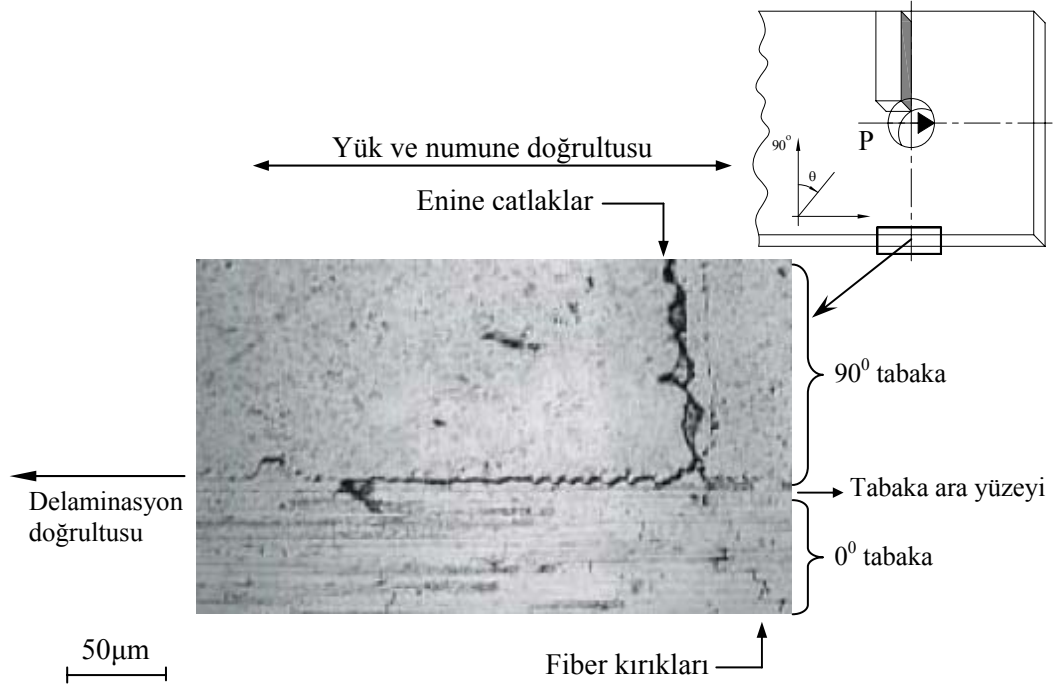
Şekil 4.62: Yükleme etkisiyle enine fiber yönlenmesine sahip olan katmanlarda oluşan ayrılmaların birleşmesiyle meydana gelen enine çatlakların şematik gösterimi

Elastik özellik farklılığı nedeniyle fiberler etrafında ilerleyen ayrılmalar birleşerek makroskobik mertebede enine çatlakların oluşmasını sağlar. Bu çatlaklar enine katman içersinde ilerleyerek son hasara neden olmaktadır. Yukarıda bahsedilen hasar mekanizmasını daha iyi açıklamak için  $(0_n/90_m)_s$  yönlenme düzenine sahip plakadaki hasar gelişiminin incelenmesi önem kazanmaktadır. Yükün uygulama doğrultusundaki kritik katmanlarda meydana gelen gerilme konsantrasyonları hasarın gelişimini ve lokal degradasyonu etkilemektedir. Şekil 4.63’te  $90^0$ ’lik katmanda meydana gelen çatlak oluşumu görülmektedir.

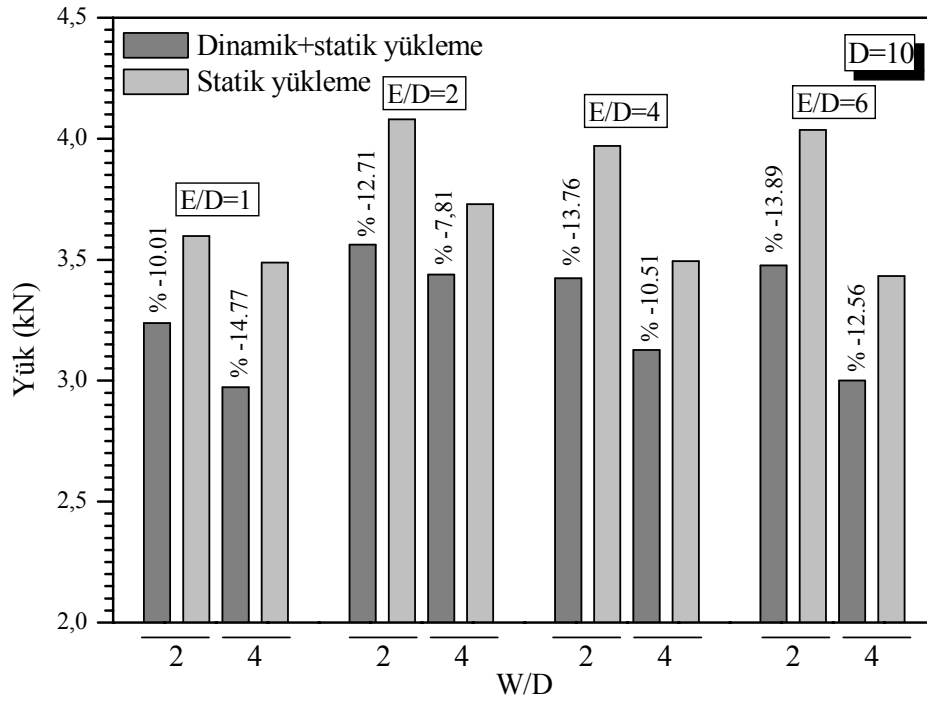


Şekil 4.63: Enine katmanda meydana gelen fiber/matris ara yüzeyindeki ayrılmaların birleşerek enine çatlakları oluşturma mekanizması; a) aksenal yüklemeye maruz çapraz katlı kompozit tabaka, b)  $90^0$ 'lik katmanda meydana gelen enine çatlaklar c) fiber/matris ara yüzey ayrılmaları sonucunda oluşan çatak (Gamstedt, 2000b)

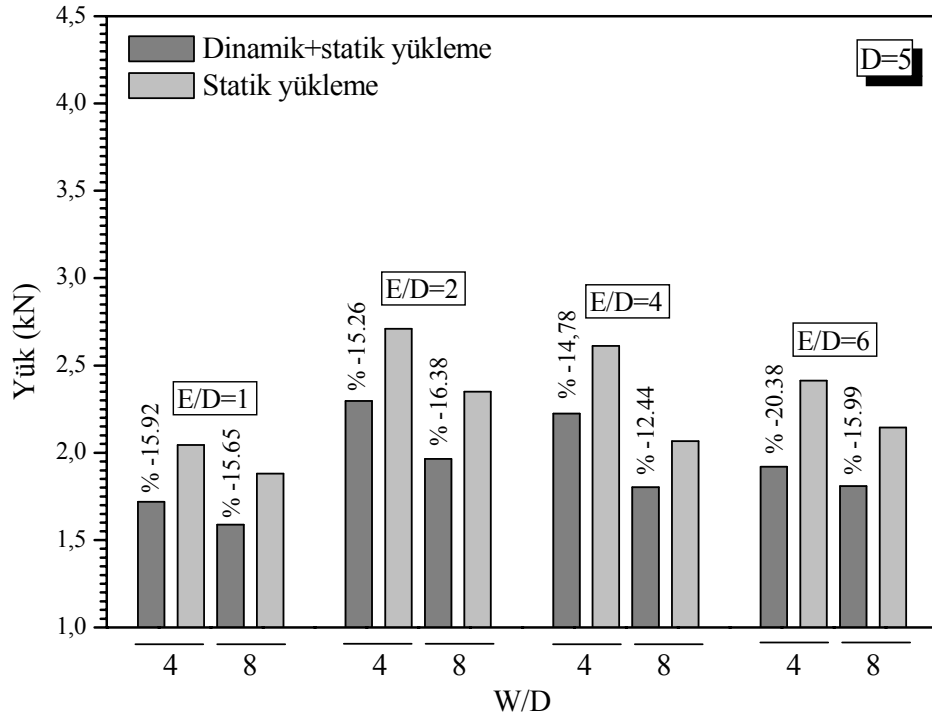
Bu çalışma ile yorulma çatlaklarının farklı elastik özelliklere sahip ortamda yani fiber /matris ara yüzeyinde geliştiği sonucu ortaya çıkmıştır. Fiber ve matris arasında mikroskobik mertebede meydana gelen ayrılmalar bu sonucun göstergesidir. Fiber/matris ara yüzeyinde gelişen delaminasyonlar özellikle dinamik yüklemelerde sıkıntı yaratmaktadır. Sıkıntıya sebep olarak bu hasar mekanizmasının aşama aşama gelişerek büyümesi ve son hasara sebep olması gösterilebilir.  $(0^0/90^0)_s$  yönlenme düzenine sahip kompozitin  $90^0$ 'lik katmanında yorulma sonucunda meydana gelen çatlaklar Şekil 4.64'te görülmektedir. Bu çatlaklar etkisiyle ve katmanlar arasında oluşan delaminasyonlar nedeniyle meydana gelen gerilme konsantrasyonları  $0^0$ 'lik katmanda fiberlerin kırılmasına sebebiyet verir. Çapraz katlı sürekli fiber takviyeli plakalarda en kritik eleman aksenal olarak yönlenmiş fiberlerin bulunduğu katmandır. Yorulma esnasında bu katmanda meydana gelen mikromekanizmalar rasgele fiber kırılmaları, fiber/matris ara yüzey ayrılmaları ve tabakalar arası delaminasyonlar şeklinde tanımlanabilir. Bu mekanizmaların etkinliği yerel gerilme dağılımı tarafından kontrol edilmektedir. Bu gerilme dağılımı aksenal yüklemeye tabi olmayan katmanlarda gelişen enine çatlaklar, matriste meydana gelen akma veya çatlak oluşumu ve tabakalar arası delaminasyonlar gibi hasar mekanizmalarına bağlıdır.



Şekil 4.64: Enine çatlakların ve tabakalar arası delaminasyonların neden olduğu gerilme konsantrasyonları sonrasında 0°'lik katmanda oluşan fiber kırılmaları (Gamstedt, 2000b)



Şekil 4.65: D=10 olması durumunda W/D oranına bağlı olarak değişen maksimum yük değerleri



Şekil 4.66: D=5 olması durumunda W/D oranına bağlı olarak değişen maksimum yük değerleri

Şekil 4.65 ve 4.66'da W/D oranına bağlı olarak değişen yük değerleri E/D oranı ile ilişkilendirilerek gösterilmiştir. Bütün geometrik parametrelere dikkat edilerek yapılan değerlendirme sonucunda tekrarlı yüklemeye maruz kalmış ve statik olarak yüklenmiş numunelerde maksimum yataklama dayanımının E/D= 2, W/D=4 ve D=10 olması halinde elde edildiği görülmüştür. Şekillerden tekrarlı yüklemeye maruz kalınması sonucunda yataklama yükü değerlerinde meydana gelen azalma yüzdeleri de görülmektedir. W/D oranında meydana gelen artış yataklama yükü değerlerini azaltmıştır. E/D oranının 2'den büyük olması halinde yük değerlerinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Dolayısı ile yapılan bütün çalışmalar ışığında kritik E/D oranının 2'ye eşit olduğu sonucu ortaya çıkarılmıştır. Tekrarlı yüklemeler sonucunda malzemelerde meydana gelen yorulma etkisiyle yataklama yükü değerlerinde oluşan azalma yukarıda bahsedilen hasar mekanizmaları ile açıklanmaya çalışılmıştır. Dolayısı ile yukarıda bahsedilen yüklemelere maruz kalacak bağlantıların tasarımı yapılırken yükleme sonrası ortaya çıkacak hasar mekanizmaları dikkate alınarak tasarımların gerçekleştirilmesinde fayda olacaktır.

#### 4.4. Termal Çevrimlerin ve Su Absorbsiyonunun Polimer Matrisli Kompozitlere Etkisi

##### 4.4.1. Karbon/PPS kompozit malzemelerde oluşan etki

Malzemelere uygulanan termal çevrimler sonrası gerçekleştirilen tabakalar arası kayma dayanımı testi sonuçları Şekil 4.67 a ve b' de verilmiştir. Şekil 4.67 a' da görüldüğü gibi ilk 5 termal çevrim sonunda tabakalar arası kayma dayanımında belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Orijinal malzeme için tabakalar arası kayma dayanımı 49.50 MPa, 5 kez hidrotermal çevrim görmüş malzeme için ise 45.59 MPa şeklinde ölçülmüştür. İlk beş çevrim içerisinde tabakalar arası kayma dayanımı yaklaşık %8 azalmıştır. Beşinci çevrim ile yüzüncü çevrim arasındaki tabakalar arası kayma dayanımı değerlerinde de düşüş söz konusudur, fakat bu düşüş beşinci çevrime kadar olan düşüş kadar belirgin değildir. Yüzüncü çevrim sonunda tabakalar arası kayma dayanımı değerlerinde yaklaşık %15 lik bir azalma tespit edilmiştir. Kompozit malzemeler termal çevrimler esnasında

termal gerilmelere maruz kalmaktadır. 100°C suda 1 dakika bekletilmesi sonucunda hem matriste hem de karbon fiberde genişleme meydana gelir, fakat PPS matriste ve karbon fiberde meydana gelen lineer termal genişleme oranları birbirinden oldukça farklıdır ve bu nedenle karbon fiber ile PPS matris ara yüzeyinde kayma gerilmeleri oluşur. Numuneler kaynar su içerisinde 1 dakika bekletildikten sonra hızlı bir şekilde buzlu suyun bulunduğu kaba daldırılmıştır. Numunelerin daldırıldığı kaplar arasındaki sıcaklık farkı yaklaşık 100°C'dir. Yorulma deneylerinde olduğu gibi çevrim sayısı arttıkça deformasyonlar gelişerek artar. Kompozitlerde kısa-kiriş-kayma-testi metodu (short-beam-shear-test method) ile tespit edilen tabakalar arası kayma dayanımından başka numunelerin eğme modülleri (flexural modulus) de ayrıca hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında eğme modülü termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde nerdeyse doğrusal olarak azalmıştır. Eğme modülü değerlerinde yüzüncü çevrim sonunda yaklaşık %10 luk azalma tespit edilmiştir. Polimer matrisli kompozitlerde su absorpsiyonu sıcaklığa, zamana, malzemenin kalınlığına ve mikroyapısına bağlı olarak değişir. Bununla birlikte polimerlerde ve polimer kompozitlerde modül; a) bağ kuvvetlerine (özellikle Van-der-Waals kuvvetlerine), b) moleküler mobilitenin değişimine bağlıdır. Düşük

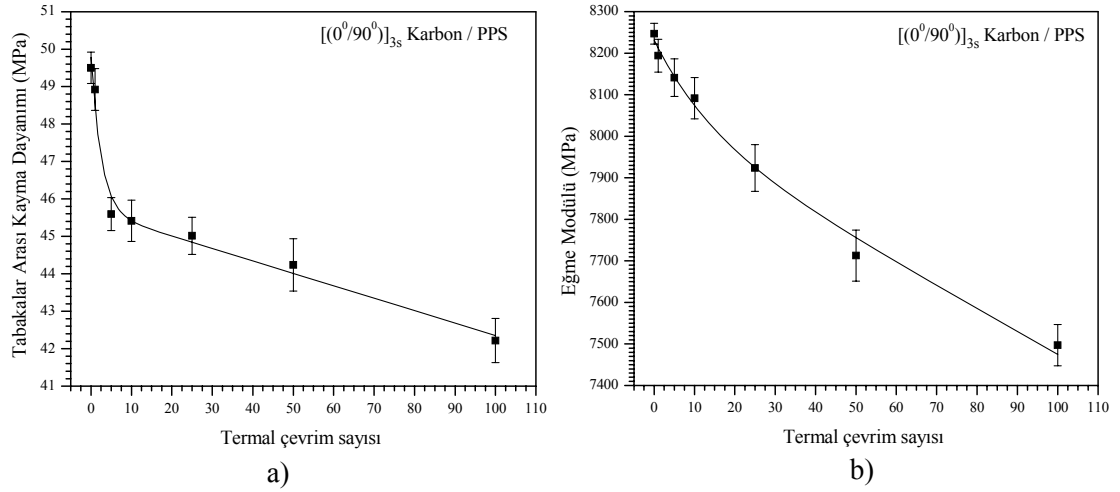
sıcaklıklarda polimer zincirleri kuvvetlidir ve modül Van-der-Waals kuvvetleri ile kontrol edilmektedir. Çamsı geçiş sıcaklığında ( $T_g$ ) ise segmentlerin hareketliliği artmaktadır ve dolayısı ile zincirler daha esnek hale gelmektedir ki bu da modülün azalmasına neden olmaktadır. Fiber ve matris arasındaki kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar ara yüzeyin yapısını bozmaktadır. Bilindiği gibi fiber/matris ara yüzeyi çatlağın ilerlemesi, yön değiştirmesi gibi olayları kontrol etmektedir.

Karbon fiber/polimer matris kompozitlerde güçlü ara yüzey bağları nedeniyle yüksek miktarda nem absorpsiyonu meydana gelmez (Russell, 2001). Buradan, kompozite olan nem absorpsiyonunun kapiler prosesi ile değil yayılım (difüzyon) yoluyla meydana geldiği sonucu ortaya çıkar. Polimer matris tarafından absorbe edilen nem önemli miktarda iken takviye edici faz olan karbon fiber tarafından absorbe edilen nem miktarı ise çok azdır. Bu olay nem absorpsiyonu etkisiyle fiber ile polimer matris arasında uyumsuz hacimsel genişmeye ve lokal gerilmelerin oluşmasına neden olur. Nemin penetrasyonu sonucu oluşan plastikleşme ve hidroliz nedeniyle polimer matrisin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinde değişimler meydana gelir.

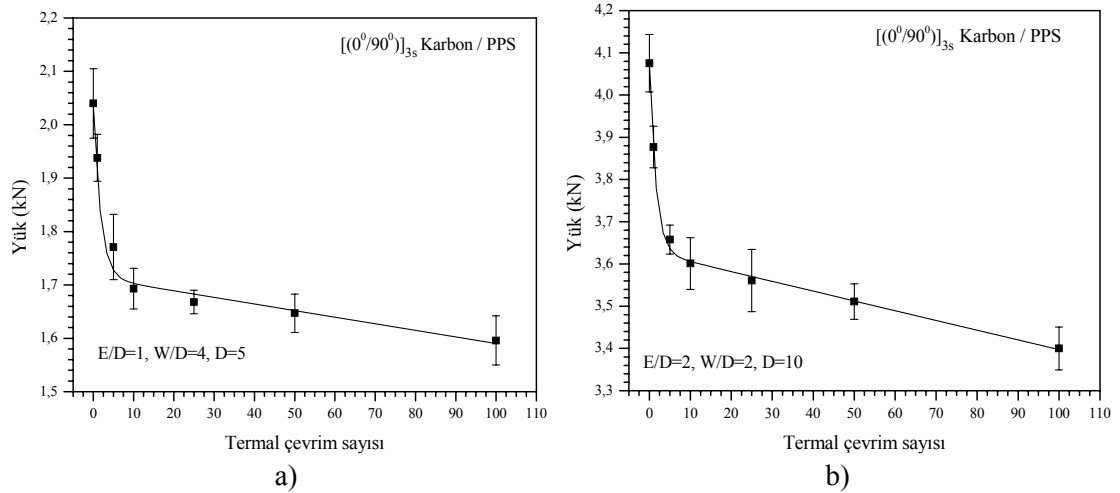
Şekil 4.68'de termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen yataklama yükü değerleri verilmiştir. Şekil 4.68 a ve b' de sırasıyla  $E/D=1$ ,  $W/D=4$ ,  $D=5$  ve  $E/D=2$ ,  $W/D=2$  ve  $D=10$  geometrik parametrelere sahip numunelerin hidrotermal yaşlandırma sonrasındaki yataklama yükü değerleri gösterilmiştir. Yorulma deneylerinde elde edilen sonuçlara benzer şekilde termal çevrim sayısı arttıkça yataklama yükü değerlerinde şekilden de görüldüğü gibi azalmalar meydana gelmiştir. Buna sebep olarak malzemede meydana gelen daha fazla sayıdaki genişmeler ve büzölmeler gösterilebilir. Termal çevrim sayısının artmasıyla gerilme konsantrasyonları ve yapıda absorbe edilen nem miktarı da artar. Bu artış gerilme dağılımını değiştirmekle kalmaz aynı zamanda ara yüzeyin degradasyonuna da neden olur.  $E/D=1$ ,  $W/D=4$  ve  $D=5$  geometrik parametrelili numunelerin yataklama yükü değerleri yaklaşık %20;  $E/D=2$ ,  $W/D=2$  ve  $D=10$  geometrik parametrelere sahip olanlar ise yaklaşık %17 mertebesinde azalmıştır.



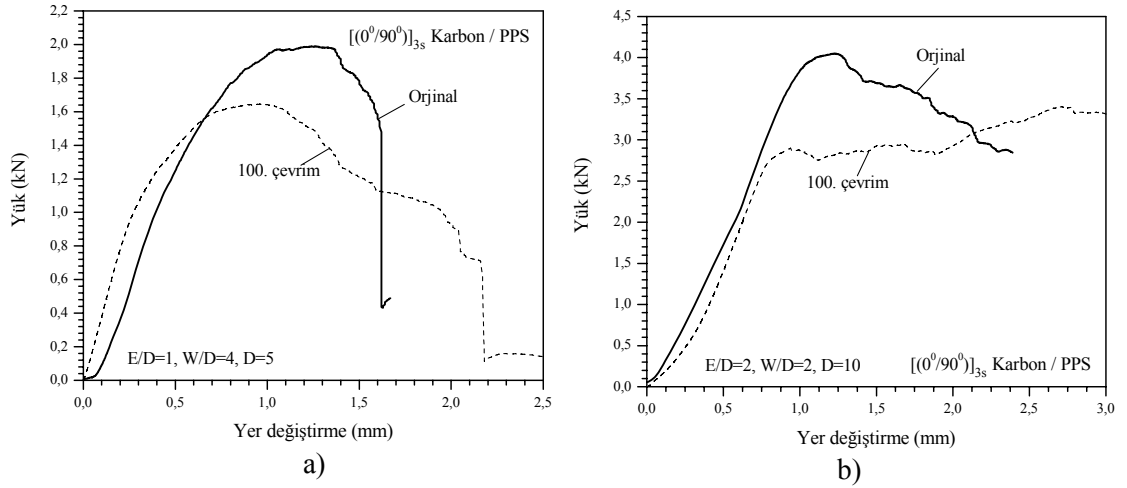
Şekil 4.69 a ve b' de sırasıyla E/D=1, W/D=4, D=5 ve E/D=2, W/D=2 ve D=10 geometrik parametrelili numunelerin yük-yer değıştirme eğrileri görülmektedir. 100 kere termal çevrime tabi tutulmuş numunenin orijinal numuneye kıyasla kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerji miktarı daha fazla olmuştur (Şekil 4.69 a ve b). Bu olay, karbon fiber/PPS matris arasındaki ara yüzey mukavemetinin yüksek olması nedeniyle ara yüzeyde düşük degradasyon oluşumunun söz konusu olması ve matristen fiberlere olan yük iletiminin devam etmesi şeklinde açıklanabilir. Yataklama yükü değerlerinde meydana gelen düşüş ise matriste meydana gelen plastikleşme (yumuşama) etkisiyle ilişkilendirilebilir.



Şekil 4.67: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen a) Tabakalar arası kayma dayanımı değerleri b) Eğme modülü değerleri



Şekil 4.68: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen yataklama yükü değerleri



Şekil 4.69:  $[(0^0/90^0)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri

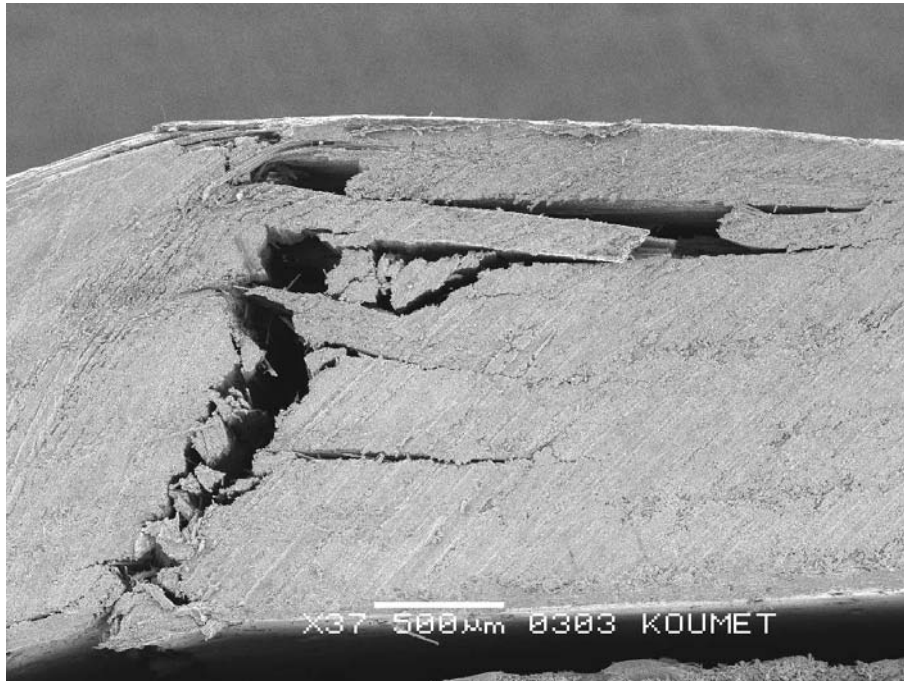
Şekil 4.70 ve 4.71'te tabakalar arası kayma testi sonucunda sırasıyla orijinal numunenin ve 100 kere termal çevrime tabi tutulmuş numunenin kırılma davranışları görülmektedir. İki şekil kıyaslandığında malzemeler arasında belirgin morfolojik değişimler olduğu açıkça görülmektedir. Orijinal numune şekilden de görüldüğü üzere gevrek kırılma davranışı göstermiştir. Çatlak ilerleme enerjisinin yüksek, çatlak ilerleme direncinin düşük olması nedeniyle tabakalar arasında meydana gelen delaminasyonlar oldukça belirgindir. Fiber/matris ara yüzey bağının yüksek olması fibere transfer edilen yük miktarının artmasına sebep olur ve dolayısıyla kompozitin toplam dayanımı artar fakat hasar da numune kalınlığı boyunca aniden gerçekleşir (Şekil 4.70).

Şekil 4.71'den görüldüğü üzere hidrotermal çevrimler esnasında yapıya absorbe edilen nem malzemenin kırılma direncini yumuşatma (plastikleşme) etkisiyle arttırmıştır ayrıca numune kalınlığı boyunca ani kırılma söz konusu değildir. Bu nedenle tabakalar arasında belirgin delaminasyonlara rastlanmamıştır. Plastikleşme etkisi fiber/matris ara yüzey bölgesinin degradasyonuna neden olan malzemenin yük taşıma kapasitesini azaltan bu nedenle oluşumu istenmeyen hasar mekanizmasıdır.

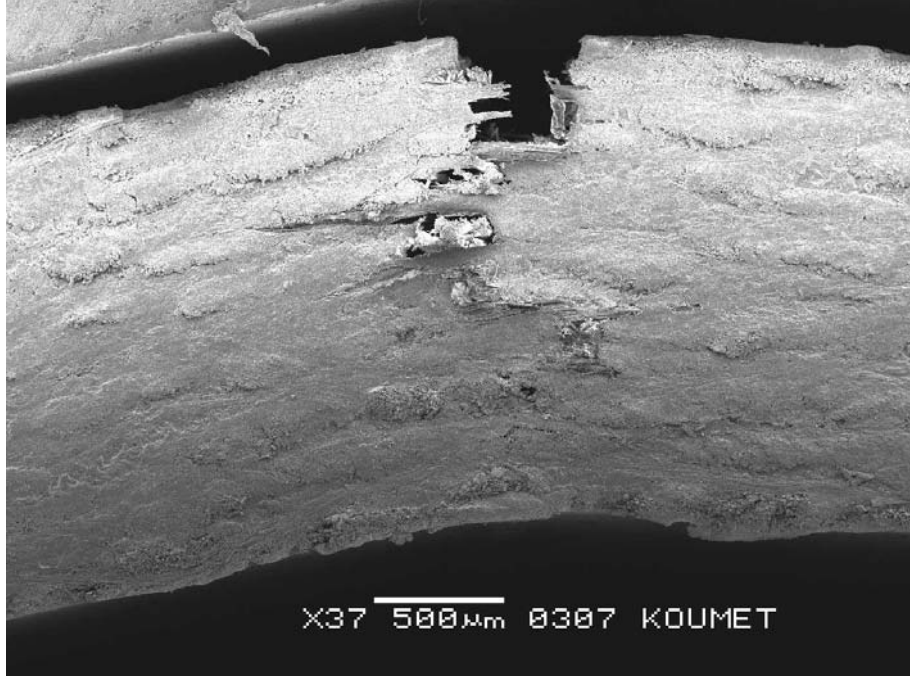
Orijinal numunede fiberlerde yığın (fiber bundle) şeklinde kırılmalara rastlanmıştır, ayrıca fiber yüzeylerinde matris kalıntıları söz konusudur. Bu oluşum orijinal

numunedeki fiber/matris ara yüzey dayanımının yüksek olmasından kaynaklanır (Şekil 4.72).

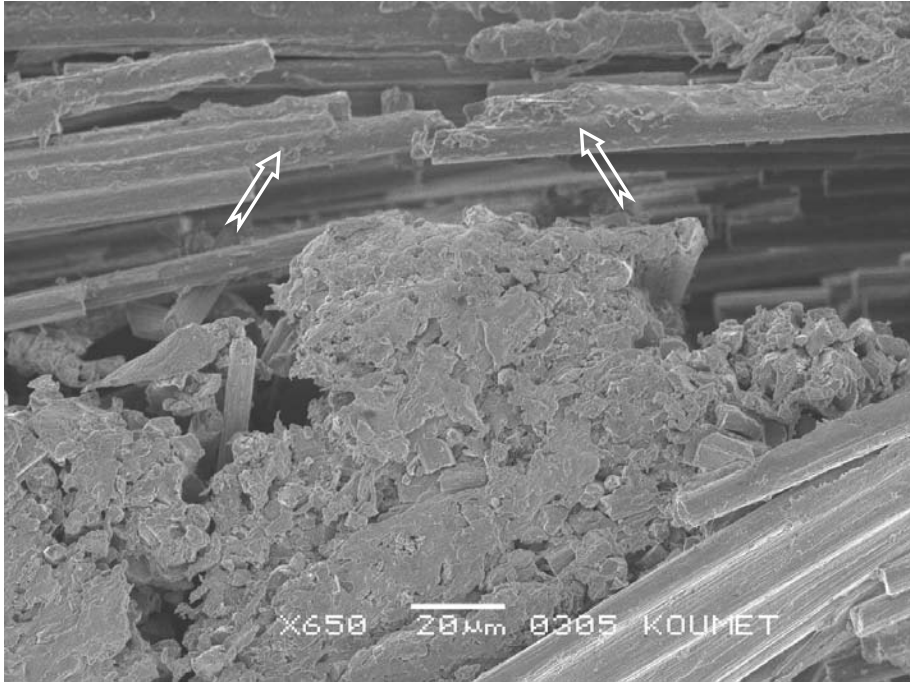
100 kere termal çevrime tabi tutulmuş numunede tekli fiber kırılmalarına rastlanmıştır. Bu olay zayıf fiber/matris ara yüzey bağımlılığını belirtmektedir. Meydana gelen hasarın düşük hasar uzaması nedeniyle fiberde başladığı düşünülmektedir. Hasar ara yüzey boyunca ilerleyerek yerinden çıkan fiberlerde büyük sıyrılma uzunluklarının gözlenmesine neden olmuştur. Fiberin matristen ara yüzey boyunca sıyrılması sonucunda fiber çıkıntıları (fiber protrusion) oluşmuştur (Şekil 4.73).



Şekil 4.70: Kısa kiriş kayma testi sonrasında orijinal numunenin kırılma davranışı



Şekil 4.71: 100 kere termal çevrime tabi tutulmuş numunenin kısa kiriş kayma testi sonrasında kırılma davranışı



Şekil 4.72: Orijinal numunenin fiber/matris ara yüzey mukavemetini ifade eden TEM fotoğrafı



Şekil 4.73: 100 kere termal çevrime tabi tutulmuş numunenin fiber/matris ara yüzey mukavemetini ifade eden TEM görüntüsü

#### 4.4.2. Cam/PEI ve cam/ PPS kompozit malzemelerde oluşan etki

Şekil 4.74 a'da  $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$  oryantasyona sahip sürekli cam fiber takviyeli PEI matrisli kompozitin termal çevrim sayısına bağlı olarak tabakalar arası kayma dayanımı değerleri görülmektedir. Üçüncü termal çevrim sonunda değerlerde ani bir düşüş söz konusudur. Buradan da anlaşılacağı üzere hidrotermal yaşlandırma üçüncü çevrim sonunda maksimum etkiyi göstermektedir. Orijinal numunenin tabakalar arası kayma dayanımı 52 MPa iken 3 kere hidrotermal çevrime maruz kalmış numunenin tabakalar arası kayma dayanımı yaklaşık 45 MPa dır. İlk üç çevrim içerisinde tabakalar arası kayma dayanımı %13,5 azalmıştır. Yüzüncü çevrim sonunda ise %19 mertebesinde azalma tespit edilmiştir. Değerlerden de anlaşıldığı üzere hidrotermal yaşlandırmanın yıkıcı etkisi üçüncü çevrim sonunda ortaya çıkmıştır. Şekil 4.74 b'de termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde eğme modülü değerleri verilmiştir. Yüzüncü çevrim sonunda bu değerlerde yaklaşık %10 azalma görülmüştür.

Şekil 4.75'te  $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$  oryantasyona sahip sürekli cam fiber takviyeli PEI matrisli kompozitin yataklama yükleri termal çevrim sayısına bağlı olarak verilmiştir. Farklı geometrik parametrelere sahip numunelerin yataklama yükleri termal çevrim

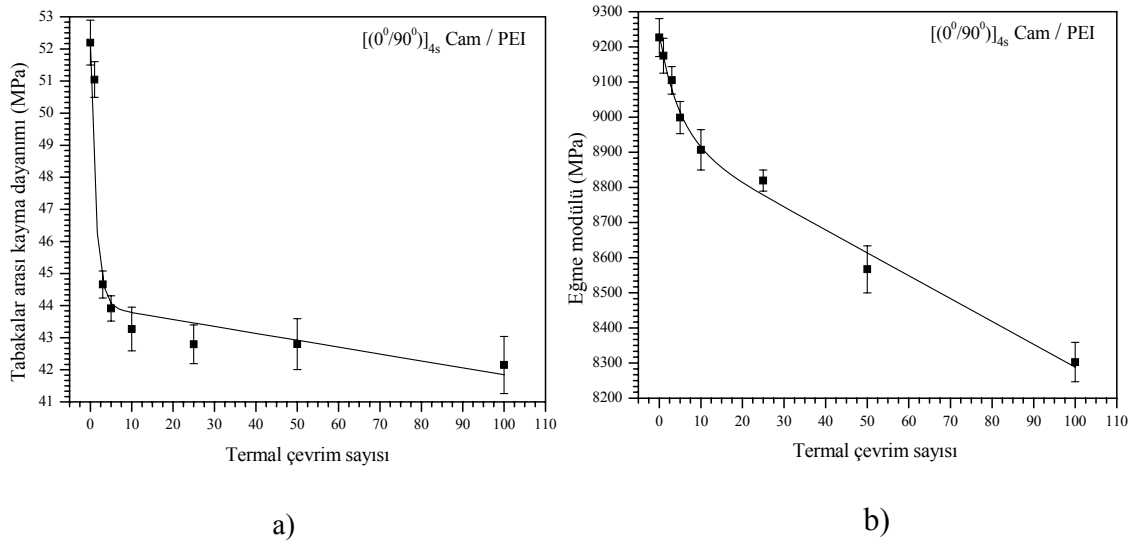
sayısının bir fonksiyonu şeklinde azalmıştır.  $E/D=1$ ,  $W/D=4$ ,  $D=5$  ve  $E/D=2$ ,  $W/D=2$  ve  $D=10$  geometrik parametrelili numunelerin yataklama yükü değerleri yüzüncü çevrim sonunda sırasıyla %26 ve %12 oranında azalmıştır.

Şekil 4.76'da polieterimit matrisli kompozitin yük-yer değıştirme eğrileri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi hidrotermal yaşlandırma her iki geometrik parametrelili kompozit malzemenin pim ile yük taşıma kapasitesini azaltmıştır. Bununla birlikte bağlantının tamamen hasara uğrayıncaya kadar absorbe ettiğı enerji miktarı da azalmıştır. Buna neden olarak cam fiber/polimer matris arasındaki zayıf ara yüzey bağı gösterilebilir. Hidrotermal yaşlandırma nedeniyle meydana gelen nem absorpsiyonu etkisiyle zaten zayıf olan ara yüzey bağı yıkıma uğramıştır. Böylece matristen fibere olan gerilme transferinin azalması malzemenin tokluğunu da düşürmüştür. Sonuç olarak fiber/matris ara yüzeyinde veya matriste, termal çevrimler ve nem absorpsiyonu sonucunda oluşan gerilmeler kompozitin mekanik özelliklerini azaltmıştır.

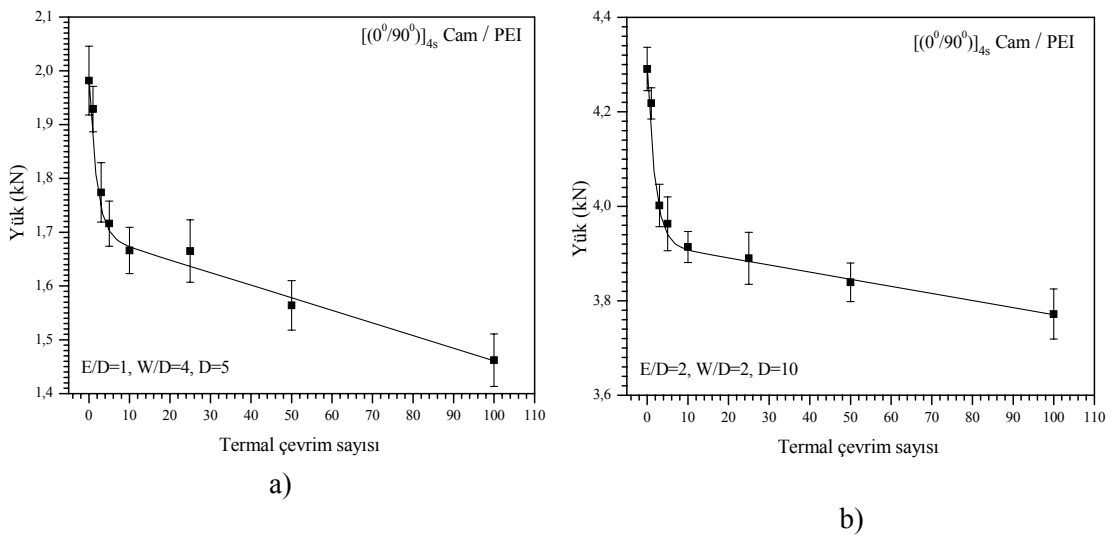
Şekil 4.77'de orijinal PEI matrisli malzemenin kısa kiriş kayma testi (short beam shear test) sonucunda elde edilen kırılma davranışı görülmektedir. Cam fiber/PEI matris ara yüzey dayanımının yüksek olması nedeniyle fiberin matristen sıyrılması söz konusu değildir. Çatlağın ilerlemesi ile birlikte kırılma fiberleri de kapsayacak şekilde gerçekleşmiştir. Tekli fiber kırılmaları yerine fiberlerde yığın şeklinde kırılmalar gerçekleşmiştir.

Şekil 4.78'de hidrotermal çevrime tabi tutulmuş PEI matrisli numunenin fiber/matris ara yüzey mukavemeti görülmektedir. Kompozitte hidrotermal yaşlandırma nedeniyle fiber/matris ara yüzeyinde ayrılmalar ve tabakalar arası delaminasyonlar meydana gelmiştir. Dolayısı ile oluşan gerilmelerin ara yüzey boyunca iletilmesi kısıtlanmıştır. Çatlağın ilerlemesi ile yığın şeklinde fiber kırılmalarından ziyade tekli fiber kırılmaları gerçekleşmiştir. Çekme bölgesindeki fiberlerin matristen sıyrılma uzunlukları zayıf fiber/matris adezyonu nedeniyle uzun olmuştur. Bunların tümü deformasyon ve çatlak ilerlemesi esnasında enerji absorbe eden mekanizmalar olarak yer almaktadır.

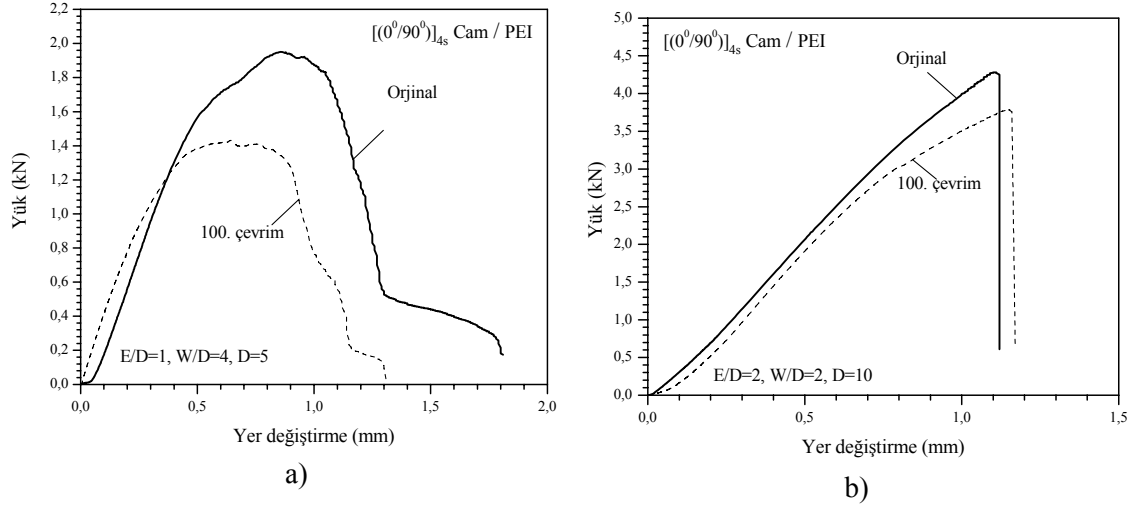
Hidrotermal çevrim sayılarının artmasıyla tabakalar arası kayma dayanımı (TAKD) değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Yüksek termal çevrim sayılarında daha büyük zorlanma etkisiyle (genleşme/büzülme) TAKD değerlerinde düşüme meydana gelmiştir. Bu büyük zorlanmalar fiber/matris ara yüzeyinde daha fazla ayrılmalara yol açmaktadır. Hidrotermal yorulma ile bağlantılı hasar mekanizmaları genellikle matris çatlaması, fiber/matris ara yüzey degradasyonu ve tabakalar arası delaminasyonlardır (Jang, 1999).



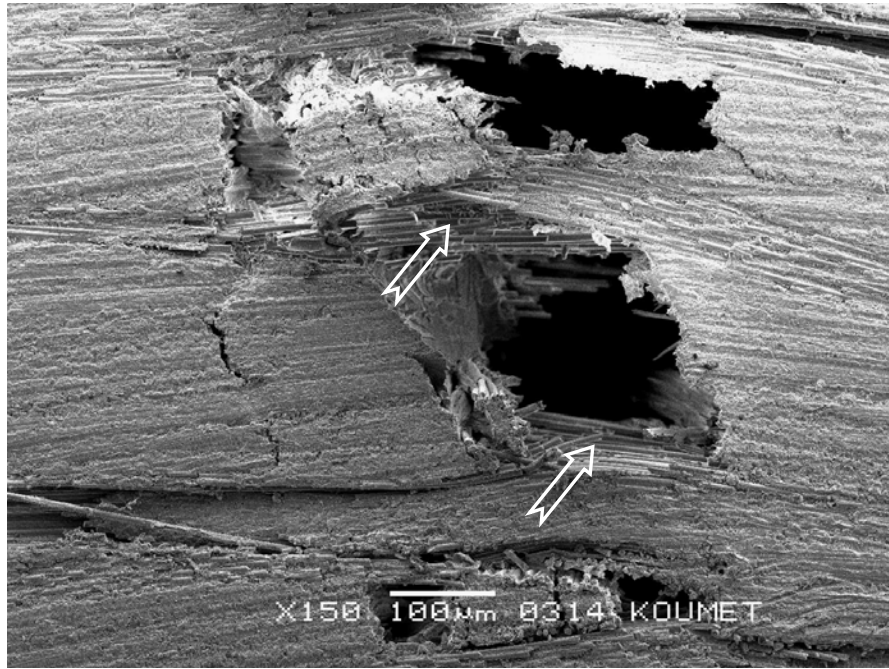
Şekil 4.74: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen a) Tabakalar arası kayma dayanımı değerleri b) Eğme modülü değerleri



Şekil 4.75: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen yataklama yükü değerleri



Şekil4.76:  $[(0^\circ/90^\circ)_{4s}]$  yönlenme düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri



Şekil 4.77:  $[(0^\circ/90^\circ)_{4s}]$  yönlenme düzenine sahip sürekli cam fiber takviyeli PEI matrisli orijinal numunenin fiber/matris ara yüzey mukavemetini ifade eden TEM görüntüsü





Şekil 4.78: 100 kere termal çevrime tabi tutulmuş  $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip sürekli cam fiber takviyeli PEI matrisli numunenin fiber/matris ara yüzey mukavemetini ifade eden TEM görüntüsü

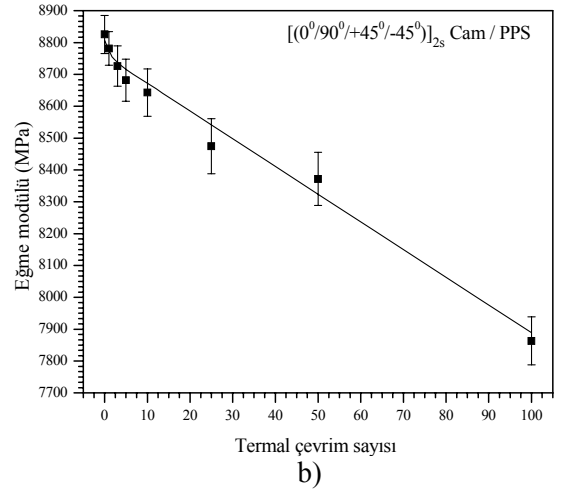
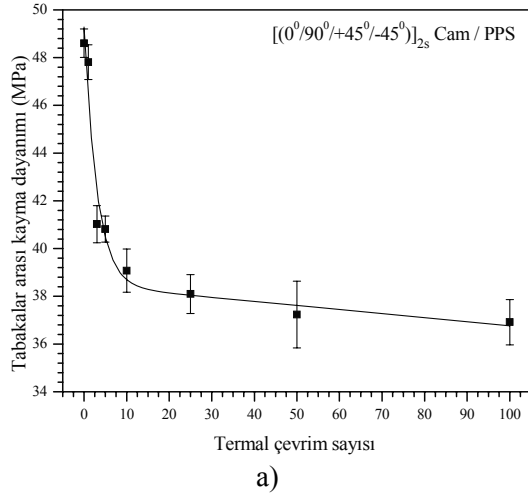
Şekil 4.79 a’da  $[(0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ)]_{2s}$  oryantasyona sahip sürekli cam fiber takviyeli PPS matrisli kompozitin termal çevrim sayısına bağlı olarak tabakalar arası kayma dayanımı değerleri görülmektedir. Üçüncü termal çevrim sonunda değerlerde ani bir düşüş olmuştur. Orijinal numunenin tabakalar arası kayma dayanımı 48,60 MPa iken 3 kere hidrotermal çevrime maruz kalmış numunenin tabakalar arası kayma dayanımı 41 MPa dır. İlk üç çevrim içerisinde tabakalar arası kayma dayanımı yaklaşık %16 azalmıştır. Yüzüncü çevrim sonunda ise %24 mertebesinde azalma tespit edilmiştir. Şekil 4.79 b’de termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde eğme modülü değerleri verilmiştir. Yüzüncü çevrim sonunda bu değerlerde yaklaşık %11 azalma görülmüştür.

$[(0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ)]_{2s}$  oryantasyona sahip sürekli cam fiber takviyeli PPS matrisli kompozitin tabakalar arası kayma dayanımı ve eğme modülü değerlerinde meydana gelen azalmalar  $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip sürekli cam fiber takviyeli PEI matrisli kompozitin değerlerinden daha fazla olmuştur. Buna sebep olarak PPS matriste cam fiberlerin yönlenme düzenlerinin geometrisi gösterilebilir. (+45°/-45°)

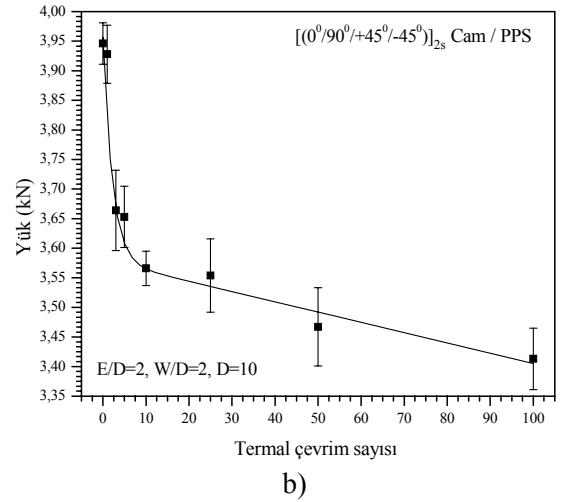
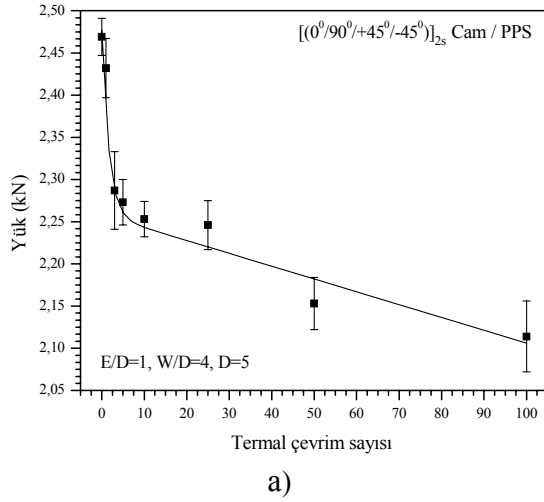
yönlenme düzeni kompozitin geometrik yapısını daha karmaşık hale getirdiğinden kalıntı gerilmeler yapıda daha etkili olmaktadır.

Polimer matrisli kompozitlerin pimli bağlantılarında hasar yükünü belirlemek önemlidir. Bağlantıya uygulanan yük rijitliğin azaldığı noktaya kadar lineer artış gösterir. Yük etkisiyle pim/delik temas yüzeyinde bası gerilmeleri oluşur ki bu gerilmeler fiberlerin mikro burkulmalarına ve delaminasyon hasarına neden olur.

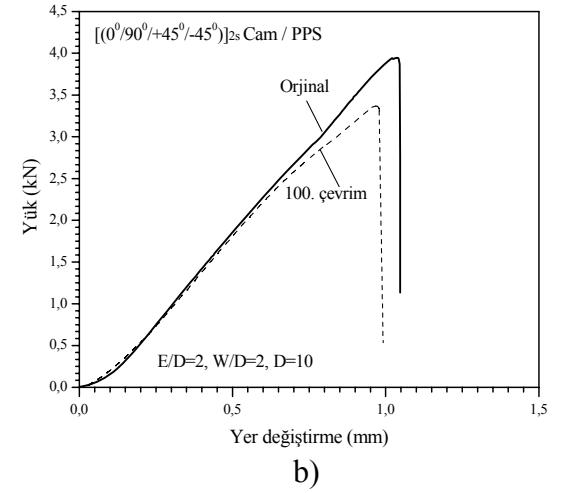
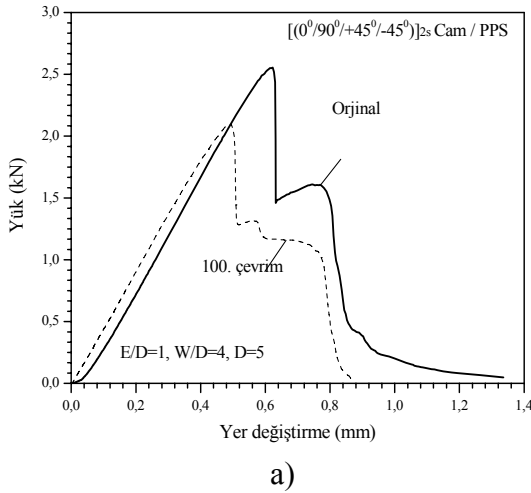
Çekme tipi hasara uğrayan bağlantılarda yükleme prosesi esnasında rijitlikte azalma görülmez. Bu yüzden bağlantının hasara uğradığı yük aynı zamanda maksimum hasar yüküdür (Şekil 4.76 b ve Şekil 4.81 a, b). Beklenildiği gibi bağlantıların yük taşıma kapasiteleri hidrotermal çevrim sayısı arttıkça azalacaktır (Şekil 4.75 a, b ve Şekil 4.80 a, b). Hidrotermal yaşlandırma sonunda  $[(0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ)]_{2s}$  oryantasyona sahip sürekli cam fiber takviyeli PPS matrisli kompozitin yük değerleri her iki geometrik parametre için (E/D=1, W/D=4, D=5 ve E/D=2, W/D=2 ve D=10) sırasıyla %14,4 ve %13,5 oranında azalmıştır (Şekil 4.80 a, b). Suyu daldırma süresi uzadıkça hasar yükünde azalma söz konusudur çünkü yapıya penetre olan su miktarı zamanla artacaktır. Çekme tipi hasara uğrayan bağlantıların yük taşıma kapasiteleri sıcaklık değişimlerine ve suya maruz kalma sürelerine bağlı olarak değişir. Hidrotermal yaşlandırmada sıcaklık, su absorpsiyonu ve çevrim sayısı gibi parametreler polimer matrisli kompozitlerin pimli bağlantılarının yük taşıma kapasitelerinde azalmaya neden olmaktadır. Termal çevrim sayıları bağlantıların yük taşıma kapasitelerini suya daldırma sürelerine kıyasla daha fazla etkilemektedir (Turvey ve Wang, 2005). Şekil 4.81'de  $[(0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ)]_{2s}$  yönlenme düzenindeki sürekli cam fiber takviyeli PPS matrisli kompozitin termal çevrim sayısına bağlı olarak yük-yer değiştirme eğrileri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi her iki geometrik parametre için numunelerin 100. çevrim sonunda pim ile yük taşıma kapasiteleri ve tokluk değerleri azalmıştır.



Şekil 4.79: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen a) Tabakalar arası kayma dayanımı değerleri b) Eğme modülü değerleri



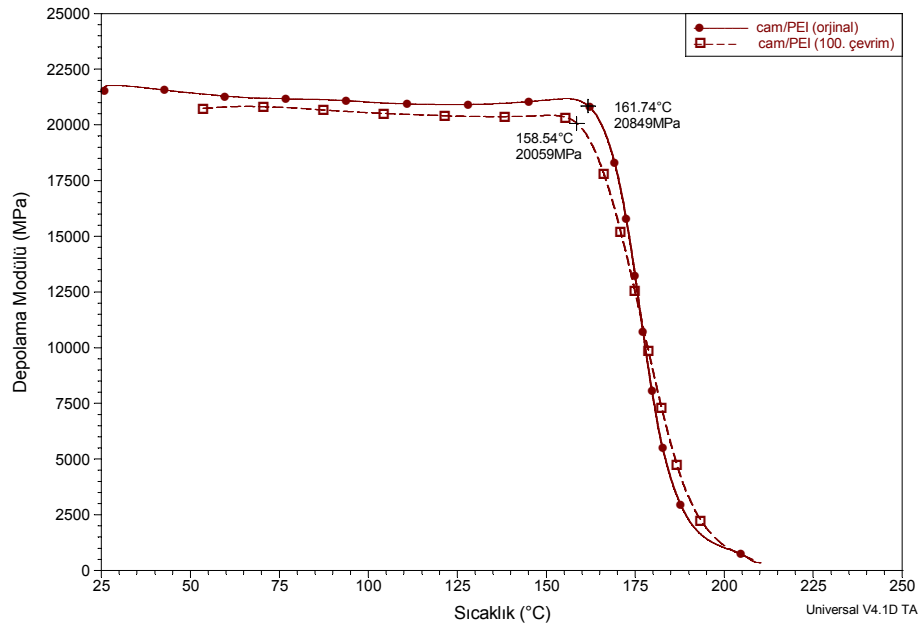
Şekil 4.80: Termal çevrim sayısının fonksiyonu şeklinde elde edilen yük değerleri



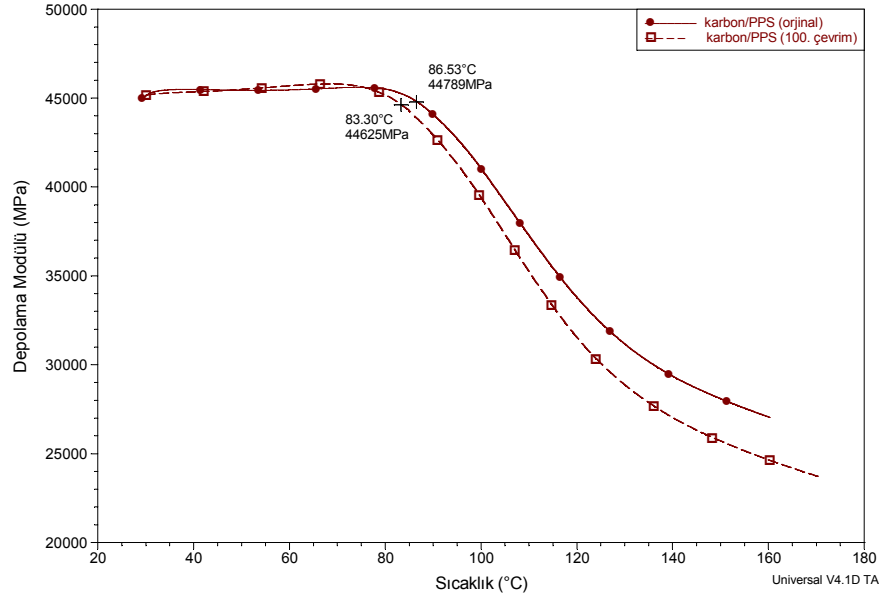
Şekil 4.81:  $[(0^{\circ}/90^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ})_{4s}]_{\text{yönlene düzenine sahip levhanın yük- yer değiştirme eğrileri}}$

#### 4.5. Hidrotermal çevrimlere maruz bırakılmış polimerik kompozitlerin dinamik mekanik ısıl analiz (DMTA) sonuçları

Tan  $\delta$  (mekanik kayıp faktör) değerlerinin büyüklüğündeki değişimler hidrotermal yaşlandırma esnasında polimer matrisin absorbe ettiği nem miktarına bağlıdır (Costa ve diğ. 2005). Polimer matris içersine absorbe olan nem miktarı arttıkça tan  $\delta$  değerlerinde artış (Şekil 4.86 ve Şekil 4.87), kompozitin camsı geçiş sıcaklığında ( $T_g$ ) ise düşüş meydana getirir. Mekanik kayıp faktör değerlerinde meydana gelen yükselme depolama modülü (elastik modül,  $E^1$ ) değerlerinin azalması ile açıklanabilir.  $\tan \delta = \frac{E''}{E^1}$  olması nedeniyle tan  $\delta$  değerlerindeki artışın sebebi  $E^1$  değerlerindeki azalmadan kaynaklandığı açıkça görülmektedir.  $E^1$  değerlerindeki azalma ise termal çevrimler esnasında fiber ve matris arasındaki termal genleşme katsayısı farklılığı nedeniyle fiber/matris ara yüzeyinde oluşan kalıntı gerilmeler etkisiyle bu bölgenin degradasyona uğraması, bunun sonucunda da su molekülleri fiber/matris ara yüzeyi boyunca ilerleyerek (kapiler akış) matrise difüze olması şeklinde açıklanabilir (Şekil 4.82).



Şekil 4.82:  $(0^0/90^0)_{4s}$  yönlenme düzenine sahip Cam/PEI kompozitinin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin depolama modülü ( $E^1$ ) değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.83:  $(0^0/90^0)_{3s}$  yönlenme düzenine sahip karbon/PPS kompozitinin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin depolama modülü ( $E^1$ ) değerlerinin karşılaştırılması

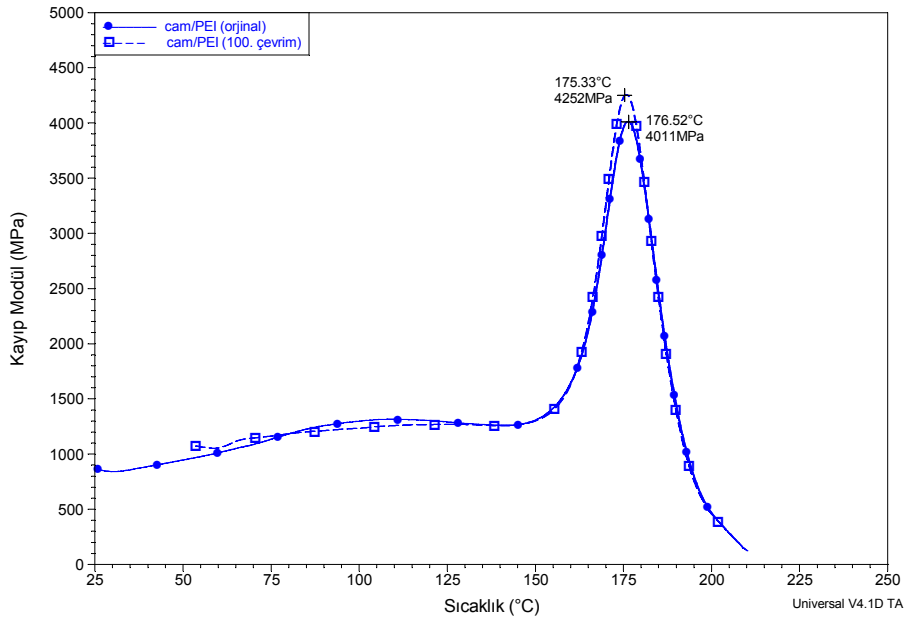
Şekil 4.82'de görüldüğü gibi 100 çevrim hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış deney numunesi, camsı geçiş sıcaklığının altında, orijinal numuneye kıyasla daha düşük depolama modülüne sahiptir. Orijinal numune örneğinde eğrideki düşüş daha yüksek sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Bahsedilen bu sıcaklık değeri aynı zamanda camsı geçiş sıcaklığını da ifade etmektedir. Cam/PEI kompozitte termal çevrimler malzemenin elastik davranışını etkilemiştir. Malzemenin depolama modülü değerlerindeki azalma bu oluşumun göstergesidir. PEI amorf bir polimer olduğundan camsı duruma geçiş sıcaklığında depolama modülünün değeri düşüş göstermiştir.

Şekil 4.83 incelendiğinde ise yaşlandırılmış ve orijinal numunelerin depolama modülü değerleri camsı geçiş sıcaklığına kadar yaklaşık aynı olmuştur. Yalnız bu sıcaklık değerinden sonra termal çevrime maruz kalmış deney numunesinin depolama modülünde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum karbon/PPS kompozitinin yapısında var olan nemin etkisinin artan sıcaklıkla yükselmesi ve oluşan plastikleşme ile açıklanabilir. PPS yarı kristalli bir polimer olduğundan camsı duruma geçiş sıcaklığında depolama modülünün değeri amorf bir polimer olan PEI gibi bir düşüş göstermemiştir. Bunun sebebi PPS yapısının kristalin kısmındaki molekül zincirleri arasındaki kuvvetlerdir.  $T_g$  bölgesinde sadece amorf yapıdaki

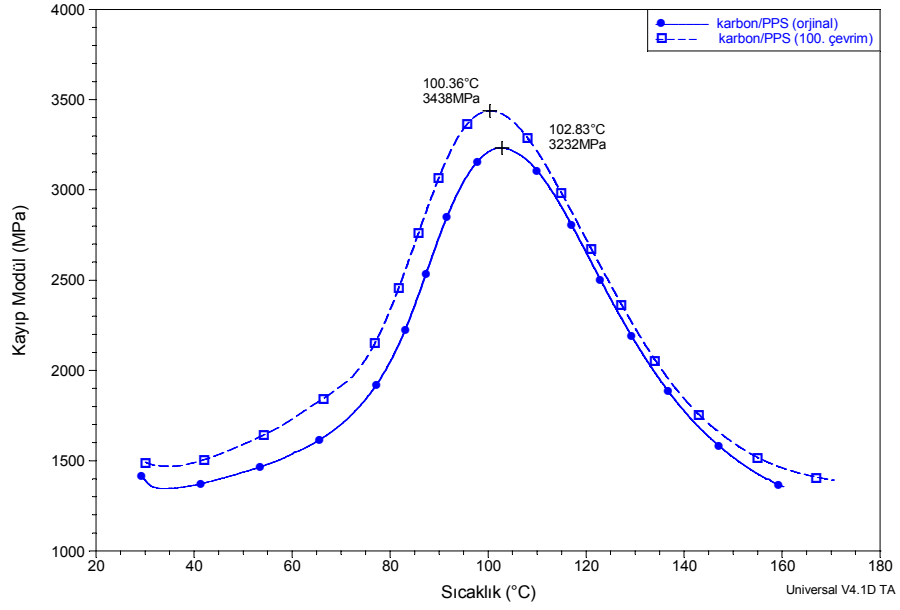
zincir birimleri hareket halindedir, bu hareket bütün zincir uzunluğunda değil sadece amorf kısmına ait zincir birimlerinde oluşmaktadır. Bu bölgede yapıda meydana gelen değişim kristalin kısım tarafından kontrol edilmektedir.

Termal çevrimlere maruz bırakılmamış numunelerin  $T_g$  değerleri daha büyüktür.  $T_g$  değerlerinde meydana gelen değişim su moleküllerinin polimer zincirleri ile olan reaksiyonuna bağlıdır (Şekil 4.84 ve Şekil 4.85). Su molekülleri polimer zincirleri bir arada tutan Van der Waals ve hidrojen bağlarını bozarak  $T_g$ ' nin azalmasına neden olur (Zhou ve Lucas, 1999).

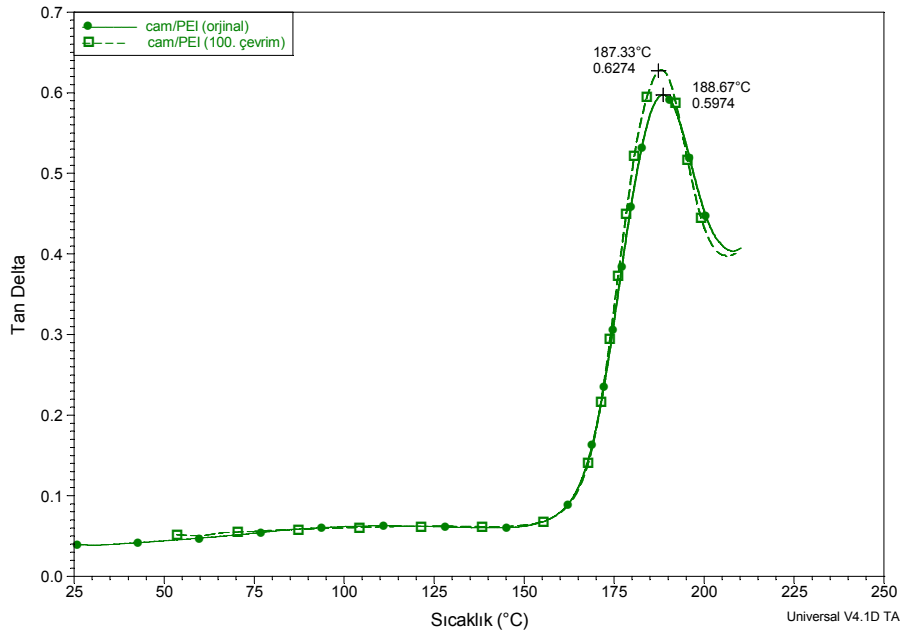
Karbon/PPS kompozitin hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış ve orijinal deney numunelerinin kayıp modül değerlerinde belirgin bir farklılık söz konusudur (Şekil 4.85). Buradan orijinal ve yaşlandırılmış numunelerin farklı viskoz davranış gösterdikleri sonucu ortaya çıkmaktadır. Yaşlandırmaya maruz kalmış numunenin kayıp modül değerlerindeki artış, depolama modülünde belirgin bir değişim olmaması nedeniyle kayıp faktör ( $\tan \delta$ ) değerlerinde de artışa neden olmuştur (Şekil 4.87).



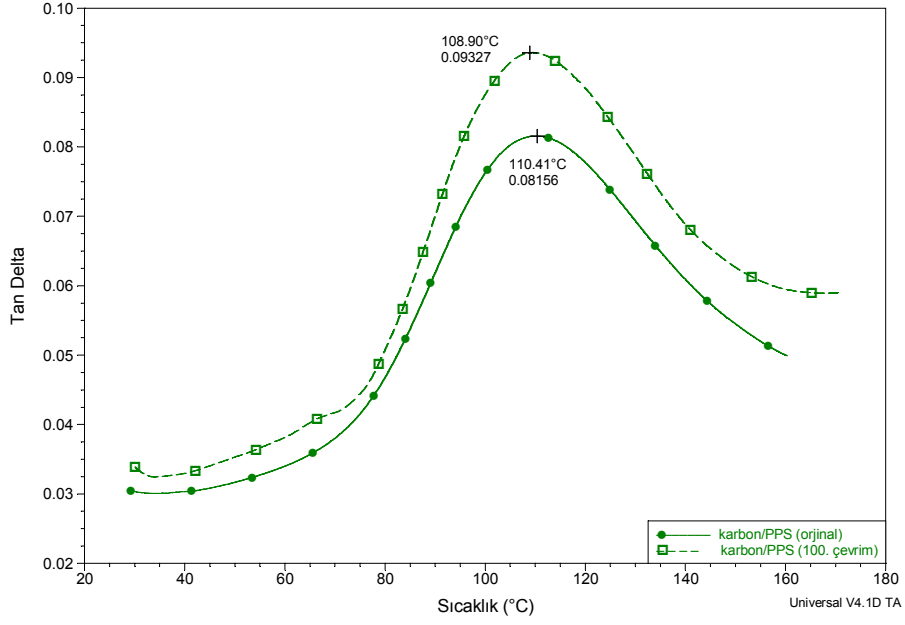
Şekil 4.84:  $(0^0/90^0)_{4s}$  yönlenme düzenindeki Cam/PEI kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin kayıp modül ( $E''$ ) değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.85:  $(0^0/90^0)_{3s}$  yönlenme düzenindeki karbon/PPS kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin kayıp modül ( $E''$ ) değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.86:  $(0^0/90^0)_{4s}$  yönlenme düzenine sahip cam/PEI kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin tan delta ( $\tan \delta$ ) değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.87:  $(0^0/90^0)_{3s}$  yönlenme düzenine sahip karbon/PPS kompozitin 100 çevrimlik hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış ve orijinal deney örneklerinin tan delta ( $\tan \delta$ ) değerlerinin karşılaştırılması

Yapıya absorbe edilen nem polimerik kompozitlerde plastikleşme veya çatlak oluşturma etkisi yarattığı daha önce söylenmişti. Bunun yanında nem absorpsiyonu matriste şişkinliğe de (swelling) neden olur. Nemin etkisiyle şişen matris yapıda gerilme yaratır. Şişmenin neden olduğu gerilme kritik değere ulaştığında matriste çatlaklar meydana gelebilir. Bu mekanizma fiber/matris ara yüzeyinde degradasyona neden olur, bu nedenle de polimerik kompozitin mekanik özellikleri kötüleşir. Mekanik özelliklerdeki kötüleşme termal çevrim sayısındaki artış ile ilgili olduğu ve  $\tan \delta$  değerlerinde yükselmeye neden olduğu söylenebilir (Şekil 4.86 ve Şekil 4.87). Nem absorpsiyonunu hızlandıran sıcaklık, nem ve numune boyutu gibi parametreler malzeme performansının uzun ömürlü olması istenildiğinde kritik durum yaratabilir.



## BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

1.  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  ve  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna sahip sürekli karbon fiber takviyeli PPS kompozitlerin statik yükleme şartlarında pim ile yük taşıma performansları incelenmiştir. Yapılan bağlantılarda optimum geometrik boyutları elde etmek için, test edilen numunenin kenarından delik eksenine olan mesafesinin pim çapına oranı (E/D) ve numune genişliğinin pim çapına oranı (W/D) testler esnasında sistematik olarak değiştirilmiştir. Bağlantıların performanslarının geometrik parametrelerin değişimi ile yakından ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

$[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna sahip kompozitlerin  $[(45^\circ/-45^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna kıyasla daha fazla yük taşıdıkları tespit edilmiştir. Her iki oryantasyona sahip malzemeler için optimum geometrik boyutlar E/D oranının 2, W/D oranının 4 ve pim çapı D'nin de 10 olması halinde elde edilmiştir.  $[(0^\circ/90^\circ)]_{3s}$  oryantasyonuna sahip numunelerde E/D oranının 1 olması halinde kayma tipi hasar meydana gelir. E/D oranının 2'den büyük olması halinde elde edilen kuvvet değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir.

Kayma tipi ve çekme tipi hasarda yükte meydana gelen azalma daha fazla ve anidir. Buna karşın yataklama tipi hasarda yükteki düşüş ani değildir. Bu nedenle yataklama tipi hasara uğrayan bağlantılar daha sağlam ve güvenilirdir. Bağlantıların performanslarına bakıldığında çekme dayanımlarının numune genişliğine ve takviye elemanının oryantasyonuna bağımlı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bağlantı bölgesinin kayma tipi hasara uğraması ise takviye elemanının yönlenme düzenine ve delik ekseninden serbest kenara olan mesafeye (E) bağlıdır.

Sonuç olarak bu tip bağlantılarda bağlantının geometrik parametreleri malzemenin taşıyacağı yük değerlerini ve oluşacak hasar tipini yakından etkilemektedir. Geometrik parametrelerin uygun seçilmesi halinde daha fazla yük taşınması ve daha güvenli olan yataklama tipi hasarların meydana gelmesinin sağlanabileceği göz önüne alınarak tasarımların yapılması gerekmektedir.

2.  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  ve  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip PPS matrisli sürekli cam fiber takviyeli kompozitlerin pimli bağlantıları araştırılmıştır. Bağlantı davranışlarının geometrik parametreler ile yakından ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Kritik  $E$  mesafesi deneysel olarak elde edilmiştir ve bu mesafenin bağlantının genişliği ile ilişkili olduğu gösterilmiştir.

$E/D$  oranında meydana gelen artış yataklama dayanımını arttırmıştır. Ancak  $E/D$  oranının 4'ten büyük olması bağlantının yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Dolayısı ile kritik  $E/D$  oranı 4'tür.

Aynı  $E/D$  oranlarında  $D=10$  olması halinde  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzenine sahip kompozitlerde yataklama dayanımı  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenmeye kıyasla daha yüksektir. Aynı  $E/D$  ve  $D=5$  olması durumunda  $[(0^0/90^0)]_{4s}$  yönlenme düzenine sahip levhaların bağlantıları  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  konfigürasyonuna göre daha mukavemetlidir.  $[(0^0/90^0)/(+/-45^0)]_{2s}$  yönlenme düzeninde ve  $D=5$  olması durumunda  $W/D$  oranındaki artış yataklama yükünde de artış meydana getirir. Bu durum verilen yönlenme düzeni ve geometrik parametreler için geçerlidir. Oluşan hasar tipleri  $W/D$  oranının fonksiyonu şeklindedir.

3. Hidroklorik asit içeren bir ortamda kullanım söz konusu olması halinde cam fiber takviyeli PPS kompozitin ortamdan etkilenerek performansının azalacağı dikkate alınarak tasarım yapılmalıdır. Korozyon ortamının konsantrasyonu, maruz kalma süresi vs malzemede oluşacak hasarların oluşumunda önemli faktörlerdir. Literatürde de belirtildiği gibi cam fiberlerde asit ortamda yüzey özelliklerinde deformasyonlar oluşmaktadır. Bunun yanı sıra fiber/matris ara yüzey mukavemetinin ve tabakalar arasındaki delaminasyon dirençlerinin azalması malzemelerin deformasyon karakteristikleri değişmektedir. Yaklaşık 16 hafta sonunda % 90'ın üzerinde

performans düşüşü gözlenmiştir. Kırılma ve hasar morfolojilerinde ciddi farklılıklar tespit edilmiştir. Malzemede meydana gelen fiziksel değişimler malzemenin mukavemet değerlerini ciddi olarak etkilemiştir.

4. Amonyum hidroksit ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) içeren bir ortamda cam fiber takviyeli PEI matrisli kompozitlerin pim ile yük taşıma performansları incelenmiştir. Ortamın konsantrasyonu ve kompozitin bu ortamda bekletilme süresi malzemenin çözeltiyi absorbe etme davranışını yakından etkilediğini göstermiştir. Üç aya kadar kullanım süresinde fiber/matris ara yüzey dayanımında ihmal edilebilir mertebede bir değişim gözlenmiştir. Bu sürede kompozitin yük taşıma kapasitesinde belirgin bir azalma görülmemiştir. Yüksek ara yüzey mukavemeti nedeniyle yapıya absorbe olan çözelti matris eğilimli bir olgudur. Bu absorpsiyon davranışında geçen birim zamanda daha fazla miktardaki çözelti yapı tarafından absorbe edilmektedir. Bu etki polieterimit matrisin solvent içerisinde çözünme kinetiğini daha da arttırmaktadır. Gerçekleşen olay polimer matrisin kimyasal çözelti ile olan temas süresi ile ilişkilidir. Diğer taraftan uzun temas süresi fiber/matris ara yüzey mukavemetini azaltacağından absorpsiyon davranışı matris eğilimli olmaktan çıkıp ara yüzey eğilimli bir olgu haline dönüşmektedir. Düşük ara yüzey mukavemeti kompozite olan çözelti penetrasyonunu kapiler etki ile daha kolay yoldan olmasını sağlamaktadır. Dolayısı ile matrisin absorpsiyon prosesine olan etkisi fiber/maris ara yüzeyine kıyasla çok daha azdır. Sonuçta zamana bağlı olarak tabakalar arası delaminasyon direncinin ve fiber/matris ara yüzey dayanımının azalması malzemenin bu ortamdaki pim ile yük taşıma kapasitesini azaltmıştır.

5.  $[(0^0/90^0)]_{3s}$  yönlenme düzenine sahip sürekli karbon fiber takviyeli PPS matrisli kompozit plakalar hidroklorik asit çözeltisi içerisinde 6 ay süre ile bekletilerek asidik ortamın kompozit malzemenin statik yükleme koşulları altında pim ile yük taşıma performansını ne şekilde etkilediği tespit edilmiştir. Saldırgan çevre koşullarında ara yüzey bölgesi degradasyona uğradığından bağlantı bölgesi düşük hasar toleransına ve dayanıma sahiptir. Buna neden olarak hasar gelişiminin ara yüzey bölgesi tarafından kontrol edilmesi gösterilebilir. Hidroklorik asit çözeltisi fiber/matris ara yüzey bağı özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek kompozitin pim ile yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Asidik ortam fiber/matris ara yüzey dayanımı yanında aynı zamanda

tabakalar arası delaminasyon direncinde de azalmalara neden olarak yataklama dayanımı değerlerinde %38'lere varan düşüşe sebebiyet vermiştir.

6. Tekrarlı yüklemeler altında karbon fiber takviyeli PPS kompozitte meydana gelen hasar mekanizmaları ve bunun sonucu oluşan yapısal degradasyon deneysel olarak araştırılmıştır. Tekrarlı yüklemeler sonucunda yataklama yükünde meydana gelen azalma, fiber kırılmaları ve iç yapı kusurları sonucunda oluşan fiber/matris ara yüzey ayrılmaları ile açıklanabilir. Fiber matris ara yüzey ayrılmaları nedeniyle oluşan çatlaklar kompozitin yorulma performansını azaltan en önemli hasar mekanizması olarak tanımlanabilir. Bütün geometrik parametreler incelenerek yapılan değerlendirme sonucunda tekrarlı yüklemeye maruz kalmış ve statik olarak yüklenmiş numunelerde maksimum yataklama dayanımının  $E/D=2$ ,  $W/D=4$  ve  $D=10$  olması halinde elde edildiği görülmüştür.

7. Bu çalışma ile termal çevrimler ve nem absorpsiyonunun karbon/PPS malzemede mekanik özellikler ve hasar davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu malzemeden hazırlanmış numuneler iki farklı sıcaklıktaki suya periyodik olarak daldırılmıştır. Kırılma yüzeylerinin incelenmesiyle nem absorpsiyonu nedeniyle fiber/matris ara yüzeyinin degradasyona uğradığı ve PPS matriste ise yumuşama meydana geldiği görülmüştür. Matrisin absorbe ettiği nem miktarı karbonun absorbe ettiği miktardan fazla olduğundan karbon/PPS kompozitte nem absorpsiyonunun matris ağırlıklı bir olgu olduğu sonucuna varılır (Botelho ve diğ. 2005). Bu tip ortamlara maruz kalınması durumunda malzemenin tabakalar arası kayma dayanımı, eğme modülü ve yataklama dayanımı değerlerinde belirli oranlara varan azalmalar söz konusudur.

Yüzüncü çevrim sonunda tabakalar arası kayma dayanımı değerlerinde ~ %15'lik azalma tespit edilmiştir. Eğme modülü değerlerinde yüzüncü çevrim sonunda ~ %10'luk azalma meydana gelmiştir.

$E/D=1$ ,  $W/D=4$  ve  $D=5$  geometrik parametrelili numunelerde yataklama yükü değerleri ~ %19;  $E/D=2$ ,  $W/D=2$  ve  $D=10$  geometrik parametrelere sahip olanlar ise ~ %17 azalmıştır.

8. Cam/PEİ ve cam/PPS kompozitler belirli çevrim sayısı ile hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılarak bu olgu sonucunda ortaya çıkan hasar mekanizmaları hakkında bilgi edinilmiştir. Cam fiberlerin matris ile olan zayıf adhezyonu nedeniyle hidrotermal yaşlandırmanın yarattığı etkinin fiber/matris ara yüzey ağırlıklı bir oluşum olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Termal çevrim sayısına bağlı olarak hidrotermal yaşlandırma etkisiyle meydana gelen fiber/matris ara yüzey ayrılmaları ve tabakalar arası delaminasyonlar cam fiber takviyeli polimerik kompozitlerde mekanik özelliklerin azalmasına neden olmuştur.

Yüz çevrimlik hidrotermal yaşlandırma sonrasında cam/PPS kompozit numunenin tabakalar arası kayma dayanımında yaklaşık %24 azalma meydana gelmiştir. Cam/PEİ kompozit numunede ise bu değer yaklaşık %19 olmuştur.  $[(0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ)]_{2s}$  yönlenmeye sahip cam/PPS kompozit numunedeki düşüş  $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$  cam/PEİ kompozitten daha fazla olmuştur. Buna sebep olarak var olan yönlenme nedeniyle yapı geometrisinin daha karmaşık olması gösterilebilir.

Cam/PPS ve cam/PEİ kompozit numunelerin eğme modülü değerlerinde sırasıyla %11 ve %10 azalma tespit edilmiştir.  $[(0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ)]_{2s}$  Cam/PPS ve  $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$  cam/PEİ kompozitlerin E/D=2, W/D=2 ve D=10 geometrik parametrelili numunelerinde yataklama yükü değerleri sırasıyla yaklaşık %13 ve %12 azalmıştır.

$[(0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ)]_{2s}$  Cam/PPS ve  $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$  cam/PEİ kompozitlerin E/D=1, W/D=4 ve D=5 geometrik parametrelili numunelerinde yataklama yükü değerleri sırasıyla yaklaşık %14 ve %26 azalmıştır. Yukarıdaki geometrik parametrelere sahip olan numunelerin yataklama yükü değerlerinde meydana gelen azalmalar arasındaki belirgin farkın E/D=1 olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

9. Hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış numunelerin camsı geçiş sıcaklığındaki ( $T_g$ ) azalma termal çevrim sayısı ve buna bağlı olarak absorbe edilen nem miktarı ile birlikte artmaktadır. Yapıdaki nem derecesi  $T_g$ 'de değişimlere sebebiyet verir. Bu değişimler matris sisteminin moleküler yapısına ve fiber/matris ara yüzey etkileşimine bağlıdır. Fiber/matris ara yüzeyi boyunca meydana gelen nem absorpsiyonu ara yüzeyde ayrılmalara ve bunun sonucunda da degradasyona neden

olur. Sıcaklık ile hızlandırılmış nem absorpsiyonu fiber/matris ara yüzey bağımlı zayıflatarak fiberlerin de nemden etkilenmesine neden olmaktadır. Çevresel etkilere maruz kalmış numunelerin  $T_g$  değerlerinde meydana gelen azalma amorf bölgede polimer zincir mobilitesinin artmasına neden olan plastikleşme ile açıklanabilir.

## 5.2. Öneriler

Gerçekleştirilen çalışmada tek bindirmeli bağlantı şekli kullanılarak kompozit tabakaların yük taşıma kapasiteleri incelenmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda bağlantı elemanı sayısı artırılarak değişik bağlantı konfigürasyonları elde edilebilir ve bu durumdaki bağlantının yük taşıma performansı tespit edilebilir.

Yorulma testleri  $10^3$  çevrime ulaşılan kadar devam ettirilmiştir. Çevrim sayısının artırılması ile pim ile yük taşıma performansında meydana gelecek değişim araştırılabilir. Termal çevrim ve hidrotermal yaşlandırmanın yarattığı etkiler polimerlerin termal ve morfolojik özellikleri ile daha detaylı ilişkilendirilerek incelenebilir.

## KAYNAKLAR

Abedian, A., Szyszkowski, W., “Influence of the free surface on the thermal stresses in unidirectional composites”, *Composites Part A*, 28A, 573-579, (1997).

Akay, M., “Bearing strength of as-cured hygrothermally conditioned carbon fiber/epoxy composites under static and dynamic loading”, *Composites*, 23: 101-108, (1992).

Akkurt, S., “Plastik Malzeme Bilgisi”, *Birsen Yayinevi*, ISBN: 975-511-055-0, İstanbul, (1991).

Aktaş, A., “Bearing strength of carbon epoxy laminates under static and dynamic loading”, *Composite Structures*, 67, 485-489, (2005).

Aktaş, A., Kurakuzu, R., “Failure analysis of two dimensional carbon-epoxy composite plate pinned joint”, *Mech Comp Mater Struc*, 347-361, (1999).

Anagnostopoulos, G., Bolas, D., Parthenios, J., Psarras, G.C., Galiotis, C., “Determination of interface integrity in high volume fraction polymer composites at all strain levels”, *Acta Mater.*, 53, 647-657, (2005).

Andreopoulos, A., G, Tarantili, P.,A., “Water sorption characteristics of epoxy resin-UHMPE fibers composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, 70(4), 747-55, (1998).

ASTM D 953-D, ‘Standart Test Method for Bearing Strength of Plastics’, *ASTM Designation*, 342-346.

ASTM Standard D 4065-01. Standard practice for plastics: dynamic mechanical properties: determination and report of procedures. West Conshohocken, PA, USA: *American Society for Testing and Materials*, (2004).

Baker, A., Composites engineering handbook, In P.K. Mallick (Eds.), “Joining and repair of aircraft composite structure”, New York: Marcel Dekker, (1997).

Barker, H., A., Baird-Smith, I., G., & Jones, F., “Large Diameter GRP pipes in Civil Eng.- The Influence of Corrosive Environments”, in *Symposium on Reinforced Plastics in Anti-Corrosion Application*, National Engineering Laboratory, East Kilbride 26-27 September, Glasgow (1979).

- Baschek, G., Hartwig, G. and Zahradnik, F., “Effect of water absorption in polymers at low and high temperatures”, *Polymer*, 40, 3433-3441, (1998).
- Bechela, V.T., Fredina, M.B., Donaldson, S.L., Kimb, R.Y., Campingb, J.D., “Effect of stacking sequence on micro-cracking in a cryogenically cycled carbon / bismaleimide composite”, *Composites Part A*, 34, 663–672 (2003).
- Bianchi, V., Sinkler, W., Goursat, P., Monthieux, M. and Menessier, E., “Carbon fiber-reinforced (YMAS) glass-ceramic matrix composites. Preparation, Structure and fracture strength”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 17, 1485-1500, (1997).
- Bonten, C., and Berlich, R., “Aging and Chemical Resistance”, *Carl Hanser Verlag*, ISBN: 3-446-21697-9, Germany (2001).
- Botelho, E.C., Pardini, L.C. and Rezende, M.C., “Hygrothermal effects on damping behavior of metal/glass fiber/epoxy hybrid composites” *J. Mater. Sci.*, 399, 190-198, (2005).
- Bradley, W., Chiou, P.B., Grant, T., “The effect of sea water on polymeric composite materials, composite materials for offshore operations: Proceedings of the first international workshop”, *NIST Special Publication 887*, In: Wang SS, Fitting, D.W., editors. National Institute of Standards and Technology, 193–202, August (1995).
- Browne, M.M., Forsyth, M., Goodwin, A.A., “Solvent diffusion in poly (ether ether ketone)/poly (ether imide) blends”, *Polymer*, 36, 4359-4360, (1995).
- Browne, M.M., Forsyth, M., Goodwin, A.A., “The effect of solvent uptake on the relaxation behaviour, morphology and mechanical properties of a poly (ether ether ketone)/poly (etherimide) blend”, *Polymer*, 38, 1285-1290, (1997).
- Burke JJ, editors. Fibrous composites in structural design. New York: *Plenum Press*, (1980).
- Caddock, B., D., Evans, K., E., Hull, D., “Stress corrosion failure envelopes for e-glass fibre bundles”. *J of Materials Science*, 25:2498–502, (1990).
- Camanho, P.P., Bowron, S. and Matthews, F. L., “Failure mechanisms in bolted CFRP”, *Journal of reinforced plastics and composites*, 17, 205-233, (1998).
- Camino, G., Polishchuk, A.Y., Luda, M.P., Revellino, M., Blancon, R., Martinez Vega, J.J., “Water ageing of PMC composite materials: a tool for material characterization”, *Polym. Degrad. Stab*, 53-61, (1996).
- Caprino, G., G., Giorleo, L., Nele and Squillace, A., “Pin-bearing Strength of Glass Mat Reinforced Plastics”, *Composites Part A*, 779-785, (2002).
- Carswell, W.,S., Roberts, R.,C., “Environmental Fatigue Stress Failure Mechanism for Glass Fibre Mat Reinforced Polyester”, *Composites*, 5–99, (1980).



Chang, F., K., Scott, R., A., G.S.Springer, “Strength of mechanically fastened composite joints”, *J Comp Mater*, 470-494, (1982).

Chang, F.,K., Scott, R., A., “Failure composite laminates containing pin loaded holes - method of solution”, *J Comp Mater*, 255-278, (1984).

Chateauinois A., Vicent L., Chabert B., Soulier JP., “Study of the interfacial degradation of a polymer composite during hygrothermal ageing using water diffusion measurements and dynamic mechanical thermal analysis”. *Polymer*, 35(22): 4766-4774, (1994).

Chevron Phillips Chemical Company, 2004, Effects of strong acids and strong bases [online],The Woodlands, [http://www.cpchem.com/ryton\\_pps\\_tl\\_acids\\_bases\\_salt.asp](http://www.cpchem.com/ryton_pps_tl_acids_bases_salt.asp) (**Ziyaret tarihi: 22 Eylül 2004**).

Chen, J., C., Chiu, C., H., Chin, H., “On the influence of weave structure on pin-loaded strength of ortogonal 3D composites”, *J Comp Mater*, 251-262, (1994).

Collings, T., A., “On the bearing strengths of CFRP laminates”, *Composites*, 241-252, (1982).

Costa M.,L., “Effect of void content on the mechanical properties on the carbon fiber/epoxy and carbon fiber/bismaleimide advanced composites [PhD thesis]”. *Instituto Tecnológico de Aeronáutica: ITA*, São José dos Campos, SP, Brazil, (2002).

Costa, M. L., Muller de Almeda S., C., Rezende, M., C., “Hydrothermal effects on dynamic mechanical analysis and fracture behaviour of polymeric composites”, *Materials research*, 8 (3), 335-340, (2005).

Counts, W. A., Johnson, W. S., “Bolt bearing fatigue of polymer matrix composites”, *International Journal of Fatigue*, 24, 197-204, (2002).

Dewimille, B., Bunsell, A.R., “Accelerated ageing of a glass fibre-reinforced epoxy resin in water”, *Composites*, 35–40, (1983).

Dharan, C. K. H., “Fatigue failure mechanisms in a unidirectional reinforced composite material” in *Fatigue in Composite Materials*, STP 569, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, 117-123, (1975).

Dowling, E., D., “Mechanical behaviour of materials”, Prentice Hall: New Jersey, (1999).

Drzal, L.T., and Madhukar, M.,“Fiber matrix adhesion and its relation to composite mechanical properties”, *Journal of Materials Science*, 28 (3), 569-610, (1993).

Ezbeşir, A., Erbay, E., Taşkıran,İ., Yağcı, M.A., Cöbek, M., Bilgiç, T., “Polimerler” *Pagev yayınları*, ISBN: 975-9816-02-3, (1999).

- Feng, X., Bates, J.K., Bradley, C.R., Buck, E.C., “Materials Research”, *Soc. Symp. Proc.*, 294, 207-214, (1993).
- Fried, J.R., Polymer Science and Technology, *Prentice Hall*, ISBN: 0-13-18168- 4, USA., (2003).
- Fu-Kuo, C., Scott, R., A., Springer G.S., “Failure strength of nonlinearly elastic composite laminates containing a pin loaded hole”, *J Compos Mater.*,18: 465–75, (1984).
- Gamstedt, K.E., Berglund, L.A., Peijs, T., “Fatigue mechanisms in unidirectional glass-fibre-reinforced polypropylene”, *Composites Science and Technology*, 59, 759-768, (1999).
- Gamstedt, K. E., “Effects of debonding and fiber strength distribution on fatigue damage propagation in carbon fiber-reinforced epoxy”, *Journal of Applied Polymer Science*, 76, 457-474, (2000b).
- Gamstedt, K.E., Östlund, S., “Fatigue propagation in fibre-bridged cracks in unidirectional polymer-matrix composites”, *Applied Composite Materials*, (2001a).
- Gdoutos, E.E., Pilakoutas, K., Rodopoulos, C., A., “Failure analysis of industrial composite materials”, New York:McGraw-Hill, (2000).
- Gentry, T.R., Bank, L.C., Barkatt, A., Prian, L., Wang, F., “Development of Accelerated Test Methods to Determine the Durability of Composites Subjected to Environmental Loading”, PA: *American Society for Testing and Materials*, (1998).
- Gu, W., Wu, H. F., Kampe, S. L., and Lu, G. -Q., “Volume fraction effects on interfacial adhesion strength of glass-fiber-reinforced polymer composites”, *Materials Science and Engineering A*, 277, 237-243, (2000).
- Haque, A., Mahmood, S., Walker, L. and Jeelandi, S., “Moisture and temperature induced degradation in tensile properties of Kevlar-carbon/epoxy hybrid composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 10, 132-145, (1991).
- Haris, B., “Fatigue-glass fibre reinforced plastics”. In: *Handbook of polymer fibre composites*. Jones FR editor, Longman, 309–316, (1994).
- Hart-Smith, L., J., “Mechanically-fastened joints for advanced composites-phenomological considerations and simple analysis”, In: Leneo EM, Oplinger DW,
- Hatakeyama, T., Quinn, F., “Thermal analysis”, *Fundamentals and applications to polymer science*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons; (1999).
- Herrington, P., D., and Sabbaghian, M., “Effect of radial clearance between bolt and washer on the bearing strength of composite bolted joints”, *J Compos Mater.* , 26: 1826-1843, (1992).

Herrington, P.D., Sabbaghian, M., “Fatigue failure of composite bolted joints”, *Journal of Composite Materials*, 27,491–512, (1993).

Heuvel, P.W.J., Peijs, T., Young, R.J., “Failure phenomena in two dimensional multi-fibre microcomposites -3. ARaman spectroscopy study of the influence of interfacial debonding on stress concentrations. *Composites Science and Technology*, 58, 933-944, (1998).

Eckold,G., “Design and manufacture of composite structures”, New York: McGraw-Hill, Inc., 172-175, (2001).

Hofer, K.E., Skaper, G.N., Bennett, L.C.,“Effect of Moisture on Fatigue and Residual Strength Losses for Various Composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 6, 53–65, (1987).

Hogg, P., J., & Hull, D., “Micromechanism of Crack Growth in Composite Materials under Corrosive Environments,” *Metal Sc.*, Aug-Sept., 441-449, (1980).

Hogg, P., J., “A model for stress Corrosion Crack Growth in Glass Reinforced Plastics”. *Composite Science and Technology*, 38: 23–42, (1990).

Hogg, P., J., Hull, D., In:B., Harris editor. “Developments in GRP technology”, vol. 1. London: *Applied Science Publishers*, 37–90, (1983).

Hong, G., Yalizis, A., Frantziskonis, G. N., “Hygrothermal degradation in glass/epoxy evaluation via stress wave factors”, *Composite Structures*, 30, 407-417, (1995).

Hough, J.A, Karad, S.K., Jones, F.R., “The effect of thermal spiking on moisture absorption, mechanical and viscoelastic properties of carbon fibre reinforced epoxy laminates”, *Compos. Sci. Technol.*, 65, 1299-1305, (2005).

Hussain, M., Niihara, K., “Control of water absorption and its effect on interlaminar shear strength of CFRC with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersion”, *Materials Science & Engineering*, A272, 264-268, (1999).

Hyer, M., W., Klang, E., C., and Cooper, D., E., “The effect of pin elasticity, clearance and friction on the stresses in a pin loaded orthotropic plate”, *J Compos Mater.* , 21: (3), 190-206, (1987).

Iglesias, J.G., Gonzalez-Benito, J., Anzar, A.J., Bravo, J., Baselga, J., “Effect of Glass Fiber Surface Treatments on Mechanical Strength of Epoxy Based Composite aterials”, *J. Colloid Interface Sci.* 250, 251-260, (2002).

Jang, B.Z., “Advanced Polymer Composites: Principles and Application”, *ASM International*, Materials Park, OH, 138-205, (1999).

Jones, H., R., (Editor)., “Environmental effects on engineered materials”. New York, NY, SA:*Marcel Dekker Incorporated*, 419-458, (2001).

- Khashaba, U., A., “Notched and pin bearing strengths of GFRP composite laminates”, *J Comp Mater*, 2042-2054, (1996).
- Kim, D., H., “Composite structures for civil and Architectural engineering”, London: E&F.N. Spon, (2001).
- Kobayashi, S., Terada, K. and Takeda, N., “Evaluation of long-term durability in high temperature resistant CFRP laminates under thermal fatigue loading”, *Composites Part B: engineering*, 34, 753-759, (2003).
- Komai, K., Minoshima, K., Shiroshita, S., “Hygrothermal Degradation and Fracture Process of Advanced Fibre-Reinforced Plastics”, *Materials Science and Engineering A*, 143, 155–166, (1991).
- Lee S.,M., “*International encyclopedia of composites*”. 2nd ed. New York: VCH Publishers; (1991).
- Lee, T., H., Y., C., Freddy & Loh, N., L., “Characterization of a fibre-reinforced PPS composite by dynamic mechanical analysis: effect of aspect ratio and static stress”, *Composite science and technology*, 49, 217-223, (1993).
- Lessard, L., B., Shokrieh, M.,M., “Two dimensional modeling of composite pinned-joint failure”, *J Comp Mater*, 671-497, (1995).
- Lewis, G., Bedder, S., W., & Reid, I., “Stress Corrosion of Glass Fibers in Acid Environments,” *Journal of Materials science Letters* 3: 728-732, (1984).
- Li, G., Lee-Sullivan, P., Thring, R., “Determination of activation energy for glass transition of an epoxy adhesive using dynamic mechanical analysis”, *J. Therm Anal Calorim*, 60(2):377–390, (2000).
- Liao, K., Schultheisz, C.R., Hunston, D.L., “Effects of environmental aging on the properties of pultruded GFRP”, *Composites: Part B*, 30, 485–493, (1999).
- Lim, T.S., Kim, B.C., Lee, D.G., “Fatigue characteristics of the bolted joints for unidirectional composite laminates”, *Composite Structures*, 72, 58-68, (2006).
- Liu, D., Raju, B., B., You, J., “Thickness effects on pinned joints for composites”, *J Comp Mater*, 2-21, (1999).
- Lorenzo, L., and Hahn, H. T., “Fatigue failure mechanisms in unidirectional composites”, in *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, STP 907, Hahn, H.T., Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, 210-232, (1986).

Luke, M., Marissen, R., Schulte, K., Maldfeld, E., and Nowack, H., “Experimental and numerical through-thickness stress/strain-analysis of notched composite laminates” in *Proceedings of the 7th European Conference on Composites Materials*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 93-98, (1996).

Maikuma, H., and Kubomura, K., “Bearing strength and damage progress for pan-based and pitch-based carbon fiber composites”, *J Compos Mater.*, 27: 1739-1761, (1993).

Marston, C., and Neumeister, J., “Statistical failure of long fibre composites – Experiments on two carbon/epoxy systems”, *Composites Science and Technology*, 57, 913-923, (1999).

Mathews, F., L., Design with advanced composite materials. In L. N. Philips, “Joining of composites”, London: The design Council, (1989).

Menard, K., “Dynamic mechanical analysis: a practical introduction”, Boca Raton, FL, USA: *CRC Press*; (1999).

Metcalf, A., G., & Schmitz, G., K., “Mechanism of Stress Corrosion in E-glass Filaments,” *Glass Technology* Vol. 13 No. 1 Feb (1982).

Meurs, P.F.M., Schreurs, P.J.G., Peijs T., and Meijer, H.E.H., “Characterization of interphase conditions in composite materials”, *Composites Part A*, 27, 781-786, (1996).

Mouritz, A.P., Gallagher, J., Goodwin, A.A., “Flexural strength and interlaminar shear strength of stitched GRP laminates following repeated impacts”, *Composites Science and Technology*, 57, 509-522, (1997).

Naby, S., F., M., Hollaway, L., “The experimental behaviour of bolted joints in pultruded glass/polyester material. Part 1: single-bolt joints”, *J Comp Mater*, 531-538, (1993).

Nettles, A.T., Biss, E.S., “Low temperature mechanical testing of carbon-fiber/epoxy resin composite materials”, *NASA Technical Memorandum*, NASA Center for Aerospace Information, TM-1996-3663 (1996).

Okutan, B., “Stres and failure analysis of laminated composite pinned joints”, Degree of Doctor of Philosophy, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, İzmir, (2001).

Patel, S.R., Case, S.W., “Durability of hygrothermally aged carbon/epoxy woven composite under combined hygrothermal conditions”, *Int. J. Fatigue*, 24, 1295-1301, (2002).

Persson, E., Eriksson, I., Zackrisson L., “Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of carbon/epoxy composite laminates”, *Compos part A*, 28A: 141-151, (1992).

- Price, J., N., & Hull, D., “Effect of Matrix Toughness on Crack Propagation during Stress Corrosion of Glass Reinforced Composites,” *Composites Science & Technology* 28: 193-210, (1987).
- Pyner G., R., Matthews, F., L., “Comprasion of single and multi-hole bolted joints in glass fibre reinforced plastic”, *J Comp Mater*, 233-239, (1979).
- Quinn, W., J., and Matthews, F., L., “The effect of stacking sequence on the pin-bearing strength in carbon fibre reinforced plastics”. *J Compos Mater.* , 11: 139-142, (1977).
- Ray, B.C., “Thermal shock on interfacial adhesion of thermally conditioned glass fiber/epoxy composites”, *Materials Letters*, 58, 2175-2177, (2004).
- Ritchie, R. O., Yu, W., and Bucci, R. J., “Fatigue crack propagation in arall laminates: Measurements of the effect of crack-tip shielding from crack bridging”, *Engineering Fracture Mechanics*, 32, 361-377, (1989).
- Rudin, A., “*Polymer science and engineering*”, 2nd ed. New York: Academic Press; (1999).
- Russell, J., “Environmental Effects on Engineered Materials”, *Marcel Dekker Incorporated*, 433-452, (2001).
- Scheirs, J., “Compositional and failure analysis of polymers”, *Willey*, ISBN: 0-471-62534-5, (2000).
- Schnabel, W., “Polymer Degradation-Principles and Practical Applications”, Hanser Publ., (2001).
- Schön, J., Nyman, T., “Spectrum fatigue of composite bolted joints”, *International Journal Of Fatigue*, 24, 273-279, (2002).
- Schultheisz, C.R., McDonough, W.G., Kondagunta, S., Schutte, C.L., Macturk, K.S., McAuliffe, N., Hunston D.L., “Effect of moisture on E-glass/epoxy interfacial and fiber strengths, fiber, matrix, and interface properties”, In: Spragg C.J., Drzal, L.T., editors. ASTM STP 1290, *American Society for Testing and Materials*, 103–131, (1996).
- Selzer, R., Friedrich, K., “Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture”, *Composites Part A*, 28A, 595-604, (1996).
- Shen C.H., Springer GS., “Moisture absorption and desorption of composite materials”. In: Springer GS, editor. *Environmental effects on composite materials*, Westport, CT: Technomic; chapter 3, (1981).

- Shin, K-B., Kim, C-G., Hong, C-S., Lee, H-H., “Prediction of failure thermal cycles in graphite/epoxy composite materials under simulated low orbit environments”, *Composites Part B*, 31, 223-235, (2000).
- Spera, D.A., “What is thermal fatigue in thermal fatigue of materials and components”, In: D.A Spera, D.F. Mowbray, editors. Philadelphia, PA: *American Society for Testing and Materials*, 3 (1975).
- Srivastava, V.K., “Influence of water immersion on mechanical properties of quasi-isotropic glass fibre reinforced epoxy vinyl ester resin composites”, *Materials Science and Engineering*, A263, 56-63, (1998).
- Starikov, R., Schön, J., “Local fatigue behaviour of CFRP bolted joints”, *Composites Science and Technology*, 62, 243-253, (2002).
- Stevens, R., M., Todd, Richard, Papakyriacou, M., “The effect of thermal cycling on the properties of a carbon fibre reinforced composites”, *Materials Science and Engineering*, A397, 249-256, (2005).
- Tang, X., Whitcomb, J.D., Y. Li, Sue, H.-J., “Micromechanics modeling of moisture diffusion in woven composites”, *Compos. Sci. Technol.*, 65, 817-826 (2005).
- Thomason J.L., “The interface region in glass fibre-reinforced composites: 2. Water absorption, voids and the interface”, *Composites*, 26(7), 477-485, (1995).
- Turvey, G.J., Wang, P., “Failure of pultruded GRP single-bolt tension joints under hot-wet conditions”, *Composite Structures*, In Press, Corrected Proof, Available online 10 October (2005).
- Vauthier, E., Chateauminois, A., Bailliez, T., “Hygrothermal Aging and Durability of Unidirectional Glass-Epoxy Composites”, *Proceedings of the 10th International Conference of Composite Materials*, 6, 185–192, (1995).
- Wagner, H.D., Lustiger, A., “Effect of water on the mechanical adhesion of the glass/epoxy interface”, *Composites*, 7, 613–616, (1994).
- Xiaoxue, D., Larry, B., Shokrieh, M., “Statistical model of multiaxial fatigue behavior of plies”, *Composite Science and Technology*, 59, 2025–2035, (1999).
- Zhou J., Lucas J.P., “Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy”, *Polymer*, 40 (20): 5513-22, (1999).

## KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER

- 1.Taner Yılmaz, Tamer Sınmazçelik, “Geometric parameters and chemical corrosion effects on bearing strength of polyphenylene sulphide (PPS) composites”, *Materials & Design*, 28, 1695-1698, 2007.
- 2.Taner Yılmaz, Tamer Sınmazçelik, “Investigation of load bearing performances of pin connected carbon/PPS composites under static loading conditions”, *Materials & Design*, 28, 520-527, 2007.
- 3.Taner Yılmaz, Tamer Sınmazçelik, “Thermal aging effects on mechanical and tribological performance of PEEK and short fibre reinforced PEEK composites”, *Materials & Design*, 28, 641-648, 2007.
- 4.Yılmaz, T., Sınmazçelik, T., “Sürekli cam fiber takviyeli Polyphenylenesulphide (PPS) matrisli kompozitlerde asit ortamın pim ile yük taşıma performansına etkisi” 7. *Uluslar arası kırılma konferansı*, Kocaeli, 671-686, Ekim 2005.
- 5.Yılmaz, T., Sınmazçelik, T., “Farklı geometrik birleştirme parametrelerinin ve fiber yönlendirme şekillerinin kompozit panellerin pim ile yük taşıma performansına etkisi” 7. *Uluslar arası kırılma konferansı*, Kocaeli, 609-622, Ekim 2005.
- 6.Şahin, T., Sınmazçelik, T., Yılmaz T., “Yüksek darbe dayanımlı polistiren (YDDPS) malzemenin farklı enerjili darbeler altındaki kırılma davranışı” 7. *Uluslar arası kırılma konferansı*, Kocaeli, 933-944, Ekim 2005.
- 7.Şahin, T., Sınmazçelik, T., Yılmaz T., “Yüksek darbe dayanımlı polistiren (YDDPS) malzemede darbeli yorulma davranışı” 7. *Uluslar arası kırılma konferansı*, Kocaeli, 1067-1078, Ekim 2005.
- 8.Tamer SINMAZÇELİK, A. Armağan ARICI, Taner YILMAZ. “Impact-Fatigue behaviour of carbon/pei composite materials.” *11th European Conference on Composite Materials “ECCM 11”*, Rhodes-GREECE, May 31-June 3, 2004.
- 9.Tamer SINMAZÇELİK, B.Hayri ATES, Taner YILMAZ. “Weathering effects on the impact, bulk and surface properties of polyphenylene sulphide (PPS) composites”. *11th European Conference on Composite Materials “ECCM11”*, Rhodes-GREECE, May 31-June 3, 2004.
- 10.Tamer SINMAZÇELİK, B.Hayri ATES, Taner YILMAZ. “Chemical corrosion effects on the impact, bulk and surface properties of polyphenylene sulphide (PPS) composites”. *The First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium “CMESI-04”*, Cappadocia-Niğde, TURKEY, July 14-16, 2004.



11.Taner YILMAZ, Tamer SINMAZÇELİK. "Statik yükleme şartlarında karbon/PPS kompozitlerin pim ile yük taşıma performanslarının incelenmesi". *Havacılıkta ileri teknolojiler ve uygulamaları sempozyumu*, HİTEK, Yeşilyut-İstanbul, 9-10 Aralık, 2004.

12.Taner YILMAZ, Tamer SINMAZÇELİK. "Polimer ve polimer matrisli kompozit malzemelerin birleştirilmeleri. Mekanik bağlama elemanlarıyla birleştirme". *PAGEV Plastik Dergisi*, Mayıs-Haziran, 2003.

13.Tamer Sınmazçelik, Taner Yılmaz. "Microstructure effects on tribological performance on PEEK and PEEK Composites". *4th International Conference on Tribology* ", *Balkantrib2002*, Erciyes University. p. 124-131.

## ÖZGEÇMİŞ

Bulgaristan'da doğdu. İlk öğrenimini Bulgaristan'da, orta ve lise öğrenimini Çerkezköy'de tamamladı. 1996 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2000 yılında mezun oldu. Eylül 2000-Haziran 2002 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

Ocak 2001 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Mart 2003-Eylül 2006 yılları arasında TÜBİTAK-Münir BİRSEL Vakfı doktora bursu ile desteklendi.