

**SÜREKSİZ CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİPROPİLENİN
YORULMA DAVRANIŞI**

100 666

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Mustafa SEZER
(503910003012)

100666

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Mayıs 1999
Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Aralık 1999

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. Ahmet ARAN (İ.T.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Barlas ERYÜREK (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Mehmet ÇAPA (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Sabri ALTINTAŞ (B.Ü.)

Prof.Dr. Ahmet TOPUZ (Y.T.Ü.)

ARALIK 1999

ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince değerli yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Ahmet ARAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarıma destek veren Arçelik A.Ş. yöneticilerine bilhassa Ürün Yönetimi Direktörü Sayın Ahmet OLPAK'a, Çamaşır Makinası Genel Müdür Yardımcısı Sayın Ahmet SAKIZLI'ya, Ürün Geliştirme Yöneticisi Sn. Engin KUTLAY'a ve AGM test imkanlarını kullanmama imkan tanıyan Araştırma Geliştirme Merkezi Yöneticilerine teşekkür ederim.

Ayrıca, bana her konuda destek olan sevgili eşim Nurten SEZER'e ve beni yetiştirmek için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan değerli anne ve babam, Aysel ve Faik SEZER'e şükranlarımı sunarım.

Aralık 1999

Mustafa SEZER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xx
ÖZET	xxii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
2. YORULMA ZORLAMASI VE DAYANIMI	2
2.1. Genel	2
2.2. Yorulma Zorlamasının Özellikleri	3
2.3. Yorulma Kırılması	4
2.3.1. Yorulma Kırılmasının Nedeni	4
2.3.2. Yorulma Çatlağının İlerlemesi (Safha II)	10
2.3.3. Yorulma Faz Diyagramı	14
2.3.4. Eşik Çatlağı	16
2.3.5. Faz Diyagramında Hasar Oluşum Yolları	16
2.4. Yorulma Dayanımının Saptanması	16
2.5. Yorulma ile İlgili Semboller	19
2.6. Yorulma Dayanımına İlişkin Genel Tanımlar	21
2.6.1. Değişken Bölgede Yorulma Dayanımı	21
2.6.2. Dalgalı Bölgede Yorulma Dayanımı	21
2.7. Yorulma Dayanımına İlişkin Özel Tanımlar	22
2.7.1. Değişken Yorulma Dayanımı, σ_D	22
2.7.2. Dalgalı Yorulma Dayanımı, σ_{Dal}	22
2.8. Süreli Yorulma Dayanımı	23
2.9. Yorulma Ömrü	23
3. POLİMERLERİN YORULMA DAVRANIŞI VE HASARLARI	24
3.1. Çevrimli Yumuşama	26
3.2. Gerilme ve Deformasyon Yaklaşımları	28
3.3. Yorulma Çatlağı İlerlemesinin Karakterizasyonu	28
3.4. Yorulma Çatlağı İlerlemesinin Mekanizmaları	29
3.4.1. Yorulma Çizgileri	29
3.4.2. Süreksiz İlerleme Bandları	31
3.4.3. Kılcal Akma ve Kayma Akmasının Birlikte Etkisi	35
3.4.4. Kayma Bandları	37
3.4.5. Genel Gözlemler	38
3.4.6. Değişken Genlikli Yorulma	40
3.5. Organik Kompozitlerin Yorulması	40
3.5.1. Süreksiz Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler	41
3.5.2. Sürekli Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler	43

4. SÜREKSİZ CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİPROPİLEN	45
4.1. Matris Malzemeleri	45
4.1.1. Termoplastik Malzemeler	45
4.1.2. Polipropilen	48
4.2. Elyaf Türleri	52
4.2.1. Cam Elyaf	52
4.2.2. Diğer Elyaf Türleri	55
4.3. Elyaf-Matris Arayüzeyi	56
4.3.1. Camelyaf Bağlayıcı Ajanları	56
4.3.2. Polipropilen Matris için Bağlayıcı Ajanlar	59
5. ELYAF TAKVİYELİ PLASTİKLERİN YORULMA DAVRANIŞLARI ÜZERİNE MEVCUT ÇALIŞMALAR	61
5.1. Yorulma Çatlaksız Numunelerle Yapılan Çalışmalar	61
5.2. Isıl Yorulma	135
5.3. Modelleme Çalışmaları	141
5.4. Yorulma Çatlağı İlerlemesi Çalışmaları	143
6. DENEY MALZEMELERİ, CİHAZLARI VE YÖNTEM	165
6.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler	165
6.2. Yorulma Deney Numunesi ve Hazırlama Yöntemleri	167
6.3. Frekansın Yorulma Dayanımına Etkisi	169
6.4. Test Yöntemleri	171
6.4.1. Mekanik Testler	171
6.4.1.1. Test Yöntemi, Cihazları ve Parametreleri	171
6.4.1.2. Histerizis Enerjisi, Dinamik Modül, Dinamik Sürünme Şekil Değişimi ve Karşılaştırmalar	174
6.4.1.3. Kalan Dayanım ve Kalan Modül	175
6.4.2. Mikroskopik İncelemeler	175
6.4.3. Wöhler (S-N) Diyagramları	176
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	177
7.1. Mekanik Davranışlar	177
7.1.1. Histerizis Eğrileri	177
7.1.2. Histerizis Enerjisi, Dinamik Modül, Dinamik Sürünme Şekil Değişimi ve Karşılaştırmalar	185
7.1.3. Kalan Dayanım ve Kalan Modül	201
7.2. Mikroskopik İncelemeler	205
7.2.1. Kimyasal Bağlı Cam Elyaf Takviyeli Polipropilenin Mikroskopik İncelemesi	207
7.2.2. Cam Elyaf Dolgulu Polipropilenin Mikroskopik İncelemesi	211
7.3. Wöhler (S-N) Diyagramları	220
8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	225
8.1. Genel Sonuçlar	225
8.2. Öneriler	226
KAYNAKLAR	228
ÖZGEÇMİŞ	233

KISALTMALAR

PP	: Polipropilen
PBT	: Polibütülfenterafitalat
PA	: Poliamid (Naylon)
PMMA	: Polimetilmetakrilat
PS	: Polistiren
PC	: Polikarbonat
UCE	: Uzun Cam Elyaf
LKK	: Levha Kalıplama Karışımları
PE	: Polietilen
YÇİ	: Yorulma Çatlağı İlerlemesi
HÖ	: Histerizis Ölçümü
PP-GM	: Polypropylene Glass Mat
SMC	: Sheet Molding Compound
OGE	: Ortalama Gerilme Eğrisi
DMA	: Dynamic Mechanical Analyser
SEM	: Scanning Electron Microscopy
GC	: Glass Coupled
GF	: Glass Filled
ÇD	: Çekme Dayanımı
KBPP	: Kimyasal Bağlı Polipropilen
DPP	: Dolgulu Polipropilen
CI	: Confidence Interval
PI	: Predicted Interval
KETP	: Kısa Elyaf Takviyeli Polimer
OGE	: Ortalama Gerilme Eğrisi
LKK	: Levha Kalıplama Karışımları

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. $da/dN-\Delta K$ eğrisini etkileyen faktörler [2].....	13
Tablo 2.2. Yorulma ile ilgili semboller [1].....	20
Tablo 2.3. Yorulma zorlaması indisleri [1]	21
Tablo 4.1. Cam elyaf takviyesinin kristalin (polipropilen), amorf (polikarbonat) ve termoset (polyester) polimerlerin özelliklerine etkisi [8].....	46
Tablo 4.2. Yarıkristalin polimer matris malzemeleri [11]	48
Tablo 4.3. Elyafların mekanik özellikleri [11]	54
Tablo 4.4. Elyaf üretiminde kullanılan camların kompozisyonları [12].....	55
Tablo 4.5. Kimyasal bağlanmanın % 30 cam elyaf takviyeli polipropilenin özelliklerine etkisi [13]	57
Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri....	167
Tablo 6.2. ISO 527 Tip I çekme numunesi ölçüleri	168
Tablo 6.3. Enjeksiyon parametreleri.....	169

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Yorulma hasarının ilk üç safhası [2]	6
Şekil 2.2 : Yorulma hasarının safhaları [2]	6
Şekil 2.3 : Çekirdek sayısının genlik gerilmesine bağlı olarak değişimi [2]	8
Şekil 2.4 : Yorulma çatlak uzunluğunun yorulma ömrünün yüzdesine göre değişimi [2]	9
Şekil 2.5 : İnce yorulma çizgileri [2]	10
Şekil 2.6 : İnce yorulma çizgilerinin oluşum mekanizması [2]	11
Şekil 2.7 : Çatlak ilerleme hızının gerilme şiddet faktörü aralığı ile değişimi [2]	12
Şekil 2.8 : İnce levhalarda yorulma kırılması [2]	14
Şekil 2.9 : Yorulma faz diyagramı [2]	15
Şekil 2.10 : Wöhler eğrisi ve hasar çizgisi [1]	18
Şekil 2.11 : Değişken çekme bölgesinde yorulma zorlaması, $\sigma_Y = \sigma_G $ (verilen σ_{ort} için) [1]	22
Şekil 2.12 : Dalgalı çekme bölgesinde yorulma zorlaması, $\sigma_Y = \sigma_G $ (verilen σ_{ort} için) [1]	22
Şekil 2.13 : Değişken yorulma zorlaması, $\sigma_D = \sigma_G $ [1]	23
Şekil 2.14 : Dalgalı yorulma zorlaması, $\sigma_{Dal} = \sigma_G $ veya $ 2\sigma_G $ [1]	23
Şekil 3.1 : 298 K'de birim şekil değişimi kontrollü yorulma altında polikarbonatın çevrimli yumuşaması. (a) Yorulma deformasyonunun artmasıyla histerizis çevrimlerinin şekli ve yönü değişir. (b) Monotonik çekme ve yorulma altında gerilme- birim şekil değişimi davranışı [3]	27
Şekil 3.2 : (a) PSF ve (b) PMMA'da ince yorulma çizgileri. Çatlak ilerleme yönü okla gösterilmiştir [3]	30

Şekil 3.3	: PSF ve PMMA'nın makroskopik yorulma çatlağı ilerleme hızları da/dN'nin (içi boş semboller) ve hasar oluştuktan sonra yorulma çizgileri aralığı s'nin ölçümlerinin (içi dolu semboller) gerilme şiddet faktörü ΔK 'ya göre çizimi [3]	32
Şekil 3.4	: PVC kırık yüzeyinde süreksiz yorulma çatlağı ilerleme bandları. Çatlak ilerleme yönü okla gösterilmiştir [3]	32
Şekil 3.5	: (a) Yorulmaya zorlanmış PVC'de çatlak ucunun pozisyonları (soldaki oklar) ve kılcal çatlağın ucu (sağdaki oklar). Her mikrografığın çevrim sayıları yanlarında belirtilmiştir. (b) Çatlak ucu kılcal çatlak bölgesinin şematik gösterimi [3]	33
Şekil 3.6	: Kılcal çatlak bölgesindeki bir yorulma çatlağının izlediği yolun idealleştirilmesi [3]	34
Şekil 3.7	: Her 100 çevrimde bir alınan fotoğraflar, PC'da bir epsilon şekilli deformasyon bölgesini oluşturan süreksiz çatlak ilerlemesini göstermektedir. Oklar çatlak önündeki ani atlamaların varlığını işaret etmektedir [3]	36
Şekil 3.8	: Oda sıcaklığındaki PC'da yorulma çatlağı ilerleme hızı. Dolu semboller, epsilon şekilli bölgelerin gelişmesi nedeniyle süreksiz çatlamları göstermektedir. Açık semboller kompakt çekme numuneleri ile elde edilen çatlak ilerleme datalarını göstermektedir [3]	37
Şekil 3.9	: PC'da bir yorulma çatlağının önündeki kayma bandı çatlakları. Çatlak, kayma ve kılcal akma proseslerinin kombine etkisi ile epsilon şekilli profilin önünden bir serbest yüzeyde ilerler. Kayma bandlarının son çiftinde bir kılcal çatlak kendisine eşlik etmez, yalnız kayma hasarı gösterir [3]	38
Şekil 3.10	: PMMA ve PVC'nin molekül ağırlıklarının bir fonksiyonu olarak yorulma çatlağı ilerleme hızlarının, sabit ΔK ($=0,6 \text{ MPa m}^{1/2}$) değerleri ve test frekanslarında f ($=10 \text{ Hz}$) değişimi [3]	39
Şekil 3.11	: Farklı miktarlarda kısa cam elyaf ve %40 kısa karbon elyaf ile takviye edilmiş enjeksiyonla üretilen PSF'nin hasar çevrim sayısı N_f 'nin bir fonksiyonu olarak maksimum çekme gerilmesi $\sigma_{\max}$ 'ın değişimini gösteren bir gerilme-ömür diyagramı. Sonuçlar oda sıcaklığında, R = 0,1 ve f= 5-20 Hz şartları altındadır. Küçük oklar belirlenen çevrim sayılarında hasarın görülmediğini göstermektedir [3]	42
Şekil 3.12	: Kısa cam elyaf takviyeli ve takviyesiz polietersülfon'un f= 5 Hz ve R = 0,2'de yorulma çatlağı ilerleme karakteristikleri. İçleri boş ve dolu semboller sırasıyla, kalıbın dolma yönüne paralel ve dik kırılmaları ifade etmektedirler [3]	43

Şekil 3.13	: Hacimce %60 tekyönlü (unidirectional) cam elyaf ile takviye edilmiş bir epoksi reçine matrisin yorulma hasar çevrim sayısı N_f 'nin bir fonksiyonu olarak maksimum çekme gerilmesi σ_{max} 'ın değişimini gösteren bir gerilme-ömür diyagramı. ϕ , elyaf yönü ile çekme eksenindeki açıyı göstermektedir. Testler oda sıcaklığında ve $R = 0,1$, $f=19$ Hz'de yapılmıştır [3]	44
Şekil 4.1	: Kristalin ve amorf polimerlerin modüllerinin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime (melt) sıcaklığı ile değişimi. Ayrıca takviyenin ısı etkisiyle eğilme sıcaklığına (HDT) etkisi [4] ...	47
Şekil 4.2	: Propilen yapıları (a) izotaktik, (b) sindiyotaktik ve (c) ataktik [5]	49
Şekil 4.3	: (a) ve (b) Kimyasal bağlanma olmayan numunenin kırık yüzeyinde elyafların kolayca sıyrıldığı delikler görülmekte ve elyaf yüzeyleri son derece temizdir. (c) ve (d) Kimyasal bağlanma olan numunenin kırık yüzeyinde daha az elyaf sıyrılması görülmekte ve elyafların üzeri matris polimer tarafından iyice sarılmıştır [14]	58
Şekil 4.4	: Silanın cam elyafa tutunması [14]	59
Şekil 4.5	: Polimer-cam elyaf bağlanması [14]	59
Şekil 4.6	: Aşılama işlemi [16]	60
Şekil 4.7	: Maleik Anhidrid aşılansmış polipropilen [16]	60
Şekil 5.1	: Kılcal çatlak başlangıcı, kırılmaya neden olan gerilme genliği ve hasar çevrimi [17]	62
Şekil 5.2	: Yorulma çatlak ilerlemesi [17]	63
Şekil 5.3	: Serbest radikal polimerizasyonla üretilmiş polistirenin molekül ağırlığının YÇİ'ne etkisi [17]	64
Şekil 5.4	: Anyonik polimerizasyonla üretilmiş polistirenin molekül ağırlığının YÇİ'ne etkisi [17]	65
Şekil 5.5	: Levha kalıplama karışımı (SMC) ve cam hasır örgülü (GM) termoplastik kompozitlerin yorulma çatlak ilerlemeleri [17]	65
Şekil 5.6	: Histerizis çevriminin malzeme enerjisi açısından değerlendirilmesi [17]	67
Şekil 5.7	: Histerizis çevriminin rijitlik açısından değerlendirilmesi [17]	68
Şekil 5.8	: R-SMC ve PP-GMT malzemelerinin 30 MPa gerilme ve $R=-1$ 'de histerizis çevrimleri [17]	68
Şekil 5.9	: 30 MPa gerilme genliği ve $R=-1$ 'de dinamik modülün değişimi [17]	69

Şekil 5.10	: Histerizis analizi [18]	71
Şekil 5.11	: Kademeli yük arttırarak yapılan deneylerde yükün değişimi [18]	72
Şekil 5.12	: Kademeli yük arttırarak yapılan deneylerde histerizis çevriminin değişimi [18]	73
Şekil 5.13	: Histerizis çevriminin farklı dolgu oranlarına göre değişimi [20]	74
Şekil 5.14	: Dolgu oranlarının etkisi [20]	74
Şekil 5.15	: Dolgu oranlarının etkisi [20]	75
Şekil 5.16	: 30 MPa gerilme seviyesinde dolgu oranının etkisi [20]	76
Şekil 5.17	: 30 MPa gerilme seviyesinde cam elyaf oranının etkisi [20] .	76
Şekil 5.18	: 30 MPa gerilme seviyesinde cam elyaf oranının etkisi [20] .	77
Şekil 5.19	: Yorulma testi uygulanmış kompozitin rijitliğindeki azalma ve kalan dayanımı [21]	79
Şekil 5.20	: Lineer viskoelastik malzemenin gerilme–birim şekil değişimi histerizis çevrimi [21]	80
Şekil 5.21	: Bir histerizis çevrimindeki gerilme ve uzama değerlerinin tanımı [22]	84
Şekil 5.22	: Bir histerizis çevrimindeki mekanik enerji komponentlerinin tanımı; soldaki grafik enerji kaybını, sağdaki grafik depolanan enerjiyi göstermektedir [22]	84
Şekil 5.23	: Bir histerizis çevrimindeki rijitliklerin tanımı [22]	86
Şekil 5.24	: Üç farklı poliüretan köpük malzemenin basma modülleri [22]	87
Şekil 5.25	: Üç farklı poliüretan köpük malzemenin verimlilikleri [22]	88
Şekil 5.26	: 3 numaralı poliüretan köpük malzemenin 15 ve 28.730'uncu çevrimlerdeki histerizis eğrileri [22]	89
Şekil 5.27	: Kademeli şekil değişimi artışı deneyinin histerizis eğrileri [23]	90
Şekil 5.28	: Kademeli şekil değişimi artışı deneyinin sönümlemesi [23]	91
Şekil 5.29	: Kademeli şekil değişimi artışı deneylerinin sönümleme-birim şekil değişimi eğrileri [23]	91
Şekil 5.30	: Kademeli şekil değişimi artışı deneylerinin sönümleme-gerilme eğrileri [23]	92

Şekil 5.31	: Elyaf yüzdesinin birim şekil değişimi ve gerilme sınırlarına etkisi [23]	93
Şekil 5.32	: Kademeli şekil değişimi ve gerilme artışı deneylerinin sönümlemesinin standart dağılımı [23]	93
Şekil 5.33	: Gerilme artışı testlerinin yükleme şekli [24]	94
Şekil 5.34	: Elyaf oranının, elyaf uzunluğunun ve yüzey işleminin cam elyaf takviyeli PBT (PBT-GF)'nin yorulma hasarına etkisi [24]	95
Şekil 5.35	: Tek kademeli gerilme çevriminde cam elyaf takviyeli PBT (PBT-GF)'nin sönümleme profili [24]	96
Şekil 5.36	: Cam elyaf takviyeli PBT'nin Wöhler diyagramında sönümleme profili [24]	97
Şekil 5.37	: Beklenen ömrünün %14'ünderken cam elyaf takviyeli PBT'nin kırık görünümü, $N=6178$, $\sigma_{maks}=50N/mm^2$, A) ışık mikroskobu, B) flöresan mikroskop [24]	97
Şekil 5.38	: Elyaf oranının, elyaf uzunluğunun ve yüzey işleminin cam elyaf takviyeli PBT (PBT-GF)'nin yorulma çatlağı davranışına etkisi [24]	98
Şekil 5.39	: Kademeli gerilme artışı testinde sönümleme profili (ağırlıkça %17 cam elyaf, elyaf uzunluğu yaklaşık 165 μm ve yüzeyi kaplanmış) [24]	99
Şekil 5.40	: Gerilmenin bir fonksiyonu olarak sönümlemenin standart sapması [24]	100
Şekil 5.41	: Elyaf yüzdesinin, elyaf uzunluğunun ve yüzey işleminin cam elyaf takviyeli PBT'nin gerilme sınırına etkisi [24]	101
Şekil 5.42	: Elyaf yüzdesinin, elyaf uzunluğunun ve yüzey işleminin cam elyaf takviyeli PBT'nin maksimum birim şekil değişimine etkisi [24]	102
Şekil 5.43	: Numunelerin plaka içindeki yerleri [25]	104
Şekil 5.44	: İki farklı numune tipi için Wöhler eğrileri [25]	104
Şekil 5.45	: İki farklı numune tipi için normalize edilmiş Wöhler eğrileri [25]	105
Şekil 5.46	: Histerizis çevrimlerinin malzeme ömrü boyunca değişimi [25]	106
Şekil 5.47	: Tüm yük seviyelerinde çevrim sayısına karşılık sürünme hızı [25]	107
Şekil 5.48	: Freze ve mikrotom yardımıyla minyatür çekme numunelerinin çıkarılması [25]	108

Şekil 5.49	: AL, BL ve CL tipi numuneler için minyatür çekme numunelerinin sonuçları merkez bölgenin etkisinin arttığını göstermektedir [25]	109
Şekil 5.50	: Yorulmamış takviyesiz poliamidin minyatür çekme sonuçları [25]	109
Şekil 5.51	: Yorulma hasar mekanizmasının bir model sistem yardımıyla açıklanması, hasar soldan sağa doğru ilerlemekte [26]	111
Şekil 5.52	: Elyaf – matris arayüzeyindeki yükleme şekli soldaki şekilde çekme, sağdaki şekilde ise yorulma hasarı görülmektedir [26]	112
Şekil 5.53	: Farklı malzeme koşulları için normalize S-N eğrileri [27]	114
Şekil 5.54	: Yorulma nedeniyle elyafın ucunda deformasyon görülmektedir. Yükleme doğrultusu sağdan sola doğrudur. Büyütme miktarı 2.000'dir [27]	115
Şekil 5.55	: Cidar numunelerin normalize modüllerinin çevrim sayısı ile değişimi. Noktalar deneysel değerler, eğriler ise en iyi uyan fonksiyonların eğrileridir [28]	117
Şekil 5.56	: Cidar numuneler için 95, 85 ve 75 MPa gerilmelerde hesaplanan değerlerle deneysel verilerin karşılaştırılması. Noktalar deneysel değerleri, eğriler ise hesaplanan değerleri temsil etmektedirler [28]	117
Şekil 5.57	: 70 MPa maksimum gerilme için orta bölgedeki çatlak uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi [28]	118
Şekil 5.58	: 80 MPa gerilme için hesaplanan normalize modülün çevrim sayısına göre değişimi. Noktalar deneysel değerleri, eğriler ise hesaplanan değerleri temsil etmektedirler [28]	119
Şekil 5.59	: 70 MPa maksimum gerilmeye üç farklı numune genişliği için normalize modüllerin çevrim sayıları ile değişimi [28] ...	120
Şekil 5.60	: 70 MPa maksimum gerilmeye 10 ve 30 mm genişliğindeki numunelerin hesaplanan normalize modüllerinin çevrim sayıları ile değişimi. Noktalar deneysel değerleri, eğriler ise hesaplanan değerleri temsil etmektedirler [28]	120
Şekil 5.61	: Yorulma çevrimleri sırasında modül azalmasını izlemek için kullanılan test tekniği [29]	121
Şekil 5.62	: Değişik elyaf boyları içeren kompozitin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri	122
Şekil 5.63	: Değişik elyaf boyları için maksimum gerilme-ömür diyagramı [29]	122

Şekil 5.64	: Değişik elyaf boyları için normalize maksimum gerilme-yorulma ömrü diyagramı [29]	123
Şekil 5.65	: Farklı elyaf boyları için maksimum birim şekil değişimi-yorulma ömrü diyagramı [29]	124
Şekil 5.66	: Farklı elyaf boyları için maksimum birim şekil değişimi-ömür dataları ve değişik hasar bölgeleri [29]	125
Şekil 5.67	: Farklı elyaf boyları içeren levhalar için normalize edilmiş modül eğrileri [29]	125
Şekil 5.68	: 5 mm elyaf boyuna sahip levhanın kalan dayanımlarının yorulma ömrüne bağlı değişimi [29]	126
Şekil 5.69	: Çekme yorulması sonuçları [30]	128
Şekil 5.70	: Eğilme yorulması sonuçları [30]	128
Şekil 5.71	: Çekme yorulması sonuçları [31]	129
Şekil 5.72	: Eğilme yorulması sonuçları [31]	130
Şekil 5.73	: Cam elyaf yüzdesinin uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin eğilme yorulma davranışlarına etkisi [32]	131
Şekil 5.74	: Molekül ağırlığının %50 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin eğilme yorulma performanslarına etkisi [32] .	132
Şekil 5.75	: Kuvvetlendirilmiş termoplastiklerin S-N eğrileri [33]	134
Şekil 5.76	: Yorulma nedeniyle dayanım düşüşü [33]	134
Şekil 5.77	: Farklı kompozitler için dayanım oranları [33]	135
Şekil 5.78	: %40 talk dolgulu polipropilenin aksenal yorulma testi sonuçları [34]	137
Şekil 5.79	: Modelin simetrisi ve sınır koşulları [34]	138
Şekil 5.80	: Sonlu eleman modeli [34]	139
Şekil 5.81	: Yorulma testi sırasında oluşan enerji artışı, enerji kaybı ve sıcaklık artışı [34]	140
Şekil 5.82	: Eğilme tipi yorulma zorlamasında normalize maksimum gerilmenin hasar çevrim sayısına göre değişimi. Eğri teorik olarak hesaplanmıştır [35]	142
Şekil 5.83	: Çekme tipi yorulma zorlamasında normalize maksimum gerilmenin hasar çevrim sayısına göre değişimi. Eğri teorik olarak hesaplanmıştır [35]	143
Şekil 5.84	: Paralel yönlenmiş cam elyafların ve bağlanma kuvvetinin yorulma çatlağı ilerlemesine etkisi [36]	145

Şekil 5.85	: Dik yönlenmiş cam elyafların ve bağlanma kuvvetinin yorulma çatlağı ilerlemesine etkisi [36]	145
Şekil 5.86	: Enjeksiyonla kalıplanmış plakalardan işlenerek çıkartılan kompakt çekme numunelerinin boyutları ve adlandırılmaları [38]	146
Şekil 5.87	: Ağırlıkça %20 (hacimce %8,3) kısa cam elyaf takviyeli enjeksiyona dik yönde çıkartılmış polipropilen çatlak açılma miktarının hasar çevrim sayısı ile değişimi [38]	147
Şekil 5.88	: Polipropilen matrisin a) çatlak açılma miktarının çevrim sayısı ile değişimi ve b) yorulma çatlağı ilerlemesi [38]	148
Şekil 5.89	: Enjeksiyonla kalıplanmış kısa ve uzun cam elyaflı L tipi çentikli numunelerin yorulma çatlağı ilerleme eğrileri [38] ...	149
Şekil 5.90	: Elyaf yüzdesi, elyaf düzenlenme şekli ve elyaf şekil oranının (aspect ratio) yorulma çatlağı ilerlemesine etkileri [38]	150
Şekil 5.91	: Farklı enjeksiyon hızlarının ağırlıkça %40 (hacimce 19,4) uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin yorulma çatlağı ilerlemesine etkileri [38]	151
Şekil 5.92	: Polipropilen matrisin yorulma kırığı yüzeyi. Çentik ucunda 1 ve 2 bölgeleri ve 1 bölgesinin topolojisi görülmektedir [38]	152
Şekil 5.93	: Numune yüzeyine yakın bir yerde 2 ve 3 bölgelerinin arasındaki sınırda matrisin kılcal çatlak alanı [38]	152
Şekil 5.94	: 1 bölgesinde düşük elyaf yüzdesinde (%10 kısa cam elyaf) polipropilen kompozitin yorulma kırığı yüzeyi ve kırık düzlemindeki topolojiyi açıklayan model [38]	153
Şekil 5.95	: Takviyesiz PA66, PP ve PA66/PP karışımlarının yorulma çatlağı ilerleme davranışları [39]	155
Şekil 5.96	: Yorulma hasarına uğramış PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin görünümü, numunenin orta bölgesi [39]	156
Şekil 5.97	: Statik olarak hasara uğramış PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin görünümü, numunenin orta bölgesi [39]	156
Şekil 5.98	: Yorulma hasarına uğramış PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin görünümü, numunenin cidar bölgesi [39]	157
Şekil 5.99	: Enjeksiyon kalıplama sonrasında dağılmış parçacıkların (damlacıkların) deformasyonunun şematik gösterimi [39] ...	157

Şekil 5.100	: Ağırlıkça %40 uzun cam elyaf takviyeli PA66/PP karışımının yorulma çatlağı ilerleme davranışı [39]	159
Şekil 5.101	: Yorulma hasarına uğramış uzun cam elyaf takviyeli PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin genel görünümü [39]	159
Şekil 5.102	: :Yorulma hasarına uğramış uzun cam elyaf takviyeli PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin genel görünümü [39]	160
Şekil 5.103	: Yorulma hasarına uğramış ağırlıkça %10 PP-g-MAH içeren uzun cam elyaf takviyeli PP'nin kırık yüzeyinin görünümü [39]	160
Şekil 5.104	: Değişen oranlarda PP-g-MAH katkısının uzun cam elyaf takviyeli PP'nin yorulma çatlağı ilerleme davranışına etkisi [39]	161
Şekil 5.105	: Değişen oranlarda PP-g-MAH katkısı içeren uzun cam elyaf takviyeli PP ve uzun cam elyaf takviyeli PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırılma tokluğu davranışları [39]	162
Şekil 5.106	: PP-g-MAH katkısı içermeyen uzun cam elyaf takviyeli PP'nin yorulma hasarı sonrası kırık yüzeyinin görünümü [39]	162
Şekil 5.107	: Ağırlıkça %5 PP-g-MAH katkısı içeren uzun cam elyaf takviyeli PP'nin yorulma hasarı sonrası kırık yüzeyinin görünümü [39]	163
Şekil 5.108	: Elyaf/matris ayrılması ve elyaf kırılması gerçekleştiği takdirde yorulma sırasında ısı oluşumunun (artışının) şematik gösterimi [39]	164
Şekil 6.1	: Yorulma ve çekme test numunesi (ISO 527 Tip I)	168
Şekil 6.2	: Frekansa bağlı olarak numune yüzey sıcaklığının değişimi	171
Şekil 6.3	: Yorulma deneylerinde kullanılan MTS test cihazı ve yardımcı ekipmanlar (referans: MTS kullanım kılavuzu)	173
Şekil 6.4	: Yorulma testi sırasında toplanan dataların yorumlanması için kullanılan yöntemler	174
Şekil 7.1	: 0,6ÇD için KBPP'in histerizis alanının değişimi	178
Şekil.7.2	: 0,7ÇD için KBPP'in histerizis alanının değişimi	179
Şekil.7.3	: 0,8ÇD için KBPP'in histerizis alanının değişimi	179
Şekil.7.4	: 0,9ÇD için KBPP'in histerizis alanının değişimi	180
Şekil 7.5	: 0,6ÇD için DPP'in histerizis alanının değişimi	181

Şekil.7.6	: 0,7ÇD için DPP'in histerizis alanının değişimi	182
Şekil.7.7	: 0,8ÇD için DPP'in histerizis alanının değişimi	183
Şekil 7.8	: 0,9ÇD için DPP'in histerizis alanının değişimi	184
Şekil.7.9	: KBPP'in (gc: glass coupled) histerizis alanının yorulma çevrim sayısı ile değişimi	187
Şekil 7.10	: DPP'in (gf: glass filled) histerizis alanının yorulma çevrim sayısı ile değişimi	188
Şekil 7.11	: KBPP ve DPP'lerin histerizis alanlarının yorulma çevrim sayısı ile değişimleri	188
Şekil 7.12	: KBPP'in dinamik modülünün yorulma çevrim sayısı ile değişimi	190
Şekil 7.13	: DPP'in dinamik modülünün yorulma çevrim sayısı ile değişimi	191
Şekil 7.14	: KBPP ve DPP'in dinamik modüllerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	192
Şekil 7.15	: KBPP'in birim şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	193
Şekil 7.16	: DPP'in birim şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	194
Şekil 7.17	: KBPP ve DPP'lerin birim şekil değişimlerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimleri	195
Şekil 7.18	: 0,6ÇD'da KBPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	196
Şekil 7.19	: 0,7ÇD'da KBPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	196
Şekil 7.20	: 0,8ÇD'da KBPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	197
Şekil 7.21	: 0,9ÇD'da KBPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	197
Şekil 7.22	: 0,6ÇD'da DPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	198

Şekil 7.23	: 0,7ÇD'da DPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	199
Şekil 7.24	: 0,8ÇD'da DPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	199
Şekil 7.25	: 0,9ÇD'da DPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	200
Şekil.7.26	: KBPP ve DPP'in kalan çekme dayanımlarının yorulma çevrim sayısı ile değişimleri	201
Şekil.7.27	: KBPP ve DPP'in normalize çekme dayanımlarının yorulma çevrim sayısı ile değişimi	202
Şekil.7.28	: KBPP ve DPP'in elastik modüllerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimi	202
Şekil.7.29	: KBPP ve DPP'in normalize kalan elastik modülünün yorulma çevrim sayısı ile değişimi	203
Şekil.7.30	: KBPP (KB) ve DPP (D)'in gerilme-birim şekil değişimi eğrileri	204
Şekil 7.31	: Yorulma ile kırılmış KBPP (soldaki resim) ve DPP'in (sağdaki resim) yorulma bölgeleri	206
Şekil 7.32	: Yorulma ile kırılmış KBPP (soldaki resim) ve DPP'in (sağdaki resim) son kırılma bölgeleri	206
Şekil 7.33	: Yorulma ve son kırılma bölgelerinin çevrim sayısı ile değişimleri	206
Şekil 7.34	: Yorulmamış KBPP'in kırık yüzeyinin (solda, 500 büyütmede) ve kırılma yüzeyindeki bir elyafın (sağda, 1.000 büyütmede) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	207
Şekil 7.35	: 10 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	207
Şekil 7.36	: 100 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	208
Şekil 7.37	: 1.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	208

Şekil 7.38	: 10.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	209
Şekil 7.39	: 25.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	209
Şekil 7.40	: Yorularak kendiliğinden kırılmış KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	210
Şekil 7.41	: 10.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyinin yorulma (solda) ve son kırılma (sağda) bölgelerinde bulunan elyafların 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	210
Şekil 7.42	: 25.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyinin yorulma (solda) ve son kırılma (sağda) bölgelerinde bulunan elyafların 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	211
Şekil 7.43	: Yorularak kendiliğinden kırılmış KBPP'in kırık yüzeyinin yorulma (solda) ve son kırılma (sağda) bölgelerinde bulunan elyafların 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	211
Şekil 7.44	: Yorulmamış DPP'in kırık yüzeyindeki sünek kırılma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 200 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	212
Şekil 7.45	: Yorulmamış DPP'in kırık yüzeyinin son kırılma bölgesinde bulunan elyafların 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüsü	212
Şekil 7.46	: 10 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 200 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	213
Şekil 7.47	: 100 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	213
Şekil 7.48	: 1.000 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	213
Şekil 7.49	: 10.000 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	214
Şekil 7.50	: 100.000 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	214

Şekil 7.51	: 300.000 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	214
Şekil 7.52	: Yorularak kendiliğinden kırılmış DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	215
Şekil 7.53	: 100.000 çevrim yorulmuş (solda) ve yorularak kendiliğinden kırılmış (sağda) DPP'lerin kırık yüzeylerindeki son kırılma bölgelerinde bulunan elyafların 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	215
Şekil 7.54	: Yorularak kendiliğinden kırılmış çentikli KBPP'in kırık yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu yardımıyla 10 büyütmede genel görünümü	216
Şekil 7.55	: Yorularak kendiliğinden kırılmış çentikli KBPP'in, kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	216
Şekil 7.56	: Yorularak kendiliğinden kırılmış çentikli KBPP'in kırık yüzeyinin son kırılma bölgesinde bulunan elyafların 2000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüsü	217
Şekil 7.57	: KBPP ve DPP'in yorulma hasarı mekanizmalarının şematik gösterimi	220
Şekil 7.58	: KBPP ve DPP'in maksimum yorulma gerilmelerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimi (Wöhler eğrisi)	221
Şekil 7.59	: KBPP ve DPP'in normalize maksimum yorulma gerilmelerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimi (normalize Wöhler eğrisi)	221
Şekil 7.60	: KBPP'le gerçekleştirilen yorulma testleri sonuçlarının %95 güvenilirlik aralığında gösterimi	223
Şekil 7.61	: DPP'le gerçekleştirilen yorulma testleri sonuçlarının %95 güvenilirlik aralığında gösterimi	223
Şekil 7.62	: KBPP'le gerçekleştirilen yorulma testleri sonuçlarının gerilme yüzdelerine göre dağılımı	224
Şekil 7.63	: DPP'le gerçekleştirilen yorulma testleri sonuçlarının gerilme yüzdelerine göre dağılımı	224

SEMBOL LİSTESİ

N	: Yorulma ömrü
N_ç	: Çekirdeklenme safhası
N_i	: Çatlak ilerleme safhası
a	: Çatlak boyu
ΔK	: Gerilme şiddet faktörü aralığı
C	: Malzeme sabiti
m	: Malzeme sabiti
ΔK_{eşik}	: Yorulma çatlak ilerlemesinin başlamadığı en büyük gerilme şiddet faktörü aralığı
K_c	: Malzemenin kırılma tokluğu
ρ	: Eğrilik yarıçapı
a_{eşik}	: Eşik çatlakının uzunluğu
σ_Y	: Yorulma dayanımı
σ_G	: Gerilme genliği
σ_{ÜST}	: Üst gerilme
σ_{ALT}	: Alt gerilme
σ_{ORT}	: Ortalama gerilme
R	: Gerilme oranı
R'	: Ortalama gerilmenin üst gerilmeye veya ortalama gerilmenin alt gerilmeye oranı
σ_{çY}	: Değişken çekme veya dalgalı çekme bölgesinde yorulma dayanımı
σ_{bY}	: Değişken basma veya dalgalı basma bölgesinde yorulma dayanımı
σ_{eY}	: Değişken eğme veya dalgalı eğme bölgesinde yorulma dayanımı
σ_{çbD}	: Çekme-basma değişken yorulma dayanımı
σ_{eD}	: Eğme değişken yorulma dayanımı
σ_{çDal}	: Çekme dalgalı yorulma dayanımı
τ_D	: Burmada değişken yorulma dayanımı
τ_{Dal}	: Burmada dalgalı yorulma dayanımı
γ	: Yüzey işi parametresi
U	: Genleme enerjisi yoğunluğu
σ_{cz}	: Çizgisel çatlak oluştuğu gerilme
r_{cz}	: Çizgisel çatlak boyu
K_{max}	: Gerilme yoğunluğu faktörünün maksimum değeri
δ_{cz}	: Çizgisel çatlak ucu açılma miktarı
t_f	: Kırılma süresi
σ_i	: Çizgisel çatlak gerilmesi
ε'_i	: Çizgisel çatlak genleme hızı
m_c	: Ampirik değer
D₀	: Çizgisel çatlak fibrilleri açıklığı
M	: Molekül ağırlığı
f	: Frekans
φ	: Elyaf yönü ile çekme eksenindeki açı
T_g	: Camı geçiş sıcaklığı

M_w	:	Ortalama molekül ağırlığı
E_s	:	Cidarın elastisite modülü
E'_s	:	Cidarın anlık elastisite modülü
σ_s	:	Cidara gelen gerilme
E_c	:	Merkezin elastisite modülü
$E_{c(0)}$	:	Hasarsız bölgenin elastisite modülü
E'_c	:	Hasarlı bölgenin elastisite modülü
W	:	Numune genişliği
E	:	Kompozitin elastisite modülü



SÜREKSİZ CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİPROPİLENİN YORULMA DAVRANIŞI

ÖZET

Plastiklerin gittikçe artan oranda hareketli parçalar ve komponentlerde kullanılması sonucu, tasarımcıların çevrimsel yüklemelere maruz kalan plastiklerin performans ve ömürleri hakkındaki bilgilere ihtiyaçları artmaktadır. Bu gerçeğe rağmen, plastikler hakkındaki yorulma bilgileri metaller kadar gelişmemiştir.

Metallerden farklı olarak, mekanik komponentlerde kullanılan mühendislik plastikleri saf polimer hallerindeyken yeterince rijit değildir. Bu sorun, plastikleri uzun veya kısa cam, karbon, aramid, polyester veya diğer tip elyaflarla takviye ederek aşılıma çalışılmaktadır. Bu tip takviyeler plastiklere daha yüksek rijitlik, boyut kararlılığı bazen daha düşük sürtünme katsayısı (artan yağlayıcılık özelliği ile) ve daha yüksek ısıl geçirgenlik sağlamasının yanısıra özellikle yorulma hasarına olan eğilimi büyük oranda düşürmektedir.

Bu çalışmada, ağırlıkça %30 kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli ve cam elyaf dolgulu polipropilenlerin yorulma davranışları ve hasarları incelenmiştir. Bu çalışmanın amaçlarından biri, söz konusu malzemeleri dinamik parçalarda kullanmak için yorulma tasarım dataları oluşturmaktır. Çalışmanın bir başka amacı ise, bahsi geçen malzemelerin hasar ve yorulma mekanizmaları hakkında ki mevcut bilgi kapasitesini arttırmaktır.

Yorulma testlerinde, TARGOR firmasının ağırlıkça %30 kısa cam elyaflı GC30H251 ticari kodlu kimyasal bağlı polipropilen (KBPP) ve GF30H152 ticari kodlu dolgulu (kimyasal bağ içermeyen) polipropilen (DPP) malzemeleri kullanılmıştır. GC30H251 malzemesi, elyaf ve matris arasındaki bağlanmayı arttırmak amacıyla kimyasal bağlanma (chemical coupling) özelliği içermektedir. Matris malzemesi olarak kullanılan polipropilen homopolimer, izotaktik ve ısı stabilizatörlüdür. Takviye elemanı olarak kullanılan cam elyaf E-camı'dır. Cam elyafların ortalama çapları 10 mikrondur. Elyafların enjeksiyon sırasındaki kırılmalarını tespit etmek için, enjeksiyon öncesi ve sonrası 500 adet elyaflın değerlendirilmesi ile ayrı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, cam elyafların boyları enjeksiyon sırasında %15 oranında azalmaktadır.

Yorulma davranışının incelenmesi için çatlak ilerlemesi yönteminin sıkça kullanılmasına karşın, bu çalışmada çatlaksız test çubuklarıyla gerçekleştirilen "kümülatif hasar yöntemi" tercih edilmiştir. "Kümülatif hasar yöntemi"nin tercih edilmesinin nedeni, çatlak ilerlemesi yöntemi sadece var olan bir çatlağın ilerlemesini incelerken, bu yöntem sayesinde çatlak oluşumu, ilerlemesi ve kırılma safhalarını birarada incelemek mümkün olmaktadır.

Testlerde gerilme oranı (minimum gerilme/maksimum gerilme) 0,1 olarak seçilmiştir. Uygulanan zorlamanın dalga şekli sinüzoidaldir. Yükleme tipi çekme-çekme tipi yorulma zorlamasıdır. Çekme-çekme tipi test kullanılmasının nedeni, sıfır gerilme civarında numunede oluşabilecek basma gerilmelerinden kaçınmaktır. Yorulma testleri, ısı hasarı önlemek amacıyla 1 Hz frekansta gerçekleştirilmiştir.

Yorulma testleri sırasında toplanan datalar histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme başlıkları altında incelenmiştir. Yorulmaya zorlanmış numunelerle her iki malzemenin “kalan çekme dayanımları” ve “kalan elastik modülleri” saptanmıştır. Mikroyapılar, taramalı elektron mikroskobu yardımıyla incelenerek, yorulma mekanizmaları araştırılmıştır. KBPP ve DPP’in Wöhler deneyleri için %95 güvenilirlik aralığı (confidence interval) çalışması yapılmıştır. Yorulma test sonuçlarının gerilme yüzdelere göre dağılımları, kutu grafikler (box plot) yardımıyla incelenmiştir.

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

Yorulma testleri sırasında elde edilen datalardan oluşturulan histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin incelenmesinin, hasar mekanizmasının gelişimini araştırmak için uygun fiziksel özellikler olduğu görülmüştür. Yalnızca bu çalışmada incelenen KBPP ve DPP’in değil, hemen tüm takviyeli polimer malzemelerin yorulma davranışları hakkında bilgi sahibi olabilmek için bahsi geçen fiziksel özelliklerin herhangi biri kullanılabilir.

KBPP’de histerizis alanı hasar oluşana kadar değişmemekte, hasardan hemen önce düşük miktarlarda artış göstererek kırılma gerçekleşmektedir. DPP’de ise, histerizis alanı yorulma testinin başından itibaren artmaya başlamakta, test boyunca artış sürmekte ve KBPP’e göre çok yüksek artışlar göstererek kırılma gerçekleşmektedir. Kimyasal bağlı polipropilende elyaf-matris arabağı daha kuvvetli olduğu için yük elyafa aktarılabilmekte, böylece yük elyaf ve arayüzey tarafından birlikte taşınmaktadır. Dolgulu polipropilende ise, elyaf-matris arabağı daha zayıf olduğu için yük elyafa etkili bir şekilde aktarılamamakta, dolayısıyla matris yük taşımaya başlamaktadır. Bu durum, cam elyaf dolgulu polipropilenin histerizis alanının her çevrimde büyümesine neden olmaktadır.

KBPP ve DPP’in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişimi eğrileri birbirleriyle uyum sağlamaktadır. Bu eğrileri, sayılan özelliklerin yorulma çevrim sayısı artışına karşın sabit kaldığı veya önemli miktarda değişmediği “hasar oluşum hızı düşük bölge” ve yorulma çevrim sayısına bağlı olarak histerizis enerjisi ve dinamik sürünmenin arttığı, buna karşın dinamik modülün azaldığı “hasar oluşum hızı yüksek bölge” şeklinde iki bölgeye ayırmak mümkün olmaktadır.

Her iki malzemede de hasar elyaf uçlarında başlamaktadır. Elyaf uçlarında başlayan matristen ayrılmalar, çevrimsel hareket nedeniyle elyaflar boyunca matristen ayrılmalara dönüşmektedir. Bu ayrılmalar nedeniyle matris yük taşımaya başlamakta ve polipropilen matriste sünek olarak deformasyon gözlenmektedir. Sıyrılan elyafların etkisiyle kompozit, uygulanan gerilmelere daha yüksek birim şekil değişimleri ile cevap vermektedir. Şekil değişimindeki artış, yeni elyaf-matris ayrılmalarına yol açmaktadır. Ayrılmalardan oluşan boşluklar büyümekte ve mikro boşluklara dönüşmektedir. Oluşan mikro boşluklar, büyük bir çatlak oluşturacak şekilde gelişmektedirler. Söz konusu çatlak, hasar cephesi (metalik malzemelere benzer) şeklinde tüm kesite yayılarak ilerlemektedir. Sıyrılan elyaflar nedeniyle, kompozitin yük taşıma kapasitesi gittikçe azalmaktadır. Yorulma bölgesi belli bir büyüklüğe ulaştıktan sonra, kalan kesit uygulanan yükü taşıyamamakta ve tek bir çatlağın hızla numune kesidine yayılması sonucu, kompozit gevrek bir şekilde

hasara uğramaktadır. Dolgulu polipropilende hasar, zayıf elyaf-matris arayüzeyi nedeniyle, kimyasal bağlı polipropilene göre daha kolay başlamakta ve daha hızlı ilerlemektedir.

Her iki malzemede de yorulma hasarı zorlanan kesitte yerel olarak başlamakta, metal malzemelerde görülen hasar ilerlemesine benzer şekilde tüm kesite yayılarak, bir çizgi halinde (hasar cephesi şeklinde) ilerlemektedir. Yorulma hasarının “hasar cephesi” şeklinde ilerlemesi, takviyeli polimerlerin literatüründe yeni bir bulgudur.

Malzemelerin yorulma dayanım değerlerindeki sapmalar, bu değerlerin mekanik tasarımlarda güvenle kullanılabileceği sınırlarda kalmaktadırlar. Yorulma dataları tipik S-N eğrileri şeklinde sunulabilmekte ve her iki malzeme de yorulma sınırı göstermemektedirler.



FATIGUE BEHAVIOR OF DISCONTINUOUS GLASS FIBER REINFORCED POLYPROPYLENE

SUMMARY

The increasing use of plastics in moving parts and mechanical components has created a need for data that will permit the designer to predict the performance and life of plastics under cyclic fatigue loads. In spite of this need, the state of the art is not as well developed for plastics as it is for metals.

Unlike metals, the engineering plastics used in molded mechanical components are not rigid in their neat polymer state. This shortcoming has been largely overcome in molded gears by reinforcing these plastics with long and short glass, carbon, aramid, polyester, or other fibers. These reinforcing materials impart stiffness, stability, and, in some cases, greater lubricity and heat conductivity; and significantly reduce the tendency toward fatigue failure.

In this study, fatigue behavior and failure of 30% wt. short glass fiber reinforced chemically coupled and uncoupled polypropylenes were investigated. One of the aims of this study is to create design data for the above mentioned materials in the design of dynamic components. To increase the knowledge about the failure and fatigue mechanism of the materials is the second aim of the study.

In the fatigue tests, 30% wt. chemically coupled (CCPP) and uncoupled (UCPP) glass fiber reinforced polypropylenes supplied by TARGOR were used (GC30H251 and GF30H152). Chemical coupling was used in CCPP to increase the bonding property between the fibers and the matrix polymer. The polypropylenes used as matrices were homopolymer, isotactic and heat stabilized. Glass fiber type was E-glass. The average diameter of glass fibers was 10 microns. Another study was performed with 500 fibers before and after the injection to evaluate the fiber breakage during the injection molding. According to the results, the glass fibers have shortened 15% during the injection.

Although "crack propagation method" was applied in many studies found in literature to investigate fatigue behavior, in this study "cumulative damage method" was applied with non-cracked specimens. Although crack propagation method investigates only the propagation of existing crack, information about crack initiation, propagation and fracture steps can be investigated by "cumulative damage method".

The minimum to maximum load ratio R was chosen to be 0.1. Load wave form was sinusoidal. To avoid the compression effect near the zero stress tensile-tensile load type was used. Test frequency was chosen to be 1 Hz to avoid unacceptable temperature increase due to hysteretic heating and thermal failure of the specimen.

Collected data during the fatigue test were classified by hysteresis energy, dynamic modulus and dynamic creep. Residual strength and residual elastic modulus were determined from fatigued materials. The microstructural mechanisms were discussed with the help of scanning electron microscope observations. Confidence interval studies were done for Wohler curves of CCPP and UCPP. Variations in fatigue test results were visualized by box plots.

During this study the followings results were obtained:

Hysteresis energy, dynamic modulus and dynamic creep which were proposed in this study are suitable physical properties to investigate the propagation of fatigue failure. These properties can be used not only to investigate for these materials but also for all reinforced polymers.

In CCPP, an hysteresis area remains constant until the failure occurs. The hysteresis area slightly increases before failure. Unlike CCPP, the hysteresis area in UCPP continuously increases during the test and it breaks showing the high increase. Since the fiber-matrix bonding is better for CCPP, load can be transferred to fibers, and loads are borne with fiber and interface together. Since the fiber-matrix interface is worse for UCPP, load can not be transferred to fibers effectively, and matrix starts to bear the loads, and hence, hysteresis areas are become bigger and bigger with fatigue cycles.

Hysteresis energy, dynamic modulus and dynamic creep curves show same tendencies and results. These curves can be splitted into two regions; in the first region, the materials are not affected from fatigue cycles and this region is called "low deformation rate region" and in the second which is called "high deformation rate region" above properties are deteriorated with increasing fatigue cycles.

Failure starts at the fiber ends. Fiber-matrix debonding propagates along the fibers with cyclic movements. Because of the debonding process, matrix starts to bear the load and ductile deformation is observed in the matrix. Composite reacts with more strain to the applied load for the reason of the debonding fibers. Increasing strain triggers the new fiber-matrix debondings. Microscopic voids grow during the test, and become macroscopic crack areas. The cracked areas develops to form a big main crack. For the reason of the debonding fibers, load bearing capacity of composite reduces. After the fatigued area grows to the extend that loads cannot be carried by the remaining cross section, material fails under tensile stresses brittlely. Because of the weak fiber-matrix interface, in UCPP, failure starts easier and propagates faster than CCPP.

In both materials fatigue damage starts as locally, it extends as a line like "failure front" similar to metallic materials and it propagates to whole section. Propagation of fatigue failure as "failure front", is a new information about the literature of reinforced polymers.

Variations in fatigue test results for both materials are within acceptable limits and the results can be used in engineering calculations confidently. Fatigue data can be shown as S-N curves and both materials do not show any endurance limits.

1. GİRİŞ

Yorulma (fatigue), malzemelerin çevrimsel (cyclic) yüklemeler etkisiyle statik akma dayanımlarının altındaki gerilmelerde hasara uğraması olarak tanımlanır. Plastiklerin gittikçe artan oranda hareketli parçalar ve komponentlerde kullanılması sonucu, tasarımcıların çevrimsel yüklemelere maruz kalan plastiklerin ömürleri hakkındaki bilgilere ihtiyaçları artmaktadır. Bu gerçeğe rağmen, plastikler hakkındaki yorulma bilgileri metaller kadar gelişmemiştir.

Metallerden farklı olarak, mekanik komponentlerde kullanılan mühendislik plastikleri saf polimer hallerindeyken yeterince rijit değildir. Bu sorun, plastikleri uzun veya kısa cam, karbon, aramid, polyester veya diğer tip elyaflarla takviye ederek aşılmaya çalışılmaktadır. Bu tip takviyeler plastiklere daha yüksek rijitlik, boyut kararlılığı bazen daha düşük sürtünme katsayısı (artan yağlayıcılık özelliği ile) ve daha yüksek ısı geçirgenlik sağlamasının yanısıra özellikle yorulma hasarına olan eğilimi büyük oranda düşürmektedir. Enjeksiyon kalıplama, takviyeli polimerlerle parça üretimi açısından en uygun üretim yöntemlerinden biridir. Belli bir ürün için seçilmiş malzemenin, diğer tüm özelliklerinin yanısıra yorulma dayanımının da araştırılması tavsiye edilmektedir.

Bu çalışmada, ağırlıkça %30 kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli ve cam elyaf dolgulu polipropilenlerin yorulma davranışları incelenmiştir. Bu çalışmanın amaçlarından biri, söz konusu malzemeleri dinamik parçalarda kullanmak isteyen tasarımcılar için yorulma tasarım dataları oluşturmaktır. Bu çalışma hem malzemelerin yorulma testleri sırasında elde edilen datalarla, hem de daha klasik bir yol olan yorulma zorlamasına maruz kalmış numunelerle yapılan mekanik testler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bir başka amacı ise, bahsi geçen malzemelerin yorulma mekanizmalarını hasar analizleri eşliğinde yorumlayarak malzeme bilimi açısından faydalı bilgiler üretmektir.

2. YORULMA ZORLAMASI VE DAYANIMI

2.1. Genel

Uygulamada statik zorlamalara ender olarak rastlanır. Makinalara ve dolayısıyla makina parçalarına, genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak sürekli değişen kuvvetler ile eğme ve burma momentleri etki ederler. Değişen zorlamalardan dolayı kırılma, söz konusu malzemenin akma sınırının çok altındaki gerilmelerde oluşabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması adı verilir. Tasarım sırasında mukavemet bilgisinin temel denklemleri yardımıyla sadece anma gerilmelerinin hesaplanmasının yeterli olmayıp, gerilmelerin kesitteki dağılımlarının ve zamanla değişimlerinin de dikkate alınması gerektiği ancak belirli aşamalardan sonra anlaşılmıştır.

Konstrüktörler tasarımlarında malzemelerin ekonomik olarak kullanımını gözönünde bulundurmaya zorundadırlar. Mukavemet ve elastisite bilgisinin gelişmesi, giderek daha düşük güvenlik katsayılarının seçimi ve yüklerin daha kesin olarak tahmin edilebilmesi ile, malzeme değişikliğine gitmeden de makina ve yapı elemanlarının daha küçük kesitli olarak boyutlandırılabilmesi mümkün olmuştur. Ancak bu durumda gerilmelerin akma sınırını aşmamasına yeterince özen gösterildiği halde, işletme sırasında makina parçalarında kırılmalar gözlenmeye başlanmıştır. Herhangi bir şekil değiştirme yaratmadan ortaya çıkan bu kırıkların, yüksek yüklerin bir kez ve tek yönde uygulanması ile oluşan kırılma yüzeylerinden, görünüşleri bakımından tamamıyla farklı oldukları saptanmıştır. Bu gözlemlere dayanarak kısa bir süre sonra yüklerin veya momentlerin büyüklüğü ve yönünde zamanla değişmelerin söz konusu olduğu durumlarda, statik deneylerle saptanan mukavemet değerlerinin malzemenin davranışını belirlemede yetersiz kaldığı anlaşılmıştır.

Böylece bu deneyimler yorulma dayanımı kavramının doğmasına neden olmuş ve deneysel olarak yorulma dayanımının, statik dayanım değerinden çok daha düşük düzeyde olduğu saptanmıştır. Ancak işletme yüklerine göre hesaplanan gerilmeler, kullanılan malzemenin düzgün yüzeyli ve parlatılmış deney parçaları yardımıyla bulunan yorulma dayanımının çok altında kalmasına rağmen, makina parçalarının

gene hasara uğradığı gözlenmiştir. Bunun üzerine yapılan deneylerle, şekil, yüzey durumu, kuvvet iletimi, makina parçasının bulunduğu ortam ve malzemenin içyapısı gibi değişik iç ve dış etkenlerin yorulma dayanımını değiştirdiği; dolayısıyla bu etkenleri dikkate almadan bulunan yorulma dayanımı değerlerinin mukavemet hesaplarında aynen kullanılamayacağı anlaşılmıştır.

İşletme koşullarında değişen zorlamaları ve malzeme davranışını hesapsal olarak kapsamayı amaçlayan çalışmalar henüz tatmin edici olmamakla birlikte, parçaların gittikçe daha iyi bir yaklaşımla tasarlanmasını sağlamaktadır. Şimdiye kadar çok sayıda yorulma deneyi sonucu ve değişik hesaplama yöntemleri yayınlanmıştır. Bu kuramsal yöntemler, sorunun matematiksel çözümü yanında tasarım kuralları ile kullanılan malzemenin özelliklerinin iyi bilinmesi halinde güvenle uygulanabilmektedir. Ancak yorulmaya etki eden faktörlerin fazlalığından ötürü günümüzde de gene çok sayıda yorulma hasarına rastlanmakta; makina, taşıt v.b. konstrüksiyonlarda görülen hasarın % 90-95'i yorulmadan ileri gelmektedir.

Konstrüktörler değişen yükler ile zorlanan parçaların tasarımında verilere bağlı olarak aşağıdaki değişik hesaplama yöntemlerini izleyebilirler:

1. Konstrüksiyonu belirleyen dört büyüklük de (şekil, boyutlar, malzeme ve zorlama) verilmişse, sadece kritik kesitlerde yorulmaya karşı güvenliğin yeterli olup olmadığının kontrolü gereklidir.
2. Sadece malzeme ve zorlama şeklinin belirli olduğu durumlarda, parça gerekli güvenlik sağlanacak şekilde boyutlandırılır.
3. Eğer parçanın şekli ve boyutları belirli ise, o zaman gerekli güvenlik sağlanacak şekilde, malzeme ve zorlama üst sınırı saptanır.

2.2. Yorulma Zorlamasının Özellikleri

Büyüklüğü ve yönü düzenli ya da düzensiz bir şekilde sürekli değişen kuvvet veya momentlerin (eğme, burma) etkimesi yorulma zorlaması olarak adlandırılır. Zorlama sırasında yük istendiği kadar tekrarlanabilir veya zorlamanın yapılmadığı zaman aralıkları mevcut olabilir. Yorulma zorlamasında yükün zamana bağlı olarak nasıl değiştiğinden çok, en alt ve en üst sınır değerlerinin büyüklüğü önemli olduğundan, yük değişimi genellikle sinüzoidal olarak kabul edilebilir. Birim zamandaki çevrim sayısı, çok düşük (örneğin saatte birkaç çevrim) veya malzemenin ısınmasına

neden olacak kadar çok yüksek olmamak koşuluyla, yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilemez. Kuvvetin veya momentin en küçük ve en büyük değerleri konumuna göre ters veya aynı işaretli olabilir. Yorulma zorlamasının iki hali için özel isimler verilmiştir: Kuvvet veya moment aynı büyüklükte, fakat biri artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasında değişiyor ise değişken zorlama ve malzeme dayanımı bakımından değişken yorulma dayanımı değeri söz konusudur. Kuvvet veya moment sıfır değeri ile belirli bir diğeri sınır arasında değişiyor ise dalgalı zorlama ve malzeme dayanımı bakımından dalgalı yorulma dayanımı değeri deyimleri kullanılır. Yorulma zorlaması sadece dış kuvvetlerin değil, örneğin sıcaklık farkları nedeni ile oluşan iç kuvvetlerin etkimesi ile de görülebilir [1].

2.3. Yorulma Kırılması

2.3.1. Yorulma Kırılmasının Nedeni

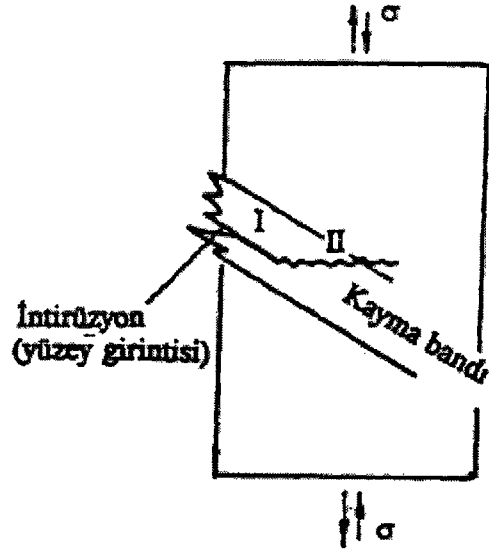
İşletme koşullarındaki zorlamalar sonucu ortaya çıkan gerilmeler mukavemet bilgisinin temel denklemlerine her zaman uymaz; dolayısıyla çekme veya basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılma, eğme ve burma gerilmeleri de yüzeyden ortaya doğru doğrusal bir azalma göstermeyebilirler. Uygulamada bu kuramsal gerilme dağılımlarında az veya çok sapmalar görülür. Parçanın şekli, yüzey kalitesi, ortamın korozyon etkisi, kuvvet iletiminin türü, ön gerilme, malzeme hatası, mikroyapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenler ile yerel gerilme yığılmaları oluşur. Yorulma çatlağı gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde başlar. Ayrıca bir makina veya yapı elemanının, öztitreşim frekansına yakın bölgelerde zorlanması sonucu oluşan rezonans titreşimlerine veya her zaman önlenmesi mümkün olmayan aşırı yüklere dayanacak şekilde tasarlanmış olmaması da yorulma çatlaklarına yol açabilir. Yorulma hasarının diğeri bir nedeni de montaj hatalarıdır. Örneğin balansı bozulmuş bir milde, hesaplarda öngörülenlerden daha yüksek gerilmeler oluşabilir. Aşırı zorlanan bir bölgede bir çatlağın başlaması durumunda yorulma kırılmasının önlenmesine çoğunlukla olanak yoktur. Çatlağın ilerleyerek kırılmanın oluşması ise çevrim sayısı yani (frekansa bağlı olarak) belirli bir zaman sorunudur. Bir yorulma çatlağının görülmesi kullanılan malzeme veya malzeme durumu için yerel bir gerilme yükselmesinin bulunduğu işaretlerdir. Yorulma sonucu oluşan keskin çatlak ek bir çentik etkisi ortaya çıkaracağından, gerilmeler bakımından durum daha kötüleşecek, bu suretle yaratılan çok yüksek gerilme yığılmaları çatlağın hızla ilerlemesi ve büyümesine neden olacaktır. Ayrıca yük

taşıyan kesit sürekli küçüldüğünden, bu kesitte gerilmenin sınır değerleri giderek daha da yükselecektir. Gözlemler yorulma çatlakları ilerleme hızının çatlak derinliğinin karesi ile arttığını göstermektedir. Parçanın ikiye ayrılması çoğunlukla uzunca bir süreyi gerektirdiği ve zorlama sürekli değiştiği için olay yorulma kırılması olarak adlandırılır. Bazı hallerde ise yorulma çatlakları kesitin tam olarak ayrılması ile sonuçlanmaz; çatlak oluşması ile parça daha az zorlanır ve dolayısıyla gerilmenin üst sınırı malzemenin yorulma dayanımı değerinin altında kalırsa veya çatlak çevresinde gerilme durumunun değişmesi ile yerel bir malzeme pekleşmesi olursa çatlak ilerlemesi durabilir.

Yukarıdaki bilgilerin ışığında yorulma hasarını dört safhada inceleyebiliriz:

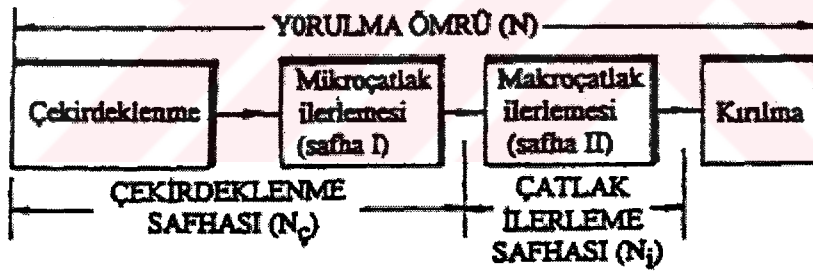
1. Yorulma çatlaklarının çekirdeklenmesi: Yerel ve tersinir olmayan plastik şekil değiştirmeler sonucu yüzeyde intrüzyonların (yüzey girintilerinin) oluşması (Şekil 2.1).
2. Çatlakların yerel plastik deformasyon (kayma) bandında ilerlemesi: Çekirdeklenen çatlakların, yüksek kayma gerilmelerinin mevcut olduğu ve çekme doğrultusuyla 45° açı yapan kayma bandı içinde ilerlemesi. Buna “safha I” çatlak ilerlemesi adı da verilir.
3. Çatlakların maksimum çekme gerilmesinin etki ettiği düzlemde ilerlemesi: Uzunluğu makro çatlak olarak kabul edilebilecek ölçüde olan çatlakların maksimum çekme gerilmesine dik düzlemde ilerlemesi. Buna “safha II” çatlak ilerlemesi adı da verilir (Şekil 2.1).
4. Kırılma: Çatlak uzunluğunun kritik bir değere ulaşması sonucu, kalan kesidin kırılması. Bu kırılmaya “zoraki kırılma” adı da verilmekte olup, kırılma, sünek veya gevrek biçimde olabilir.

İlk üç safha Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Yorulma hasarının ilk üç safhası [2]

Şekil 2.2'de ise tüm safhalar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Yorulma hasarının safhaları [2]

Yorulma hem çekirdeklenme hem de çatlak ilerlemesi safhalarında plastik deformasyon sonucu oluşur. Her safhaya karşılık gelen tekrar sayısı kolaylıkla saptanamaz. Kırılma ömrün en son tekrarında oluşur ve hasarın bu safhası yorulmadan ziyade yarı-statik bir kırılmadır. Mikroskopik etüdler, çatlak çekirdeklenmesinin yorulma ömrünün ilk başlarında oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Safha I çatlak ilerlemesinin hangi tekrar sayısından sonra başladığını saptamak

kolay değildir. Ancak, buna pratik açıdan gerek de yoktur. Bu durumda yorulma hasarının ilk iki safhası birleştirilerek bir basitleştirme yapılabilir:

$$N = N_{\text{ç}} + N_i \quad (2.1)$$

Burada, N yorulma ömrü, $N_{\text{ç}}$ ilk iki safha için geçen tekrar sayısı olup, ilk iki safhanın toplamı, çekirdeklenme safhası olarak kabul edilmiştir. N_i ise makroçatlak ilerlemesinde (safha II) geçen tekrar sayısıdır (Şekil 2.2). Makroçatlağın klasik tanımı, çıplak gözle seçilebilecek uzunluğa sahip çatlaktır. Ancak bu tanım oldukça kabadır. Bir çatlak, kırılma mekaniği prensipleri uygulanabilecek kadar büyükse makroçatlak olarak kabul edilir. Bu değerin alüminyum alaşımlarında 0,125 mm ve çeliklerde 0,2 mm civarında olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.

Yorulma safhalarının detaylı incelenmesinin nedeni, farklı uygulamalarda farklı safhaların önem kazanmasıdır. Aşağıdaki üç tip uygulama bu konuda bir fikir verebilir:

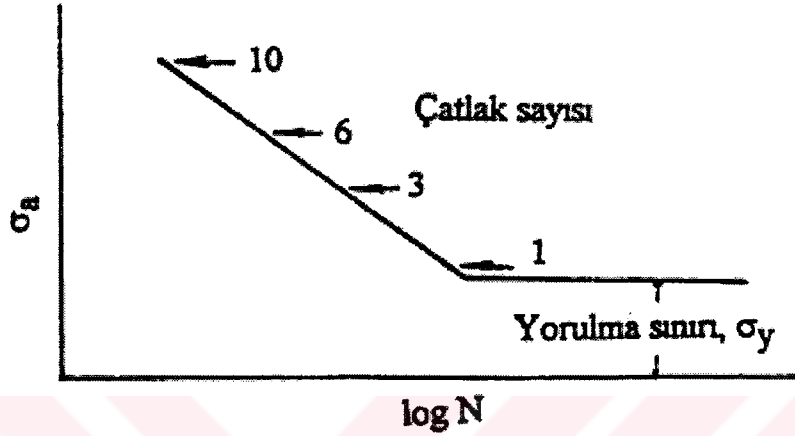
1. Otomobil motoru: Çatlak oluşmamalıdır. Sonsuz ömür istenir, bu nedenle çatlak ilerlemesi safhası konu dışındadır. Amaç, çatlak çekirdeklenmesi oluşmayacak şekilde tasarım ve imalatıdır.
2. Nükleer basınçlı kap: Kaynakla imal edilen bu yapılarda birtakım başlangıç hataları beklenmelidir. Bu nedenle çatlak çekirdeklenmesi önemini kaybetmiştir. Çatlak ilerleme safhası (çok yavaş) önem kazanmıştır.
3. Uçak gövdesi: Sonlu bir ömür kabul edilmelidir. Bu nedenle tasarım ve imalatı hem çekirdeklenme hem de çatlak ilerleme safhaları önem kazanır.

Yorulma çatlağı genellikle malzeme yüzeyinde oluşur. Bunun nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Bazı yükleme hallerinde (burulma, eğilme), gerilmeler yüzeyde en büyük değeri alır.
2. Yüzey pürüzlülüğü gerilme yığılmalarına neden olur.
3. Yüzeyler dış ortamdan etkilenir (örneğin, çentik etkisi yapan korozyon çukuru oluşabilir).

4. Yüzeyde düzlem gerilme halinin olması nedeniyle burada plastik şekil değişimi daha kolaydır.

Çatlak yüzeyde birden fazla noktada çekirdeklenebilir. Genlik gerilmesi arttıkça, bunların sayıları artar. Ancak yorulma sınırına yakın gerilme değerlerinde tek bir çatlak çekirdeklenmesi olabilir (Şekil 2.3).

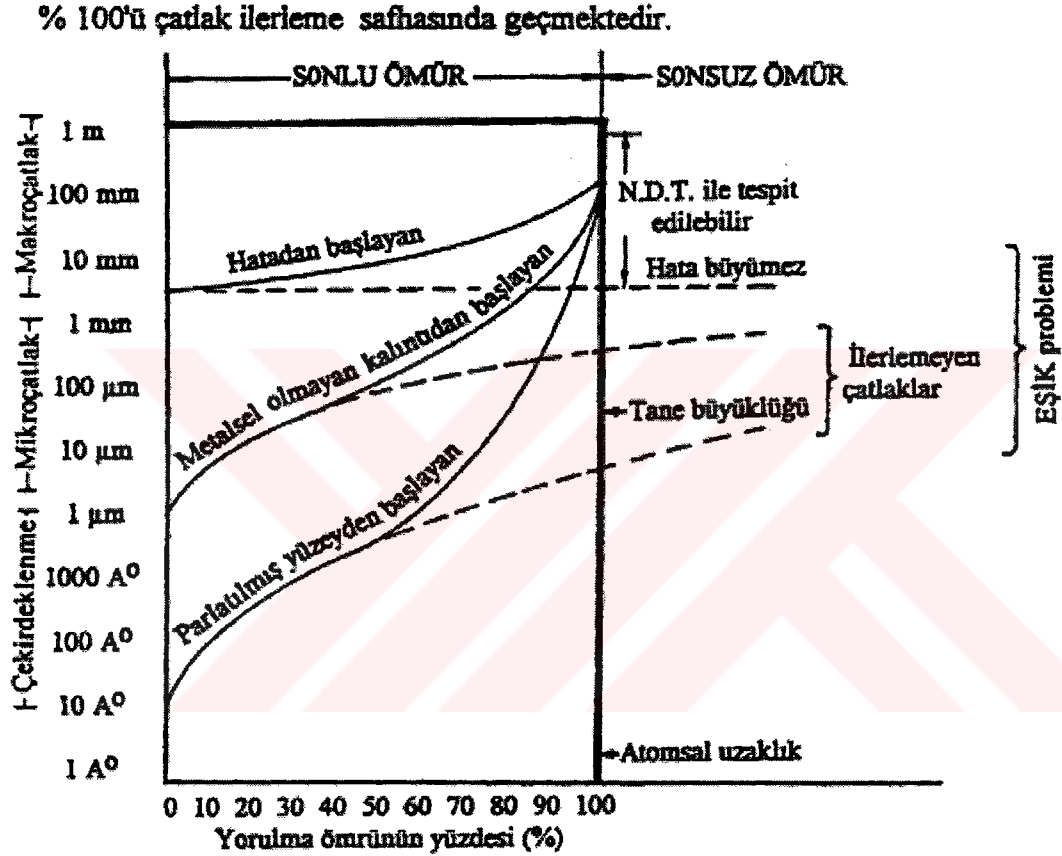


Şekil 2.3 Çekirdek sayısının genlik gerilmesine bağlı olarak değişimi [2]

Çekirdeklenme ve çatlak ilerleme safhalarının yorulma ömrü içindeki yüzdeleri çeşitli faktörlere bağlı olarak değişir. Çatlak ilerleme safhasının yorulma ömrü içindeki yüzdesi (N_i/N) şu şekilde değişmektedir.

1. Genlik gerilmesi arttıkça N_i/N artar.
2. Aynı ömür için, malzemenin tokluğu arttıkça N_i/N artar. Buna göre tok malzemelerde çekirdeklenme kolay olup çatlak ilerleme hızı (da/dN) düşüktür. Gevrek malzemelerde ise, çekirdeklenme daha zor olup çatlak ilerleme hızı yüksektir. Burada çatlak ilerleme hızı, bir tekrar başına çatlakın ilerleme miktarı olarak tanımlanmaktadır.
3. N_i/N çentiğin mevcudiyeti ile ve çentiğin keskinleşmesi ile artar. Bu durumda keskin çentikler veya önceden mevcut olan çatlaklar halinde, N_i/N ihmal edilecek mertebede olup, yorulma ömrünün tümünün çatlak ilerlemesinde geçtiği kabul edilebilir.

Şekil 2.4'de metalsel malzemeler için çeşitli hatalardan başlayan yorulma hasarında, yorulma çatlak uzunluğunun yorulma ömrünün yüzdesine göre değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, parlatılmış bir yüzeyden başlayan yorulma hasarında, yorulma ömrünün %90'ı çekirdeklenme safhasında geçmektedir. Diğer taraftan, bir makro-çatlaktan başlayan hasarda ise, yorulma ömrünün %100'ü çatlak ilerleme safhasında geçmektedir.



Şekil 2.4 Yorulma çatlak uzunluğunun yorulma ömrünün yüzdesine göre değişimi [2]

Malzemede başlangıçta makro sayılabilecek bir hata mevcut değilse, yorulma ömrünün neredeyse tamamı çekirdeklenme safhasında geçer. Çekirdeklenme safhasında yorulma hasarı, malzemenin çok küçük bir hacminde olduğu için, büyük ölçüde malzemedeki yerel şartlara bağlıdır. Bu nedenle, bir malzemenin deneysel olarak elde edilen yorulma özelliklerinde, bir deney parçasından diğerine,

önemli ölçüde dağılma oluşur. Buna karşılık, bir makro-çatlaktan başlayan yorulmalarda, yorulma özelliklerinde bir dağılma görülmez.

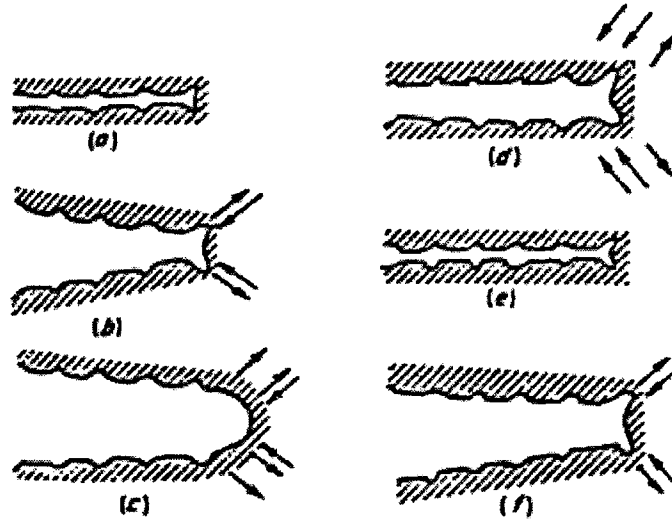
2.3.2. Yorulma Çatlağının İlerlemesi (Safha II)

Yorulma çatlağının II. safhada ilerlemesi sırasında yorulma yüzeyinde “ince yorulma çizgileri (fatigue striations)” adı verilen ve ancak elektron mikroskopuyla görülebilen çizgiler oluşur (Şekil 2.5). Bu çizgiler, yorulma yüzeyinde gözle görülebilen ve “durak çizgileri” veya “yorulma çizgileri” adı verilen çizgilerle karıştırılmamalıdır. İki durak çizgisi arasında binlerce ince yorulma çizgisi olabilir.



Şekil 2.5 İnce yorulma çizgileri [2]

İnce yorulma çizgileri, her yük tekrarında, çatlağın belirli bir miktar ilerlemesi sonucu oluşur. Yani bu çizgiler arasındaki uzaklık, çatlağın boyunda bir tekrar sonunda oluşan artmayı verir. Çatlak ilerledikçe, çatlak ucundaki yerel gerilmeler daha da artıp çatlak ilerleme hızını (da/dN) artırır. Bu ise, her bir tekrarda çatlağın boyundaki uzama miktarını arttırdığından, ince yorulma çizgileri arasındaki uzaklık çatlak boyu arttıkça artar. Şekil 2.6'da ince yorulma çizgilerinin oluşum mekanizması açıklanmıştır.



Şekil 2.6 İnce yorulma çizgilerinin oluşum mekanizması [2]

Yüklemeye sırasında, çatlak ucunun her iki tarafındaki “kulaklar”da çekme doğrultusuyla 45° açı yapan kayma bandlarında yoğun plastik deformasyon oluşur (Şekil 2.6b). Yük artarken çatlak yüzeyleri hem birbirinden uzaklaşır, hem de çatlak ucunun kendisi kütleşerek plastik deformasyonla uzar (Şekil 2.6c). Yükün boşalması sırasında yüklemeye yönü değiştiğinden, çatlak ucundaki kayma, başlangıç yönünün ters yönünde oluşur (Şekil 2.6d). Bu olay çatlak ucunda yeni bir “kulak çifti” oluşturur. Bu kulaklar yorulma yüzeyinde ince yorulma çizgileri olarak görünür.

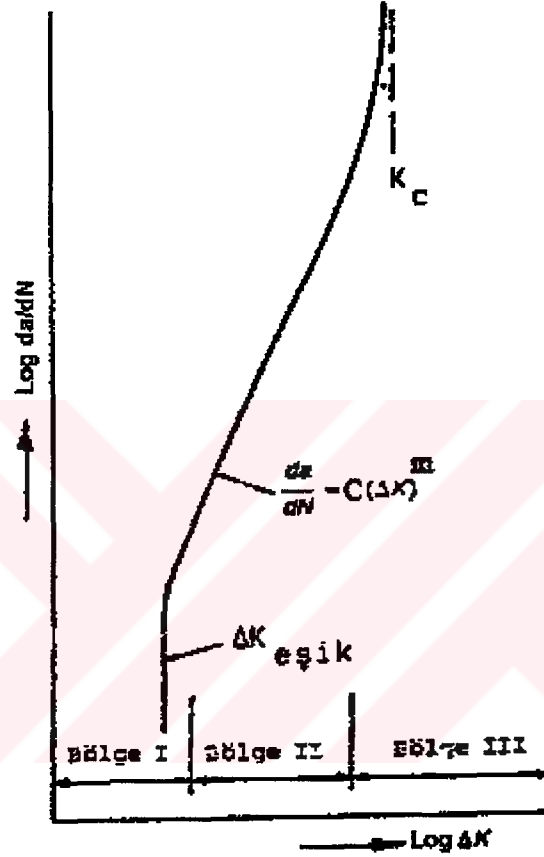
Yüzeydeki ince yorulma çizgilerinin gözlenmesi aşağıdaki nedenlerden ötürü mümkün olmayabilir:

1. İnce yorulma çizgileri arasındaki uzaklık kullanılan gözlem yöntemiyle saptanamayacak kadar küçüktür.
2. Plastik deformasyonla oluşan kulaklar, çatlak ucundaki yetersiz süneklik nedeniyle, gözlenebilecek büyüklükte değildir.
3. Yorulma yüzeyinin herhangi bir nedenle tahribi sonucu, çizgiler silinmiştir.

Yorulma çatlaklarının II. safhada ilerlemesiyle ilgili yoğun araştırmalar yapılmıştır. Küçük bölgede akma halinde, çatlak ilerleme hızı da/dN ile gerilme şiddet faktörü aralığı ΔK arasında aşağıdaki türden bir ilişkinin varlığı saptanmıştır.

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad (2.2)$$

Burada, $\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \beta (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) (\pi a)^{1/2}$ olup, $K_{\max}$ ve $K_{\min}$ sırasıyla maksimum ve minimum gerilme değerleriyle hesaplanan gerilme şiddet faktörleridir. Yüklemenin $R \leq 0$ halleri için, $K_{\min} = 0$ kabul edilir. C ve m malzemeye bağlı sabitlerdir. Çelikler için m'nin değeri 3 civarındadır. Şekil 2.7'de da/dN 'nin ΔK 'ya göre değişimi çift logaritmik skalada verilmiştir.



Şekil 2.7 Çatlak ilerleme hızının gerilme şiddet faktörü aralığı ile değişimi [2]

Şekil 2.7'deki I. bölge "ilerlemeyen" çatlaklara (eşik problemi), II. bölge safha II çatlak ilerlemesine, III. bölge de zorunlu kırılma bölgesine karşılık gelir. III. bölgeye $K_{\max} = K_c$ olunca girilir ve yorulma statik türden bir kırılmayla sonuçlanır. Bir bölgeden diğerine geçiş genellikle ani değildir. Çift logaritmik skalada II. bölgede, (2.2) ifadesiyle verilen doğrusal değişim mevcuttur. $\Delta K_{\text{eşik}}$ değeri, başlangıç çatlağı içeren cisimde yorulma çatlağı ilerlemesinin gözlenmediği en büyük gerilme şiddet faktörü aralığıdır. Ortalama gerilmenin veya gerilme oranının artması II. bölgedeki

çatlak ilerleme hızını artırır. Ancak gerilme oranının etkisi I. ve III. bölgede daha kuvvetlidir. Gerilme oranının etkisini gösteren ve II. ve III. bölgeyi de içine alan ifade,

$$da/dN = C (\Delta K)^m / [(1-R) K_c - \Delta K] \quad (2.3)$$

şeklinde olup, burada K_c malzemenin kırılma tokluğudur. Bu bölgelere çeşitli faktörlerin etkisi Tablo 2.1’de verilmiştir.

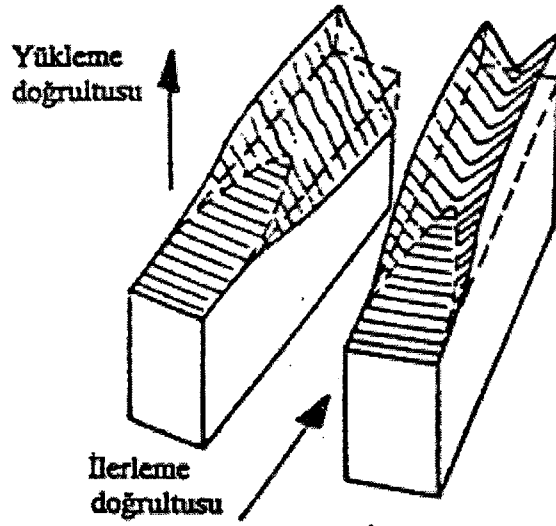
Tablo 2.1 da/dN- ΔK eğrisini etkileyen faktörler [2]

Faktör	Bölge		
	I	II	III
Mikroyapı	Çok	Az - Çok*	Çok
Gerilme Oranı	Çok	Az	Çok
Ortam	Çok	Çok**	Az
Kalınlık	-	Az	Çok
Frekans	-	Az	-

*) Malzemeye bağlı olarak.

**) Bazı ortamlarda.

Çatlak ilerleme mekanizması II. bölgede ince yorulma çizgileri, III. bölgede ise, statik kırılmada oluşan mekanizmalardan biridir. Çatlağın parça yüzeyine ulaştığı yerlerde kayma dudakları oluşabilir. Yeterince gevrek malzemelerde, zoraki kırılma bölgesinde çavuş işaretleri oluşabilir. Parça yeterince ince ise zoraki kırılma bölgesi, “eğik kırılma” yüzeyine sahip olabilir. Bu halde, III. bölgeye yakın gerilme şiddet faktörü aralığı değerlerinde, yorulma çatlağı da eğik düzlemlerde ilerleyebilir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 İnce levhalarda yorulma kırılması [2]

Çeliklerde $\Delta K_{\text{eşik}}$ değeri $3-7 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ arasında değişir. Çeşitli çeliklerde $\Delta K_{\text{eşik}}$ değerinin alt sınırları gerilme oranı R 'ye bağlı olarak aşağıdaki eşitliklerle verilmektedir:

$$\begin{aligned} \Delta K_{\text{eşik}} &= 7 (1 - 0,85R) & R > 0,1 \\ \Delta K_{\text{eşik}} &= 6 & R < 0,1 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Burada $\Delta K_{\text{eşik}}$ değerinin boyutu $\text{MPa(m)}^{1/2}$ 'dir. Diğer taraftan, çeşitli çeliklerde, ρ eğrilik yarıçapındaki çentiklerden oluşabilecek yorulma çatlakları için eşik değeri aşağıdaki ifadeyle verilebilmektedir:

$$\Delta K_{\text{eşik}} / \rho^{1/2} = 26,3 (\sigma_{\text{ak}})^{1/2} \quad -1 < R < 0,1 \quad (2.5)$$

Burada $\Delta K_{\text{eşik}}$ $\text{MPa(m)}^{1/2}$ boyutunda, ρ m boyutunda ve malzemenin akma dayanımı σ_{ak} MPa boyutundadır.

2.3.3. Yorulma Faz Diyagramı

Yorulma faz diyagramı, yorulma çatlağı uzunluğuyla genlik gerilmesi arasında çizilir. Böyle bir diyagram, ortalama gerilmenin sıfır olduğu hal için, Şekil 2.9'da verilmiştir. Bu diyagram, şekilden de görüldüğü gibi çeşitli bölgelere ayrılabilir. Bu bölgeler yorulma açısından farklı özelliklere sahip olup, bu özellikler aşağıda açıklanmıştır:

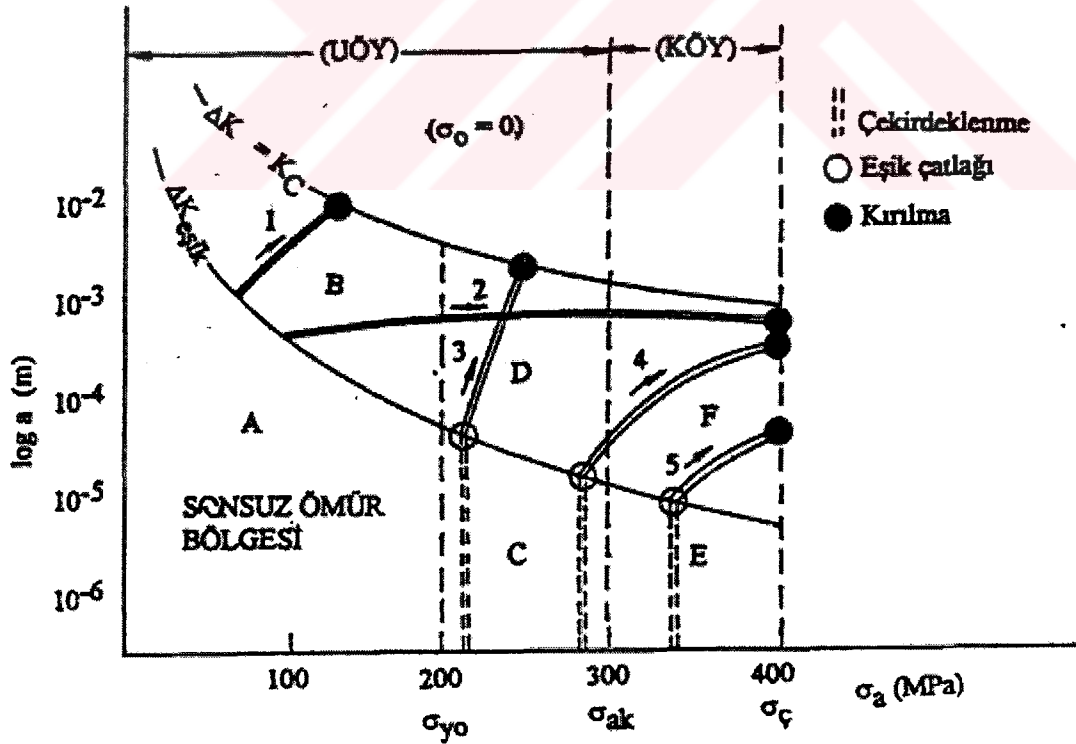
A bölgesi: Bu bölge hem yorulma sınırının (σ_{yo}) hem de eşik değerinin ($\Delta K_{eşik}$) altındadır. Bu nedenle A bölgesinde ne çekirdeklenme ne de çatlak ilerlemesi oluşur.

B bölgesi: Bu bölge yorulma sınırının altında, ancak eşik değerinin üzerindedir. Bu nedenle B bölgesinde sadece çatlak ilerlemesi gözlenir.

C bölgesi: Bu bölge eşik değerinin altında, ancak yorulma sınırının üzerindedir. Bu yüzden C bölgesinde “yorulma hasarı birikimi”, bir başka deyişle çatlak çekirdeklenmesi oluşur.

D bölgesi: Bu bölge hem yorulma sınırının hem de eşik değerinin üzerindedir. Bu nedenle D bölgesinde çatlak ilerlemesi etkin olacaktır.

E ve F bölgeleri: Bu bölgeler C ve D bölgelerine benzerdir, ancak plastik alandadırlar. Bu nedenle kısa ömürlü yorulma (KÖY) rejimindedirler. σ_{ak} düşeyiyle ayrılan bölgelerin birinden diğerine geçiş ani olmayıp, belirli bir aralıkta oluşur.



Şekil 2.9 Yorulma faz diyagramı [2]

2.3.4. Eşik Çatlağı

Verilmiş bir malzemede ve verilmiş yükleme şartlarında, çatlak ilerleme safhasının (safha II) başlaması için yeterli uzunluğa sahip olan çatlağa “eşik çatlağı” adı verilir. Eşik çatlağının uzunluğu, $\Delta K = \Delta K_{\text{eşik}}$ ifadesi yardımıyla aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$a_{\text{eşik}} = (\Delta K_{\text{eşik}})^2 / \pi \beta^2 \Delta \sigma^2 \quad (2.6)$$

Bu eşik çatlağı, çatlak çekirdeklenme safhasının bittiği ve ilerleme safhasının başladığı çatlak uzunluğu olarak da kabul edilebilir. $a_{\text{eşik}}$ değeri oldukça küçük olup, malzemeye bağlı olarak, değeri 0,005-0,25 mm arasında değişir. Çeliklerde bu değer 0,2 mm, alüminyum alaşımlarında ise 0,125 mm civarındadır. $a_{\text{eşik}}$ değerlerinin bu kadar küçük olması yorulmanın, parçanın yüzey pürüzlülüklerinden doğrudan safha II çatlak ilerlemesiyle başlayabileceğini göstermektedir.

2.3.5. Faz Diyagramında Hasar Oluşum Yolları

Faz diyagramındaki A bölgesi, sonsuz yorulma ömrüne, diğer bölgeler sonlu yorulma ömrüne karşılık gelir. B bölgesinde yorulma hasarı, içinde $a > a_{\text{eşik}}$ uzunluğunda çatlak (hata) içeren parçalarda doğrudan çatlak ilerlemesiyle (safha II) başlar. Bu bölgede safha I mevcut değildir. Parça, $K_{\text{max}} = K_c$ olduğunda gevrek (Şekil 2.9 1 yolu) veya $\sigma_{\text{max}} = \sigma_c$ olduğunda sünek (2 yolu) olarak kırılır. Çatlak ilerlemesiyle ilgili araştırmalar, başlangıçta çatlak içeren deney parçaları ile, bu bölgede yapılır. C bölgesinde genlik gerilmesi yorulma sınırının üzerinde olduğundan, bu bölgede hasar çekirdeklenme ile başlar. Çekirdeklenme sonucu çatlak uzunluğu $a_{\text{eşik}}$ değerine ulaştıktan sonra D bölgesine girilir ve çatlak ilerleme safhası başlar. Parça, $K_{\text{max}} = K_c$ olduğunda gevrek (3 yolu) veya $\sigma_{\text{max}} = \sigma_c$ olduğunda sünek olarak (4 yolu) kırılır. Parlatılmış deney parçalarıyla yapılan klasik yorulma deneyleri 3 veya 4 yolunu takip eder. E bölgesi KÖY rejimi bölgesidir. Parlatılmış deney parçalarıyla yapılan KÖY deneyleri 5 yolunu takip eder [2].

2.4. Yorulma Dayanımının Saptanması

Malzemelerin yorulma dayanımlarının saptanması için düzgün deney parçaları kullanılır. Çentik duyarlılığının araştırılması için de, çentik katsayıları belirli çentikli deney parçalarından yararlanılır. Günümüzde kullanılan yorulma deney makinaları

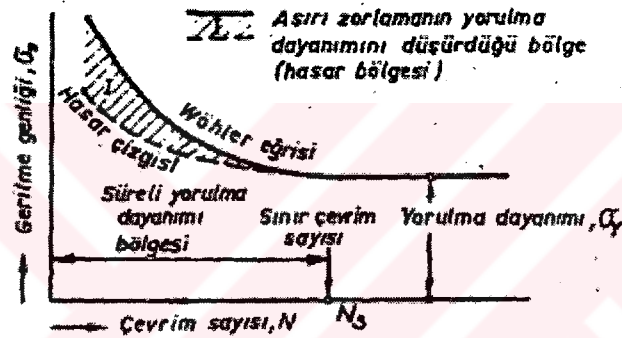
çekme, çekme-basma, çevresel eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır. Bu makinaların deney frekansları, yapılarına bağlı olarak 500-15000 1/dak (8-250 Hz) arasındadır. Söz konusu aralık için çelikten yapılmış düzgün parçaların yorulma dayanımları frekansa bağlı değildir. Ancak hafif metaller, plastikler ve çentikli parçalarda yorulma davranışı frekansla değişir ve bu değişim süreli yorulma durumunda daha fazladır. Deney parçası örneğin asit içermeyen bir yağla soğutulmazsa, ısınma nedeniyle zamanından önce çatlayabilir. Süreli yorulma zorlamasında frekansın çok düşük veya çok yüksek olması, çeliklerde de düz veya çentikli tüm parçaların yorulma ömürlerinin azalmasına neden olur.

Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler yöntemiyle bulunur. Bu yöntemde, malzeme, biçim ve yüzey kalitesi bakımından tümüyle aynı olan deney parçalarının herbiri aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları saptanır. Bir deney serisinde çoğunlukla 6-10 adet parça gereklidir. Belirli bir deney parçası için başlangıçta ayarlanan yorulma zorlaması deney sırasında değiştirilemez, yani “tek kademeli yorulma deneyi” söz konusudur. Buna karşın “çok kademeli yorulma deneyi”nde zorlama sistematik olarak deney sırasında değiştirilir. Her bir zorlama kademesi belirli çevrim sayıları arasında sabit kalır; zorlamaların sırası istenildiği gibi seçilebilir; yani giderek artabilir, azalabilir veya karışık olabilir. Sadece iki zorlama seviyesinin bulunduğu deneyler “iki kademeli yorulma deneyi” olarak adlandırılır.

Yorulma deneyi zaman zaman durdurulursa, düzgün deney parçalarında toparlanma olayı görülür ve böylece aralıksız olarak yapılan deneyden daha yüksek yorulma dayanımları elde edilir. Çentikli deney parçalarında malzeme bünyesindeki değişik mekanizmalara bağlı böyle bir toparlanma olayının etkisi görülmez.

Deneyin amacına, malzeme ve deney makinasına göre yük veya şekil değiştirme genlikleri kontrol edilir ve bu büyüklükler gerilme veya birim şekil değişimi değerlerine dönüştürülür. Wöhler yönteminde bir deney serisinde tüm parçalar için ortalama gerilme σ_{ort} veya alt gerilme σ_{alt} sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği σ_g seçilir. İlk deney parçası üst gerilme genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney parçalarına ise gittikçe daha düşük zorlama uygulanarak kırılma çevrim sayısının çok yüksek değerlere ulaşması sağlanır. Bir deney serisi sonunda uygulanan gerilme genlikleri ve kırılmanın görüldüğü çevrim sayılarının bir eğri olarak çizim ile, eğer noktalar büyük dağılmalar göstermiyor ise, Şekil 2.10’de verilen “Wöhler eğrisi” elde edilir. Bu grafikte normal

olarak apsis (çevrim sayısı) logaritmik, ordinat (gerilme genliği) ise metrik bölümlü olarak seçilir. Sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görülmediği en büyük gerilme genliği yani eğrinin asimptotuna karşılık olan değer yorulma dayanımı olup σ_Y veya τ_Y ile gösterilir. Diğer yandan belirli bir çevrim sayısından sonra (sınır çevrim sayısı) eğri sonsuz çevrim sayısına yaklaşıyor kabul edilebilir. Sınır çevrim sayısı oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda çelikler için $10 \cdot 10^6$, ağır ve hafif metaller ile yüksek sıcaklıklarda çelikler için $100 \cdot 10^6$ veya daha fazla olarak alınır. Deney süresinin kısaltılması amacıyla çelik için $2 \cdot 10^6$ ve hafif metaller için $10 \cdot 10^6$ - $50 \cdot 10^6$ sınır çevrim sayıları da kullanılmaktadır. Bu nedenle σ_Y sembolü yanında söz konusu sınır çevrim sayısı da verilmelidir. Örneğin sınır çevrim sayısının 10^6 olması halinde $\sigma_{Y(10^6)}$ gibi.



Şekil 2.10 Wöhler eğrisi ve hasar çizgisi [1]

Yorulma dayanımından daha büyük gerilme genliklerinin bir süre uygulanmasının muhakkak hasara veya diğer bir deyişle yorulma dayanımının azalmasına yolaçacağı söylenemez. Önemli olan bu aşırı yüklemelerin seviyesi ve bunlara ait çevrimlerin sayısıdır. Hangi koşullarda hasarın başlayacağını belirten ve görünümü bakımından Wöhler eğrisine benzeyen "hasar çizgisi" sürekli yorulma bölgesi için söz konusu olup yüksek çevrim sayılarında Wöhler eğrisi ile birleşir (Şekil 2.10). Hasar çizgisi yorulma dayanımı üzerinde bir zorlamanın, daha sonra aynı parçada yorulma dayanımına eşit bir zorlamada kırılma meydana gelmemek koşuluyla, en çok kaç çevrim sayısı taşınabileceğini göstermektedir.

Yorulma dayanımını malzemeye bağlı, teknolojik ve deney tekniği ile ilgili çok sayıda faktör etkilediğinden, bu değer normal Wöhler yöntemi yani 6-10 deney parçası

yardımla güvenilir şekilde bulunabilmesi oldukça güçtür. Wöhler eğrisini dağılma bantının ortalama eğrisi olarak veya yorulma dayanımını belirli bir yüzde olasılıkla verebilmek için çok sayıda deney yapılması ve bunların istatistik olarak değerlendirilmesi zorunludur. Wöhler eğrisinin dağılma bantının güvenli olarak saptanabilmesi, en az 40-200 deney parçasını gerektirir. Hasar çizgisinin de kesin belirlenebilmesi için çok sayıda deney yapılmalıdır.

Sürekli yorulma ve yorulma dayanımlarını hesaplayabilmek amacıyla Wöhler eğrisi için bazı analitik ifadeler önerilmiştir. Ancak gerçek malzeme davranışlarını içermeyen bütün bu ifadeler, yorulma dayanımı ile statik deneylerden elde edilen değerler (örneğin çekme dayanımı) arasında kurulan ampirik bağıntılardan daha iyi sonuç vermezler. İstatistiksel olarak güvenli yorulma dayanımı değerleri elde etmek için "Merdiven Yöntemi" olarak adlandırılan yaklaşım kullanılabilir. Bu yöntemde, saptanması istenen büyüklüğün beklenen dağılma bölgesi, örneğin yorulma dayanımı veya sürekli yorulma bölgesinde belirli bir çevrim sayısına tekabül eden gerilme genliği basamaklara bölünür. Deneyler beklenen dağılma bölgesinin ortasındaki bir zorlama ile başlar. Deney parçası kırılırsa, bir sonraki deney bir alt basamağın gerilmesi ile yapılır; parça kırılmazsa bir üst basamağın gerilmesine geçilir. Başlangıç deneyi dışında bütün deneylerde uygulanacak gerilme genliği bir önceki deney sonucuna göre seçilir. Gerilme genliği bu şekilde değiştirilerek belirli sayıda deney yapıldıktan sonra sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilir. Bu yöntemin üstünlüğü tüm deneylerin hepsinin kendiliğinden ortalama değer etrafında toplanmasıdır. Bu arada her deney parçası sadece bir kez kullanılır. Sınır çevrim sayısı da dahil olmak üzere, çeşitli çevrim sayılarında dağılma bantının saptanması için en az 40 deney parçası gereklidir. Yöntem çentikli parçalar ve hasar çizgisine de uygulanabilir.

2.5. Yorulma İle İlgili Semboller

DIN 50100'e göre aşağıdaki semboller kullanılmakta ve deneylerle saptanan dayanım değerleri büyük indisler, mevcut zorlama şartlarını belirleyen yani önceden verilmiş olan değerler ise küçük indisler taşımaktadır.

Tablo 2.2. Yorulma ile ilgili semboller [1]

σ_Y	Yorulma dayanımı (genel anlamda)
σ_G	Verilen bir σ_{ort} ortalama gerilmesi için bulunan yorulma dayanımının gerilme genliği
$\sigma_{ÜST}$	Verilen bir σ_{ort} ortalama gerilmesi veya σ_{alt} gerilmesi için bulunan yorulma dayanımının üst gerilmesi (işaretten bağımsız olarak gerilmenin en büyük mutlak değeri)
σ_{ALT}	Verilen bir σ_{ort} ortalama gerilmesi için bulunan yorulma dayanımının alt gerilmesi (işaretten bağımsız olarak gerilmenin en küçük mutlak değeri)
σ_{ORT}	Deneye esas olarak σ_{ALT} alt gerilmenin alınması halinde bulunan yorulma dayanımının ortalama gerilmesi
$2\sigma_G$	Gerilme alanı ($\sigma_{ÜST} - \sigma_{ALT}$)
R	Gerilme oranı $\sigma_{ALT}/\sigma_{ÜST}$ veya $\sigma_{alt}/\sigma_{üst}$ (İşaret dikkate alınacak)
N	Kırılma çevrim sayısı
R'	$\sigma_{ORT}/\sigma_{ÜST}$ veya $\sigma_{ort}/\sigma_{üst}$ (İşaret dikkate alınacak)
σ_G/σ_K	Yorulma dayanımı oranı=Yorulma dayanımı gerilme genliğinin (σ_G) çekme dayanımına (σ_K) oranı

Yorulma dayanımının hangi σ_{ORT} için bulunduğu aşağıdaki biçimlerde ve çoğunlukla da ilk gösterim şeklinde olduğu gibi belirtilir.

$$\sigma_Y = \sigma_{ort} \pm \sigma_G \quad \text{veya} \quad \sigma_{ort} = \dots\dots \text{ için } \sigma_Y = \pm \sigma_G \quad (2.7)$$

Yorulma dayanımının sayısal değeri ise genliğin mutlak değerine eşittir.

$$\sigma_Y = | \sigma_G | \quad (2.8)$$

Başka bir şekilde belirtilmediği takdirde yorulma zorlamasının türü çekme, basma ve eğme zorlamaları için sırasıyla σ_c , σ_b ve σ_e indisleri ile verilir (Tablo 2.3).

Tablo 2.3. Yorulma zorlaması indisleri [1]

σ_{cY}	Değişken çekme veya dalgali çekme bölgesinde yorulma dayanımı
σ_{bY}	Değişken basma veya dalgali basma bölgesinde yorulma dayanımı
σ_{eY}	Değişken eğme veya dalgali eğme bölgesinde yorulma dayanımı
σ_{cbD}	Çekme-basma değişken yorulma dayanımı
σ_{eD}	Eğme değişken yorulma dayanımı
σ_{cDal}	Çekme dalgali yorulma dayanımı

2.6. Yorulma Dayanımına İlişkin Genel Tanımlar

2.6.1. Değişken Bölgede Yorulma Dayanımı

Ortalama gerilme sıfırdan farklı ve gerilme genliğinden daha küçüktür. Alt ve üst gerilmeler ters işaretlidir ($-1 < R < 0$). Şekil 2.11 değişken çekme bölgesinde yorulma dayanımı için zorlama durumunu göstermektedir.

2.6.2. Dalgali Bölgede Yorulma Dayanımı

Ortalama gerilme sıfırdan farklı ve gerilme genliğinden daha büyüktür. Alt ve üst gerilmeler aynı işaretlidir ($0 < R < +1$). Şekil 2.12 dalgali çekme bölgesinde yorulma dayanımı için zorlama durumunu göstermektedir.

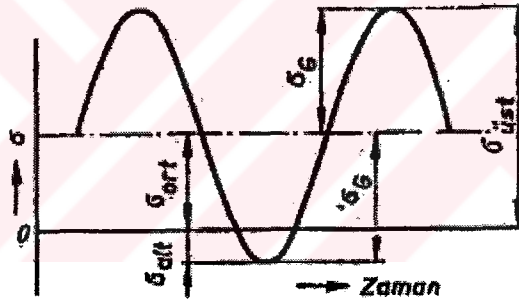
2.7. Yorulma Dayanımına İlişkin Özel Tanımlar

2.7.1. Değişken Yorulma Dayanımı, σ_D

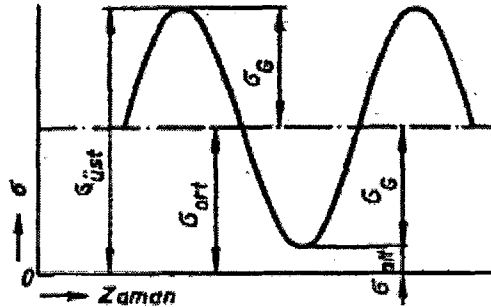
Ortalama gerilme her zaman sıfırdır, yani gerilme eşit ancak ters işaretli iki sınır değeri arasında değişir. Bu nedenle genliğin maksimum değeri alt ve üst gerilmelere eşit olup $R=-1$ 'dir (Şekil 2.13). Eğmede σ_{eD} , burmada τ_D ve çekme-basmada $\sigma_{\phi bD}$ sembolleri kullanılır.

2.7.2. Dalgalı Yorulma Dayanımı, σ_{Dal}

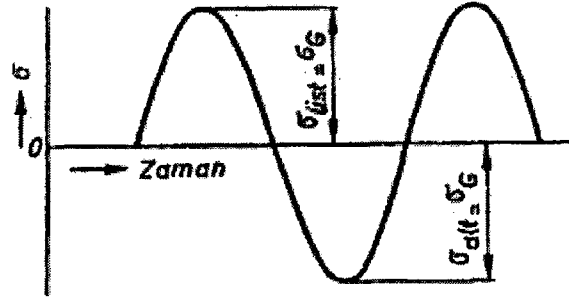
Gerilme genliği ortalama gerilmeye eşittir. Alt gerilme σ_{alt} sıfır, dolayısıyla $R=0$ 'dır (Şekil 2.14). Zorlama türüne bağlı olarak ç (çekme), b (basma) veya e (eğme) indisleri σ_{Dal} sembolüne eklenerek kullanılır (örneğin eğme için σ_{eDal}). Burmada dalgalı yorulma dayanımı τ_{Dal} olarak gösterilir. Dalgalı yorulma dayanımının sayısal değeri, genel olarak kural dışında gerilme genliğinin iki katı yani gerilme alanına eşit olarak da alınabilmektedir.



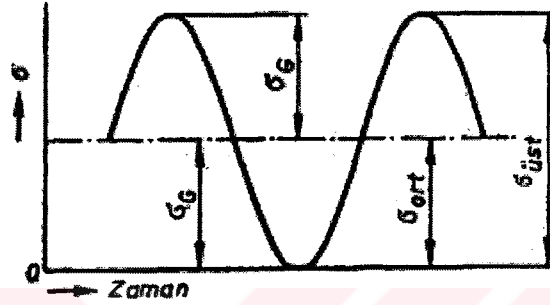
Şekil 2.11 Değişken çekme bölgesinde yorulma zorlaması, $\sigma_Y = |\sigma_G|$ (verilen σ_{ort} için) [1]



Şekil 2.12 Dalgalı çekme bölgesinde yorulma zorlaması, $\sigma_Y = |\sigma_G|$ (verilen σ_{ort} için) [1]



Şekil 2.13 Değişken yorulma zorlaması, $\sigma_D = |\sigma_G|$ [1]



Şekil 2.14 Dalgalı yorulma zorlaması, $\sigma_{Dal} = |\sigma_G|$ veya $|2\sigma_G|$ [1]

2.8. Süreli Yorulma Dayanımı

Daha önce bahsedildiği gibi, örneğin $N=10^5$ çevrim sayılı bir ömre karşılık olan süreli yorulma dayanımı genel olarak $\sigma_{Y(10^5)}$ sembolüyle gösterilir. Özel durumlar da benzer şekilde belirtilir, örneğin süreli değişken yorulma dayanımı için $\sigma_{D(10^5)}$.

2.9. Yorulma Ömrü

Bir deney parçası veya yapı elemanının “yorulma ömrü”, yorulma dayanımından daha yüksek bir gerilmede kırılmanın olduğu çevrim sayısıdır. Yorulma ömrünün gösteriminde ortalama gerilme σ_{ort} ve gerilme genliği σ_g , söz konusu kırılma çevrim sayısına indis olarak eklenir. Örneğin, $N_{(+8\pm14)} = 2,2 \cdot 10^6$ gösterimi ile $\sigma_{ort} = +8$ kgf/mm^2 ve $\sigma_g = \pm 14$ kgf/mm^2 olan bir zorlamada, kırılmanın $2,2 \cdot 10^6$ çevrim sayısında olduğu anlaşılmaktadır.

3. POLİMERLERİN YORULMA DAVRANIŞI VE HASARLARI

Çevrimsel yüklemeler altında, polimerler metallere benzer şekilde deformasyon modları (gerilme-şekil değiştirme histerizis ve çevrimsel yumuşama gibi) ve kritik altı çatlak ilerlemesi gösterirler. Polimerik katı malzemelerde, kinematik geri dönüşsüz deformasyonlar; kılcal akma (crazing), kayma bandları oluşumu, moleküler zincirlerin dönmesi veya oryantasyonlarındaki diğer değişiklikler veya bu mekanizmaların kombinasyonu olabilir. Polimerlerin yorulmasında kılcal akma ve kayma akması en çok bilinen iki deformasyon modudur. Kılcal akma kırılğan hasarı, kayma bandı oluşumu ile deformasyon daha sünek bir prosesi ifade etmektedir.

Kılcal çatlak (craze) camsı polimerlerde (amorf) örnek olarak; polistiren (PS), polimetilmethakrilat (PMMA) ve polisülfon (PSF) ve bazı yarı-kristalin polimerler örnek olarak; polietilen (PE), polipropilen (PP), polietilenterafitelat (PETP) ve polioksimetilen (POM)'de oluşur. Bu polimerik katılar düşük sıcaklıklarda çekme gerilmesine maruz kaldıklarında, seramiklerde ki yüzey yarıklarına (flaw) benzeyen çatlak benzeri oluşumlar görülür. Kılcal çatlak boyunca malzeme sürekliliği vardır, oysa ki kırılğan bir katıda ki Griffith çatlağının yüzeyleri tamamen ayrılır. Kılcal çatlaklar daima maksimum eksenel gerilmeyle normal yapacak şekilde yönlenirler, oysa ki kırılğan bir katıda ki Griffith çatlağı rastgele oluşabilir. Birçok polimerde çevrimli deformasyon ve yorulma çatlağının kritik altı ilerlemesi, kılcal çatlakların çekirdeklenmesi (nucleation), büyümesi ve ayrılması ile oluşur.

Bir kılcal çatlak yüksek oranda yönlenmiş moleküllerin fibrillerini içerir. Kılcal çatlağın yoğunluğu matris yoğunluğunun yalnızca % 40 ile %60'ı kadardır ve moleküler fibriller maksimum çekme gerilmesinin yönü boyunca yönlenirler. Kısaca kılcal çatlak tek eksenli çekme gerilmesine normal yapacak şekilde yönlenirken, kılcal çatlağın içindeki fibriller çekme eksenine göre dizilirler.

Kılcal çatlakların ilerlemesi önemli bir konudur çünkü birçok polimerin kırılmasının sebebi kılcal çatlakların oluşumudur. Bu anlamda polimerdeki bir çatlağın önündeki kılcal çatlak bölgesi, sünek metalik malzemedeki bir çatlağın önündeki plastik bölgeye benzemektedir.

Kayma oluşumu da birçok polimer için önemli bir deformasyon özelliği ve hasarıdır. Çekme dayanımlarının altındaki gerilme seviyelerindeki camsı polimerlerde, plastik deformasyon kayma bandlarının oluşumu ile başlar. Kayma bandı oluşumuna hassas polimerlerde, akmanın başlangıcı kayma bandlarının başlaması ile uyumludur. Kayma bandları daima maksimum kayma gerilmesinin yönüne paralel yönelir.

Oda sıcaklığındaki metal ve polimerlerin çevrimsel deformasyon karakteristikleri arasında birçok fark vardır. Bu farklılıklar onların karakteristik sıcaklıkları (test sıcaklıklarına göre), ısıl geçirgenlikleri ve yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

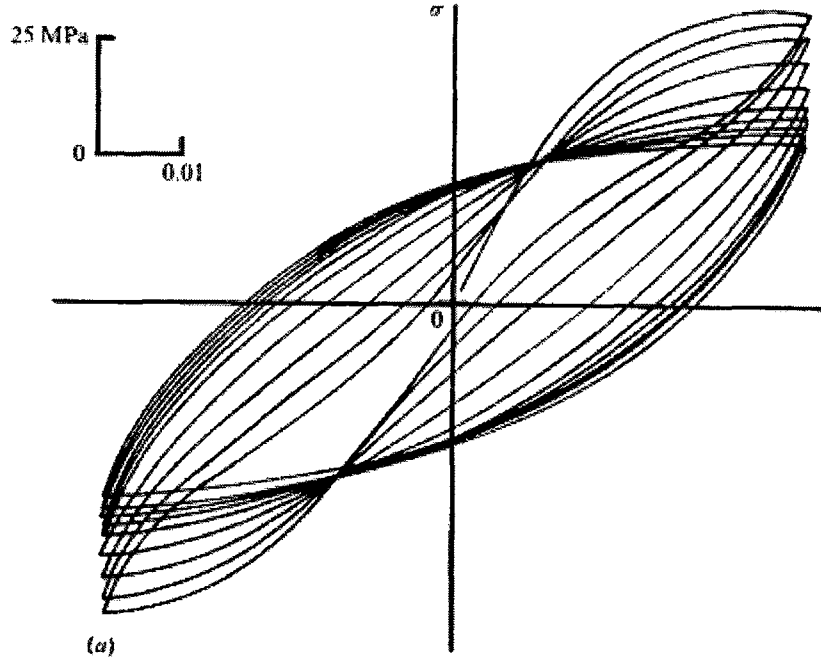
Metalik bir malzeme şekil verme prosesine, kompozisyonuna ve ısıl işlemine bağlı olarak çevrimli pekleşme (cyclic hardening) veya yumuşamaya uğrar. Diğer taraftan polimerik malzemeler yalnızca çevrimli yumuşamaya uğrarlar. Polimerin kompozisyonu, moleküler yapısı, sıcaklığı ve şekil değiştirme hızı çevrimli yumuşamanın şiddetini etkiler. Ender olsa da kimi zaman çevrimli stabilite sağlansada, bu durum yalnızca küçük şekil değiştirme genliklerinde söz konusudur.

Metal ve polimerlerin yorulma davranışları arasındaki ikinci önemli fark yükleme hızının gerilme-şekil değiştirme karakteristiklerini ve hasar modunu etkilemesidir. Birçok polimer için oda sıcaklığı dahi kritik sıcaklıklarına yakındır. Metallerde söz konusu olmamakla birlikte, termoplastiklerin güçlü lineer olmayan viskoz etkileri sonucu histeritik sönümlleme etkisi oldukça önemlidir. Bu etkiler polimerlerin düşük ısıl geçirgenlikleriyle birleştiğinde, çevrimli deformasyon sırasında yüksek şekil değişim hızlarında önemli sıcaklık artışına neden olur. Sonuçta oluşan ısıl yumuşama oldukça önemlidir ve mekanik yorulma etkilerine göre baskın hale gelir. Bu ısıl etki ve mekanik yorulma ilişkisi oldukça karmaşıktır. Gerilme genliği ve şekil değişim hızının belli kombinasyonlarında ısıl etki yorulma ömrünü oldukça etkiler diğer durumlarda ısıl ve mekanik etkilerin kombinasyonunun yorulma ömrü üzerine önemli bir etkisi yoktur. Düşük şekil değişim hızları ile çalışıldığında, diğer zamana bağlı etkiler örneğin sürünme etkisi ısıl yumuşamaya göre baskın konuma geçer.

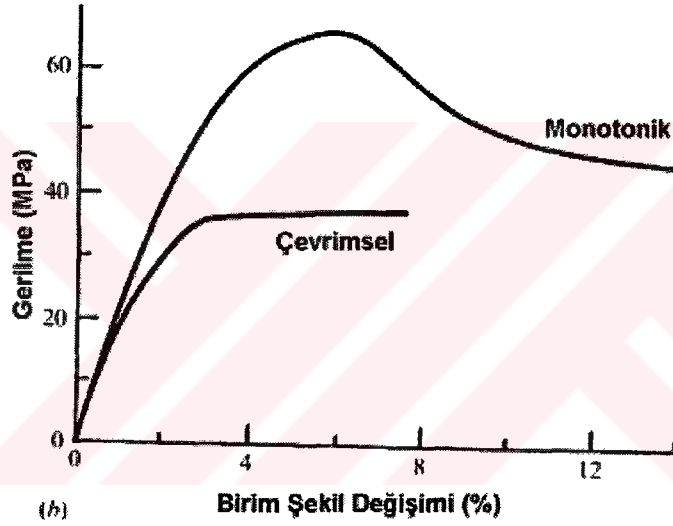
Metalik malzemelerdeki baskın yorulma deformasyon modu, tekrarlanan dislokasyonların kristal kayma düzlemleri boyunca kayması ile oluşur. Bununla beraber, polimerik malzemelerde birçok mikroskopik deformasyon modu bulunmaktadır. Bunlar kayma bandları ve kılcal akma ile oluşan normal veya kayma akması, zincir kopması, yeniden oryante olma, zincir segmentlerinin kayması, kristalizasyon veya heterojen deformasyondur.

3.1. Çevrimli Yumuşama

Çevrimli yumuşama (cyclic softening) sünek polimerler için genel yorulma davranışdır. Amorf ve yarı-kristalin polimerler de olduğu kadar, polimer matrisli kompozitler de çevrimli yumuşama gösterirler. Kristaliniteadaki değişimler çevrimli yumuşamanın derecesini ve hızını önemli bir şekilde etkiler. Amorf polimerler düşük şekil değişim genliklerine maruz kaldıklarında, yumuşamadan önce bir kuluçka (incubation) devresi geçirirler, artan şekil değişim genlikleriyle bu kuluçka süresi azalır. Homopolimerlerin çevrimli gerilme-şekil değiştirme eğrileri stabil histerizis çevrimleri üretirler. Buna karşın, polimer matrisli kompozitler bütün yorulma ömürleri boyunca doymuş bir duruma ulaşmadan çevrimli yumuşamaya uğrarlar. Bu durum matris, takviye veya matris-takviye arasındaki mikroskopik hasarların gittikçe artmasından dolayı oluşmaktadır. Metalik malzemelerde gerilme-şekil değişimi histerizis eğrileri orijin çevresinde simetrik olmasına karşın, polikarbonat gibi çoğu polimer malzeme viskoelastik deformasyon nedeniyle oda sıcaklığında pervaneye benzer bir şekil gösterir (Şekil 3.1-a). Düşük şekil değişimlerinde monotonik ve çevrimli çekme etkileri benzerdir (Şekil 3.1-b). Artan şekil değişim değerleri ile çevrimli yumuşamanın miktarı artar.



(a)



(b)

Şekil 3.1 298 K'de birim şekil değişimi kontrollu yorulma altında polikarbonatın çevrimli yumuşaması. (a) Yorulma deformasyonunun artmasıyla histerizis çevrimlerinin şekli ve yönü değişir. (b) Monotonik çekme ve yorulma altında gerilme- birim şekil değişimi davranışı [3]

Basma gerilme-şekil değişim eğrileri monotonik ve çevrimli yükleme için benzer şekildedir. Monotonik ve çevrimli etkiler arasındaki farkın nedeni moleküllerin yeniden düzenlenmesi ile ilgilidir. Çevrimli deformasyon sırasında, mikroskopik seviyede şekil değişimleri moleküllerin yeniden düzenlenmesi ile oluşur oysa monotonik yüklemede moleküllerin yeniden düzenlenmesine uygun olarak daha makroskopik kalıcı deformasyonlar söz konusudur.

3.2. Gerilme ve Deformasyon Yaklaşımları

Toplam yorulma ömrünü kontrol eden mekanizmalar morfolojik, ısı, mekanik ve çevresel faktörlerle değişebilir.

Çevrimli yükleme yüksek şekil değiştirme hızları içeriyorsa, malzeme histeritik ısınma ve ısı yumuşamaya hassastır. Sonuç olarak artan test frekansı (laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen testler için 10 Hz'in üzeri) yorulma ömründe azalma ile sonuçlanır.

Yüksek frekanslı yorulma zorlaması sırasında polimerdeki sıcaklık artışı numunenin boyutlarına da bağlıdır. İnce numunelerde, sönümlenme sırasında üretilen ısının önemli bir bölümü çevreye verilir. Histeritik ısınma nedeniyle artan sıcaklığın önemli bir kısmını atamayan kalın numuneler daha düşük dayanım limiti (endurance limit) gösterirler. Benzer şekilde, test sıcaklığındaki artış (dış ısınma nedeniyle) yorulma ömründe azalmaya yol açar.

Birçok polimer inert ortamlarda kimyasal saldırgan ortamlara nazaran daha uzun yorulma ömrü gösterirler. Saldırgan ortamların bu tip bozucu etkisinin nedeni polimerin yapısı ve onu çevreleyen ortam arasındaki kompleks ilişkidir. Örneğin polimerin solvent olmayan bir ortamdaki absorpsiyonu sonucu camsı sıcaklığı ve modülü, kavitasyonun ve çatlak başlangıcının oluşacağı noktaya düşer. Belli sıvı ortamlar, örneğin su, plastikleştirme (plasticization) veya sertleştirme (antiplasticization) proseslerinden biri ile polimerin halini değiştirir. Benzer olarak, az miktarda aseton polikarbonatı camsı halden kristalin hale dönüştürür. Belli malzemeler, ortamlar ve zorlama kombinasyonları yorulma dayanımını da arttırabilir.

Bugüne kadar moleküler özelliklerin yorulma ömrü üzerine etkilerinin mekanizması çok iyi tanımlanamamakla birlikte, toplam yorulma ömrünün artan moleküler ağırlık, artan kristalinite ve azalan çapraz bağlanma seviyesi ile arttığı görülmektedir.

Metalik malzemelerde olduğu gibi, sabit gerilme genliği yorulmasından çıkarılan toplam yorulma ömrü, artan ortalama gerilme ile azalır.

3.3. Yorulma Çatlağı İlerlemesinin Karakterizasyonu

Kauçuk malzemelerde yorulma çatlağı ilerleme hızı konusundaki ilk çalışmalar Griffith'in enerji yaklaşımına başvurularak gerçekleştirilmiştir. Rivlin ve Thomas 1953

yılında Griffith'in yüzey enerjisi kavramını kauçuk malzemeler gibi yüksek birim şekil değişimleri ve lineer olmayan elastik deformasyonlar içerecek şekilde genişletmişler ve yüzey işi parametresi (surface work parameter) (γ) vasıtasıyla kırılma başlangıcı için kritik koşulları karakterize etmişlerdir. Bu parametre birim şekil değişimi enerjisi yoğunluğu ve çatlak boyunun bir fonksiyonudur. Tek kenar çentikli levha için, yüzey işi parametresi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\gamma = m_1 a U \quad (3.1)$$

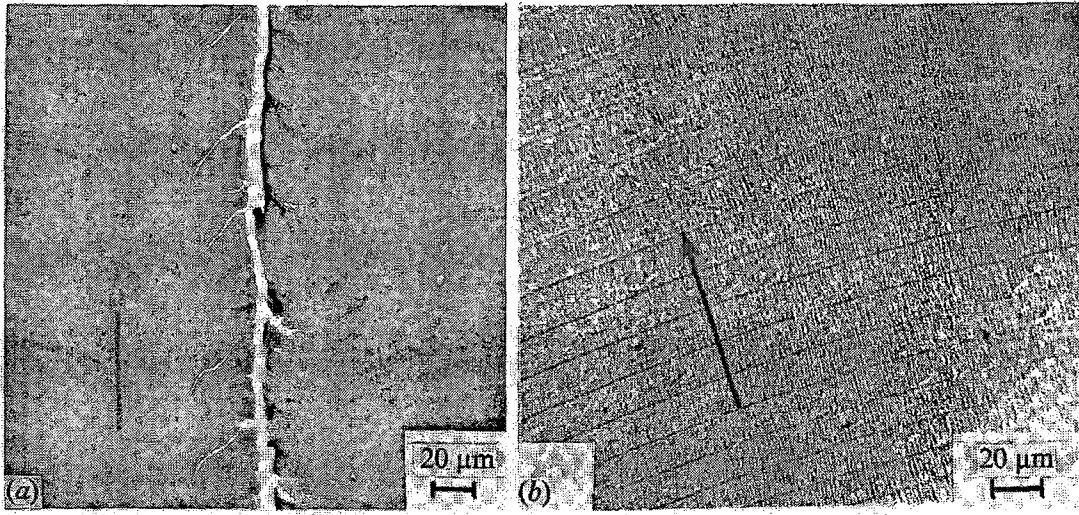
burada m_1 malzeme özelliklerine biraz bağlı bir sabit, a çatlak boyu ve U birim şekil değişimi enerjisi yoğunludur. Üniform gerilme altındaki lineer elastik bir katı için $U=\sigma^2/2E$ 'dir. $m_1=$ için γ birim şekil değişimi enerjisi gevşeme hızına eşittir.

3.4. Yorulma Çatlağı İlerlemesinin Mekanizmaları

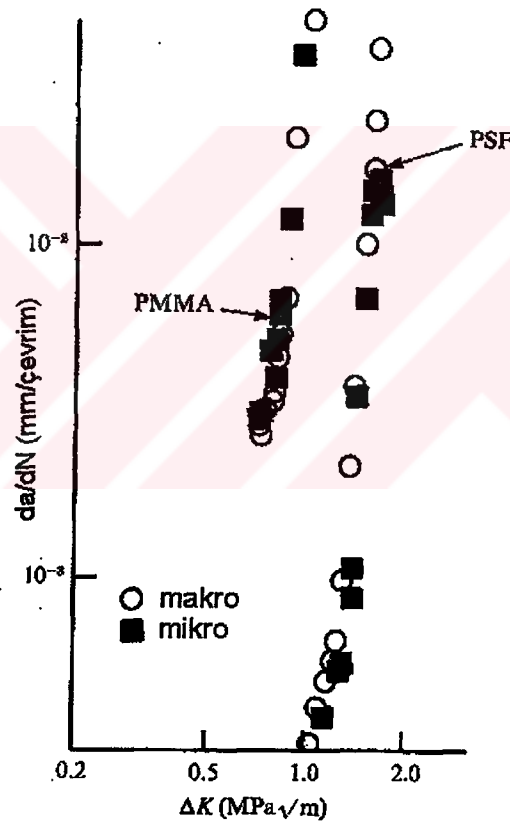
3.4.1. Yorulma Çizgileri

Belli yükleme koşullarında birçok polimerin kırılma yüzeylerinde metallerde olduğu gibi kılcal izler (striations) görülür. Metal yorulmasında "çizgiler" terimi genellikle, çizgi aralıklarının çevrim başına çatlak ilerleme hızı ile ilişkili olup olmadığına bakmaksızın, yorulma kırığı yüzeyindeki ilerleyen bantları (growth bands) ifade eder. Polimer yorulması literatüründe, çizgiler terimi özellikle her bir çevrimdeki çatlak ilerleme hızına eşit aralıkları içeren kırılma yüzeyindeki ilerleme bantlarını işaret etmek için kullanılır.

Şekil 3.2 (a) ve (b)'de sırasıyla PSF ve PMMA'da oluşan yorulma çizgileri örnekleri görülmektedir. Bu kılcal izler çatlak ilerleme yönüne dik yöndedir. Yarıkristalin ve amorf polimerlerle yapılan çalışmalar sonucu çizgi aralıklarının makroskopik çatlak ilerleme hızlarıyla ilişkili olabileceği görülmüştür. Yorulma çatlağı ilerleme hızları da/dN 'nin gerilme yoğunluk faktör aralığı ΔK ile değişimi iki çeşit polimerik malzeme PSF ve PMMA için Şekil 3.4'de verilmektedir. Bu şekilde gösterilen datalar hasar bölgesindeki çizgi aralığı "s"nin taramalı elektron mikroskobunda ölçülmesinin yanı sıra, yük oranı $R=0,1$ için yapılan yorulma deneyi sırasında çatlak ilerleme hızlarının oda sıcaklığındaki makroskopik ölçümlerinden elde edilmişlerdir. Belli malzeme ve yükleme koşulları için birim çevrim başına çatlak ilerleme hızının çizgi aralıklarına karşılık geldiği görülmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.2 (a) PSF ve (b) PMMA'da ince yorulma çizgileri. Çatlak ilerleme yönü okla gösterilmiştir [3]



Şekil 3.3 PSF ve PMMA'nın makroskopik yorulma çatlakları ilerleme hızları da/dN 'nin (içi boş semboller) ve hasar oluşuktan sonra yorulma çizgileri aralığı s 'nin ölçümlerinin (içi dolu semboller) gerilme şiddet faktörü ΔK 'ya göre çizimi [3]

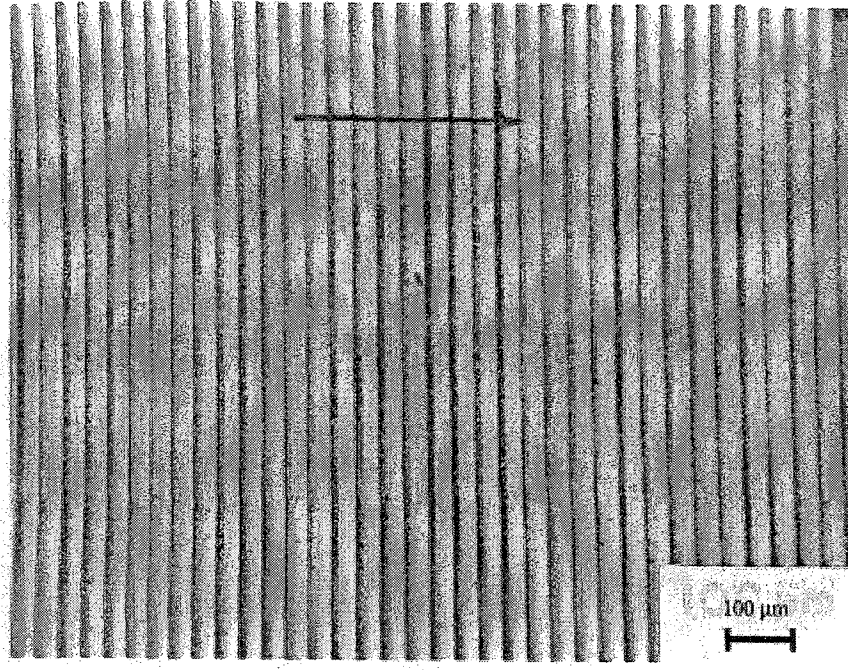
Polimerik malzemelerde çizgileri oluşturan koşullar metallerekinden biraz farklıdır. Polimerler yüksek ΔK değerlerinde ($da/dN \geq 5 \times 10^{-4}$ mm/çevrim) kılcal ilerleme gösterirler. Diğer taraftan metallerde Paris denklemine göre daha düşük ilerleme hızlarında da/dN ile s' 'in birebir karşılıkları vardır.

Metallerde çizgi oluşumunun en popüler açıklaması çizgi aralıklarının çatlak ağzı açılma mesafesi ile ilişkisidir. Polimerler için elde edilen sonuçlara göre Paris denklemindeki m üssü ne metallerde olduğu gibi 2'ye eşittir ne de sabit bir değere. Oysa kılcal yorulma çatlak ilerlemesi gösteren polimerlerde m üssü 4 ile 20 arasında değişir. Bu yüzden, çatlak ucu açılma mesafesini polimerlerdeki çizgi oluşumuna oranlamaya dayanarak geliştirilen modeller, gerçek sonuçlarla benzemeyecektir.

Metalik malzemelerde hasar bölgesindeki çizgilerin analizi hesaplamalarda kullanılmaktadır. Polimerik malzemelerde çizgi aralıkları ile makroskopik çatlak ilerleme hızları arasında yalnızca ampirik bağıntılar söz konusudur. Bu yüzden, çatlak ilerleme hızlarının deneysel ölçümlerinden faydalanmadan ΔK için sayısal tahminler yapılamaz.

3.4.2. Süreksiz İlerleme Bandları

Polimerlerde bir diğer yorulma kırık yüzeyi görünümü süreksiz ilerleme bandları (discontinuous growth bands) olarak bilinir. Bu ilerleme bandları PVC'de her yüz yorulma çevrimi sonunda yorulma çatlak ilerlemesinin bir tek açılmasına karşılık gelmektedir. Bu süreksiz genişleme bandları, aralıkları çevrim başına çatlak boyu artışından önemli derecede büyük olmasına rağmen görünümleri itibarıyla çizgilere benzemektedirler. Süreksiz ilerleme bandları düşük ΔK 'larda daha kolay oluşmaktadır. Süreksiz ilerleme bandlarının oluşum ihtimali ve aralarındaki mesafe ΔK seviyesi, test sıcaklığı ve yükleme frekansına olduğu kadar polimerin kimyasal yapısı ve molekül ağırlığına da bağlıdır. Şekil 3.4 PVC'de, yorulma çatlak ilerleme yönüne dik olarak yönlenmiş süreksiz ilerleme bandlarını göstermektedir.



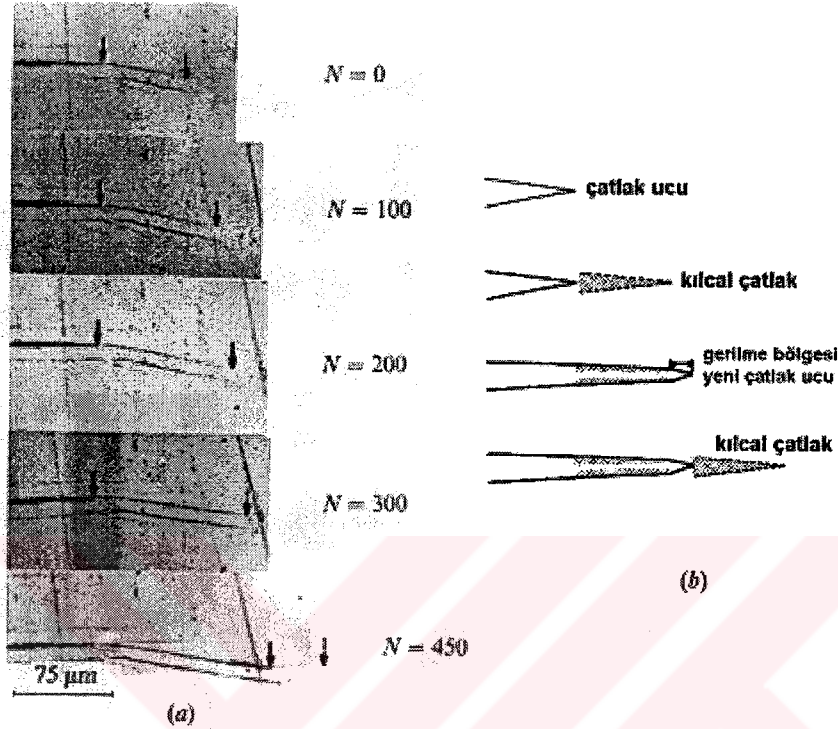
Şekil 3.4 PVC kırık yüzeyinde süreksiz yorulma çatlakları ilerleme bandları. Çatlak ilerleme yönü okla gösterilmiştir [3]

Süreksiz ilerleme bandları yorumlandığı takdirde, birçok çevrim sonunda yorulma çatlakları önünde oluşan hasar birikimi nedeniyle çatlakların ani olarak açılması olarak tanımlanır. Yorulma çatlakları ilerlemesinin eşiğine yaklaşan çok düşük ΔK seviyelerinde, çatlak ucundaki mikroskopik deformasyon birçok polimer için kılcal akma içerir. Bir polimerin çatlak ucundaki kılcal çatlak bölgesi ile bir metalin çatlak ucundaki plastik bölgesi arasında benzerlik vardır. Maksimum kılcal çatlak boyunu tahmin etmek için Dugdale'nin akma şerit modeli kullanılır,

$$r_{cz} = \frac{\pi K_{max}^2}{8 \sigma_{cz}^2} \quad (3.2)$$

Burada, σ_{cz} kılcal çatlakların oluştuğu gerilme (kılcal çatlakların uzunluğu boyunca sabit olduğu varsayılır) ve K_{max} bir yük çevrimi esnasındaki gerilme yoğunluğu faktörünün maksimum değeridir. Hertzberg, Skibo ve Manson birçok polimerde farklı K_{max} seviyelerinde kılcal çatlak boyu r_{cz} 'yi ölçmüşler ve σ_{cz} 'yi 3.2 denklemi yardımıyla hesaplamışlardır. σ_{cz} 'nin hesapla bulunan değerleri literatürde çekme tipi kırılma için verilen değerlerle uyum göstermektedir. Bundan başka, bu prosedür yardımıyla hesaplanan kılcal çatlak gerilmesinin değeri, süreksiz çatlak ilerlemesi durumundaki ΔK değerlerinin tümü için kabaca sabittir. Birçok polimer için kılcal çatlak gerilmesi

çekmede akma gerilmesi ile de karşılaştırılabilir. Bu incelemelerdeki önemli bir nokta süreksiz çatlak ilerlemesinin çatlak ucunda gelişen kılcal çatlak bölgesinde oluştuğudur. Yorulma çatlağının ani ilerlemesi Şekil 3.5'de görülmektedir.



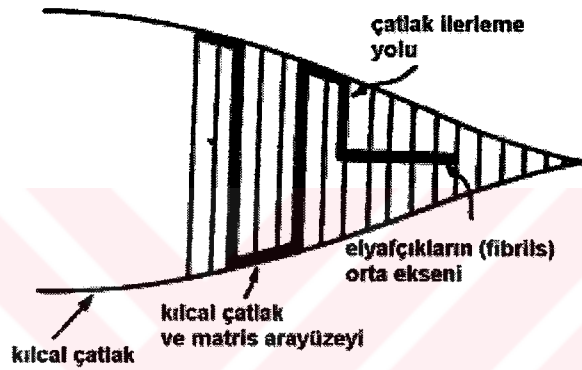
Şekil 3.5 (a) Yorulmaya zorlanmış PVC'de çatlak ucunun pozisyonları (soldaki oklar) ve kılcal çatlağın ucu (sağdaki oklar). Her mikrografinin çevrim sayıları yanlarında belirtilmiştir. (b) Çatlak ucu kılcal çatlak bölgesinin şematik gösterimi [3]

Bu deneysel gözlemler, birçok araştırmacıyı mühendislik plastiklerinde süreksiz yorulma çatlak ilerlemesi için kavramsal modeller önermeye teşvik etmiştir. Şekil 3.6 süreksiz çatlak ilerleme mekanizmalarını şematik olarak göstermektedir. Çatlak ucundaki kılcal çatlak bölgesinin maksimum açılması δ_{cz} çatlak ucu açılma miktarı için verilen Dugdale tipi eşitliğinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\delta_{cz} = \frac{K_{\max}^2}{E \sigma_{cz}} \quad (3.3)$$

Çevrimsel yükleme sırasında, çatlak ucu hareketsiz kalmasına rağmen yorulma hasarı birikimi δ_{cz} 'de tedrici artışa neden olur. δ_{cz} belli bir kritik değere ulaştığında, bir

anda çatlak ilerlemesi gerçekleşir. Bu hasar birikimini yaratan mekanizma veya kılcal çatlakdaki yorulma çatlakları ilerlemesinden sorumlu olan proses açıkça anlaşılamamıştır. Bundan başka, yorulma çatlaklarının kılcal çatlakların tüm boyunca mı yoksa boyunun belli bir yüzdesinde mi ilerlediği ve mikroboşlukların kılcal çatlakların orta ekseninde mi olduğu önemli bir tartışma konusudur. Bu belirsizliklere rağmen, çatlakların önce kılcal çatlak-matris arayüzeyi boyunca ve sonrada çatlak durana kadar fibril orta eksenini boyunca ilerlediği varsayılmaktadır. Bu düzlemsel olmayan mikroskopik yol Şekil 3.6'de çizilmiştir. Bu proses yorulma kırık yüzeyinde görülen süreksiz ilerlemelerin koyu bantlarını oluşturarak kendini tekrar eder. Bu bantlar, tekrarlanan bir şekilde körelen, ilerleyen ve durdurulan çatlak ucu bölgeleridir.



Şekil 3.6 Kılcal çatlak bölgesindeki bir yorulma çatlaklarının izlediği yolun idealleştirilmesi [3]

Kramer ve Hart'ın yaptıkları teorik çalışmada kılcal çatlaklarında içeren quasi-statik kritikaltı çatlak ilerlemesi prosesini incelemişlerdir. Kılcal çatlakların kırılması yerel sürünme (creep) prosesi ile gerçekleşir. Yerel gerilme σ_i kırılma süresi t_f olmak üzere,

$$t_f = \frac{1}{\epsilon_i} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_c} \right)^{m_c} \quad (3.4)$$

$1/\epsilon_i$ yerel kılcal çatlak gerilmesi σ_i altında kılcal çatlak fibrillerinin hasar ömrü ve m_c 'de ampirik olarak saptanan üstür (PMMA için $m_c=12$ 'dir). Çatlak ucu gerilme yoğunluğu faktörü K 'nın üzerinde çatlak hızı da/dt 'nin bağımlılığı şöyle verilebilir,

$$\frac{da}{dt} = \frac{2 \dot{\epsilon}_I D_0}{(m_c - 2)} \left(\frac{K \lambda}{\sigma_I \sqrt{2\pi D_0}} \right)^{m_c} \quad (3.5)$$

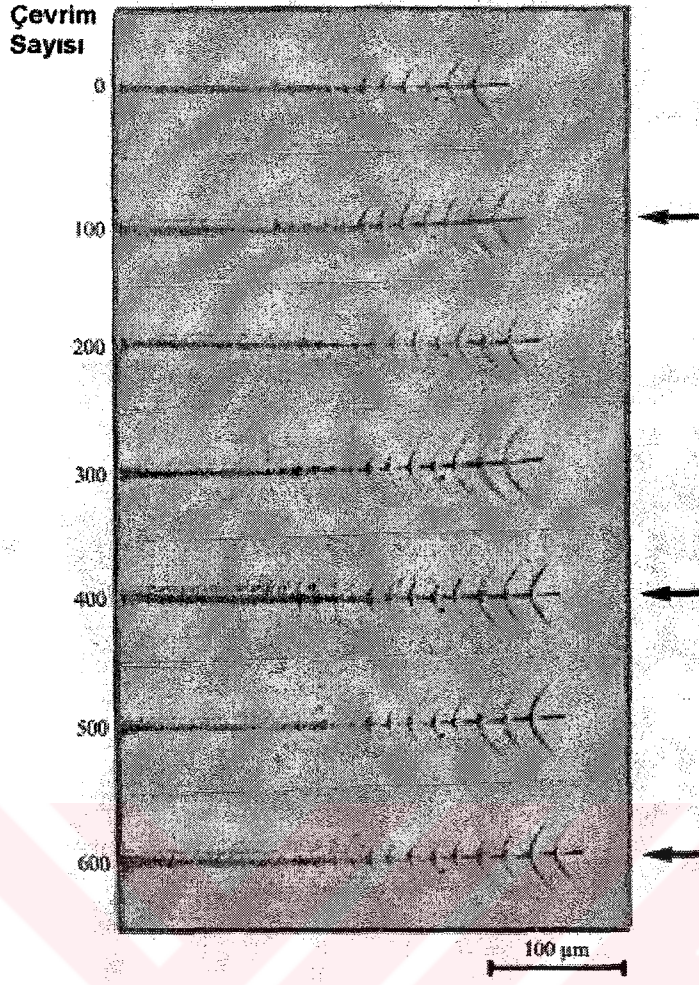
D_0 kılcal çatlak fibrilleri açıklığıdır ve $\sigma(D_0) = K / \sqrt{2\pi D_0}$ 'dır. Tekrarlı çevrimsel yüklemeler kılcal çatlak kırılmasını şiddetlendirmesine rağmen, bu quasi-statik sürünme prosesi kılcal çatlak olabilen polimerlerin yorulma kırılmasında uygulanabilmektedir.

3.4.3. Kılcal Akma ve Kayma Akmasının Birlikte Etkisi

Düşük ΔK seviyelerine maruz kalan bazı polimerlerde, hem kılcal akma hem de çatlak ucu önündeki kayma bandı oluşumu neticesinde süreksiz çatlak ilerlemesi meydana gelir. Çatlak ucu ilerleme bölgesi “ε” şeklinde olduğu için bu kırılma prosesi epsilon süreksiz çatlak ilerlemesi olarak bilinir.

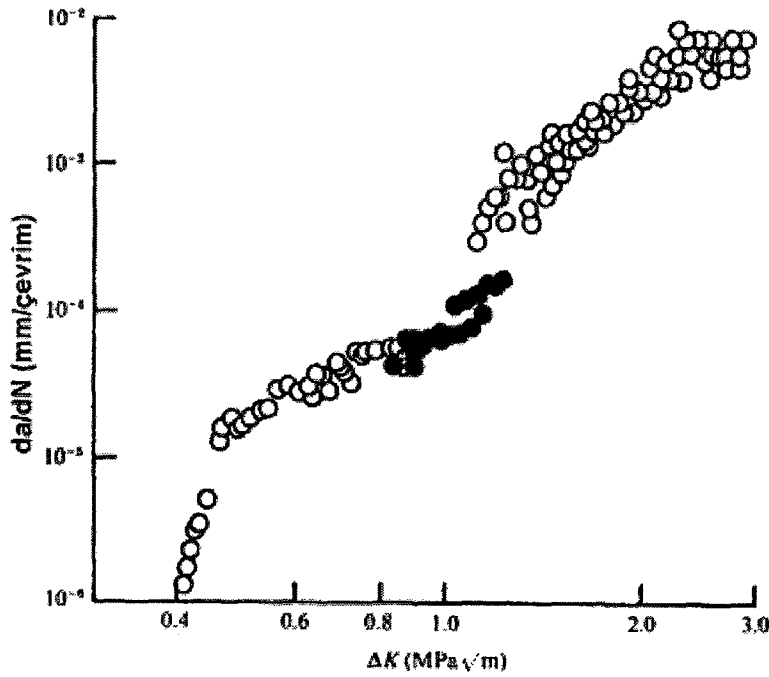
Mills ve Walker ile Takemori ve Kambour düzgün polikarbonat numunelerindeki yorulma kırıklarında bir çift kayma bandı ve bir tek kılcal çatlaktan oluşan alışılmadık biçimli çatlak ucu plastik bölgesini deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Kayma bandlarının yayı çatlak düzleminden asimptotik olarak 45° altında ve üstünde olarak daha ilerideydi oysa, kılcal çatlak doğrudan çatlak ucunun önünde oluşmuştu. Daha sonraki çalışmalarda Takemori küçük yüzey çatlaklarının bu kombine kılcal çatlak-kayma özelliğinin daha büyük kalınlık boyunca olan çatlaklardan tamamıyla farklı ilerlediğini gözlemiştir. Daha büyük çatlaklar çatlak ucundaki tek bir kılcal çatlak veya bir kılcal çatlaklar demeti bulunması veya yalnızca kayma bandı prosesi ilerlemesi nedeniyle süreksiz çatlak ilerlemesi gösterirler. Bu fark yüzey yarıklarının (10 mm'ye kadar) nominal ΔK değerleri ve çentiklerden ortaya çıkan daha uzun yarıklar için eşdeğerdir. Bu açıdan bakıldığında epsilon süreksiz çatlak ilerlemesi prosesi metal yorulmasında çok iyi bilinen küçük yorulma çatlağının polimer versiyonu olarak değerlendirilebilir.

Epsilon şekilli plastik bölgede kayma bandları çatlak ucunda orijindedir ve yay mod I çatlak düzlemine 45° olacak şekilde yönlenmiş düzlemde ileri doğrudur. Kayma bandlarını kesen kılcal çatlak düzlemi, çatlak düzlemi ile uyum sağlamaktadır. Şekil 3.7 epsilon plastik bölgesinin bulunduğu süreksiz çatlak ilerlemesi bandlarının bir seri optik mikroskop görüntülerini içermektedir.



Şekil 3.7 Her 100 çevrimde bir alınan fotoğraflar, PC'da bir epsilon şekilli deformasyon bölgesini oluşturan süreksiz çatlak ilerlemesini göstermektedir. Oklar çatlak önündeki ani atlamaların varlığını işaret etmektedir [3]

Şekil 3.8'de kısa parça boyunca yüzey çatlaklarının kapalı dairelerle ifade edilerek PC'nin küçük ve büyük yorulma kırıklarının ilerleme davranışları gösterilmektedir. Diğer data noktaları uzun kalınlık boyunca çatlak içeren bir kompakt çekme numunesi kullanılarak elde edilmiştir. Bu grafik sünek metalik malzemelere benzerlik göstermektedir.



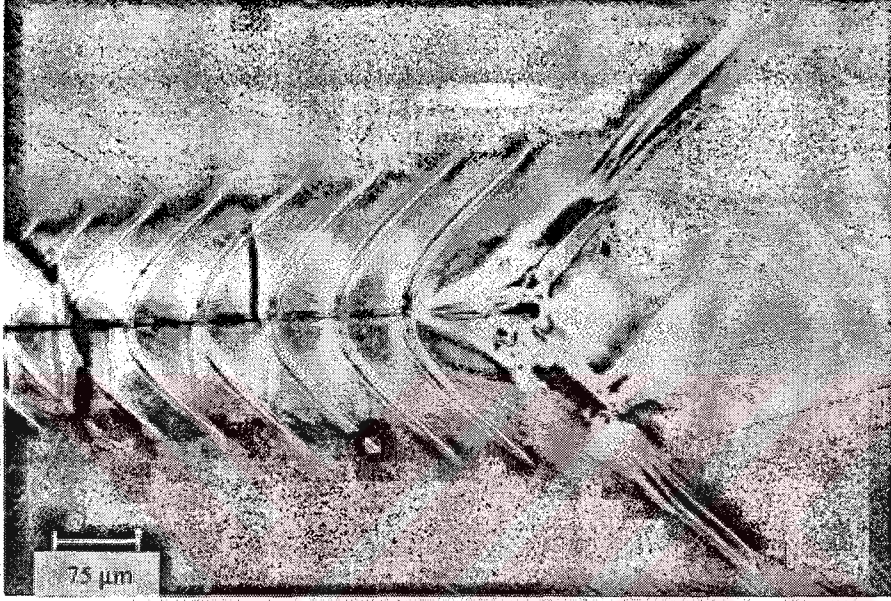
Şekil 3.8 Oda sıcaklığındaki PC'da yorulma çatlakları ilerleme hızı. Dolu semboller, epsilon şekilli bölgelerin gelişmesi nedeniyle süreksiz çatlamları göstermektedir. Açık semboller kompakt çekme numuneleri ile elde edilen çatlak ilerleme datalarını göstermektedir [3]

Epsilon süreksiz ilerlemesi gösteren yüzey çatlaklarında ilerleme hızları, genellikle yalnızca kılcal akma içeren süreksiz çatlak ilerlemesinde beklenenden daha azdır. Bundan başka, epsilon kırılma moduna uyan ilerleme hızları yüksek ΔK seviyelerindeki (epsilon plastik bölgelerinin ilerlemediği) çatlak ilerlemelerinin ekstrapolasyonu ile hesaplanandan daha azdır. Epsilon kırılma prosesi ile ilgili bu yararlı ve farklı davranış, kayma bantları ve kılcal çatlakların oluşumuna (yalnızca kılcal çatlak oluşumuna göre) ve plastik bölge tarafından çatlak ucunun engellenmesi için harcanan büyük miktarda işe bağlanmaktadır.

3.4.4. Kayma Bantları

Deneysel sonuçlar uygulanan ΔK veya test sıcaklığının artmasının genellikle polimerlerin mikroskopik kırılma modlarının şu sıra ile değişmesine neden olduğunu göstermiştir; çatlak ucu kılcal çatlak oluşumu sonucu süreksiz ilerleme bantları → kılcal akma ve kayma bantlarının kombine etkisi ile oluşan epsilon süreksiz ilerleme bantları → kayma bantları oluşumu. Epsilon süreksiz ilerleme bantları gösteren parça boyunca yüzey çatlakları için bir kayma çatlakına geçiş, belirli bir mesafe

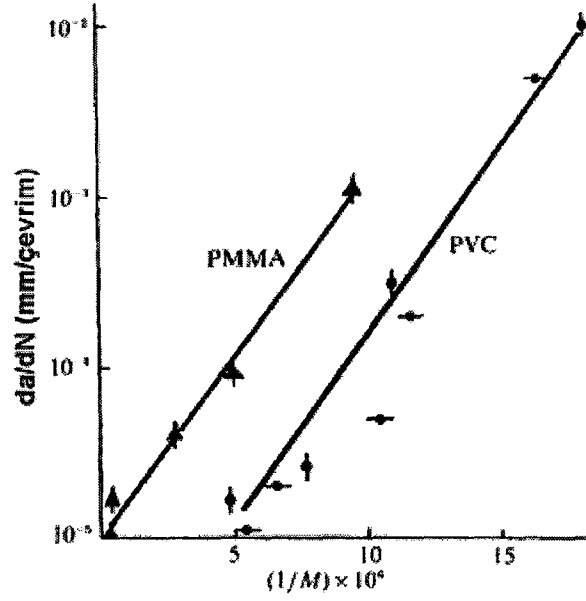
ilerledikten sonra olur, bu mesafe PC ve PSF'de 1 mm'ye kadar çıkar. Şekil 3.9 PC'da bir yorulma kırılması için böyle bir geçişi göstermektedir. Burada epsilon şekilli profile ilerleyen çatlağın ilk ilerlemesi kayma bantları ve kılcal çatlak oluşumunun kombine etkisi ile olmuştur. Bu şekildeki kayma bantlarının son çifti bir kılcal çatlak eşliğinde değildir ve kayma-kılcal çatlak kırılmasından saf kayma hasarına bir geçiş vardır.



Şekil 3.9 PC'da bir yorulma çatlağının önündeki kayma bantı çatlakları. Çatlak, kayma ve kılcal akma proseslerinin kombine etkisi ile epsilon şekilli profilin önünden bir serbest yüzeyde ilerler. Kayma bantlarının son çiftinde bir kılcal çatlak kendisine eşlik etmez, yalnız kayma hasarı gösterir [3]

3.4.5. Genel Gözlemler

Polimerlerin molekül ağırlığındaki artışın yorulma çatlağı ilerlemesine karşı direncini önemli ölçüde arttırdığı bilinmektedir. PS, PVC, PA, Naylon 66, PMMA ve PE ile yapılan deneysel çalışmalar sonucu molekül ağırlıkları arttığı takdirde çatlak ilerleme hızlarının azalma eğilimine girdiği gözlenmiştir. Şekil 3.10 PMMA ve PVC için da/dN 'nin M molekül ağırlığı olmak üzere, $1/M$ ile değişimini göstermektedir. Sabit bir ΔK değeri için $1/M$ 'deki üç kat artış çatlak ilerleme hızında üç mertebesinde üç kat artışa neden olmaktadır.



Şekil 3.10 PMMA ve PVC'nin molekül ağırlıklarının bir fonksiyonu olarak yorulma çatlak ilerleme hızlarının, sabit ΔK ($=0,6 \text{ MPa m}^{1/2}$) değerleri ve test frekanslarında f ($=10 \text{ Hz}$) değişimi [3]

Hertzberg ve Manson yalnızca belli bir boyuttan daha büyük moleküllerin çatlak ilerlemesini engelleme kapasitesine sahip bir ağ oluşturabileceğini söylemişlerdir. Hertzberg ve Manson polimer ağlarının yorulma zorlaması ile dolaştığını iddia etmişlerdir. Yüksek molekül ağırlıklarında yönlenme sertleşmesi olduğu gibi ağların çözülme olasılığında düşürülmesi ile yorulma çatlak ilerlemesine karşı dayanım artırılabilir. M 'nin yorulma çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisi camsı geçiş sıcaklığı (glass transition temperature), akma dayanımı ve elastik modülden çok daha kuvvetlidir. Monotonik özellikler malzemenin hacimsel (bulk) davranışını göstermektedir ve farklı zincir boylarından oluşan zayıf ve güçlü moleküler dolaşıklığı göstermektedir. Bu yüzden belli kritik bir M 'nin üzerinde belli sayıda gevşek molekül zincirleri içeren M , monotonik özellikleri önemli derecede arttırmaz. Tam tersine kılcal çatlak içeren yorulma kırılmasında, kılcal çatlak fibrillerinin çekirdeği kuvvetle bağlı molekül zincirleridir, kılcal çatlak nispeten dar molekül ağırlığı dağılımı ile nispeten yüksek M 'ye sahiptir. Hertzberg ve Manson yorulma çatlak ilerleme hızının artan M ile düşmesi gerektiğini çünkü kılcal çatlak fibrillerinde yalnızca en yüksek M dolaşıklıklarının kalacağını ifade etmişlerdir.

Kristalinite derecesinin artması da yorulma çatlak ilerleme hızında benzer bir azalmaya neden olur. Diğer taraftan, test sıcaklığının artması ve çapraz bağlanma derecesinin artması veya kimyasal olarak saldırgan ortamların devreye girmesi ile yorulma kırılmasına direnç azalır. Bu faktörlerden herbirinin toplam yorulma çatlak ilerleme hızına etkisini tek tek incelemek zordur çünkü, basit polimerik sistemlerde kontrollü deneyler çok sık uygulanmamaktadır. Polimerlerde metalik malzemelerde olduğu gibi yük oranı arttığı takdirde çatlak ilerleme hızları da artar. Bununla birlikte, yorulma testleri sabit K_{max} değerlerinde gerçekleştirildiği takdirde, polimerlerde yüksek zorlama oranları daha düşük yorulma çatlak ilerleme hızlarına yol açar.

Polimerlerde çatlak ucunun önünde kılcal çatlak ve/veya kayma bantları nedeniyle oluşan kalıcı deformasyon, kalıntı çekme gerilmesi bölgesi yaratabilir. Bir mod I yorulma çatlak, çatlak ucundaki yerel kalıntı çekme alanının etkisi altında gittikçe azalan bir hızla ilerler. Bu yorulma mekanizması, 1-5 Hz frekansta ve $R=20$ yük oranında çevrimsel basma zorlamalarına maruz HDPE ve PS'in tek taraflı kenar-çentikli numunelerinde gözlenmiştir.

3.4.6. Değişken Genlikli Yorulma

Pitoniak, Grandt, Montulli ve Packman (1974) ve Basnasiak, Grandt ve Montulli (1977) PMMA'daki yorulma kırıklarına $0,5 \text{ MPam}^{1/2}$ ΔK seviyesinde 5 çevrimlik yüksek çekme yükü (overload) uygulamışlardır. Yüksek yükün uygulanmasından sonra çatlak 35.000 çevrim sabit kalmıştır. Benzer şekilde Hertzberg ve Manson'un PS'nin yorulma kırılmasına yüksek yükün etkisi üzerine yaptığı çalışmalarda, artan yüksek yük oranları ile çatlak ilerlemesinin önemli gecikme kaydettiğini saptamışlardır. Benzer şekilde Takemori (1990) tarafından polyester karbonat'ın yorulma kırılmalarında sık aralıklarla periyodik aşırı yükler uygulanarak kayma hasarı yaratıldığı ve yorulma ömründe önemli artışlar olduğu saptanmıştır.

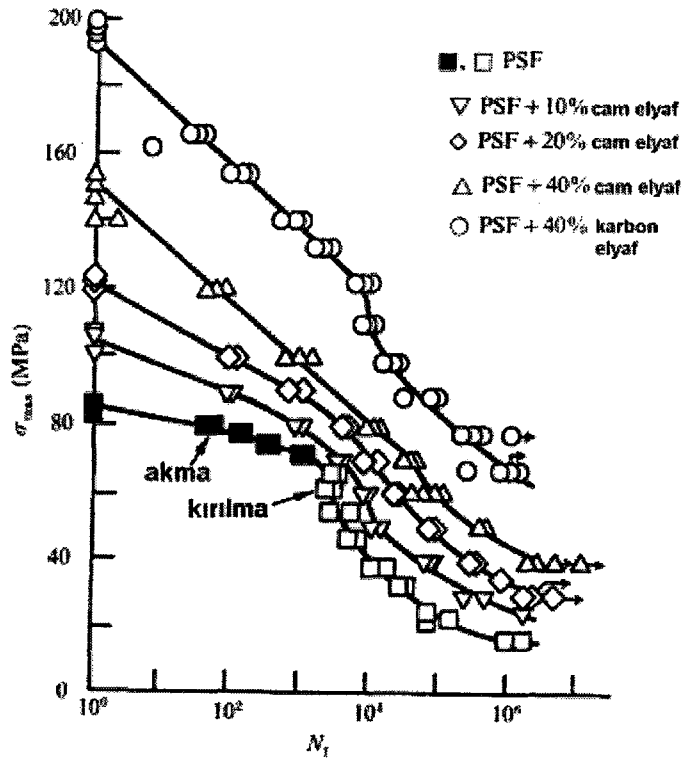
3.5. Organik Kompozitlerin Yorulması

Polimerik matrislerin partikül, ince elyaf (wishker) ve sürekli elyafarla takviye edilmesi ile dayanım, rijitlik, sürünme ve yorulma dayanımı artmaktadır. Polimerik kompozitlerin kuvvetlendirilmesinde süreksiz ve sürekli elyaf takviye olarak cam, boron, karbon ve polyaridler gibi yüksek modüle sahip malzemeler sıkça kullanılmaktadır. Organik kompozitlerde sıkça kullanılan polimerler ise polysterler, epoksiler, Naylon 66, PC, PPS, PAI, PSF, PVC, PEI, PP'dir.

3.5.1. Süreksiz Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler

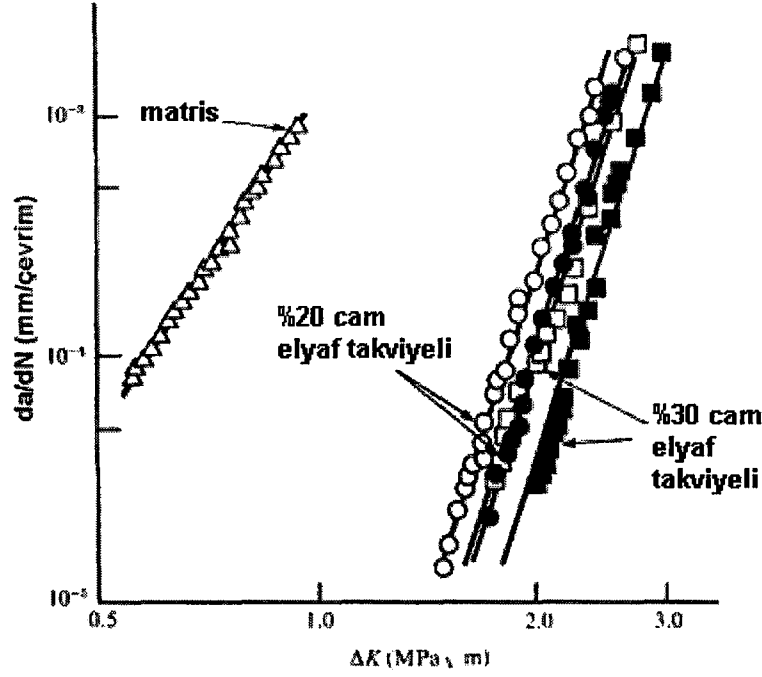
Şekil 3.11’da kısa karbon veya cam elyaf takviyeli PSF matrisli enjeksiyonla üretilen birkaç çeşit numunenin, çekme tipi yorulma için gerilme-ömür eğrileri görülmektedir. Bu şekilde ayrıca karşılaştırmak amacıyla benzer yöntemle üretilen takviyesiz matris malzemesinin gerilme-ömür karakteristiği de verilmektedir. Polimerik kompozitlerin matris malzemelerine göre mükemmel bir toplam yorulma ömrü sağladıkları ve yorulma kırılması dayanımının artan cam elyaf yüzdesi ile arttığı açıkça görülmektedir. Karbon elyafla takviyenin cam elyafla takviyeye göre daha üstün olduğu da açıktır. Yüksek rijitliğe sahip karbon whiskerler belli bir gerilme genişliğinde matrisin çevrimsel birim şekil değişimlerini azaltarak yorulma ömrüne katkıda bulunmaktadır. Bundan başka, yüksek ısı iletimine sahip karbon histeritik ısınma nedeniyle oluşan ısı artışını dengelemektedir. Bununla beraber, yüksek çevrim frekanslarında gerçekleştirilen yorulma testlerinde ısı yumuşamanın yorulma ömrünü kontrol etmeye başlaması ile whisker takviyelerin iyileştirici etkisi önemli derecede azalmaktadır.





Şekil 3.11 Farklı miktarlarda kısa cam elyaf ve %40 kısa karbon elyaf ile takviye edilmiş enjeksiyonla üretilen PSF'nin hasar çevrim sayısı N_f 'nin bir fonksiyonu olarak maksimum çekme gerilmesi σ_{max} 'ın değişimini gösteren bir gerilme-ömür diyagramı. Sonuçlar oda sıcaklığında, $R = 0,1$ ve $f = 5-20$ Hz şartları altındadır. Küçük oklar belirlenen çevrim sayılarında hasarın görülmediğini göstermektedir [3]

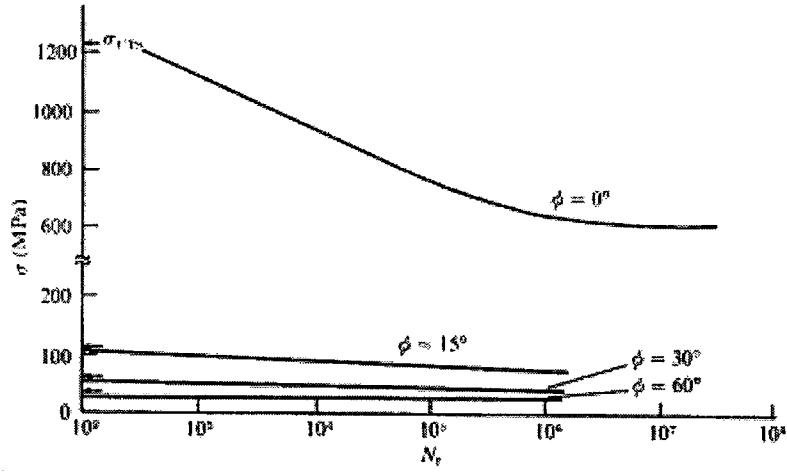
Polimerik matrise kısa elyaf takviyelerin katılması ile yorulma çatlakları ilerleme dayanımında da artış sağlanır. Bu durum Şekil 3.12'de cam elyaf takviyeli PES ile yapılan testlerle gösterilmiştir. ΔK 'ya göre da/dN 'nin çizildiği bu grafikte elyaf yüzdesi arttıkça ΔK daha yüksek değerlere kaymaktadır. Kompozitler için yorulma çatlakları ilerlemesinin ΔK_0 eşiği, Paris üssü m ve tokluk, takviyesiz matrise göre daha yüksektir. Bu malzemede yorulma çatlakları ilerlemesi dayanımı izotropik değildir ve kalıp dolma yönüne dik yönde çekme yorulma kırılması dayanımı kalıp dolma yönüne göre daha yüksektir.



Şekil 3.12 Kısa cam elyaf takviyeli ve takviyesiz polietersülfon'un $f = 5$ Hz ve $R = 0,2$ 'de yorulma çatlak ilerleme karakteristikleri. İçleri boş ve dolu semboller sırasıyla, kalıbın dolma yönüne paralel ve dik kırılmaları ifade etmektedirler [3]

3.5.2. Sürekli Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler

Sürekli ve tek yönlü elyaf takviyeli organik kompozitlerin çevrimsel yüklemeleri, monotonik yüklemelere göre servis ömürleri üzerinde daha kötü bir etki yaratır. Kalıntı gerilmeler, tokluk ve elastik davranış devam eden çevrimsel yüklemelerden ters bir şekilde etkilenir. Bu etki Şekil 3.13'de hacim yüzdesi 0,6 olan tek yönlü E-camı takviyeli epoksi reçine matrisli bir organik kompozitin gerilme-ömür grafiğinde açıkça görülmektedir. Kompozit, elyaf yönünde 0,1 gerilme oranı ve 19 Hz test frekansında çekme yorulmasına maruz kaldığında, dayanım limiti 686 MPa olmaktadır. Bu değer statik çekme dayanımı olan 1.245 MPa'dan önemli derecede düşüktür. Şekil 3.13'de ayrıca Φ elyaf yönü ile çekme eksenindeki açı olmak üzere, farklı yönlerde gerçekleştirilen yorulma testleri sonuçları da görülmektedir. Φ arttıkça matrisin yorulma prosesinde artan bir şekilde dominant rol oynaması sonucu, dayanım limitinde monotonik bir azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 3.13 Hacimce %60 tekyönlü (unidirectional) cam elyaf ile takviye edilmiş bir epoksi reçine matrisin yorulma hasar çevrim sayısı N_f 'nin bir fonksiyonu olarak maksimum çekme gerilmesi σ_{max} 'ın değişimini gösteren bir gerilme-ömür diyagramı. ϕ , elyaf yönü ile çekme eksenindeki açıyı göstermektedir. Testler oda sıcaklığında ve $R = 0,1$, $f = 19$ Hz'de yapılmıştır [3]

Yorulma zorlamalarına maruz elyafli kompozitlerde akustik emisyon, radyografi, modül ve sönümlendirme ölçümleri gibi hasarsız test metodları ile yorulma sürecinde oluşan elyaf kırılmaları, elyaf-matris ayrılmaları ve matris kırılmaları gözlemlenebilmektedir. Artan yorulma çevrimleri ile oluşan hasar nedeniyle azalan gerilme bu mikroskopik hasarların büyümesine yol açmaktadır. Bu artan degradasyon açısından bakıldığında, sürekli elyafli kompozitlerin yorulma ömrü elastik modüllerinde belli bir azalmaya neden olan çevrim sayısı olarak tanımlanır. Yorulma hasarı dağılımını Weibull istatistikleri kullanarak karakterize etmek gittikçe daha çok kullanılmaktadır. Yüksek çevrimsel frekanslarda histeretik ısınma da önemli bir faktör olmaktadır. Bundan başka, bazı durumlarda elyafların yeniden dizilimi, çatlak körleşmesi, periyodik aşırı yükler ve frekans dalgalanması nedeniyle yorulma ömründe anormal artışlar gerçekleşmektedir [3].

4. SÜREKSİZ CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİPROPİLEN

Kısa elyaf takviyeli polimerler (ketp), uçak ve uzay endüstrisinde temel yapı elemanı olarak kullanılan sürekli elyaf takviyeli tabakalı polimer kompozitlerle, genellikle yük taşımayan uygulamalarda kullanılan takviyesiz polimerler arasındaki boşluğu doldurmak için geliştirilmiştir. Ketp'lerde kullanılan elyaf boyları yeterince uzun olduğu takdirde rijitlikleri sürekli elyafli sistemlere yaklaşır, bununla beraber karmaşık şekilli parçalar takviyesiz polimerlerde olduğu gibi kolayca kalıplanabilir. Bu yüzden ketp'ler kendilerine, rijitliğin ön planda olduğu fakat çok yüksek gerilmelerin söz konusu olmadığı, buna rağmen takviyesiz polimerlerle başaramayacak uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadır. Ketp'lerin takviyesiz, hatta mineral takviyeli sistemlere göre bir başka avantajı da oda sıcaklığındaki özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da sürdürebilmeleridir.

4.1. Matris Malzemeleri

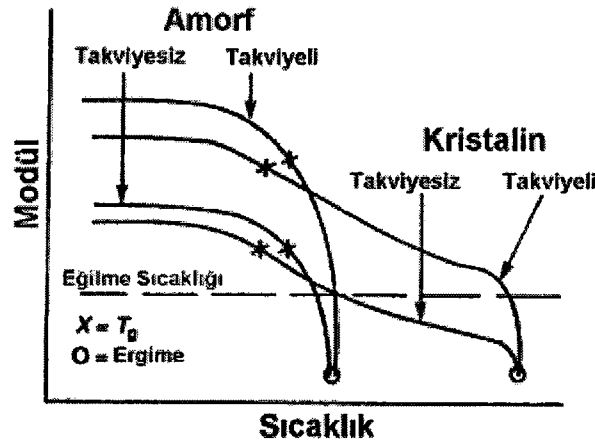
4.1.1. Termoplastik Malzemeler

En genel halde sıcaklık etkisiyle, malzemelerin dayanım ve rijitlik değerleri düşerken uzama değerleri artar. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi polimer malzemelerin modül değerleri camsı geçiş sıcaklıklarına (T_g) kadar dereceli olarak düşer. T_g 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise amorf polimerlerin modüllerinde ani bir düşme görülür. Bunun yanı sıra, kristalin malzemeler modül değerlerini kristalin erime noktalarına kadar önemli bir düşme göstermeden sürdürebilirler.

Cam elyaf takviyesi kristalin malzemelerin modülerini T_g 'nin üstündeki sıcaklıklarda önemli derecede arttırabilir. Amorf malzemeler cam elyafla takviye edilseler dahi modül değerleri T_g 'lerinin üstünde hala ani bir düşüş gösterir. Cam elyaf takviyesinin kristalin (polipropilen), amorf (polikarbonat) ve termoset (polyester) polimerlerin özelliklerine etkisi Tablo 4.1'de görülmektedir. Dayanım ve sıcaklık değişimini gösteren diyagramlar Şekil 4.1'deki modül-sıcaklık eğrilerine benzemektedirler.

Tablo 4.1 Cam elyaf takviyesinin kristalin (polipropilen), amorf (polikarbonat) ve termoset (polyester) polimerlerin özelliklerine etkisi [8]

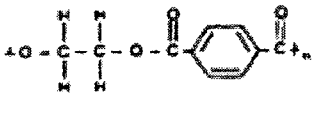
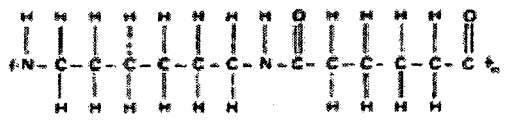
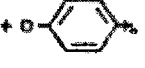
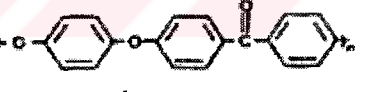
Özellikler	PP	%40 cam elyafı	PC	%30 cam elyafı	Polyester	Cam elyafı polyester
T_g veya T_m , °C	170	163	150	150	-	-
Isı etkisiyle eğilme sıcaklığı (1,82 MPa), °C	55	160	130	144	79	200
Maksimum sürekli sıcaklık dayanımı, °C	100	135	125	130	120	160
Lineer genleşme katsayısı, $\text{cm/cm/}^\circ\text{C} \times 10^{-5}$	9	3	7	1	5	2,5
Çekme dayanımı, MPa	35	82	65	135	40	70
% Uzama	150	2	110	3	5	1
Eğme dayanımı, MPa	48	100	93	155	80	85
Çentikli Izod darbe dayanımı, J/m	42	90	130	90	20	200
Sertlik, Rockwell	R90	R105	M70	M92	M70	M50
Özgöl hacim	0,90	1,22	1,2	1,4	1,2	2



Şekil 4.1 Kristalin ve amorf polimerlerin modüllerinin camı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime (melt) sıcaklığı ile değişimi. Ayrıca takviyenin ısı etkisiyle eğilme sıcaklığına (HDT) etkisi [4]

Birçok farklı yarıkristalin polimer malzeme, kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılabilir. Bu matris malzemelerinin seçiminde önemli olan faktörler; maliyet, üretim kolaylığı, ısıl ve kimyasal kararlılık ve matris reçinenin mekanik özellikleridir. Bu matris malzemeleri Tablo 4.2'de görülmektedir. Bunların içinden poliamid (PA66), polipropilen (PP) ve polietilen terafitalat (PET) bu sahaya ilk giren malzemelerdir. Yukarıda sayılan üç malzeme yeterli mekanik özellikler ve uygun erime noktası özelliğine sahip düşük maliyetli malzemelerdir. Tablo 4.2'de geri kalan diğer malzemeler zincirlerinde yüksek oranda fenil halkaları içeren malzemelerdir. Bu polimerler yukarıda bahsedilen üç düşük maliyetli malzemelerden daha sonra yaygın olarak endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Bahsi geçen malzemeler rijitlik ve yüksek erime noktası özelliklerine sahiptirler.

Tablo 4.2 Yarıkristalin polimer matris malzemeleri [11]

Kısaltma	Adı	Yapı	T_m (°C)	T_i (°C)
PP	Polipropilen		180	-18
PET	Polieteraftalat		270	69
PA66	Naylon 6.6		267	45
PPO	Polifenilenoksit		285	85
PPS	Polifenilensülfid		288	85
PEK	Polieterketon		367	154
PES	Polietersülfon			225
PEEK	Polietereterketon		335	144

4.1.2. Polipropilen

Polipropilen, ısı ve kimyasal dayanım, iyi mekanik ve elektriksel özellikler ve üretim kolaylığı özellikleri arasında iyi bir denge sağlayan kullanışlı bir termoplastiktir.

Kristalin bir polimer olan polipropilen ilk defa 1954 yılında G. Natta ve arkadaşları tarafından "Chimica Industriale del Politecnico di Milano"da tanımlanmıştır. Propilen'in polimerizasyonunu başlatmak konusundaki ilk çalışmalar kristalin olmayan bir polimer yönündeydi. Katalizörlerin gelişmesi ile polipropilende optimize edilmiş kristalin değerlerine ulaşılabilmiştir.

Polipropilen'de üç değişik geometrik forma sahip polimer zinciri elde edilebilir (Şekil 4.2):

*İzotaktik

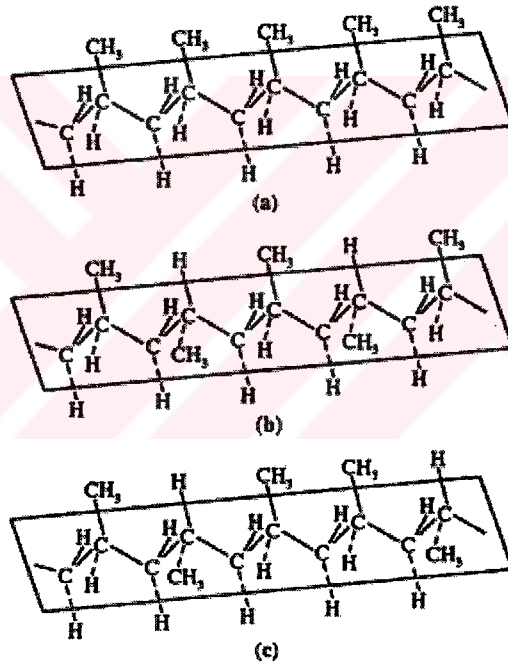
Tüm metil grupları zincirin bir tarafındadır.

*Sindiyotaktik

Metil grupları sıra ile zincirin değişen taraflarındadır.

*Ataktik

Metil grupları zincir etrafında rastgele dağılmışlardır.



Şekil 4.2 Propilen yapıları (a) izotaktik, (b) sindiyotaktik ve (c) ataktik [5]

Erimiş halde soğutulduğunda hem izotaktik hem de sindiyotaktik formların kristalize olmalarına rağmen, genellikle enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplamada kullanılan ticari polipropilen çeşitleri %94-97 oranında izotaktiktir. Fabrikasyon parçalar eriyikten itibaren kristalleşme durumlarına bağlı olarak polihedral sferulite formda ve genellikle %60 oranında kristalindirler.

Sindiyotaktik polipropilen genellikle laboratuvarlarda elde edilir. Ataktik polipropilen ise yapısal bir plastik olarak kullanılmamasına rağmen, modifiye edici olarak hot-melt yapıştırıcılar, çatı kaplamaları ve iletişim kablolarında kullanılır.

Polimerizasyon işleminden bağımsız olarak, propilen homo ve kopolimeri oksidasyondan korunmak için stabilize edilmelidir. Aksi takdirde ısı, ışık veya diğer tip bir bozucu etki ile zincirde serbest radikaller oluşur. Genel olarak polimerin yüksek sıcaklıklara ilk defa maruz kalacağı kurutma veya uzun süreli saklama işlemi öncesinde polimere küçük bir miktar stabilizör katılır. Daha sonraki stabilizörler (%1'e kadar) polimere pelet haline getirilirken karıştırılır. Polimere karıştırılacak katkıların seçimi son kullanıcının üretim yöntemine, bitmiş ürünün gereksinimlerine, çevre koşullarına ve üründen beklenen ömre bağlıdır. Bu gün 120°C sıcaklıkta polimeri çok uzun süreler bozulmadan koruyabilecek mükemmel ısı antioksidantları mevcuttur.

Zaman-sıcaklıkla ilgili etkilere karşı hazırlanan temel stabilizasyonlardan başka özel uygulamalar için başka katkılar da mevcuttur. Ençok bilinenleri oksidasyon meydana geldiğinde oluşan radikalleri yakalayan veya hidrojen peroksitleri ayrıştıran ultraviyole tutucularıdır. Bu katkılar UV ve güneş ışığı dayanımını arttırmasının yanı sıra radyasyon sterilizasyonu için de koruma sağlar.

Polipropilen'deki stabilizatör sisteminin etkinliği, hızlandırılmış yaşlanma testinin sonuçları ekstrapole edilerek saptanabilir. Bir polipropilen parçanın farklı koşullar altında farklı sıcaklıklara dayanımı sirkülasyonlu bir etüvde yaşlanma datalarından hesaplanabilir. Islak veya ıslak/kuru uygulamalar için test örnekleri etüv yaşlanmasından önce uygun şekilde ortama maruz bırakılabilir.

Bu deneyde tebeşirlenmenin başladığı ilk nokta hasarın oluştuğu aynı zamanda çekme uzaması, rijitlik veya kırılma anının değiştiği an olarak değerlendirilebilir. Isıl ömür testi sıcaklıktaki değişimlerin yanı sıra numunenin kalınlığı, etüv içindeki hava hızı ve stabilizörlerin volatilitesi özellikle polimer içindeki hareketliliğinden çok etkilenir. Birçok polipropilen kullanıcısı kendi hızlandırılmış deneylerini yaratmışlardır.

Poliolefin polimerlerin nonpolar özellikleri nedeni ile polipropilen'in tüm çeşitleri, çoğu solvent ve kimyasala karşı oldukça yüksek dayanıma sahiptir. Polipropilen tuz, asit ve alkalilerin sulu çözeltilerinden etkilenmez, yüksek sıcaklıkta yağ ve hidrokarbonların içinde kaldığı takdirde ise az bir miktar şişme gösterir. Güçlü oksit

asitleri ve klorlu solventler ise polipropilene etki ederler. Polipropilen ortam etkisi ile çatlamaya (environmental stress cracking) karşı mükemmel dayanıma sahiptir.

Polipropilenin kristalin bir polimer olması nedeni ile, morfolojisi ve kristalin yapının özelliği homopolimerin fiziksel özellikleri üzerinde özellikle eğilme modülü, yüzey sertliği ve şeffaflığını önemli ölçüde etkilemektedir. Polimer katılaştıkça kristalin olmayan yapıdan kristaller oluşurken hız ve yapı malzemenin fiziksel ve üretim şartlarını etkiler. Kristalin organik asit veya metal tuzlarının formülasyona küçük oranda katılmasıyla çok sayıda küçük kristal başlama noktaları (nucleation sites) oluşur. Bu kristallerin büyümesi sırasında daha çok sayıda sferulit oluşur. Polimer morfolojisindeki bu değişiklik kristalizasyon hızını, sıcaklığını ve optik özellikleri artırır. Nükleasyon katkısı katılmış ürünlerde daha yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerinin elde edilmesinin yanında daha iyi üretim şartları ve daha kısa çevrim zamanları elde edilir. Bazı pigmentler nükleasyon ajanları olarak davranır ve renkli bileşimlerin özelliklerini değiştirir.

Polipropilen'in cam, talk, mika, kalsiyum karbonat veya bunların karışımları ile takviye edilmesiyle birçok özelliği iyileşme gösterir.

Polipropilen'in avantajları şunlardır:

- Düşük yoğunluk
- Mükemmel kimyasal dayanım
- Yüksek erime noktası
- İyi bir rijitlik/ tokluk dengesi
- Birçok üretim metoduna uygunluk
- Birçok özel çeşit oluşturabilme imkanı
- Mükemmel dielektrik özellikleri
- Düşük fiyat (özellikle birim hacim başına)

Polipropilen'in dezavantajları ise şunlardır:

- Yanmaya eğilim
- Düşük sıcaklık kırılabilirliği

- Orta düzeyde rijitlik
- Baskı, boyama ve yapıştırma zorluğu
- Düşük ultraviole dayanımı
- Düşük ekstrüder çıktısı (özellikle yumuşak/ amorf malzemeleri göre)
- Kötü optik özellikler
- Düşük eriyik dayanımı

Yukarıda dezavantaj olarak sayılan özelliklerin hemen tamamına yakını uygun üretim metodu ve katkılarla sorun olmaktan çıkmıştır.

Polipropilen ayrıca nem çekmediği için üretim öncesi ek kurutma işlemine gerek bırakmaz. Polipropilen parçalar enjeksiyon makinasından çıkarıldıktan sonra parça kalınlığına bağlı olarak yaklaşık 24 saat çekmelerini sürdürürler [5, 6, 7, 8, 9].

4.2. Elyaf Türleri

Termoplastiklerin takviyelendirilmesinde elyaf olarak cam (E ve S), karbon, aramid ve uzun olarak da üretilebilen bazı “whisker” çeşitleri kullanılmaktadır. Bunlara ait özellikler Tablo 4.3’de verilmiştir. Ayrıca, küre, tabaka ve parçacık gibi takviye veya dolgu maddeleri de mevcuttur, fakat bunlar yüksek dayanımların istendiği mühendislik uygulamalarında takviyelendirici nitelikte görülmemektedir.

4.2.1. Cam Elyaf

Camelyaf, kısa elyafli termoplastik kompozitlerde takviye edici olarak en çok kullanılan elyaf tipidir. Camelyaf en eski olarak Mısırlı zanaatkarlar tarafından kullanılmıştır. O zamanlar, ısıtılmış cam çubuklardan çekilen camelyaf, dekoratif amaçlı kullanılmıştır. 1930 yılı sonlarında, bugünkü anlamda, sürekli halde camelyaf üretimi gerçekleştirilmiştir. Sonra, 2. Dünya Savaşı’nda ve daha sonra ise plastiklerin kuvvetlendirilmesinde kullanılmıştır. Bir kalsiyum-alümino-borosilikat kompozisyonu olan E-camelyafı, elektriksel ve mekanik özelliklerinin dengeli olması ve ayrıca fiyatı dolayısıyla, polimer matris kompozitlerinde kullanılan başlıca takviyedir. E-CR camı E-camının yüksek asit direncine sahip, boronsuz modifiye edilmiş bir tipidir. S-camı ise kompozitlerin dayanım ve rijitliğini arttıran oldukça

yüksek dayanım ve modüle sahip bir cam türüdür. Elyaf üretiminde kullanılan belli başlı camların kompozisyonları Tablo 4.4'de görülmektedir. Termoplastik ve termoset reçinelere artan oranlarda cam elyaf katılarak çekme ve eğme dayanımı, rijitliği ve birçok durumda darbe dayanımı arttırılabilir. Elyaf çapı gerilmenin matrisden elyafa aktarılmasında önemli rol oynar. Verilen bir elyaf yüzdesi için daha küçük çapta elyaflar daha fazla elyaf yüzeyi anlamına gelmektedir. Camelyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri elyaf yüzdesi, elyaf uzunluğu, elyaf yönlenmesi ve bazı durumlarda da elyaf çapına kuvvetle bağlıdır. Limitler dahilinde dayanım, yapıdaki camelyaf miktarı ile doğru orantılı olarak artar. Genellikle, belirli bir doğrultudaki uzun yapıda elyaf, o doğrultudaki gerilmenin transferinde devamlılık sağlar.

Ayrıca elyafın doğrultusu, optimum yükün taşındığı doğrultu olmalıdır. Bu arada oryantasyon, paketlenme (packing) özelliğini aynı zamanda elyaf miktarını etkiler, böylece de dayanıma katkıda bulunur. Mesela, sürekli ve yönlenmiş elyaflı yapılar % 80 - 85'e varan ağırlık yüzdelerine sahipken, dağınık elyaf ile ulaşılabilen maksimum değer, % 65 civarındadır.

Cam elyafının oldukça elastik olduğu söylenebilir, başka bir deyişle gerilme altında kopma gerilmesine kadar akma göstermeden üniform olarak uzayıp, yükün kaldırılmasıyla ilk boyuna döner.

Histerizis olmaması ve yüksek dayanımı, cam elyafının enerjiyi kayıpsız olarak depolayabilmesini ve geri verebilmesini sağlamaktadır. Dinamik yorulma direncinin sağlandığı ve aşınmanın da bertaraf edildiği durumlarda, otomobil makaslarında, treyler römorkları, mobilya ve telefon kabloları uygulamalarında bu özellikten faydalanılmıştır.

Tablo 4.3 Elyafların mekanik özellikleri [11]

Elyaf Tipi	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (GPa)	Young Modülü (GPa)	Özgül Çekme Dayanımı (GPa.cm ³ /g)	Özgül Young Modülü (GPa.cm ³ /g)
E - Camı	2,6	34	76	13	29
S - Camı	2,5	48	83	19	33
Yüksek Modül Karbon	2,0	21	414	11	207
Yüksek Dayanım Karbon	1,7	28	276	17	162
Silikon Nitrür	3,2	138	393	43	123
Silikon Karbür	3,2	103 - 207	483	32 - 65	151
Aramid	1,5	34	124	22,7	83
Alimüna	4,0	14,5	193	3,6	48
Çelik	7,87	28 - 41	200	3,5 - 5,2	25

Bununla birlikte, kompozitlerin belirgin akma sınırı göstermemesi ve yük taşıma kabiliyetlerinin zamanla azalması sebebiyle, ani olarak gerçekleşebilecek hasarlara karşı uygun bir emniyet katsayısı kullanılmalıdır. Örneğin, E cam elyafı takviyeli kompozitlerin sabit yük altında kırıldıkları görülmektedir. Çekme dayanımı ilk zamanlarda 2/3'e, 50 yıllık bir periyottan sonra da yarısına düşmektedir [10].

Tablo 4.4 Elyaf üretiminde kullanılan camların kompozisyonları [12]

Hammadde	E - Camı	C - Camı	S - Camı
SiO ₂	52 - 56	64 - 68	64
Al ₂ O ₃	12 - 16	3,5	25
MgO	0 - 6	2 - 4	10
CaO	16 - 25	11 - 15	-
Na ₂ O + K ₂ O	0 - 2	7 - 10	-
B ₂ O ₃	5 - 10	4,6	-
BaO	-	0 - 1	-
TiO ₂	0 - 1,5	-	-
F ₂	0 - 1	-	-
Fe ₂ O ₃	-	0,8	-
FeO	0,8	-	-

4.2.2. Diğer Elyaf Türleri

Karbon elyafı, yüksek performansın arandığı uygulamalarda kullanımı gitgide artan bir elyaf türü olup; yüksek dayanım ve modül, boyut kararlılığı, elektriksel iletkenlik, kendinden yağlama özelliği, korozyon direnci, ısı direnç, düşük yoğunluk gibi birçok değişik özellikte karbon elyafı mevcuttur. Özellikle kırılmış (chopped strand) haldeki karbon elyafı, enjeksiyon ile kalıplamada elyafların tutunması için bir yüzey kaplaması ile kullanılır. Başlangıçta bu kaplamalar termoset reçineler için optimize edilmiş olup, çoğu durumda termoplastikler için de uygundur. Ayrıca, yüzey enerjisi özelliklerini bertaraf etmek için karbon elyafına özel yüzey işlemleri (kimyasal veya elektriksel oksidasyon) uygulanır. Karbon elyaf/termoplastik kompozit uygulamaları için kullanılan yüzey işlemleri ve bağlama katkılarında çok büyük ilerlemeler kaydedilmiştir, fakat birçok sistem henüz optimize edilebilmiş değildir.

Aramid (Kevlar) elyafı sentetik bir organik fiber olup, 1972'de esasen araçların lastiklerindeki çelik elyafa alternatif olarak ortaya çıkartılmıştır. Yüksek dayanım, hafiflik ve tokluk özellikleri sayesinde, endüstri, askeri ve uzay alanlarında artan bir şekilde kullanım alanı bulmaktadır. Aramid elyaf, ayrıca matris ile olan bağı arttırmak amacıyla bir yüzey işlemine tabi tutulur. Karbon elyafta olduğu gibi, aramid elyafta da, arabağ özelliklerini artırıcı yöndeki çalışmalar, daha çok termoset reçine matrisler için olmuştur. Bu yüzden, bu sistemler termoplastik matris reçineleri için henüz optimize edilmemiştir.

Metal elyaf, metalize cam ve metalize karbon elyafı da hali hazırda mevcuttur, fakat bunlar henüz yaygın kullanım alanına sahip olmayıp, elyaf ile takviyelendirmede pek fazla aranılan çeşitler değildirler. Bununla birlikte, elektrik iletkenliği, statik yük dağıtmanın önemli olduğu uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır [11,12].

4.3. Elyaf-Matris Arayüzeyi

Elyaf takviyeli termoplastiklerde performans ve dayanıklılığın göstergesi elyaf ve matris arasındaki bağlanmadır. Zayıf bağlanmalar, zayıf kompozit özelliklerine neden olur. Bu arabağı kuvvetlendirmek için elyaf yüzeyi kaplanabilir, ve/veya matrise bağlayıcı ajanlar katılabilir. Kimyasal bağlayıcı uygulanmış cam elyaf-PP kompozitinin özellikleri Tablo 4.5'de görülmektedir.

4.3.1. Camelyaf Bağlayıcı Ajanları

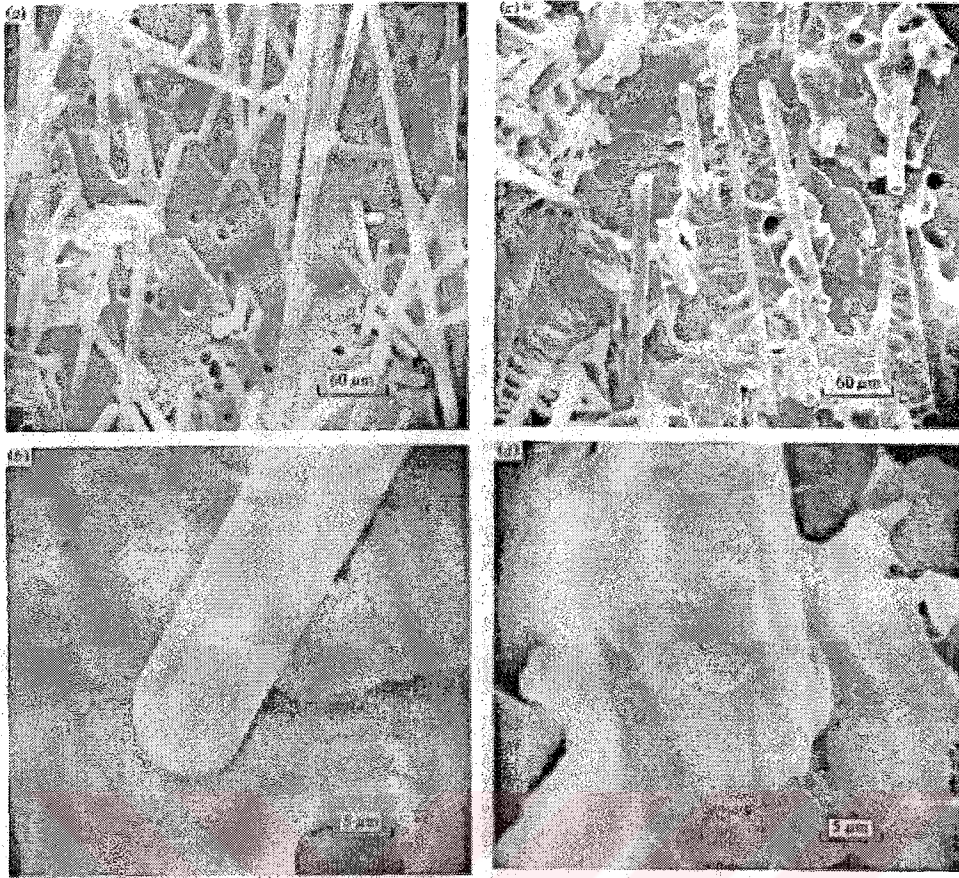
Elyaf ve matris arasındaki etkileşimi arttırmak için, elyafın üstüne, kullanılan polimer matrise uygun kaplama (sizing) uygulanır. Camelyaf için kullanılan bağlanmayı artırıcı madde genellikle "silan"lardır. Camelyaf takviyeli poliamidin başarısı kısmen iki elemanın birbirine iyi uyum sağlamasından kaynaklanır. Olefinik malzemeler (PE ve PP) ve diğer birçok termoplastik, camelyaf ile iyi bir bağlanma yapmaz, böylece yük altında elyaflar matristen kolayca sıyrılır ve kompozitten beklenen özellikler sağlanamaz . Şekil 4.3'de kimyasal bağlanmanın etkisi görülmektedir.

Tablo 4.5 Kimyasal bağlanmanın % 30 cam elyaf takviyeli polipropilenin özelliklerine etkisi [13]

Özellikler	Kimyasal Bağlanma YOK	Kimyasal Bağlanma VAR
Çekme Dayanımı (MPa)	48	75
Uzama (%)	2,5	2,0
Eğilme Modülü (GPa)	4,14	4,83
Çentikli Izod Darbe Dayanımı (J/m)	54,3	65,1
Isı Altında Eğilme Sıcaklığı /A (°C)	129	138
Isı Altında Eğilme Sıcaklığı /B (°C)	138	151

İnorganik katkılar atmosferdeki suyla temasa girmeleri veya yüksek yüzey enerjileri nedeniyle, yüzeylerinde hidroksil gruplar içerirler. Bu malzemelere yalnızca hidrojen bağları oluşturabilen termoplastikler kuvvetle bağlanır.

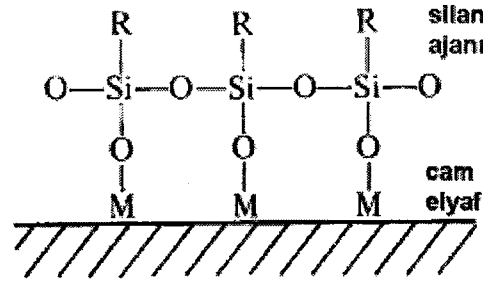
Bununla beraber inorganik katkılar hidrofilik özellikleri nedeniyle atmosferdeki suyu matrisle aralarındaki arayüzeye çekerler ve nemli ortamlarda mekanik özelliklerde zamanla düşme olur. Bu yüzden bağlayıcı ajanlar elyaf takviyeli termoplastiklerin bu özelliklerini de iyileştirmesi açısından önemlidir.



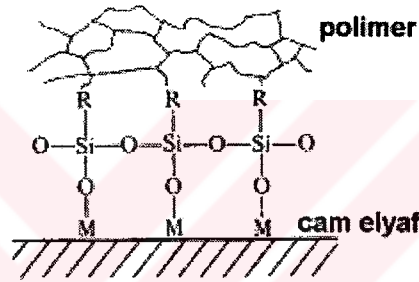
Şekil 4.3 (a) ve (b) Kimyasal bağlanma olmayan numunenin kırık yüzeyinde elyafların kolayca sıyrıldığı delikler görülmekte ve elyaf yüzeyleri son derece temizdir. (c) ve (d) Kimyasal bağlanma olan numunenin kırık yüzeyinde daha az elyaf sıyrılması görülmekte ve elyafların üzeri matris polimer tarafından iyice sarılmıştır [14]

En çok bilinen bağlayıcı ajanlar, kimyasal kompozisyonları hem elyaf yüzeyi, hem de polimer matris ile etkileşimde bulunabilen, silan ve titan bazlı bileşimlerdir (Şekil 4.4). Bağlayıcı ajanının moleküllerinin organik kısımları kullanılacak polimer matrise uyum sağlayacak şekilde değiştirilebilir (Şekil 4.5). Silan kaplamada, % 1 bağlayıcı ajan 10 mikron çapında bir elyafın üzerinde 0,05 mikron kalınlığında bir tabaka oluşturur. Titan bağlayıcı ajanı inorganik yüzeylere hidroliz ile bağlanır. Silan dışındaki bağlayıcı ajanlar arasında DuPont tarafından üretilen krom kompleksli "Volan" sayılabilir. Bunlar camelyafla yoğun şekilde kullanılır. Hidroksil gruplar camelyaf yüzeyinin silanol gruplarına hidrojen ve mümkün olursa kovalent bağlarla bağlanır. Bu bağlayıcı ajanlar camelyaf takviyeli polyester ve epoksilerde kullanılır. Diğer silansız bağlayıcı ajanlar, fosfor içeren bileşikler, uzun zincirli alifatik karboksil asitler ve belli aminleri içerirler, fakat bunların kullanımı yaygın değildir. Polimerler,

kendileri de diğer iki polimerin arasında bağlayıcı ajan olarak kullanılabilir. Örnek olarak, poliüretanın aramid elyafları epoksi matrise bağlanması verilebilir [15].



Şekil 4.4 Silanın cam elyafa tutunması [14]



Şekil 4.5 Polimer-cam elyaf bağlanması [14]

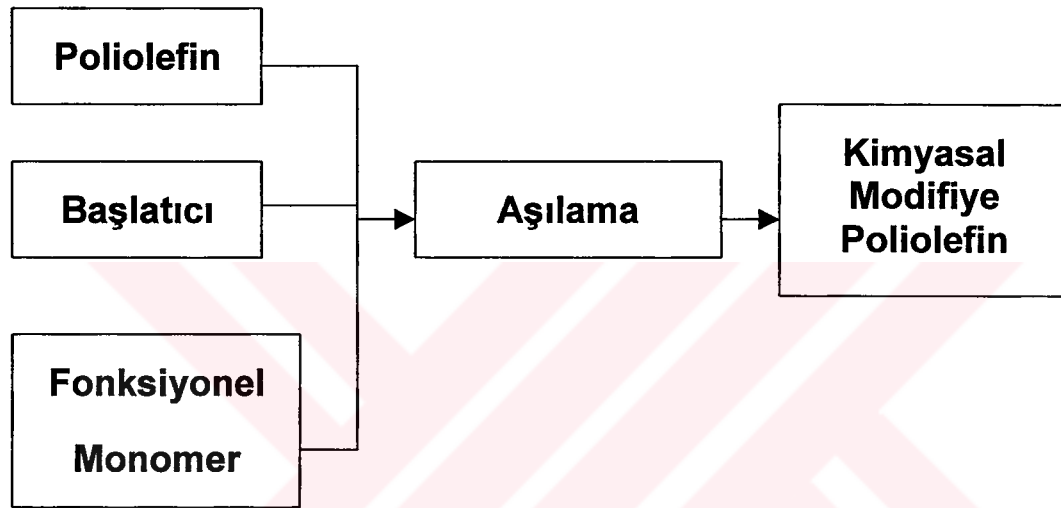
4.3.2. Polipropilen Matris için Bağlayıcı Ajanlar

Apolar polimerler olan PP ve PE, özel hazırlanmış kaplamalara dahi sınırlı bir uyum gösterirler. Bu problemi çözmek için PP, camelyaf ve matris arasındaki bağlanmayı artırıcı yönde modifiye edilir. Elyaf ve matris arasında optimum bağlanmayı sağlayan camelyaf/PP sistemleri, uygun şekilde kaplanmış camelyafla akrilik asit aşılansmış veya maleik anhidrit ile modifiye edilmiş polipropilendir.

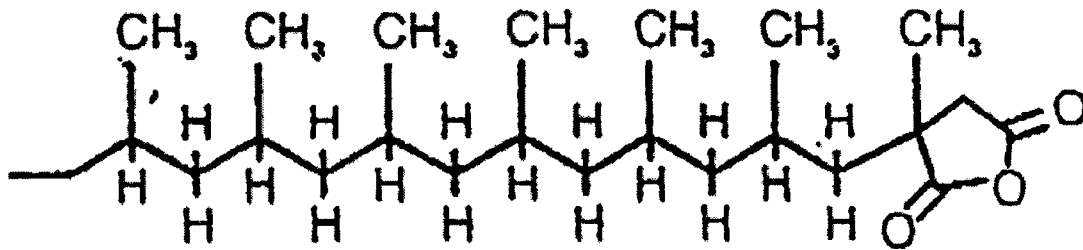
Kısa camelyaf takviyeli polipropilen bileşimlerinin mekanik özellikleri üzerine yapılan incelemede, akrilik asit aşılansmış polipropilen gibi kimyasal olarak modifiye olmuş PP'lerin faydalı etkisi görülmüştür.

Kimyasal modifiye edilmiş poliolefinler fonksiyonel monomerlerin polimer matrise kimyasal olarak aşılması ile üretilir. Bu aşılama reaksiyonu peroksitsiz radikaller, maleik anhidrit ve akrilik asit kullanılan monomerler tarafından başlatılır (Şekil 4.6).

Bu kimyasal olarak modifiye edilmiş poliolefinler kendilerine özgü moleküler özelliklere sahiptir, çünkü yüksek polariteli bir hidrofilik grupta, hidrofobik bir polimer zincirinin birleşmesinden oluşurlar (Şekil 4.7). Bu ürünün kullanışlı olmasının nedeni, polimer zincirinin polar olmayan matrislerle uyum sağlamasının yanı sıra fonksiyonel grubun ilerideki kimyasal reaksiyonlara imkan sağlamasıdır [16].



Şekil 4.6 Aşılama işlemi [16]



Şekil 4.7 Maleik Anhidrid aşılانmış polipropilen [16]

5. ELYAF TAKVİYELİ PLASTİKLERİN YORULMA DAVRANIŞLARI ÜZERİNE MEVCUT ÇALIŞMALAR

Bu bölümde takviyeli plastiklerin yorulma davranışları üzerine yapılmış çalışmalardan bahsedilecektir. Bölüm içinde yorulma davranışlarını tanımlamakta sıkça kullanılan Wöhler diyagramları ve yorulma çatlağı ilerlemesi çalışmalarının yanısıra, histerizis enerjisi, dinamik modül, dinamik sürünme, ısı yorulma, yorulma mekanizmasını modelleme ve mikroskobik hasar analizi gibi çalışmalardan bahsedilecektir.

5.1. Yorulma Çatlaksız Numunelerle Yapılan Çalışmalar

Polimer ve kompozit sistemlerinin yorulma davranışları klasik malzemelerde olduğu gibi genellikle Wöhler diyagramları (S-N eğrileri) ile tanımlanmaya çalışılır. Bir Wöhler diyagramı oluşturabilmek için çok sayıda numunenin test edilmesine gerek duyulur. Bu durum özellikle malzeme araştırmalarının ilk aşamalarında sınırlı miktarda malzeme üretilmişken çoğu zaman mümkün olmayabilir. Üstelik uzun testlere rağmen kırılma ömrünü veren çevrim sayılarının bulunması, malzeme içindeki yorulma prosesi ile ilgili yapısal değişiklikler hakkında bilgi vermez.

Altstadt ve arkadaşları [17] polimer ve polimer kompozitlerin yorulma davranışlarını karakterize etmek amacıyla halen kullanılan farklı test metodlarını karşılaştırmışlardır. Polimer malzemelerin kimyasının ve üretim metodlarının yorulma davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla;

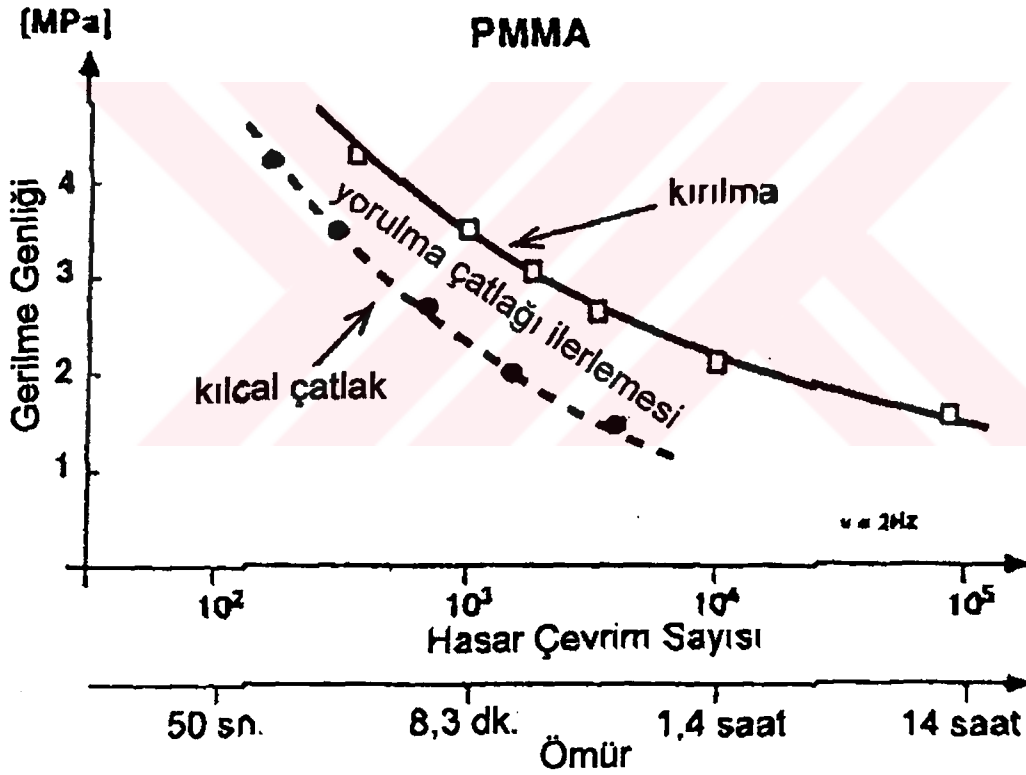
Yorulma çatlağı ilerlemesi (YÇİ) veya

Histerizis ölçümü (HÖ)

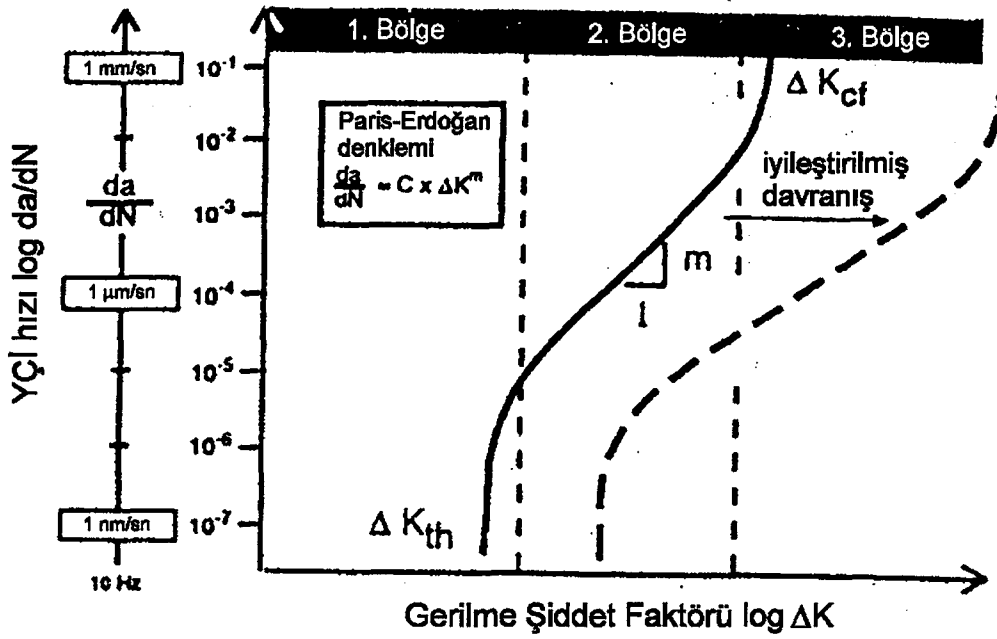
test metodlarından birinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Polimer ve polimer kompozitlerin yorulma hasarlarının hemen tamamı, bir kılcal çatlak (craze) veya mikroçatlak ile başlar ve bu fazı hasar ile sonuçlanan çatlak ilerleme safhası izler (Şekil 5.1). Çatlak ilerleme tezinde malzemede bir ön çatlağın

bulunduğu varsayılır ve yorulma ömrü çatlak ilerleme safhasından itibaren hesaplanır. Çatlak ucundaki gerilme durumu, gerilme yoğunluk faktörü ΔK yardımıyla tanımlanır (Şekil 5.2). Çatlak ilerleme hızı eğrilerinin orta bölgelerinde doğrusal bir ilişki gözlenir. ΔK değeri eşik değer olan ΔK_{th} değerine yaklaştıkça, YÇİ hızı çok küçük değerlere doğru hızla azalır. ΔK değeri, tasarım kriteri olarak klasik S-N diyagramlarından elde edilen yorulma sınırına benzemektedir. ΔK bir yükleme çevriminde kararsız kırılmanın olduğu K_{cr} değerine yaklaştıkça, YÇİ hızı önemli bir şekilde artmaktadır. Bu noktadan hareketle malzemelerin yorulma dayanımlarının değerlendirilmesinde, verilen bir ΔK değeri için YÇİ hızındaki bir azalma veya belli bir hızda ilerleyen bir çatlak için ΔK değerindeki bir artış, malzemenin yorulma dayanım açısından olumlu sayılmaktadır.



Şekil 5.1 Kılcal çatlak başlangıcı, kırılmaya neden olan gerilme genliği ve hasar çevrimi [17]

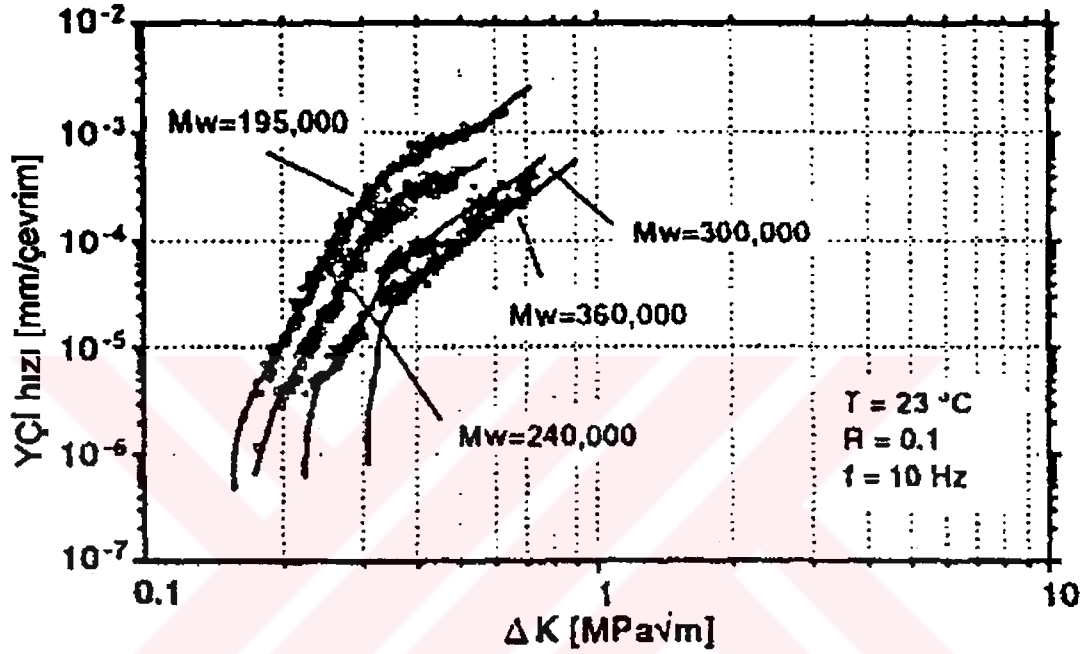


Şekil 5.2 Yorulma çatlakları ilerlemesi [17]

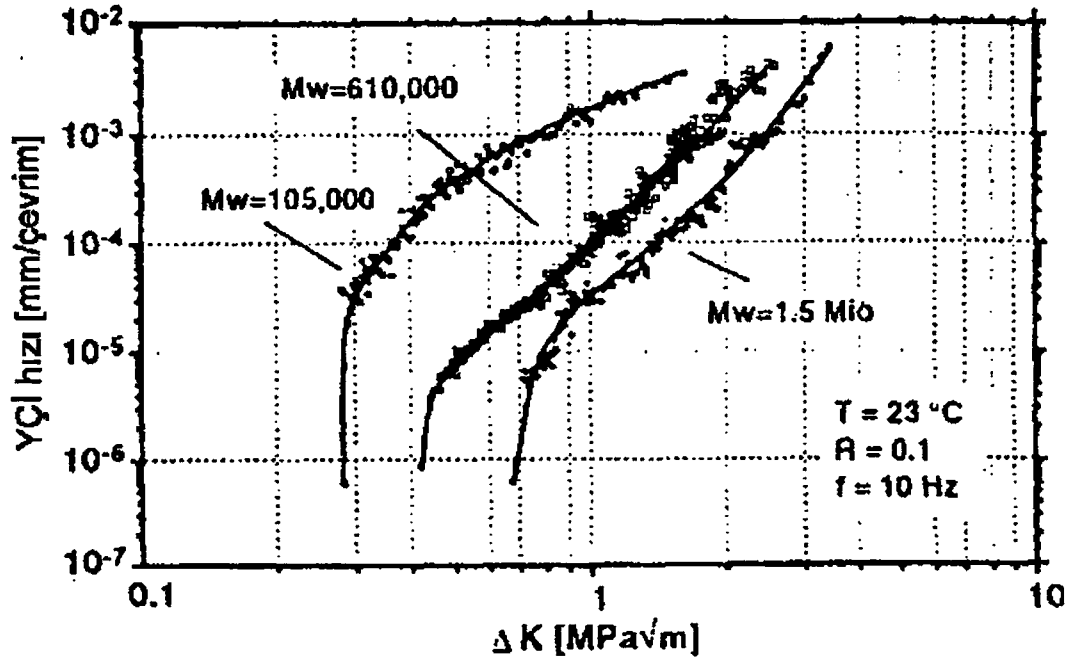
Genellikle yeni sentezlenen malzemelerin testleri için çok az miktarda polimer üretilmektedir. Yorulma çatlakları ilerlemesi testi, çok az miktarda polimerden (örneğin 6 gr.) küçük bir kompakt çekme numunesi hazırlayarak, yorulma çatlakları ilerlemesi çalışmasını gerçekleştirme avantajına sahiptir. Çekme veya darbe testlerinin tersine, mikroskopik ölçüde bir proba gerçekleştirilen yorulma çatlakları ilerlemesi testi, çatlak ucunun ilerlemesi ve polimer malzeme hakkında birçok önemli bilgi verebilir. Bu bilgilerle, çevrim başına 10^{-7} ile 10^{-2} mm arasında bir yorulma çatlakları ilerleme bölgesinde viskoelastik kırılma davranışı çalışması gerçekleştirmek mümkündür. Bunlara ek olarak kırılma yüzeyinin oluşumu iyi tanımlandığı takdirde, yorulma kırılması yüzeyinden yapılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışması yapı-özellik ilişkisi hakkında değerli bilgiler içerir.

Bir polimerin fiziksel özellikleri ortalama molekül ağırlığı (M_w) ve molekül ağırlığı dağılımına (M_w/M_n) kuvvetle bağlıdır çünkü, moleküler bağlar mekanik özellikleri önemli derecede etkilemektedirler. Serbest radikal polimerizasyonunun tersine, belli koşullar altında anyonik polimerizasyon daha düşük molekül ağırlığı dağılımı verir. Düşük molekül ağırlığı dağılımı da yorulma performansını yükseltmektedir (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4).

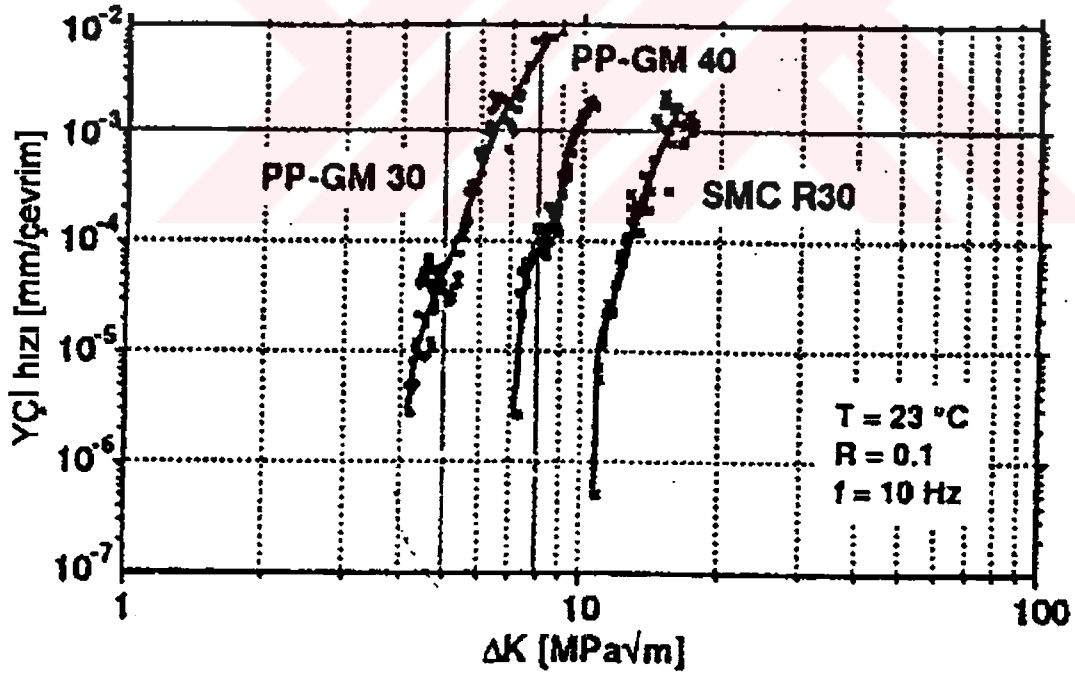
Kırılmış cam elyaf takviyeli termoset kompozitler, örneğin levha kalıplama karışımları (sheet moulding compound) veya cam hasır örgülü (glass mat) termoplastik kompozitler genellikle makroskopik çatlak ilerlemesi sonucu hasara uğrarlar. Bu tip yüksek oranda anizotropi gösteren malzemelerde takviyelerin YÇİ dayanımlarına olan etkisini belirleyebilmek amacıyla YÇİ deneyleri kullanılabilir (Şekil 5.5).



Şekil 5.3 Serbest radikal polimerizasyonla üretilmiş polistirenin molekül ağırlığının YÇİ'ne etkisi [17]



Şekil 5.4 Anyonik polimerizasyonla üretilmiş polistirenin molekül ağırlığının YÇI'ne etkisi [17]



Şekil 5.5 Levha kalıplama karışımı (SMC) ve cam hasır örgülü (GM) termoplastik kompozitlerin yorulma çatlakları ilerlemeleri [17]

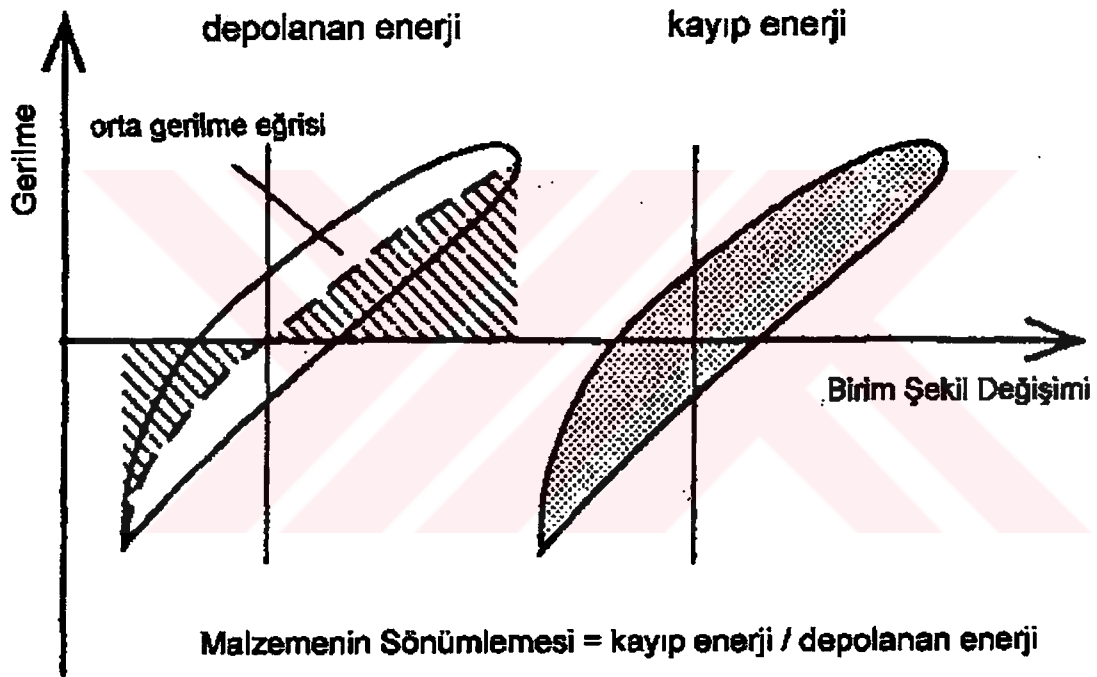
Yorulma çatlağı ilerleme diyagramları farklı malzemelerin veya bir malzemenin farklı test değişkenleri için, malzemenin çatlak ilerlemesi direnci hakkında değerli bilgiler vermektedir. Buna rağmen, bu testler polimerde kılcal (çizgisel) çatlak oluşumu veya çatlağın başlamasına direnci hakkında hiçbir bilgi verememektedirler. Bundan başka söz konusu testler pozitif R (gerilme oranı) değerleri için söz konusu olduğundan, çevrimsel basma (cyclic compression) gerilmelerinin etkisi ile oluşan hasarlar hakkında çok az bilgi sağlayabilirler. Kırılma mekaniği araştırmaları çatlaklı numuneler ile çalışmasına rağmen, histerizis ölçümü metodu hem çatlaklı hem çatlaksız numunelerle çalışabildiği için daha kullanışlıdır. Böylece kılcal çatlakların başlangıç safhaları, kayma akması veya ayrılma ve çatlak ilerleme safhaları da incelenebilmektedir.

Bir çevrimsel yükleme deneyi sırasında şekil değişimi ve gerilme değerleri izlenerek oluşturulan, histerizis çevriminin değişimi yardımıyla malzemenin yorulma dayanımı açıkça tanımlanabilir. Deney cihazı ve test numunesinden toplanan bilgiler şekil değişimi, rijitlik ve enerjiyle ilgili karakteristikleri tanımlamak için kullanılır (Şekil 5.6 ve Şekil 5.7). Malzemenin sönümlenmesini saptamak için histerizis eğrisine bir ortalama gerilme eğrisi adapte edilir. Doğrusal olmayan viskoelastik malzeme davranışlarında histerizis eğrisi bir elipsden farklıdır. Doğrusal elastik malzemelerde, ortalama gerilme eğrisi histerizis çevrimi alanını iki eşit parçaya ayırır.

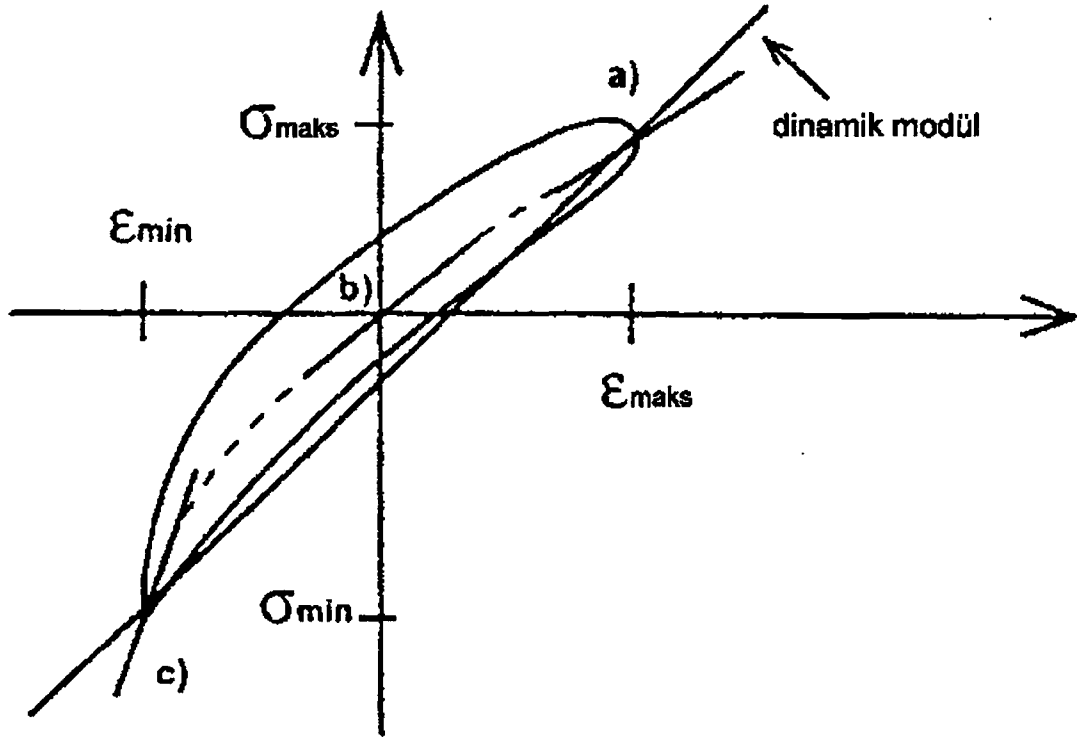
Çevrimsel çekme-basma zorlaması, yorulma zorlaması koşulları içinde her malzeme için en kritik yükleme şeklidir. Farklı elyaf hacim oranına sahip malzemelerin dinamik modülleri, histerizis çevrimlerinin farklı eğimleri ile temsil edilir. Çevrimlerin başlangıç noktasına göre yatay yöndeki ötelenmeleri, çevrimsel sürünme davranışını göstermektedir (Şekil 5.8). Bu örnekte SMC-R30, PP-GM40 ile karşılaştırıldığında yorulmaya karşı daha duyarlıdır. Buna karşın, dinamik rijitlik davranışları tamamen farklı şekilde değişmesine rağmen, her iki malzemede de 10^6 yükleme çevrimine kadar herhangi bir hasar gözlenmemektedir. R-SMC'nin dinamik modülü 10 ile 10.000 çevrim arasında %50'den fazla azalmaktadır. PP-GM40 için azalma önemsiz mertebededir. PP-GM-30 ise 20.000 çevrim sonunda basma tarafında kararsız bir şekilde oluşan hasar nedeniyle kırılmaktadır.

PP-GM40 sönümlemede çok düşük bir artış göstermektedir (Şekil 5.9). Buna karşın PP-GM-30, 10.000 çevrime kadar sönümlemede büyük artış göstermektedir. Hasardan hemen önce, sönümlemede çok hızlı bir artış görülmektedir. Düşük elyaf hacim oranı (hacimce %13) nedeniyle matris yüzdesi çok yüksektir. Histerizis ısınma etkisi matrisi yumuşatmakta ve elyafların destek görevleri ise burkulmaları nedeniyle

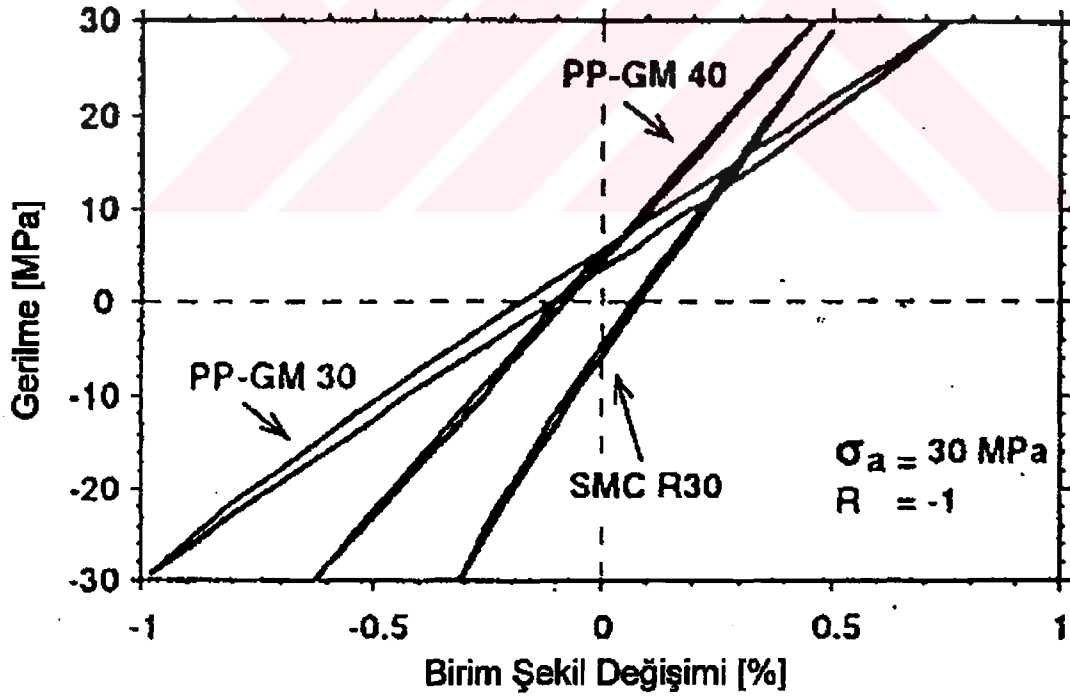
azalmaktadır. Basmada kararsız hasar oluşumu sonucu, daha fazla çevrimsel ısınma bu hasar prosesini hızlandırmaktadır. SMC-R30 10.000 çevrimde maksimum sönümleme göstermektedir. Bu artan sönümleme etkisinin nedeni, reçine ve dolgu arayüzeyleri arasında oluşan mikroçatlaklardır. Bu davranış, mikroçatlak yoğunluğunun artışı sonucu oluşan mekanik sürtünmenin artmasıyla açıklanmaktadır. Daha yüksek çevrimlerde sönümleme azalmaktadır. Bu durum mikroçatlak oluşumu ile ortaya çıkan yeni sürtünme yüzeylerinin azalması ve gittikçe daha fazla dolgu parçacığının çatlak bölgelerine girmesi sonucu, efektif sürtünme alanlarının azalması ile açıklanmaktadır.



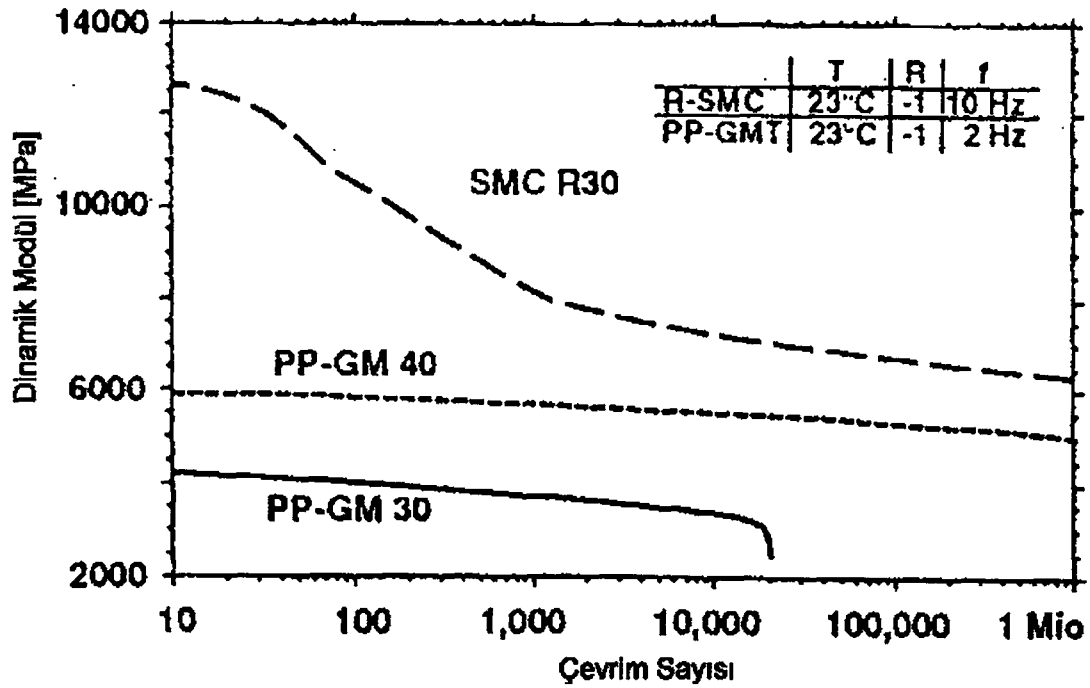
Şekil 5.6 Histerizis çevriminin malzeme enerjisi açısından değerlendirilmesi
[17]



Şekil 5.7 Histerizis çevriminin rijitlik açısından değerlendirilmesi [17]



Şekil 5.8 R-SMC ve PP-GMT malzemelerinin 30 MPa gerilme ve $R=-1$ 'de histerizis çevrimleri [17]



Şekil 5.9 30 MPa gerilme genliği ve $R=-1$ 'de dinamik modülün değişimi [17]

Özet olarak, Wöhler diyagramının tersine hem “yorulma çatlağı ilerlemesi” hem de “histerizis ölçümü” metodları yorulma ömrü sırasında oluşan hasar gelişimini gözlemleyebilmektedirler. HÖ lineer olmayan malzeme davranışını tanımlamak için kullanılabilir. Yorulma sırasında malzemenin sönümlemesindeki değişimler, son derece hassas bir şekilde toplam hasar kriteri olarak kullanılabilir. Birim şekil değişimi, rijitlik ve enerji ile ilgili parametreler tasarım için önemlidir. YÇİ deneyleri hataların yorulma davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için son derece uygundur. YÇİ deneyleri, özellikle yorulma hasar mekanizmalarının çatlak ilerleme hızına bağımlılığını analiz etmek için, çok hızlı ve efektif bir izleme metodu olarak kullanılabilir. HÖ numune hazırlama şekline son derece duyarlıyken, YÇİ deneyleri plastik bölgenin boyutları dikkate alınmak şartıyla numune geometrisinden bağımsızdır. YÇİ deneyleri elyaf ve elyaf-matris etkilerine karşı daha duyarlıdır.

Renz ve arkadaşları [18 ve 19] histerizis ölçüm yöntemini kullanarak, levha kalıplama karışımlarının dinamik yorulma davranışlarını tespit etmeye çalışmışlardır. Levha kalıplama karışımlarının (LKK'larının) heterojen bileşimleri nedeniyle hasara çok fazla duyarlı olduklarını belirtmektedirler. Elyaf takviyeli kompozitlerde hasar nedeni olarak şu faktörleri saymışlardır:

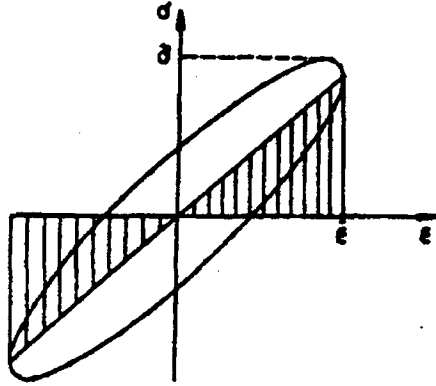
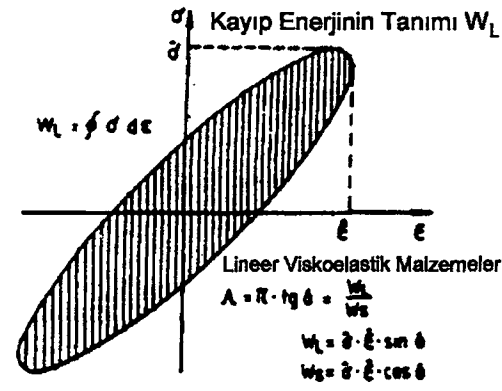
1. matris-elyaf arayüzeyinin ayrılması
2. reçine (resin) ile dolgu arayüzeyinin ayrılması
3. matris kırılması
4. elyafların veya elyaf demetlerinin (fibre-bundles) sıyrılması
5. çekme kırılması nedeniyle elyaf kırılması veya elyaf burkulması (buckling)

Çevrimsel zorlama sırasında viskoelastik malzeme davranışı, gerilme-şekil değiştirme diyagramında bir histerizis yaratır. Artan malzeme yorulması ile histerizis eğrisinin değişimi histerizis ölçümleri ile hesaplanır ve bazı karakteristik değerlerle tanımlanabilir.

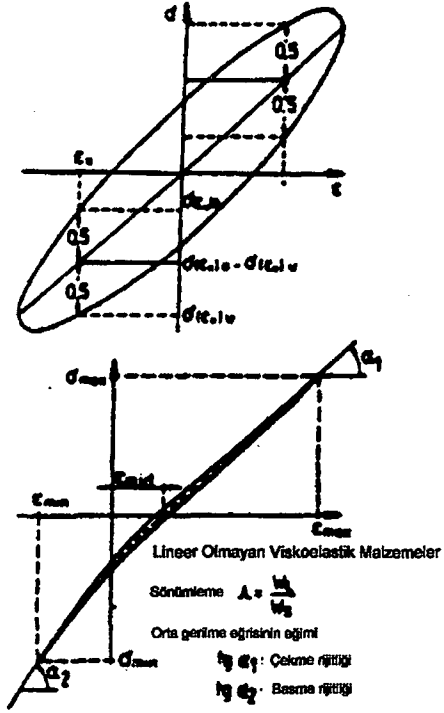
Kırılma mekaniği önceden bilinen çatlaklı test numuneleri ile çalışırken, histerizis ölçümleri malzeme deformasyonunun bir uzama ölçer (strain gauge) yardımıyla ölçüldüğü çatlaklı veya çatlaksız numuneler üzerinde yapılabilir. Böylece malzemedeki değişimler çatlak öncesi fazdan başlayarak ölçülebilir.

Deneyler sırasında incelenen malzemeler, yük kontrollü bir servo-hidrolik test cihazında sinüzoidal çevrimlere maruz bırakılmıştır. Kaydedilen her bir histerizis eğrisi 180 değer noktasından oluşturulmuş ve 27 kadar histerizis karakteristiği hesaplanmıştır.

Malzemelerin sönümleme (damping) özelliğini ve aynı zamanda numunelerin rijitliğini (stiffness) saptamak için, ortalama gerilme eğrisi (OGE) nümerik olarak histerizis eğrisi üzerine çizilmiştir (Şekil 5.10). OGE'nin eğimi malzemenin çekme ve basma fazlarında yüke bağımlı rijitliği hakkında fikir verebilmektedir. Zorlama süresi boyunca rijitlikteki değişim, yorulma zorlaması esnasındaki hasar oluşumu için bir ölçü olmaktadır. LKK'ların yorulma zorlamalarında, çatlaklar olduğu kadar sıcaklıkta artmakta ve oluşan sürünme (creep) neticesi modül değişimi meydana gelmektedir. Çatlaklı malzemelerin rijitliği, çekme zorlaması altındayken basma zorlamasından daha çok azalma göstermektedir. Ortalama şekil değişimi ise OGE'nin şekil değişimi eksenini kestiği nokta olarak kabul edilmekte ve çatlak oluşumu veya elastik olmayan deformasyon sonucu oluşan malzemenin çevrimsel sürünmesini tanımlamaktadır.



Orta Gerilme Eğrisinin Oluşturulması



Histerizis Analizinin Parametreleri

Şekil 5.10 Histerizis analizi [18]

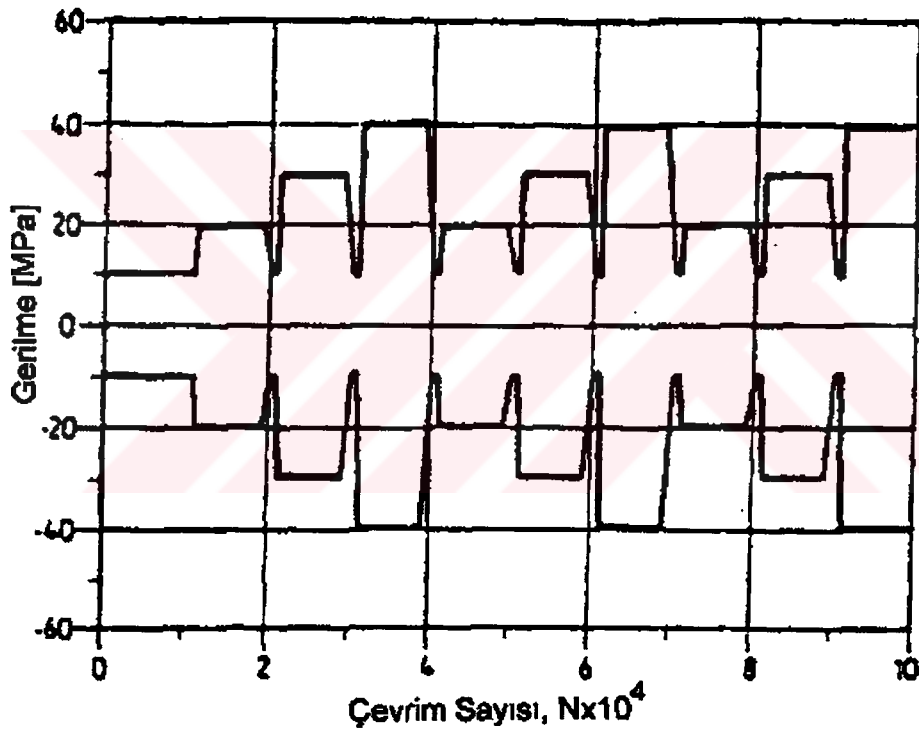
Lineer viskoelastik malzeme davranışı durumunda histerizis eğrisi elips şeklini alır. Malzemenin sönümlemesi (Λ) gerilmenden bağımsızdır ve sinüzoidal yük ile ölçülen numune deformasyonu arasındaki faz açısı (δ) yardımıyla hesaplanabilir.

$$\Lambda = \pi \tan \delta \quad (5.1)$$

Viskoelastik deformasyon, çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve özellikle sürtünme ve aşınma mekanizmaları yardımıyla malzemedan yayılan enerji, bir çevrim sırasında oluşan histerizis eğrisinin alanına eşittir. Bu alan entegrasyon ile saptanmakta ve kayıp enerji W_L 'yi ifade etmektedir. Hesaplanan OGE ile apsis üzerinde minimum şekil değişiminden maksimum şekil değişimine kadar olan alan, bir çevrim sırasında malzemenin depoladığı enerjinin bir ölçüsüdür. Bu alan da entegrasyon ile saptanmakta ve kayıp enerji W_S 'yi ifade etmektedir. Kayıp enerjinin depolanan enerjiye oranı malzemenin sönümlemesi olarak tanımlanmaktadır.

$$\Lambda = \frac{W_L (Nm / mm^3)}{W_s (Nm / mm^3)} \quad (5.2)$$

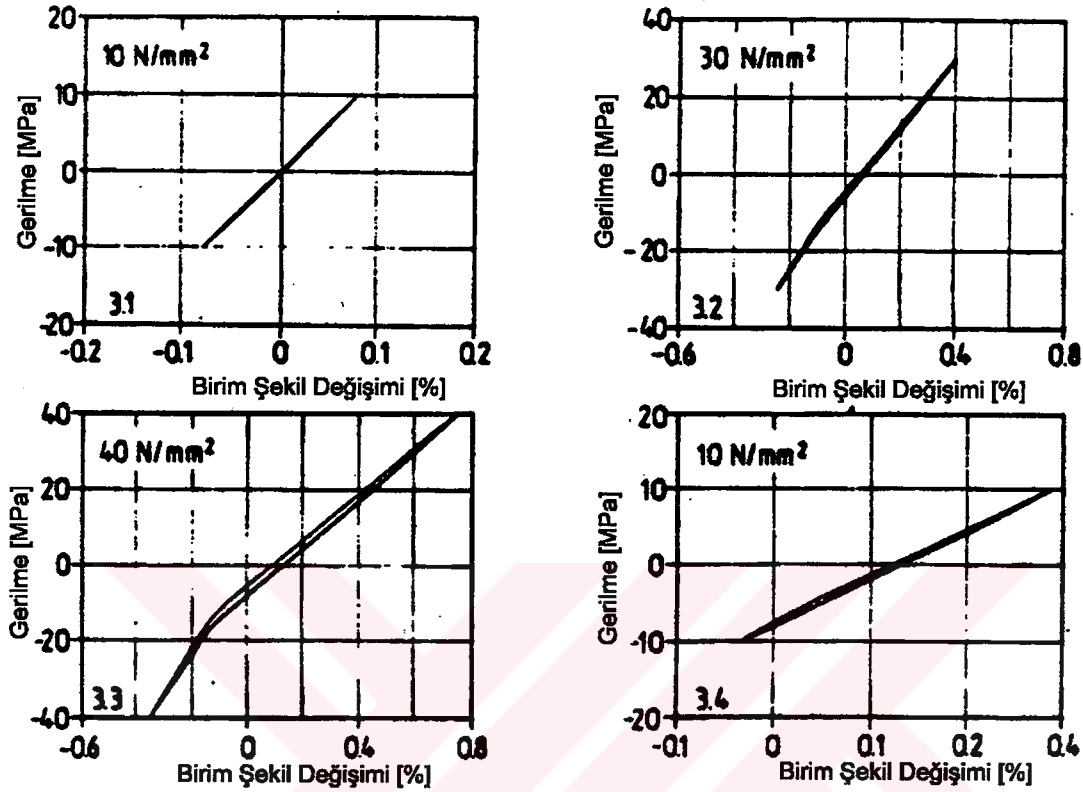
Testlerde kullanılan LKK'ları değişik yüzde oranlarında cam elyaf ve doymamış polyester (unsaturated polyester) matrisden oluşmaktadır. LKK'ları laboratuvar şartlarında 140°C sıcaklık ve 74 bar basınç altında 3 dakika preslenerek, 350x400x4 mm³ levhalar üretilmiştir. Bu levhalardan çekme testi için çekme çubukları ve dinamik testler içinse 80x10x4 mm³ düz numuneler çıkartılmıştır. Dinamik testler için kullanılan serbest açıklık (free span) 40 mm'dir. Testler her üç zorlama seviyesi, bir yükleme çevrimi oluşturacak şekilde tasarlanmıştır (şekil 5.11). Çekme-basma değişken zorlama deneylerinde R=-1 ve 10 Hz frekans seçilmiştir.



şekil 5.11 Kademeli yük arttırarak yapılan deneylerde yükün değişimi [18]

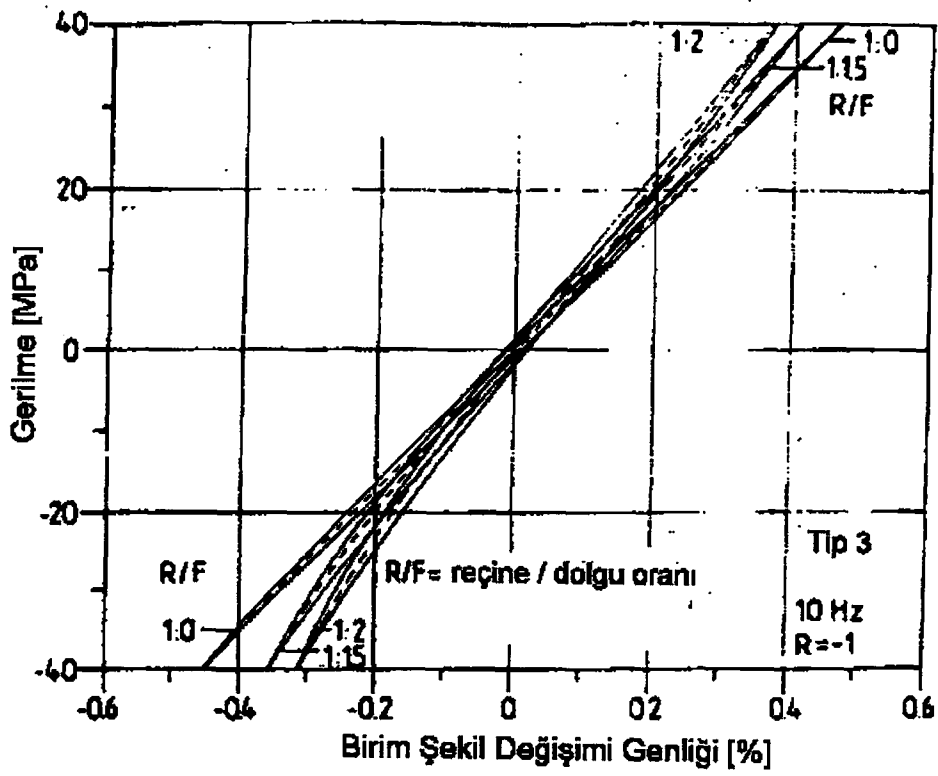
Değişken zorlama testinde ($R=-1$ ve ± 30 N/mm²) histerizis eğrisi bir elipsten lineer olmayan viskoelastik malzeme özelliğini gösteren bir şekle dönüşür (şekil 5.12). Eğrinin basma tarafında bir "diz" (knee) oluşur. Zorlama seviyesinin artması ile yaklaşık 12 N/mm²'de oluşan diz ve rijitliğin azalması daha açıkca görölmektedir (şekil 5.12). Zorlama seviyesinin artışı ile oluşan dizin pozisyonu değişmemektedir. Dizin oluşumu ile ilgili olarak histerizis eğrisinin çekme tarafında uzama olmaktadır.

Malzeme üzerindeki zorlama boşaltılarak tekrar 10 N/mm^2 gerilme seviyesine düşüldüğünde, histerizis eğrisinin önemli ölçüde değişen formu ve pozisyonu, malzemenin daha önceki zorlamalar nedeniyle geri dönüşümsüz olarak hasara uğradığını göstermektedir (Şekil 5.12).

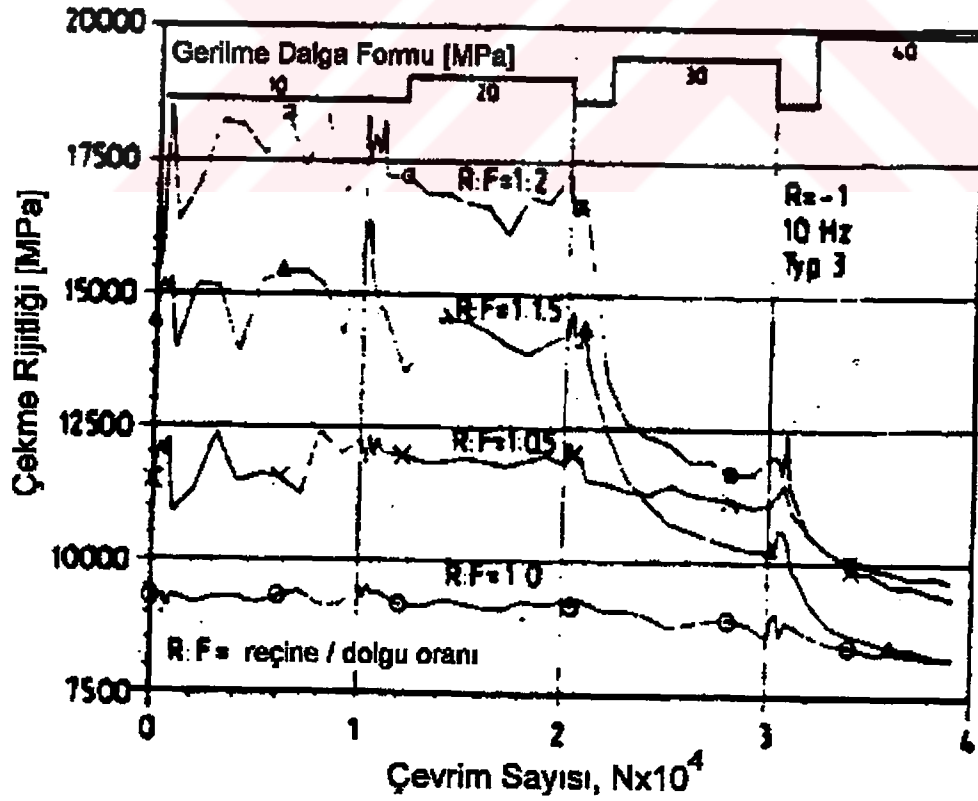


Şekil 5.12 Kademeli yük arttırarak yapılan deneylerde histerizis çevriminin değişimi [18]

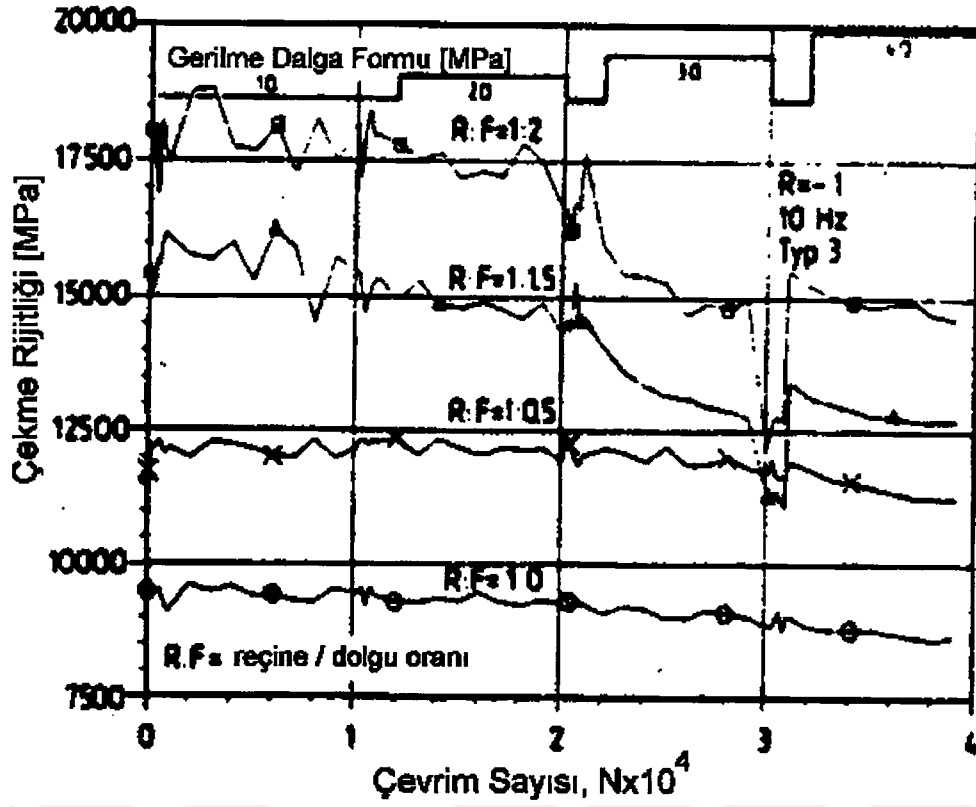
Ehrenstein [20] yukarıdaki çalışmanın yanısıra, dolgu oranının LKK malzemenin yorulma davranışına olan etkisini ayrı bir çalışma olarak da incelemiştir. Artan dolgu yüzdesi ile basma bölgesinde oluşan diz formu daha da belirginleşmektedir (Şekil 5.13). Reçine ve dolgu parçacıkları arasındaki sınır yüzey, LKK'da mikroçatlakların oluştuğunu gösteren bir hasar kriteridir. Kalsitden üretilen mineral dolgu parçacıkları bir yüzey işlemi görmediği için reçine ile olan bağları zayıftır. Özellikle yüksek dolgu yüzdesi için çekme bölgesindeki rijitlik, artan çevrim sayısı ile dolgusuz malzemenin seviyesine düşer. Basma bölgesinde çatlaklar kapanır ve böylece malzeme rijitliği büyük oranda sürdürülebilir (Şekil 5.14 ve Şekil 5.15). Çekme bölgesinde oluşan mikroçatlakların artışı nedeniyle tüm malzemede bir bozulma söz konusu olur ve neticesinde basma bölgesinde de rijitlikte bir azalma gerçekleşir. Dolgu yüzdesi arttıkça sönmülemdeki artış daha belirgin olmaktadır.



Şekil 5.13 Histerizis çevriminin farklı dolgu oranlarına göre değişimi [20]



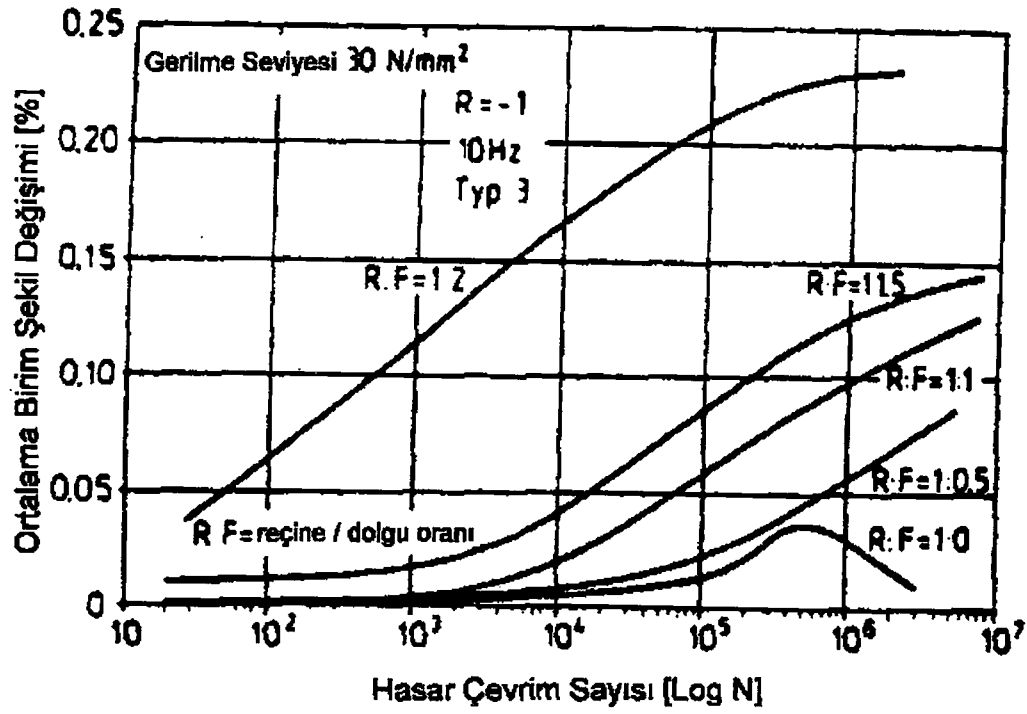
Şekil 5.14 Dolgu oranlarının etkisi [20]



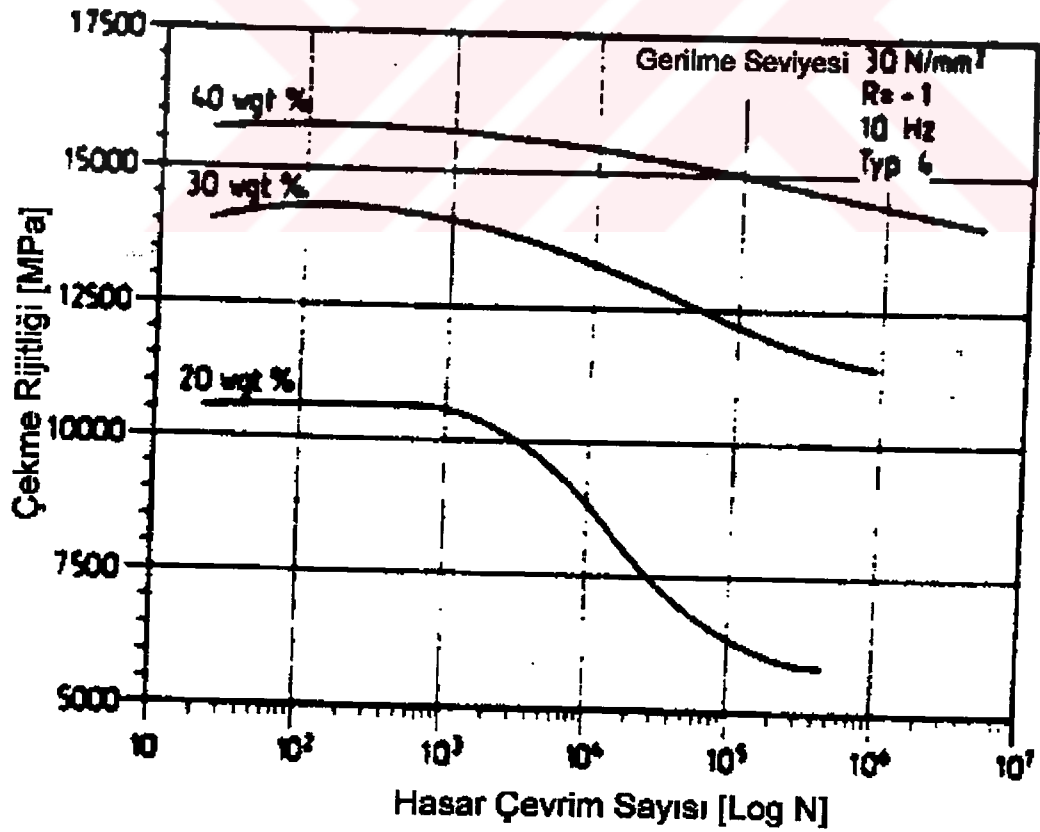
Şekil 5.15 Dolgu oranlarının etkisi [20]

Artan dolgu yüzdesi ile sönümlemedeki hızlı artış şöyle açıklanabilir; ilk olarak düzensiz şekilli çatlak sınırları nedeniyle daha yüksek enerji kaybı, ikinci olarak genellikle belli bir çevrim sayısında daha büyük çatlak alanı. Çatlak sınırlarının SEM incelemeleri sonucu, çekme zorlaması safhasında gittikçe daha küçük parçacıklar çatlak alanına girmekte ve çatlakları sıkıştırmaktadır, böylece açıkça çatlak sınırları arasındaki efektif sürtünme alanı azalmaktadır. Bu durum sönümleme azalmasına rağmen, ortalama şekil değişimi artan dolgu yüzdesi ile veya bir başka deyişle küçük dolgu parçacıkları yardımıyla artmaktadır (Şekil 5.16).

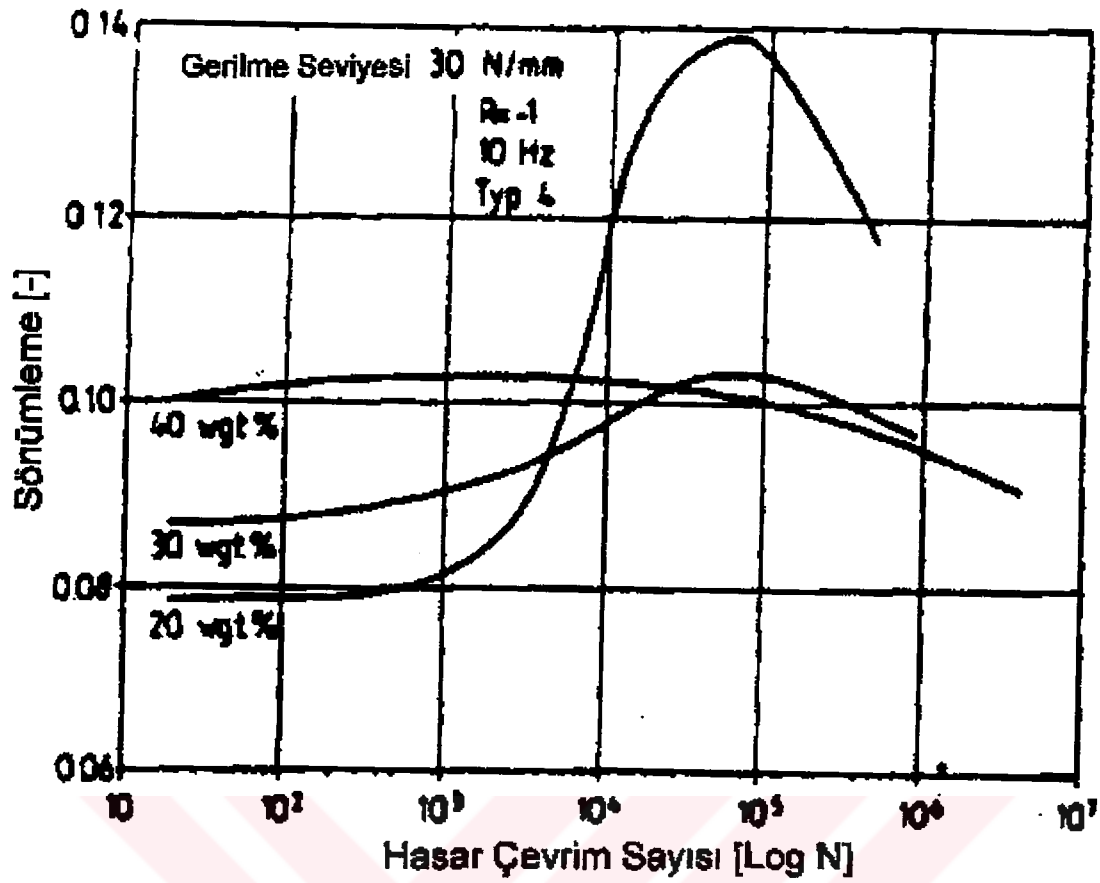
Belli bir cam elyaf yüzdesinde artan dolgu oranı, diz formunun altındaki zorlama seviyelerinde takviyeli LKK'nın rijitlik davranışını iyileştirir. Belli bir reçine/dolgu oranı için, cam elyaf yüzdesinin artması ile diz formunun yükselmesi nedeniyle tüm zorlama seviyelerinde yorulma davranışını iyileştirir (Şekil 5.17). Rijitliğin değişmesine paralel olarak sönümlemedeki artış, zorlama çevriminin bir fonksiyonu olarak malzeme hasarının artışı karakterize etmektedir. Sönümleme prosesindeki maksimum değer artan cam elyaf yüzdesiyle daha az belirgin olmaktadır (Şekil 5.18).



Şekil 5.16 30 MPa gerilme seviyesinde dolgu oranının etkisi [20]



Şekil 5.17 30 MPa gerilme seviyesinde cam elyaf oranının etkisi [20]



Şekil 5.18 30 MPa gerilme seviyesinde cam elyaf oranının etkisi [20]

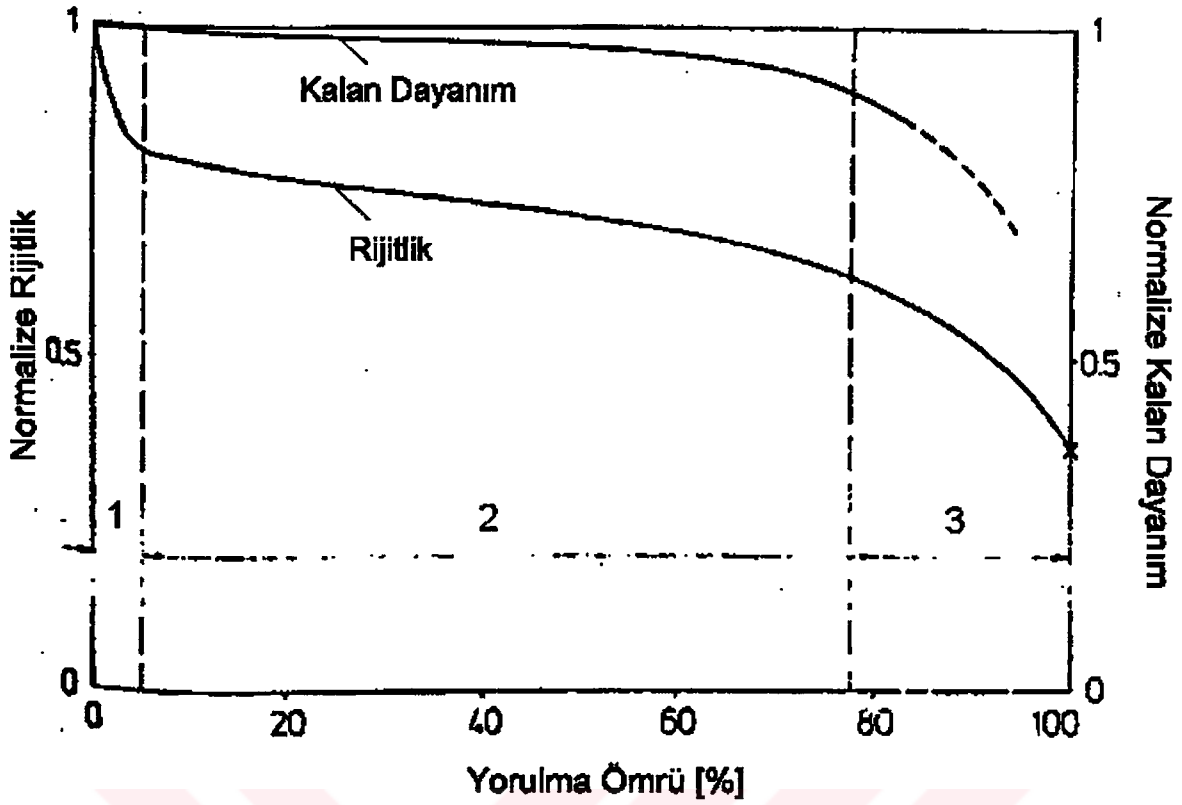
Renz ve arkadaşları [18 ve 19] bahsi geçen çalışmaların sonucunda şu önemli bilgilere ulaşmışlardır:

1. Histerizis ölçüm yöntemi, numunede makroskopik çatlakların oluşumundan önceki hasarı saptamak için kullanılabilir. Teknik uygulamalarda dinamik zorlamalar altında rijitliğin değişimi sıkça incelenmektedir. Malzemenin yorulması, sönümlemenin ölçülmesi ile daha hassas bir şekilde tanımlanabilir.
2. Hasarın ilerlemesi hakkında yorumlar yapmak mümkündür, böylece kabul edilebilir yük seviyelerini tanımlamak da mümkündür.
3. Dinamik zorlamalar altında levha kalıplama karışımları rijitliklerinde yüksek oranda azalma gösterdikleri için, mühendislik yaklaşımı açısından yalnızca hasarın olduğu ömür değil, aynı zamanda rijitlikteki değişim de vurgulanmalıdır.

4. Ölçüm yönteminin yüksek hassasiyeti değişik kompozisyon komponentlerinin (dolgular, takviyeler vb.) etkilerini hızlı bir şekilde değerlendirmeyi ve dolayısıyla malzemeleri geliştirmeyi mümkün kılmaktadır.
5. Yorulma davranışının karakterizasyonu için “malzemenin sönümleme parametresi”nin yanında, çekme ve basmada dinamik elastiklik modülü ve dinamik zorlama altında bir malzemenin sürünme (creep) özelliklerini tanımlayan orta birim şekil değişimi (mid-strain) eksenli özelliklerle uygundur.

Von Bernstorff ve Ehrenstein [21], değişken gerilmelere maruz kalan LKK'nın hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Testlerde kullandıkları LKK, %30 polyester veya vinilester reçine, %30 rastgele yönelmiş 25 mm boyunda cam elyaf ve %40 ince parçacık boyutlu (finely ground) kalsiyum karbonat bileşenlerinden oluşmaktadır.

Yaptıkları literatür çalışmalarının sonucunda da elyaf takviyeli kompozitlerde malzemenin karakteristik bir özelliği olarak, maksimum çatlak yoğunluğunun mevcut olduğu fakat bu durumun yükleme geçmişinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Rijitlik, herbiri farklı hasar mekanizmaları ile karakterize edilen ve yorulma ömrünün üç bölgeye ayrılmasına izin veren üç farklı safhada azalmaktadır (Şekil 5.19). Yorulma ömründe ilk olarak gerçekleşen birinci safhada, rijitlik matriste çok sayıda oluşan yükleme yönüne dik (transverse) çatlakların etkisiyle hızla düşmektedir. Eğrinin ikinci bölgesinde matristeki kırılmaların yanısıra elyaf ayrılmaları da (delamination) meydana gelmektedir ve rijitlikteki azalma önemsizdir. Bu bölümün sonuna doğru çatlak yoğunluğu çok yüksektir ve matrisde daha fazla çatlak oluşmaz. Gerçekte matris çatlakları birleşirler ve çok sayıda çatlakdan büyük tek bir çatlağa geçiş başlar. Yorulma ömrü eğrisinde üçüncü bölge bu tek çatlağın ilerlemesi ve elyaflarda oluşan hasarla birlikte dayanım ve rijitlikteki azalma ve numunenin hasara uğraması ile karakterize edilebilmektedir.



Şekil 5.19 Yorulma testi uygulanmış kompozitin rijitliğindeki azalma ve kalan dayanımı [21]

Rijitlikteki değişim, yorulma zorlaması esnasındaki çok sayıda çatlak oluşumunun bir ölçüsüdür ve mekanik sönümlenme ($\tan \phi$) malzemedeki hasarın bir göstergesidir. Malzeme lineer viskoelastik davranış gösterdiği takdirde ϕ açısı, zorlamalı sinüzoidal kuvvet ve ölçülen deformasyon değeri arasındaki faz farkıdır. Kuvvet ve deformasyon sinyalleri gerilme ve şekil değişimlerine dönüştürülürse, $\hat{\sigma}$ gerilme ve $\hat{\epsilon}$ birim şekil değişimi olmak üzere sürekli fazda aşağıdaki denklemler geçerli olmaktadır.

$$\sigma(t) = \hat{\sigma} \sin \omega t \quad (5.3)$$

$$\epsilon(t) = \hat{\epsilon} \sin(\omega t - \phi) \quad (5.4)$$

Buradan zamanı yok etmek etmek amacıyla sinüzoidal gerilme ve birim şekil değiştirme sinyalleri süperimpoze edildiği takdirde, eliptik bir σ - ϵ histerizis çevrimi elde edilir.

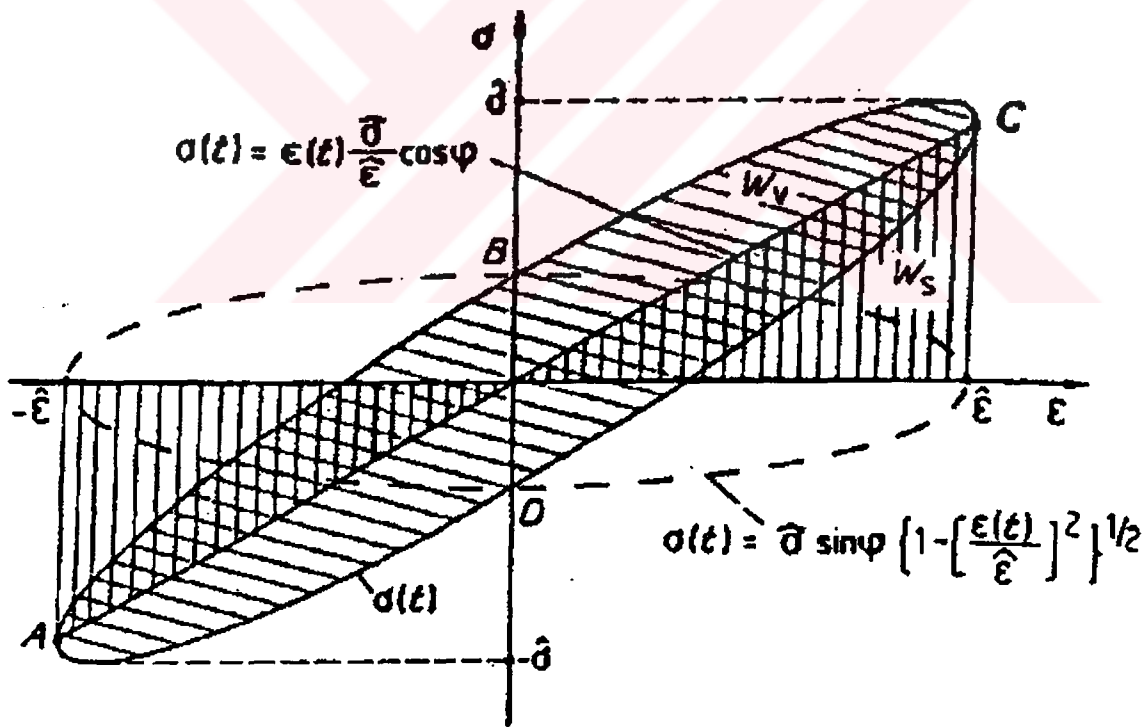
$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \cos \phi + \hat{\sigma} \sin \phi \left\{ 1 - \left[\frac{\varepsilon(t)}{\hat{\varepsilon}} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (5.5)$$

$$\hat{\sigma} \sin \phi \left\{ 1 - \left[\frac{\varepsilon(t)}{\hat{\varepsilon}} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (5.6)$$

$$\geq 0; A \leq \varepsilon(t) \leq C \text{ için}$$

$$\leq 0; C \leq \varepsilon(t) \leq A \text{ için}$$

Eğer (5.6) denklemi $\varepsilon(t) = \hat{\varepsilon} \sin(\omega t - \phi)$ için pozitif ise, (5.5) numaralı denklemde verilen iki terimin toplamı gerilme-şekil değiştirme histerizis çevriminin üst kısmını (ABC) verir (Şekil 5.20). Benzer şekilde, eşitlik negatıfse, alt kısım (CDA) kısım elde edilir. Böylece, (5.5) numaralı eşitliğin ilk terimiyle temsil edilen doğru, gerilme-şekil değiştirme histerizis çevrimini ikiye ayırır ve histerizis çevriminde malzeme rijitliğinin bir ölçüsü olarak eğimi gösteren ve merkezden geçen bir eğri olarak ifade edilir.



Şekil 5.20 Lineer viskoelastik malzemenin gerilme-birim şekil değişimi histerizis çevrimi [21]

Mekanik sönümlleme, lineer viskoelastik bir malzemede gittikçe azalarak sıfıra yaklaşır. Bu takdirde gerilme-şekil değıştirme histerizis çevrimi, üst ve alt bölgeler merkezdeki eğriyle uyum sağlayacak şekilde gittikçe daha ince olmaya başlamaktadır. AC merkez eğrisi lineer viskoelastik bir malzemede (5.5) numaralı denklemin sınır durumunda, gerilme-şekil değıştirme eğrisi olarak elde edilir.

$$\lim_{\phi \rightarrow 0} \sigma(t) = \varepsilon(t) \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \quad (5.7)$$

Böylece merkezden geçen doğrunun altında kalan dikine taralı alan malzeme değışken gerilme altındayken hacimsel olarak depolanan enerjinin (W_s) bir ölçüsüdür.

$$W_s = \int_{-\hat{\varepsilon}}^{\hat{\varepsilon}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \cos \phi \int_{-\hat{\varepsilon}}^{\hat{\varepsilon}} d\varepsilon = \hat{\sigma} \hat{\varepsilon} \cos \phi \quad (5.8)$$

Bir bütün yükleme çevrimi boyunca birim hacim başına harcanan enerji, diğler bir deyişle kayıp enerji (W_L) histerizis çevrimi tarafından çevrelenen alanın integre edilmesi ile elde edilir.

$$W_L = \oint \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \pi \hat{\sigma} \hat{\varepsilon} \sin \phi \quad (5.9)$$

Mekanik sönümlleme kayıp enerji'nin (W_L) depolanan enerji'ye (W_s) oranlanması ile elde edilmektedir.

$$W_L/W_s = \frac{\pi \hat{\sigma} \hat{\varepsilon} \sin \phi}{\hat{\sigma} \hat{\varepsilon} \cos \phi} = \pi \tan \phi \quad (5.10)$$

Lineer olmayan viskoelastik malzemelerin dinamik karakteristikleri, herbir şekil değıştirme değeri için histerizis eğrisini ikiye bölen bir merkez eğrinin tanımlandığı ve eliptik olmayan histerizis çevriminden de çıkartılabilir. Bu takdirde merkez doğrunun altında kalan alan depolanan enerji'ye (W_s) ve histerizis çevrimi tarafından çevrelenen alan kayıp enerji'ye (W_L) karşılık gelmektedir. W_L/W_s oranı ise yine mekanik sönümllemenin bir tanımıdır.

Orth ve Ehrenstein [22], cam elyaf takviyeli doymamış polyester levha ve jogging spor ayakkabısı taban malzemesi çalışmaları için yine histerizis ölçüm metodunu kullanmışlardır. Histerizis ölçümü yöntemini, bir malzeme veya bir komponentin dinamik davranışları hakkında çok kısa sürede maksimum bilgiyi alabilmek için

kullandıklarını belirtmektedirler. Böyle bir çalışma için iki tip test yöntemi kullanılabilir; artan zorlama testi ve dinamik yorulma testi. Artan zorlama testinde, malzeme yük kaldırıldığı takdirde, herhangi bir hasarın görülmeyeceği zorlama seviyelerine sırasıyla maruz bırakılmaktadır. Bu test yöntemi malzemenin dinamik karakteristiklerinin gerilme bağımlılığının hızlı bir şekilde tespit edilmesi için elverişlidir. Buna karşın, dinamik yorulma testinde karakteristiklerin zamana bağlı değişimleri kaydedilir.

Bir malzemenin sönümlenmesi (mekanik enerji kaybı), şekil değiştirmesi ve gerilmesi arasında faz farkına neden olur. Bu iki sinyal bir histerizis diyagramı oluşturacak şekilde süperpoze edilirse dört farklı karakteristik değer elde edilir: gerilmeler, şekil değiştirmeler, elastik modüller ve mekanik kayıplar. Maksimum gerilme, minimum gerilme ve şekil değiştirme değerleri doğrudan diyagramdan okunabilir (Şekil 5.21). ϵ_u 'dan ϵ_o 'ya kadar olan gerilme eğrisinin üst kısmı $\sigma_{ok}(\epsilon)$ ve alt kısmı $\sigma_{uk}(\epsilon)$ olarak adlandırılabilir. Ortalama eğri σ_{mk} bu iki değerden çıkartılabilir:

$$\sigma_{mk}(\epsilon) = \frac{\sigma_{ok}(\epsilon) + \sigma_{uk}(\epsilon)}{2} \quad (5.11)$$

Gerilme değerlerinin ortalaması şu şekildedir:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2} \quad (5.12)$$

Bu nokta relatif koordinat sisteminin başlangıç noktasını tanımlar. Bu noktadaki uzama, yük altında malzemenin sürünme (creep) miktarının bir ölçüsü olarak kabul edilen ortalama uzamadır (ϵ_m).

Zorlama sırasında test numunesinin aldığı enerji, yükün boşalması sırasında tamamen geri kazanılamaz. Bu fark enerji kaybıdır (W_v) ve eğri tarafından çevrelenen alana karşılık gelmektedir (Şekil 5.22-sol).

$$W_v = \frac{1}{2} \left(\oint \sigma \cdot d\epsilon - \oint \sigma \cdot d\sigma \right) \quad (5.13)$$

Depolanan enerji ise ortalama eğri ile ortalama gerilme arasında kalan alandan elde edilir (Şekil 5.22-sağ).

$$W_s = \int \sigma_{mk} \cdot d\varepsilon \quad (5.14)$$

Relatif koordinat sistemi yardımıyla toplam enerji üst ve alt enerjiler olarak ayrılabilir. Kayıp enerjinin depolanan enerjiye oranı ilgili sönümlleme (Λ) değerini vermektedir.

$$\Lambda_u = \frac{W_{vu}}{W_{su}} \quad (5.15)$$

$$\Lambda_o = \frac{W_{vo}}{W_{so}} \quad (5.16)$$

$$\Lambda_g = \frac{W_{vg}}{W_{sg}} \quad (5.17)$$

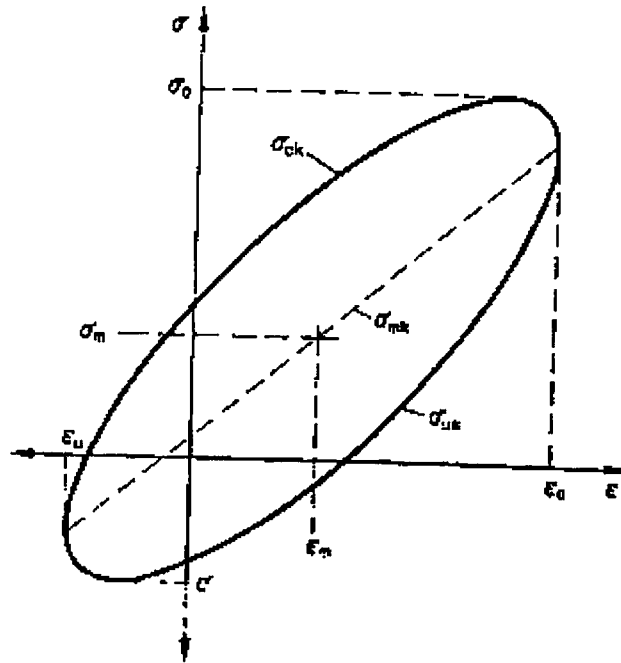
Eğer malzeme lineer viskoelastik ise uzama ve gerilme arasında bir faz farkı olacaktır ve histerizis diyagramı elips formunu alır. 5.13-5.17 denklemleri analitik olarak çözülebilir;

$$W_v = \pi \cdot \hat{\sigma} \cdot \hat{\varepsilon} \cdot \sin \delta \quad (5.18)$$

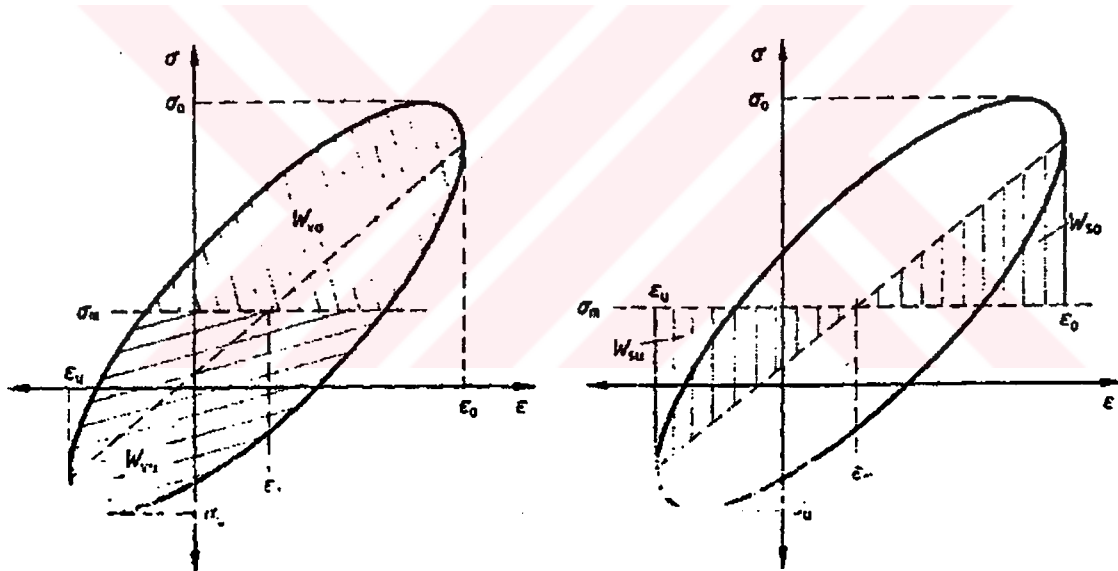
$$W_s = \hat{\sigma} \cdot \hat{\varepsilon} \cdot \cos \delta \quad (5.19)$$

$$\Lambda = W_v / W_s = \pi \cdot \tan \delta \quad (5.20)$$

Burada $\hat{\sigma}$ ve $\hat{\varepsilon}$ sırasıyla gerilme ve şekil değiştirme genlikleridir. 5.18 - 5.20 numaralı eşitliklerde enerjiler ve sönümlleme açısal fonksiyonlardır. Diğer taraftan 5.13 ve 5.14 denklemlerine göre enerjilerin tanımları, hem lineer viskoelastik malzemeler hem de lineer olmayan viskoelastik malzemeler için geçerlidir. Sönümlleme boyutsuzdur ayrıca, gerilme ve şekil değiştirmeden bağımsızdır.



Şekil 5.21 Bir histerizis çevrimindeki gerilme ve uzama değerlerinin tanımı [22]



Şekil 5.22 Bir histerizis çevrimindeki mekanik enerji komponentlerinin tanımı; soldaki grafik enerji kaybını, sağdaki grafik depolanan enerjiyi göstermektedir [22]

Yük bağımlı rijitlikler ortalama eğri yardımıyla tanımlanabilir (Şekil 5.23). Minimum yükte basma rijitliği diyagramının alt ucundan çıkar, benzer şekilde ortalama ve maksimum yükler için σ_m ve σ_o noktalarında ortalama ve maksimum çekme rijitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$E_u = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) \bigg|_{\sigma=\sigma_u} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \tan \alpha_u \quad (5.21)$$

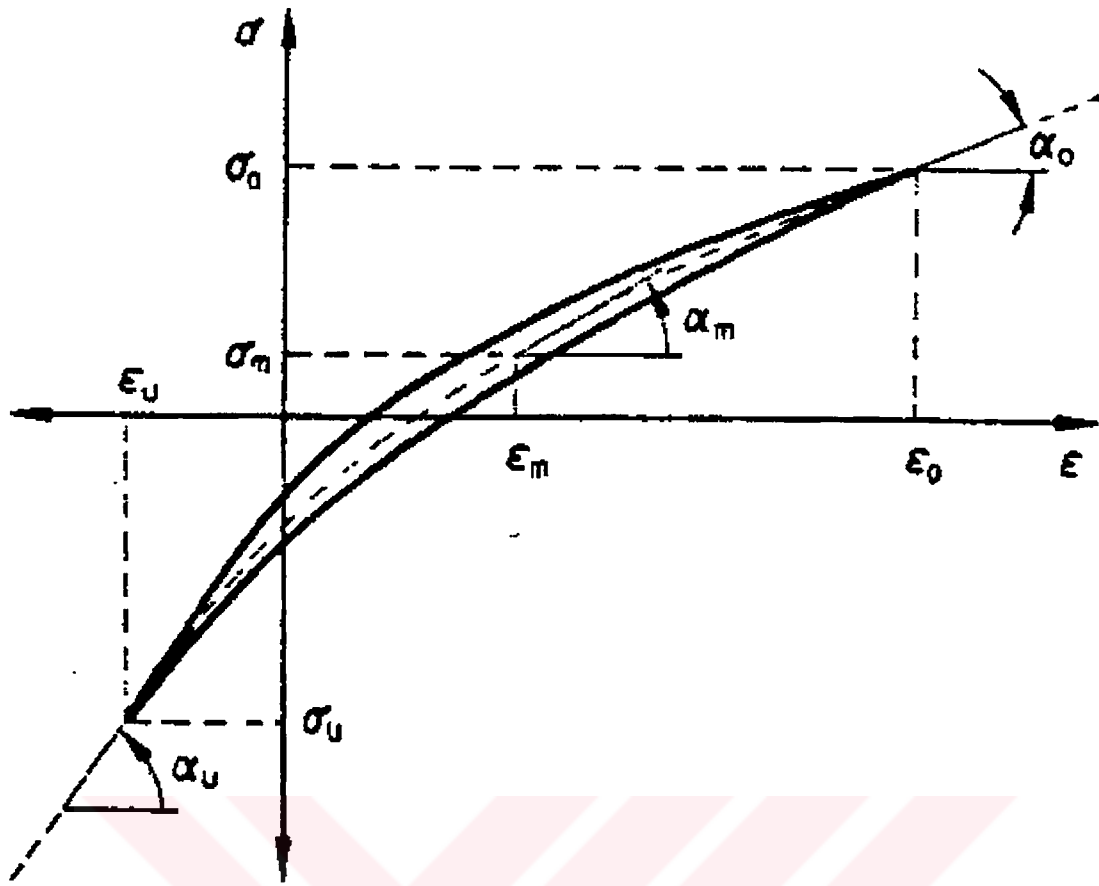
$$E_m = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) \bigg|_{\sigma=\sigma_m} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \tan \alpha_m \quad (5.22)$$

$$E_o = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) \bigg|_{\sigma=\sigma_o} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \tan \alpha_o \quad (5.23)$$

Dinamik sekant modül E_{dyn} , maksimum ve minimum gerilme ve birim şekil değiştirmelerden elde edilmektedir:

$$E_{dyn} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad (5.24)$$

Bu çalışmada önce ağırlıkça %60 örülmüş cam elyaf takviyeli doymamış polyester levha kullanmışlardır. Testler 10 Hz frekansta ve $R = -1$ yük oranında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yük kontrollü yaptıkları test sırasında 60 MPa ile 100 MPa arasında 10 MPa'lık gerilme artışları uygulamışlardır. Daha sonra üç değişik tip yumuşak poliüretan köpük sistemi test etmişlerdir. Bu çalışmalarında uygun malzeme kompozisyonunun tespiti için histerizis ölçüm yöntemini kullanmışlardır. Artan zorlama testi hasarın gelişiminin hızla kaydedilmesine olanak sağlamaktadır. Yaklaşık bir saat kadar süren bir artan gerilme testinde, malzeme karakteristiğindeki değişimler ve iç hasarların gelişimi kolaylıkla tespit edilebilir.



Şekil 5.23 Bir histerizis çevrimindeki rijitliklerin tanımı [22]

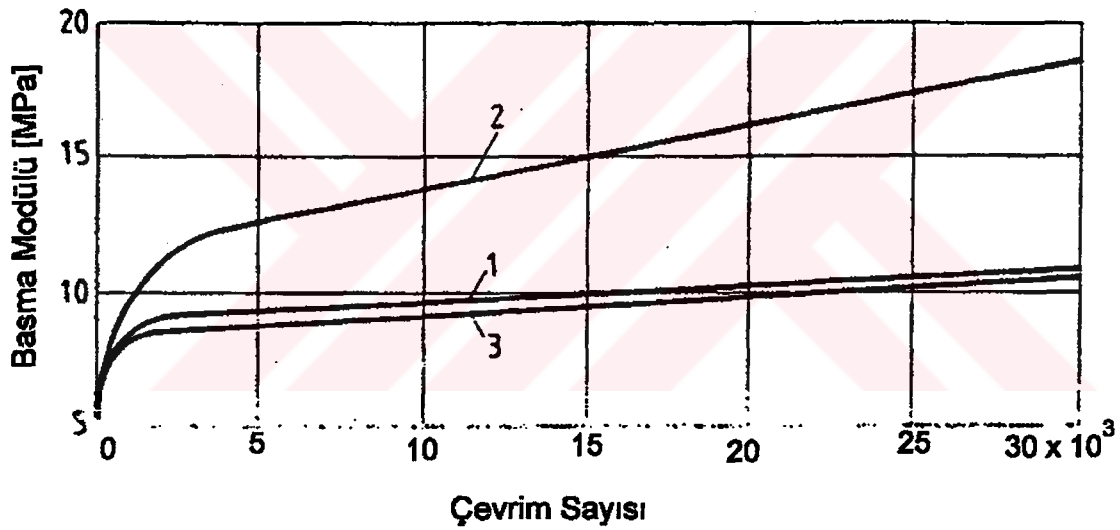
Jogging ayakkabılarının taban malzemelerinin kullanım şartları oldukça zorludur. İlk olarak malzeme kullanıcının eklemlerine mümkün olan en az yükü uygulayacak şekilde yumuşak olmalıdır. Diğer kullanım şartına göre ise, malzeme koşu sırasında harcanan enerjiyi minimum yapmak için, yük boşaltıldıktan sonra depoladığı enerjinin olabildiğince yüksek bir yüzdesini geri verebilmelidir. Malzemenin karakteristik değerleri yaşlanma (ageing) nedeniyle zamanla değişecektir. Ayakkabıların olabildiğince uzun kullanılabilmesi için, taban malzemelerinin seçiminde üçüncü bir kriter olarak karakteristik değerlerin zamanla değişmemesi gerekmektedir.

İlk gereksinim olan malzeme yumuşaklığı için kullanılan fiziksel karakteristik basma modülüdür. Eğer modül düşükse eklemlere gelen yük az olur. Sönümlleme katsayısı taban tarafından geri verilmeyen mekanik enerji yüzdesini belirtir. Bu değer enerji kaybının depolanan enerjiye oranıdır ve koşu sırasında ayakkabıdaki enerji kaybının bir ölçüsüdür.

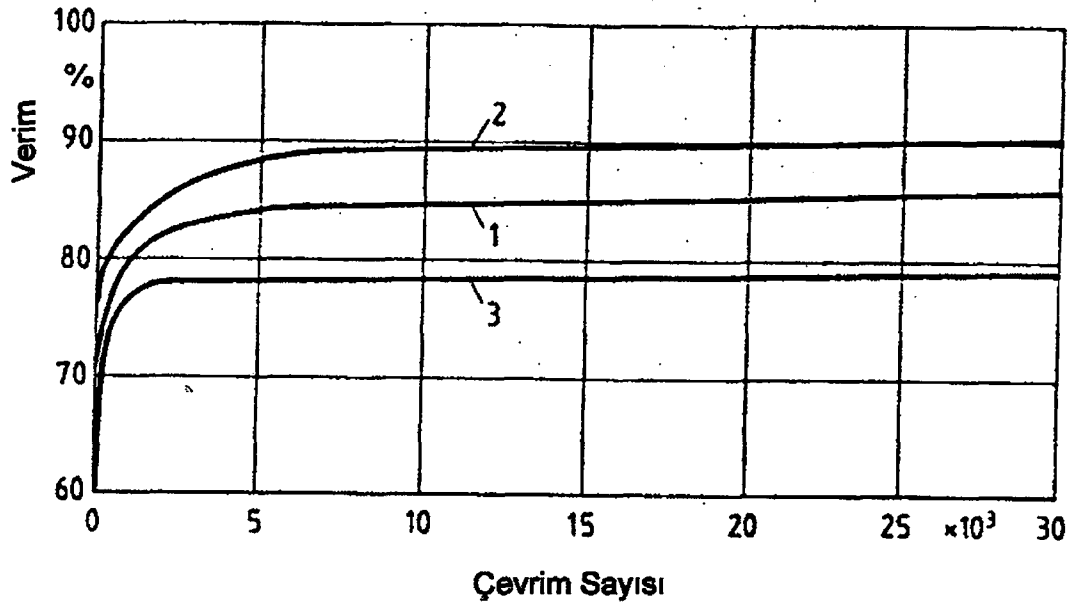
Verimlilik μ , sönümlemeden hesaplanabilir ve geri kazanılan (depolanan) enerjinin toplam enerjiye oranıdır.

$$\mu = \frac{W_s}{W_v + W_s} = \frac{1}{\Lambda + 1} \quad (5.25)$$

Koşu sırasında malzeme çevrimsel yüklemeye maruz kalır. Ayak yere bastığı zaman taban sıkışır. Basma yükü sıfırdan belli bir maksimum değere yükselir. Bundan sonra ayak kalkar ve taban üzerindeki yük ayak bir daha aşağı ininceye kadar boşalır. Herbiri jogging ayakkabı tabanlarında kullanılan üç farklı yumuşak poliüretan köpük sistemi test edilmiştir. Tüm numuneler ilk 1.000 test çevrimi içerisinde yüksek şekilde hasara uğramış ve daha sonra hasar zamanla yaklaşık lineer değişecek şekilde ilerlemiştir (Şekil 5.24 ve Şekil 5.25).

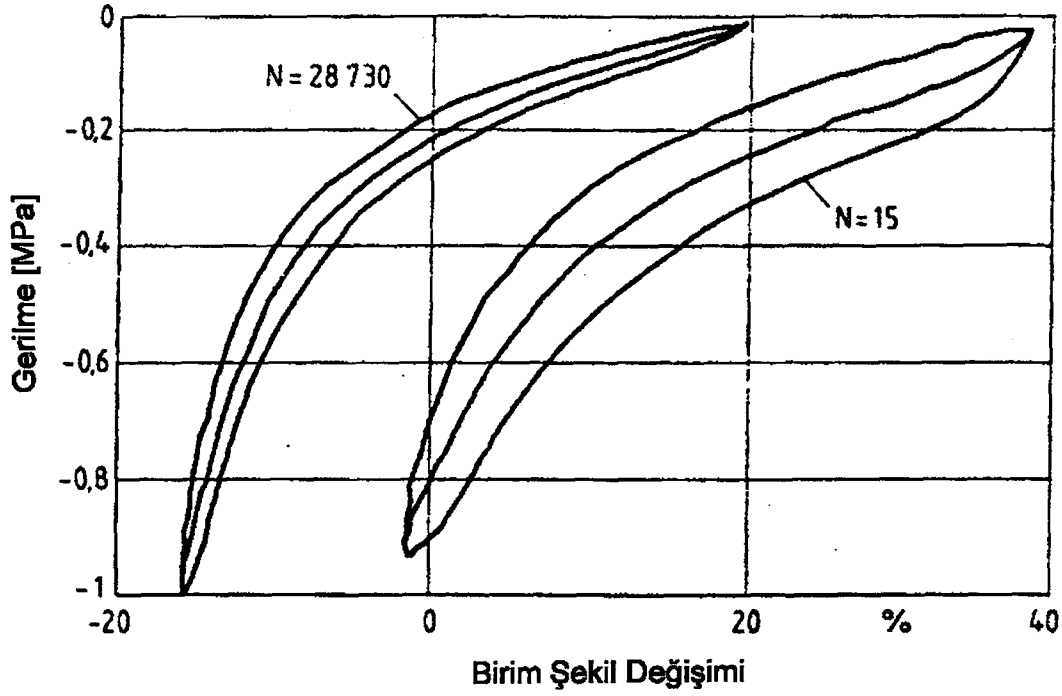


Şekil 5.24 Üç farklı poliüretan köpük malzemenin basma modülleri [22]



Şekil 5.25 Üç farklı poliüretan köpük malzemenin verimlilikleri [22]

Enerji kaybı diğer bir deyişle eğriler tarafından çevrelenen alan artan çevrim sayısı ile azalmaktadır (Şekil 5.26). Histerizis eğrisinin üst ve alt gradyanları artan yükleme zamanı ile değişmektedir. Bu nitelik bilgileri, malzemenin karakteristik değerlerinin eğilimi cinsinden ölçülebilir. Düşük eğim, ayak yere bastığında en yüksek basma yükü bölgesindeki kuvvet/uzama davranışını temsil eder (Şekil 5.24). Başlangıçta üç numuneninde elastik modülleri hızla artmaktadır, daha sonra farklılıklar ortaya çıkmaktadır. 1 ve 3 numaralı numuneler düşük hızla artış göstermektedir. 2 numaralı numunenin modülü, test sonuna doğru ilk birkaç çevrimden sonra ulaştığı değerini hemen hemen iki katına erişmektedir. Üç malzemeninde verimliliği hızla artan bir başlangıç değerinden sonra sabit kalmaktadır (Şekil 5.25).



Şekil 5.26 3 numaralı poliüretan köpük malzemenin 15 ve 28.730'uncu çevrimlerdeki histerizis eğrileri [22]

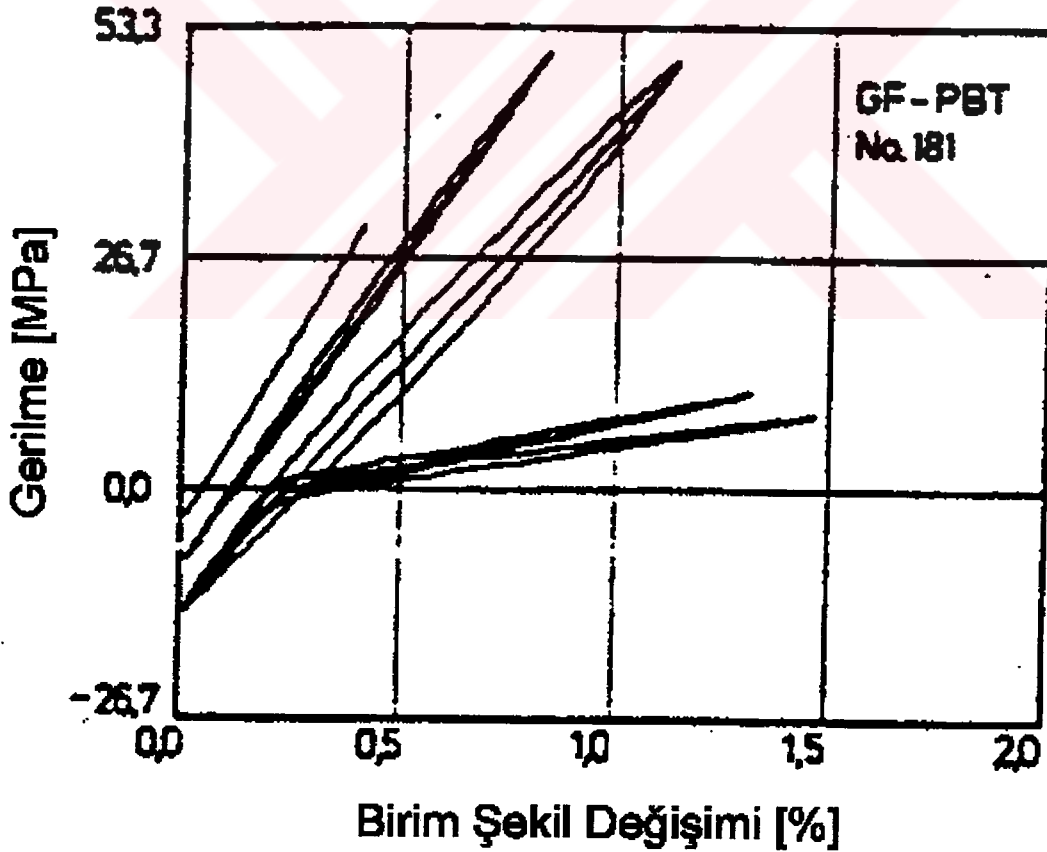
Janzen ve Ehrenstein [23], kısa cam elyaf takviyeli termoplastik polyester (PBT) malzemenin sönümleme davranışını incelemek amacıyla histerizis ölçüm yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında ağırlıkça %15, %30 ve %45 oranlarında cam elyaf yüzdelere sahip PBT'ler kullanmışlardır. Çevrimsel basamaklı şekil değiştirme ve gerilme artışı test metodu kullanmışlardır. Dinamik testler sırasında histeritik ısınmayı önlemek amacıyla testler 1 Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. Gerilme testinde gerilme oranı $R=0,01$, şekil değişimi testinde ise şekil değiştirme oranı $\epsilon_{maks}/\epsilon_{min}=0,01$ olarak tespit edilmiştir.

Histerizis eğrisi düşük şekil değiştirme seviyelerinde, örnek olarak ilk çevrimde dardır, dolayısıyla harcanan enerji ve sönümleme düşüktür (Şekil 5.27). Bu durum numunede hiç hasar oluşmadığını göstermektedir. Histerizis eğrisi yüksek şekil değiştirme seviyelerinde, örnek olarak ikinci ve üçüncü çevrimlerde genişlemektedir, bu durum kayıp enerjinin artışı ve malzeme hasarlarının başladığını ifade etmektedir (Şekil 5.27). Orta eksen eğrisinin eğimi diğer bir deyişle dinamik modül azalırken, histerizis çevrimleri basma yüklerine doğru kaymaktadır. Histerizis eğrisi çok yüksek şekil değiştirme seviyelerinde, örnek olarak bükülmüş dördüncü ve beşinci çevrimlerde, hasar ve kırılma oluşmaktadır (Şekil 5.27). Numune yüksek

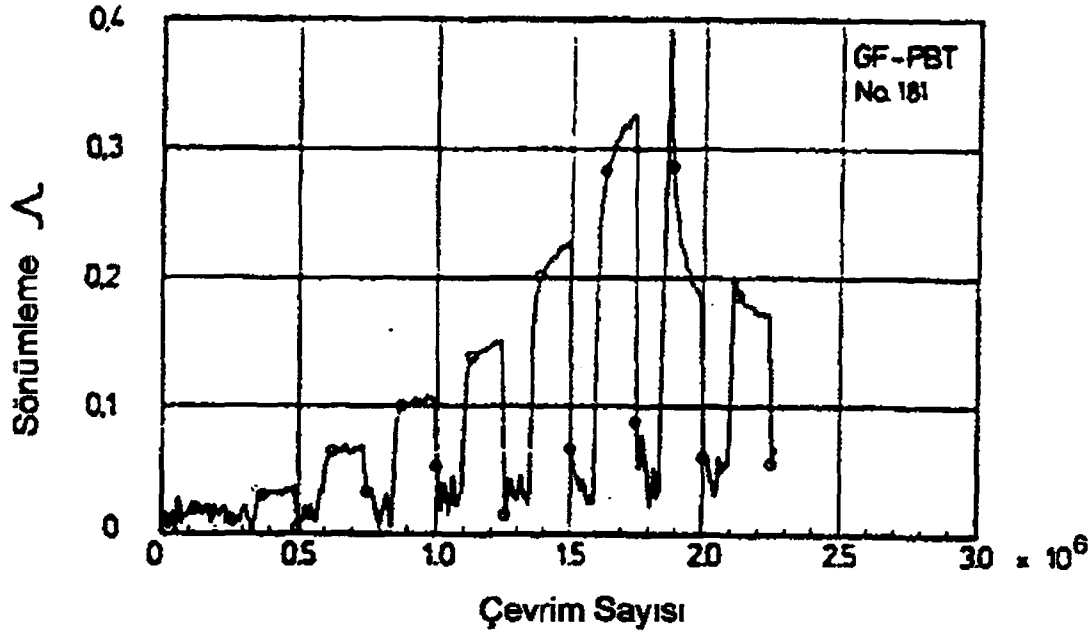
çekme yüklerini taşıyamamaktadır. Bu hasar tipinde çekmedeki dinamik modül azalmaktadır. Basma yükü altında çatlaklar kapanmakta ve numune tekrar yük taşıır hale gelmektedir. Basmadaki dinamik modül sürekli olarak yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Sönümlenme başlarda çevrimsel şekil değişimi ile sabittir (Şekil 5.28). Daha sonra sabit yük seviyelerinde çevrimsel yorulma ile artmaktadır ve artan şekil değiştirme seviyelerinde orantısız olarak artmaktadır.

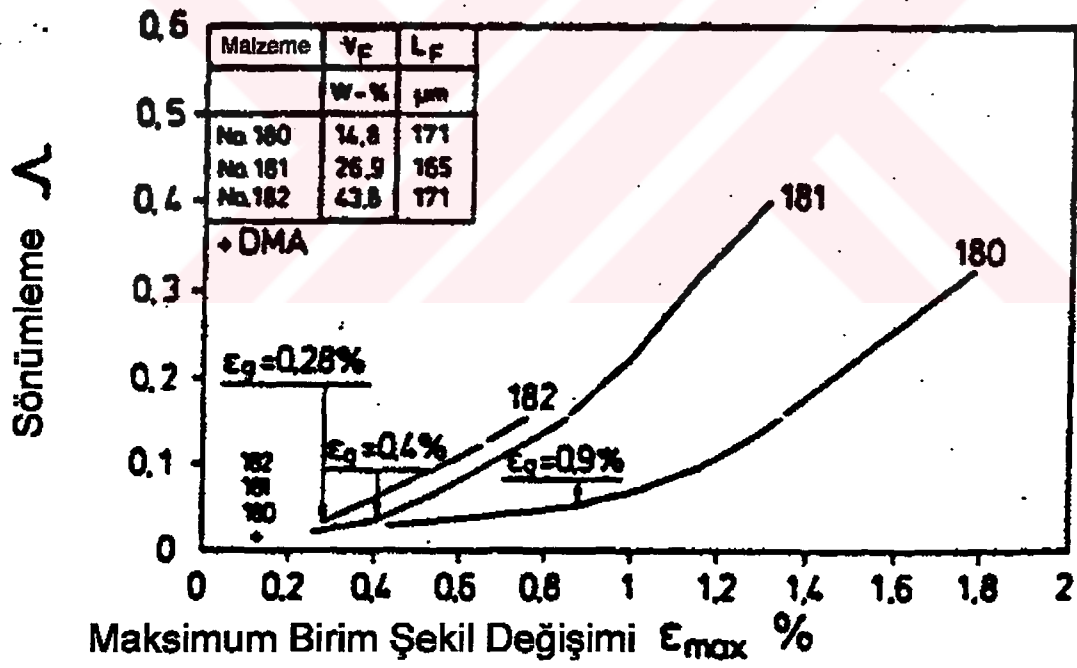
Düşük şekil değiştirme seviyelerinde, DMA (dynamic mechanical analyser) sönümlenmeyi farklı fakat sınırlar içinde ölçmektedir (Şekil 5.29). Daha yüksek şekil değiştirme seviyelerinde GF-PBT malzemenin histerizis ölçümlerinin sönümlenmesi eklenmektedir. Düşük şekil değiştirme seviyelerinde şekil değiştirme eğrilerine karşılık gelen sönümlenme, orantısız artışın görüldüğü noktaya erişilene kadar lineer olarak artmaktadır.



Şekil 5.27 Kademeli şekil değiştirme artışı deneyinin histerizis eğrileri [23]



Şekil 5.28 Kademeli şekil değişimi artışı deneyinin sönümlemesi [23]

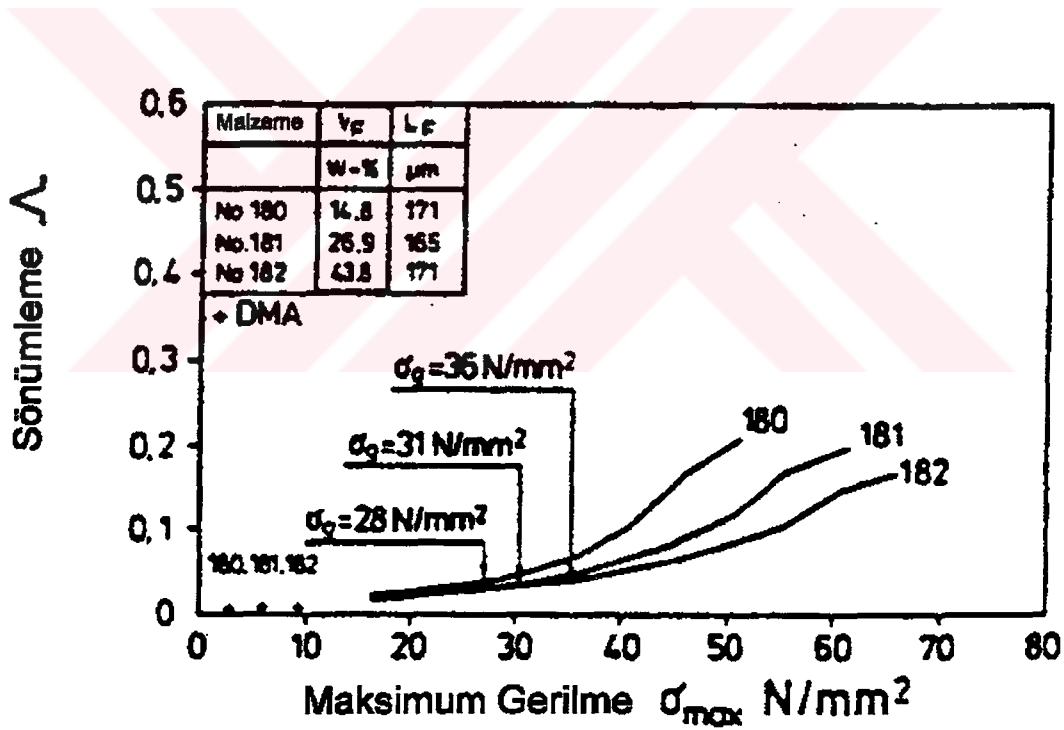


Şekil 5.29 Kademeli şekil değişimi artışı deneylerinin sönümleme-birim şekil değişimi eğrileri [23]

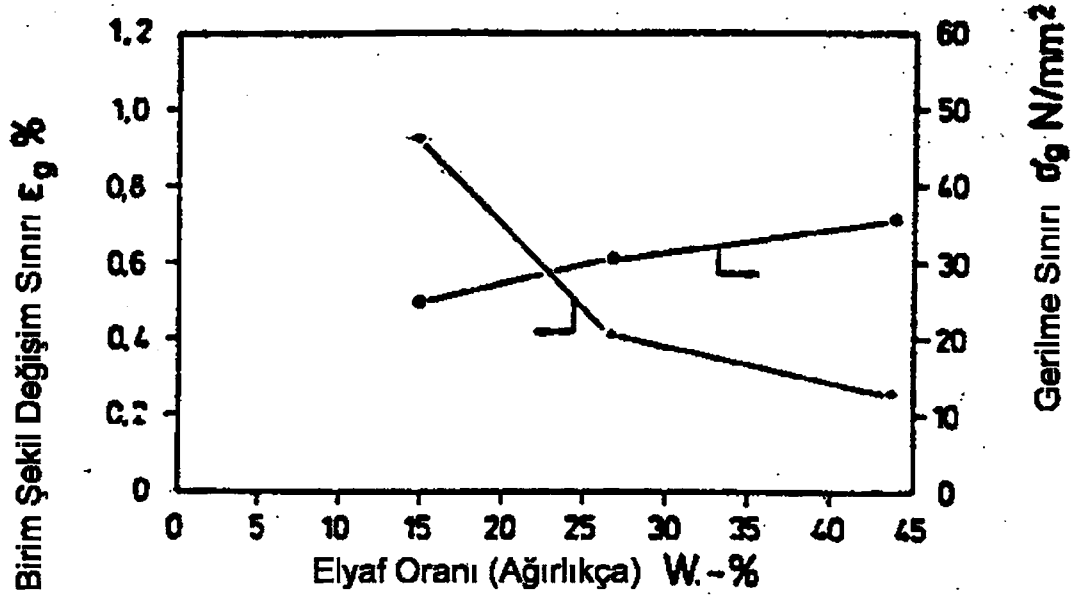
Düşük gerilme seviyelerinde sönümleme lineer olarak artmaktadır (Şekil 5.30). Daha yüksek gerilme seviyelerinde sönümleme orantısız olarak artmaktadır. Gerilme limiti

artan elyaf oranıyla yavaşça artarken, şekil değiştirme limiti önemli bir şekilde azalmaktadır (Şekil 5.31).

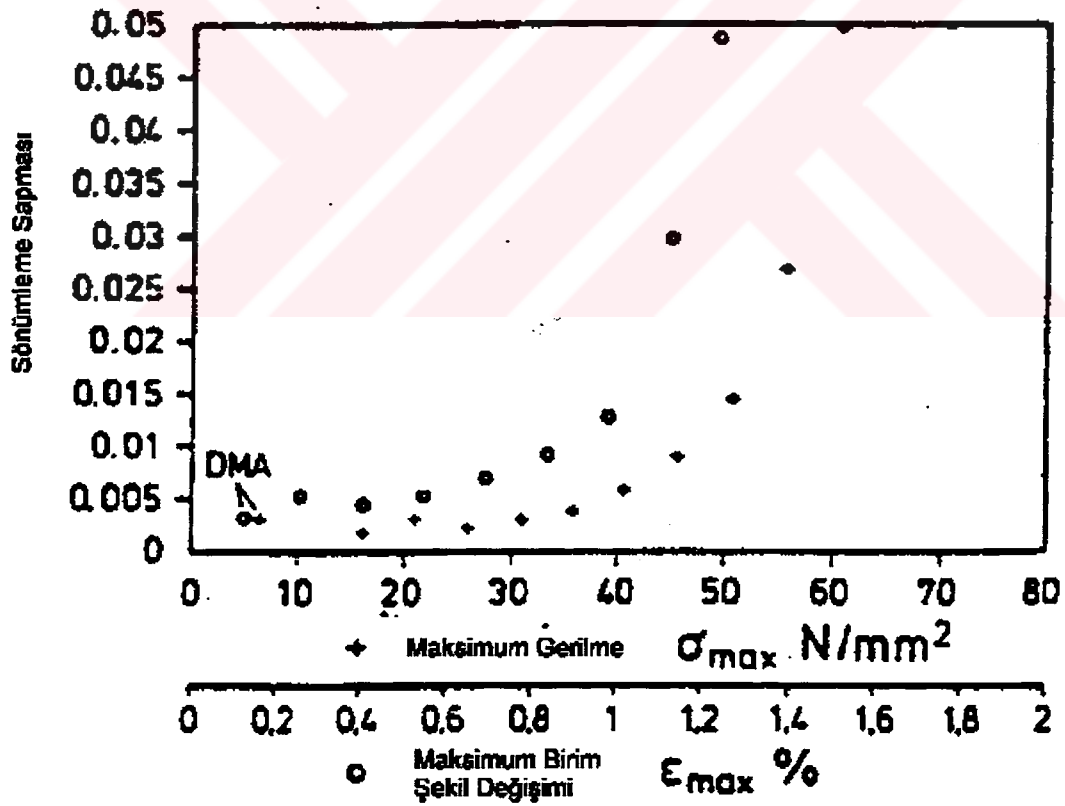
Gerilme kontrollü deneylerde düşük gerilme seviyelerinde sönümlemedeki sapma 0,0035 ve şekil değiştirme kontrollü deneylerde düşük şekil değiştirme seviyelerinde sönümlemedeki sapma 0,005'dir (Şekil 5.32). Yüksek zorlamalarda sönümlemenin gerilme ve şekil değiştirme sapmaları yüksek değerlere çıkmaktadır. Standart sapmalardaki ani artış noktaları 33 N/mm² gerilme ve %0,6 şekil değiştirmedir. Bu değerler tek bir numune ile gerçekleştirilen kademeli gerilme ve şekil değiştirme artış deneyleri yardımıyla tespit edilen çevrimsel gerilme ve şekil değiştirme hassasiyet limitlerine karşılık gelmektedir. Düşük sönümleme/düşük yük sapması bir malzeme karakteristiği olan viskoelastik sönümleme davranışı ile açıklanabilir. Hassasiyet limitinin üzerinde hasar ve kırılma sönümleme mekanizmaları eklenmektedir. Yüksek sönümleme/yüksek yük değişimine numunelerdeki tekil hasar prosesleri sebep olmuştur.



Şekil 5.30 Kademeli şekil değişimi artışı deneylerinin sönümleme-gerilme eğrileri [23]



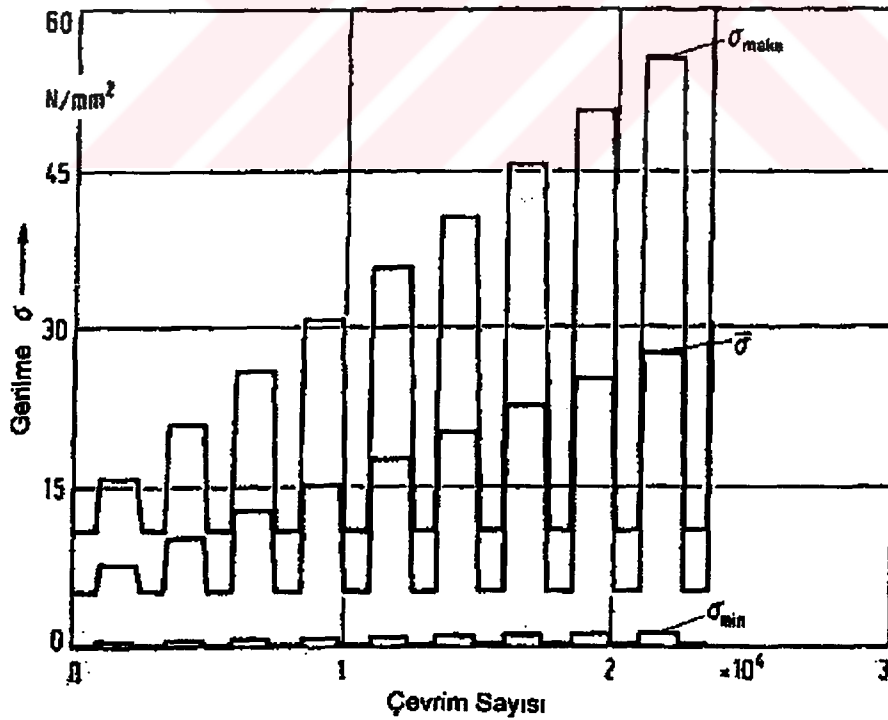
Şekil 5.31 Elyaf yüzdesinin birim şekil değişimi ve gerilme sınırlarına etkisi [23]



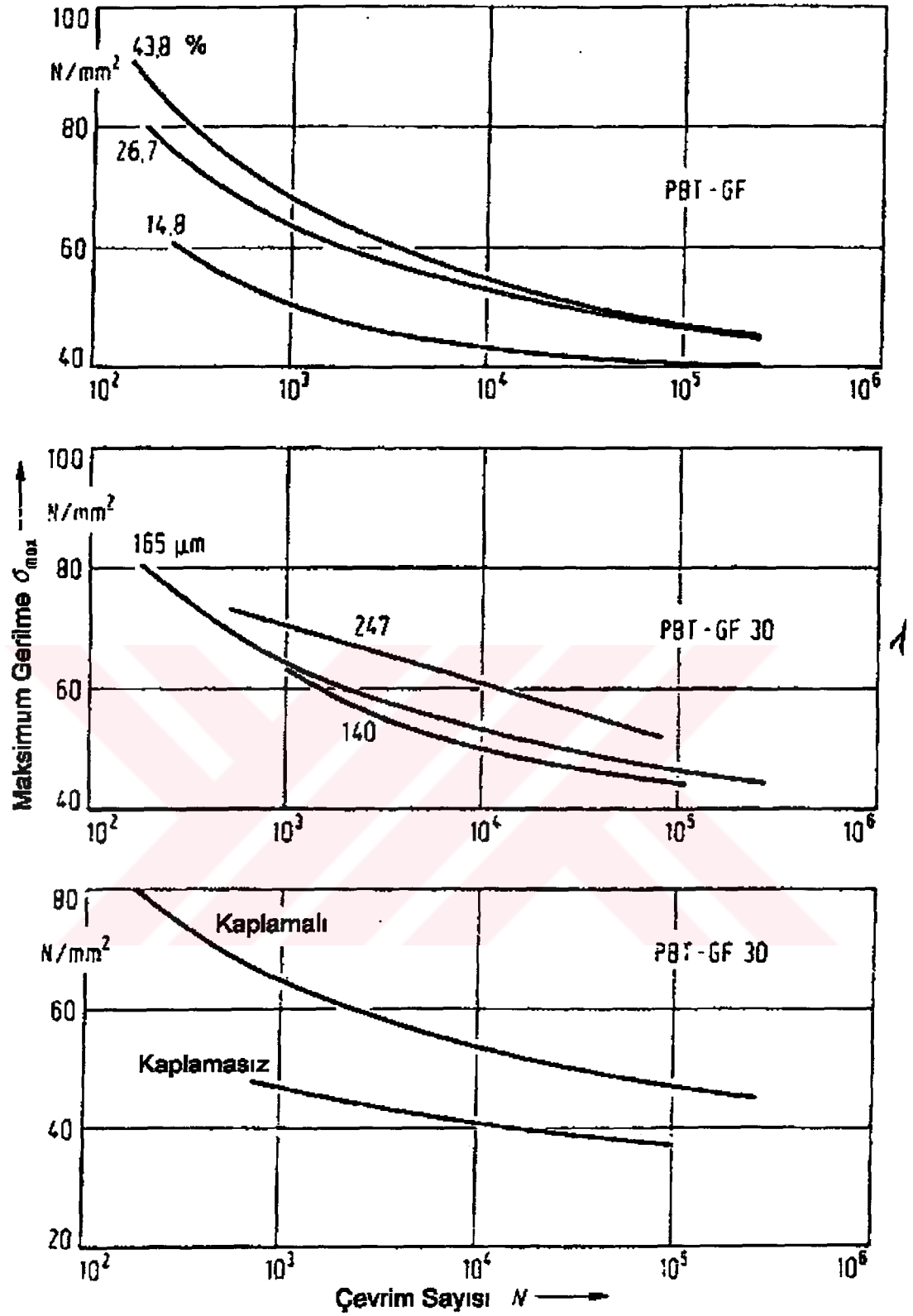
Şekil 5.32 Kademeli şekil değişimi ve gerilme artışı deneylerinin sönümlemesinin standart dağılımı [23]

Janzen ve Ehrenstein [24], yine bir başka çalışmalarında matris olarak kısmi kristalin termoplastik polyester (PBT) ve takviye malzemesi olarak yüzey işlemlili ve işlemsiz E-cam elyafı kullanmışlardır. Enjeksiyon ile 150 mm x 150 mm x 4 mm boyutlarında plakalar kalıplamışlardır. Mekanik testlerde numunelerin dış yüzey tabakalarındaki elyaf yönlerinin yükleme doğrultusu ile çakışması için numuneler enjeksiyon yönünde çıkarılmışlardır. En önemli ve en hassas karakteristik değer olan mekanik sönümlleme, histerizis çevriminden elde edilmektedir. Mekanik sönümlleme kayıp işin depolanan işe oranı olarak tanımlanmaktadır. Gerilme limitlerini tanımlarken, gerilme ve şekil değıştirmelerde kademeli artış sistemi ile gerilme artış testi gerçekleştirilir. Test frekansı 1 Hz olarak seçilmiştir (Şekil 5.33). Şekil değıştirme artış testi de aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.

Elyaf oranı ve elyaf uzunluğundaki artış ve uygun yüzey işlemli kullanılması, daha yüksek yorulma dayanımı değeri vermektedir (Şekil 5.34). Elyaf-matris bağlanması arttığı için, yüzey işlemlili elyaflar daha yüksek yorulma dayanımı değeri vermektedirler. Kırık yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde elyaflara yapışmış matris kalıntıları görülmektedir oysa, yüzey işlemsiz elyaflarda daha düşük elyaf-matris yapışması nedeniyle matris kalıntıları görülmemektedir.

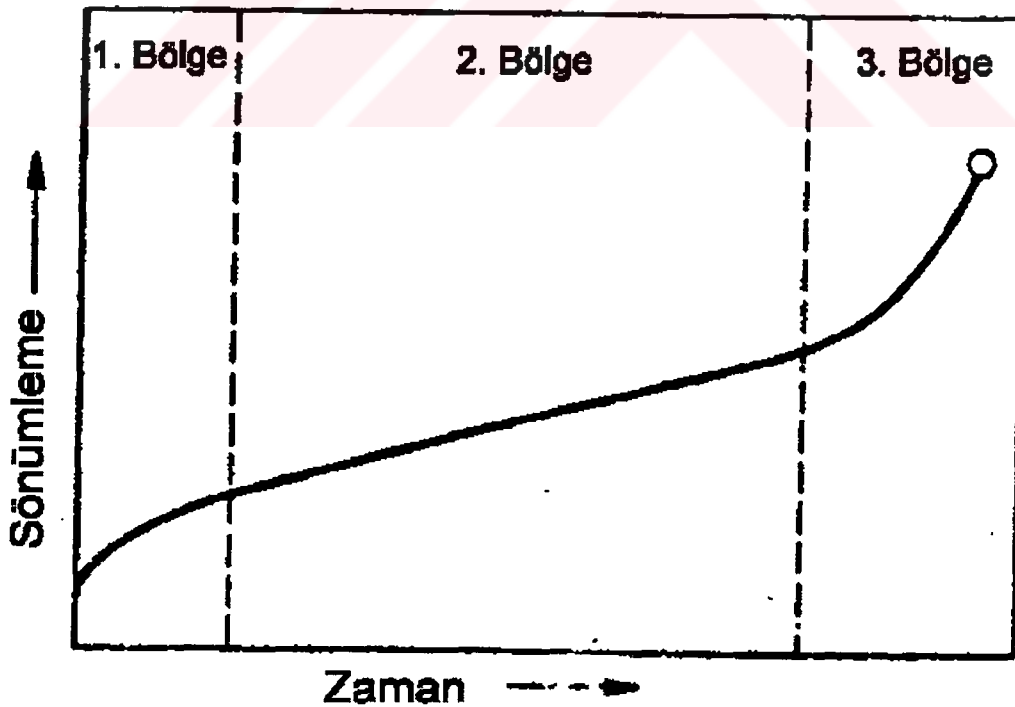


Şekil 5.33 Gerilme artış testlerinin yükleme şekli [24]

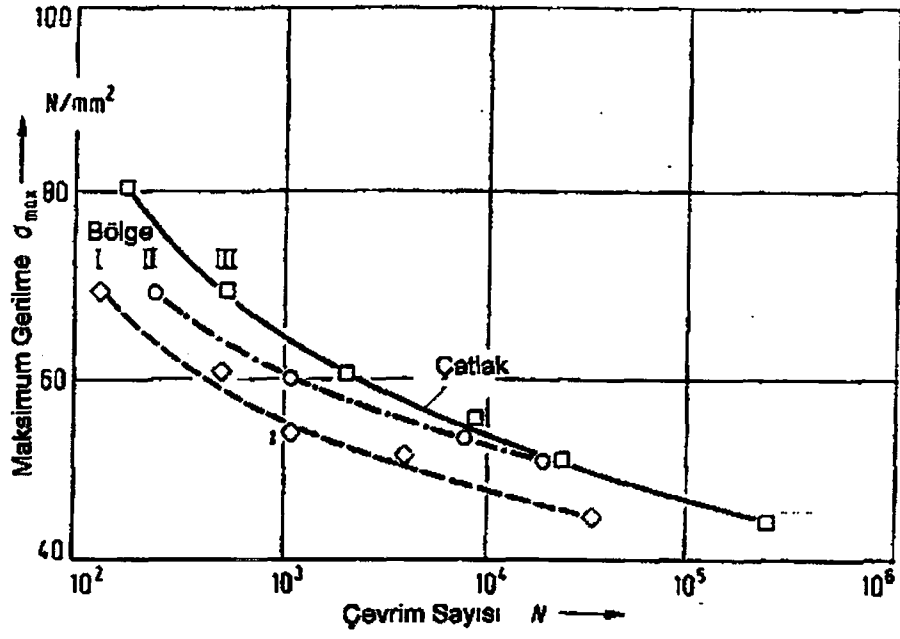


Şekil 5.34 Elyaf oranının, elyaf uzunluğunun ve yüzey işleminin cam elyaf takviyeli PBT (PBT-GF)'nin yorulma hasarına etkisi [24]

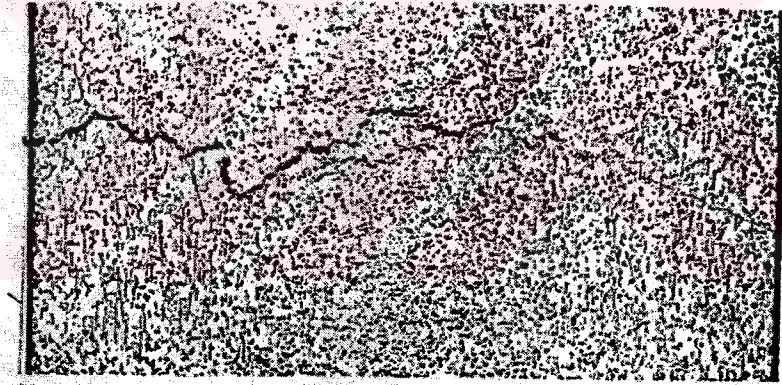
Sönümlleme profilinde üç bölge ayırdedilmektedir: ilk bölge düşük hızla artan, ikincisi doğrusal ve üçüncü bölge ise yüksek hızla artan sönümlleme bölgeleridir (Şekil 5.35). PBT-GF'nin modifikasyonundan ve gerilme tipinden (değişken çekme ve çekme-basma gerilmesi) bağımsız olarak, birinci sönümlleme bölgesi daima malzeme ömrünün %10'u civarındadır (Şekil 5.36). Birinci sönümlleme bölgesinin bitişi, malzemenin yapısında erken bir değişim olduğunu ve malzeme hasarının ilerlemeye başladığını göstermektedir. İlk yükleme periyodunun ardından (toplam ömrün yaklaşık %14'ü), numunenin merkezinde çoklu çatlak oluşumu ve dış tabakalarında tek çatlak ilerlemesi saptanmaktadır (Şekil 5.37). Tek çatlak dış tabakada boyuna yönelmiş yüzeyden başlar ve daha sonra elyafların yüke dik yönde dizildiği orta tabaka boyunca ilerler. Bu tip çatlaklar gözle fark edilebilmektedir. Orta tabakada, yüklemeye göre dik olarak yönelen elyaflarda gözlenen çoklu çatlak oluşumu ise ancak ışık mikroskobu altında fark edilebilmektedir. Birinci bölge (azalan sönümlleme profili) orta tabakadaki çoklu çatlak oluşumu ile ilişkilendirilebilir, ikinci bölge ise (sönümllemede doğrusal artış) büyük tek bir çatlağın ilerlemesi olarak karakterize edilebilir. Artan elyaf oranı, artan elyaf uzunluğu ve iyileşen elyaf-matris bağı ile kırılma tokluğu önemli ölçüde iyileşmektedir (Şekil 5.38).



Şekil 5.35 Tek kademeli gerilme çevriminde cam elyaf takviyeli PBT (PBT-GF)'nin sönümlleme profili [24]



Şekil 5.36 Cam elyaf takviyeli PBT'nin Wöhler diyagramında sönümlenme profili [24]

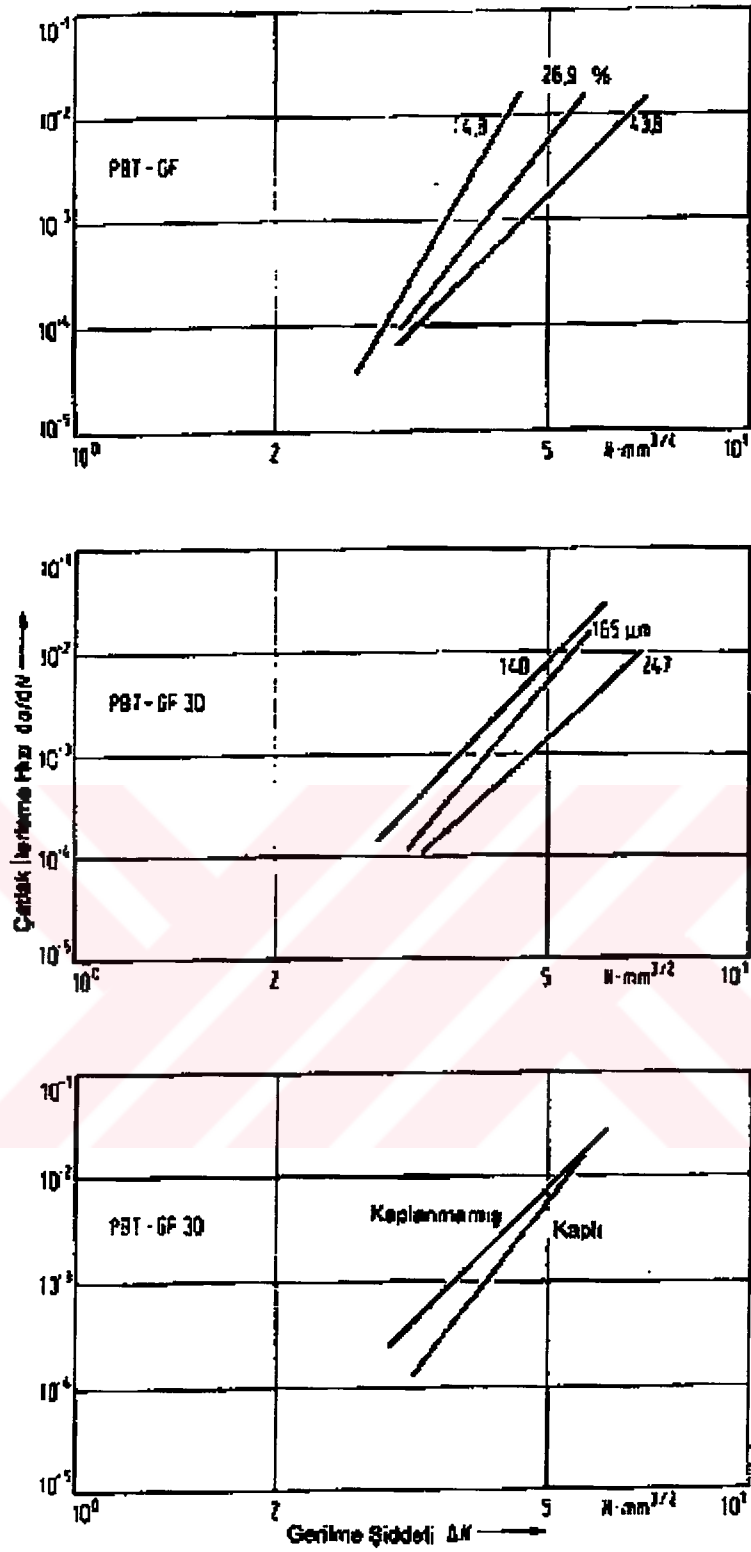


A)



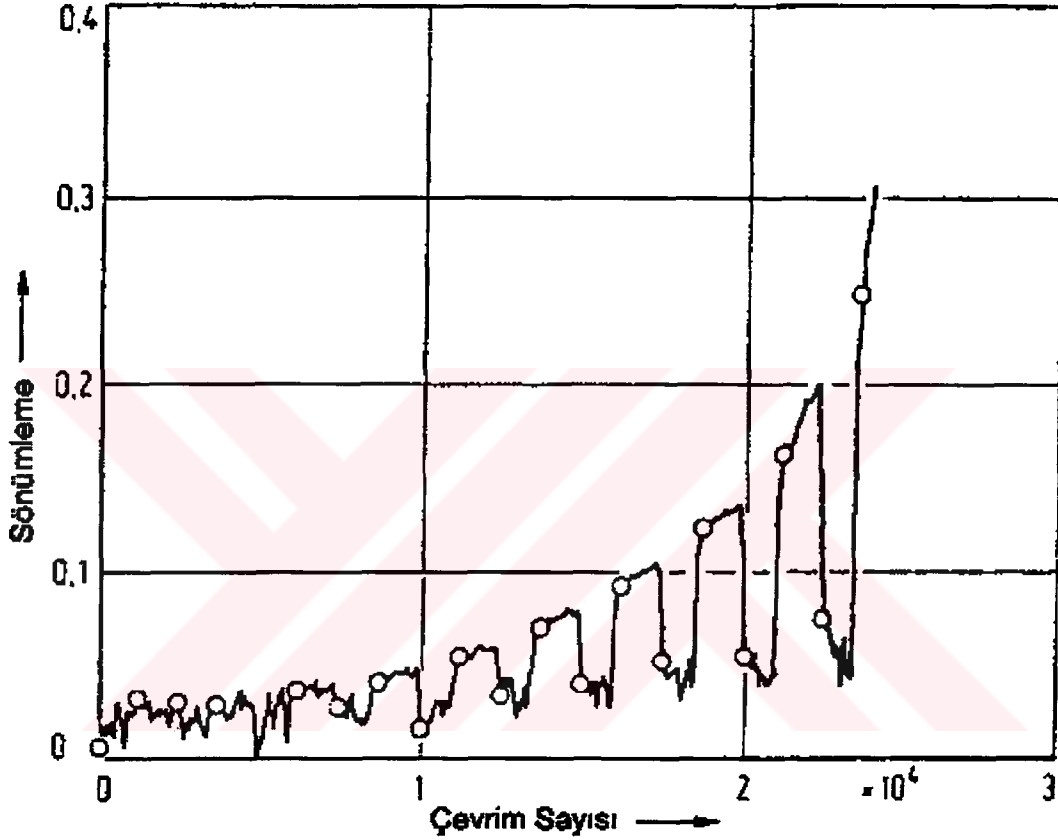
B)

Şekil 5.37 Beklenen ömrünün %14'ündeyken cam elyaf takviyeli PBT'nin kırık görünümü, $N=6178$, $\sigma_{maks}=50N/mm^2$, A) ışık mikroskobu, B) flöresan mikroskop [24]



Şekil 5.38 Elyaf oranının, elyaf uzunluğunun ve yüzey işleminin cam elyaf takviyeli PBT (PBT-GF)'nin yorulma çatlak davranışına etkisi [24]

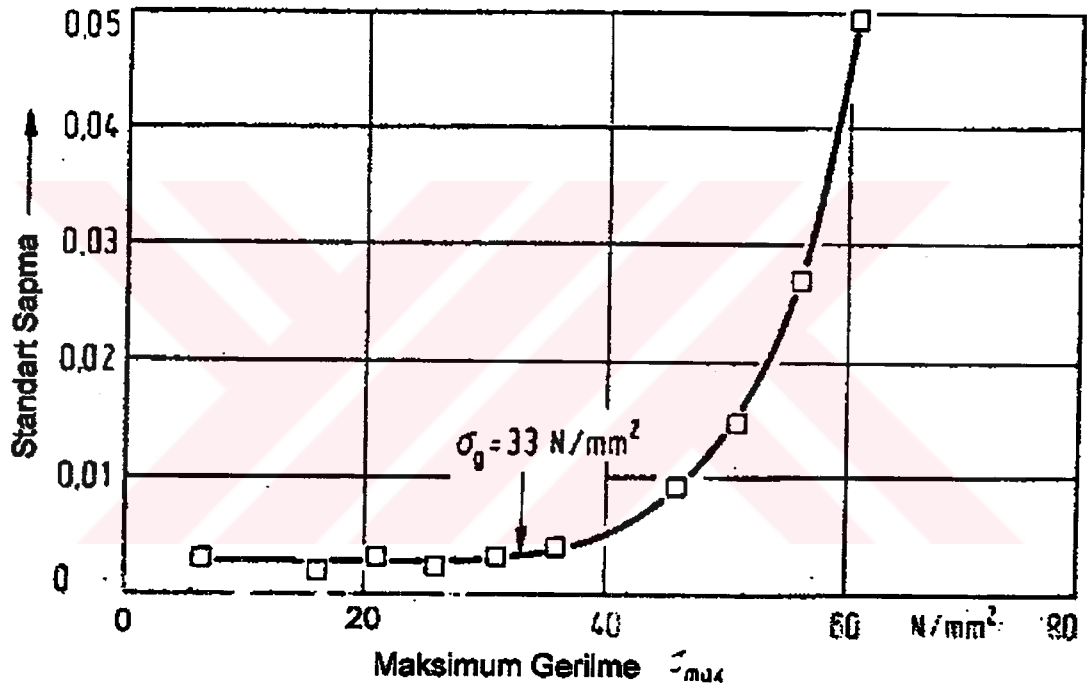
Gerilme artış testlerinde, başlangıçta sönümlenmede sürekli bir artış gözlenmekte ve daha sonra hasara kadar orantısız büyüklükte bir artış söz konusu olmaktadır (Şekil 5.39). Bu yükselme esnasında, malzemenin sönümlemesinin düşük başlangıç seviyesi yük azaltılmasına karşın geri kazanılamaz. Bu durum artan geri dönüşümsüz hasarın bir ölçüsüdür. Yükte artış olmasına rağmen sönümlenme, artan çevrim sayısı ile ilerleyen hasar nedeniyle yükselir.



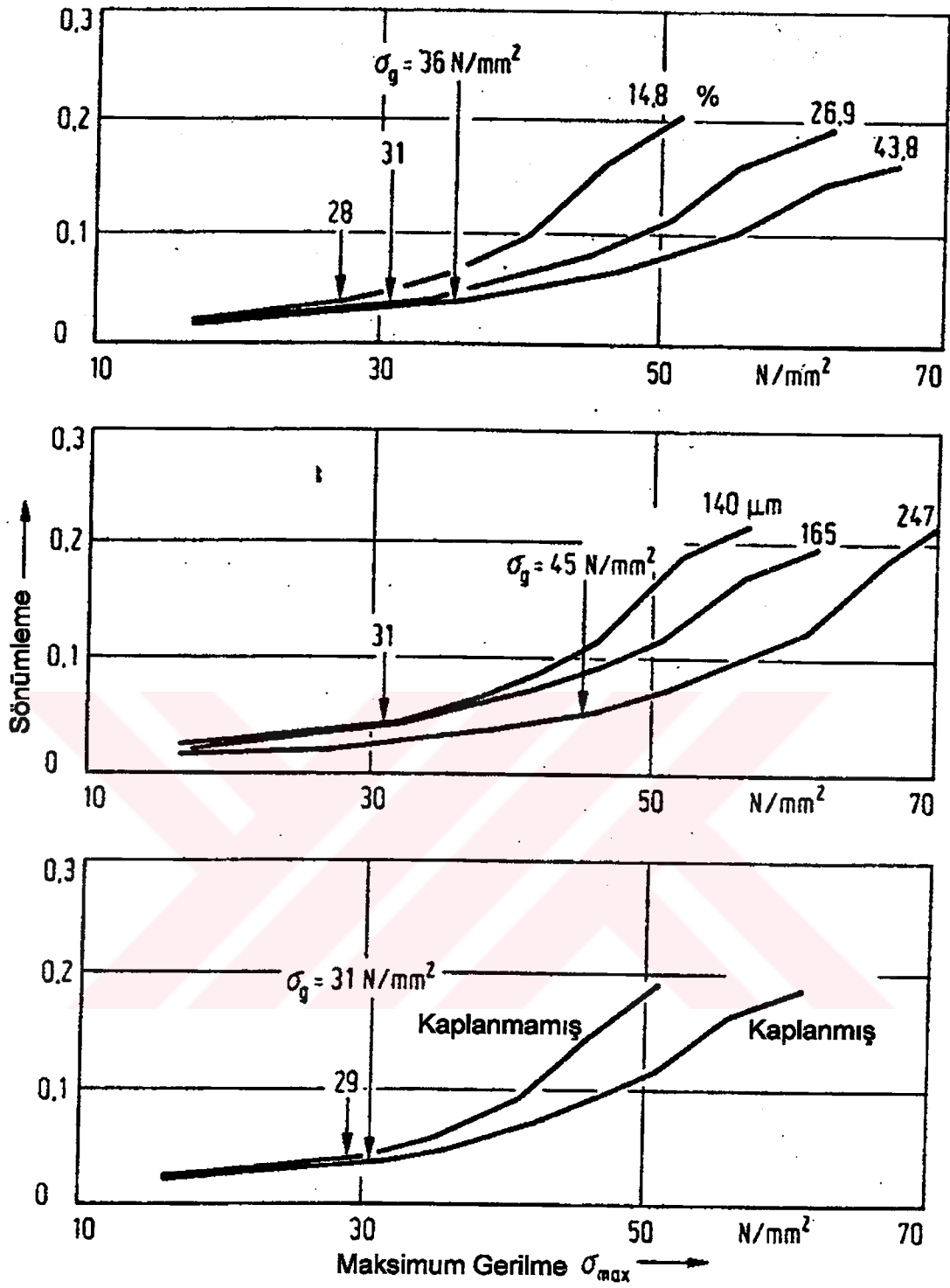
Şekil 5.39 Kademeli gerilme artışı testinde sönümlenme profili (ağırlıklıca %17 cam elyaf, elyaf uzunluğu yaklaşık 165 μm ve yüzeyi kaplanmış) [24]

Sönümlenmenin hemen hemen sürekli artması nedeniyle, gerilme sınırı olarak sabit bir değerin tespit edilmesi güçtür. Mekanik sönümlenmenin düşük gerilmelerde malzemenin karakteristik bir özelliği buna karşın, yüksek gerilmelerde bireysel hasar prosesinin bir göstergesi olduğu varsayılırsa, sönümlenmedeki düşük standart sapma düşük gerilmede olacaktır. Yüksek gerilmeler bölgesinde, bireysel hasarı karakterize eden sönümlenmenin standart sapmasında artış beklenebilir. Sönümlenmedeki

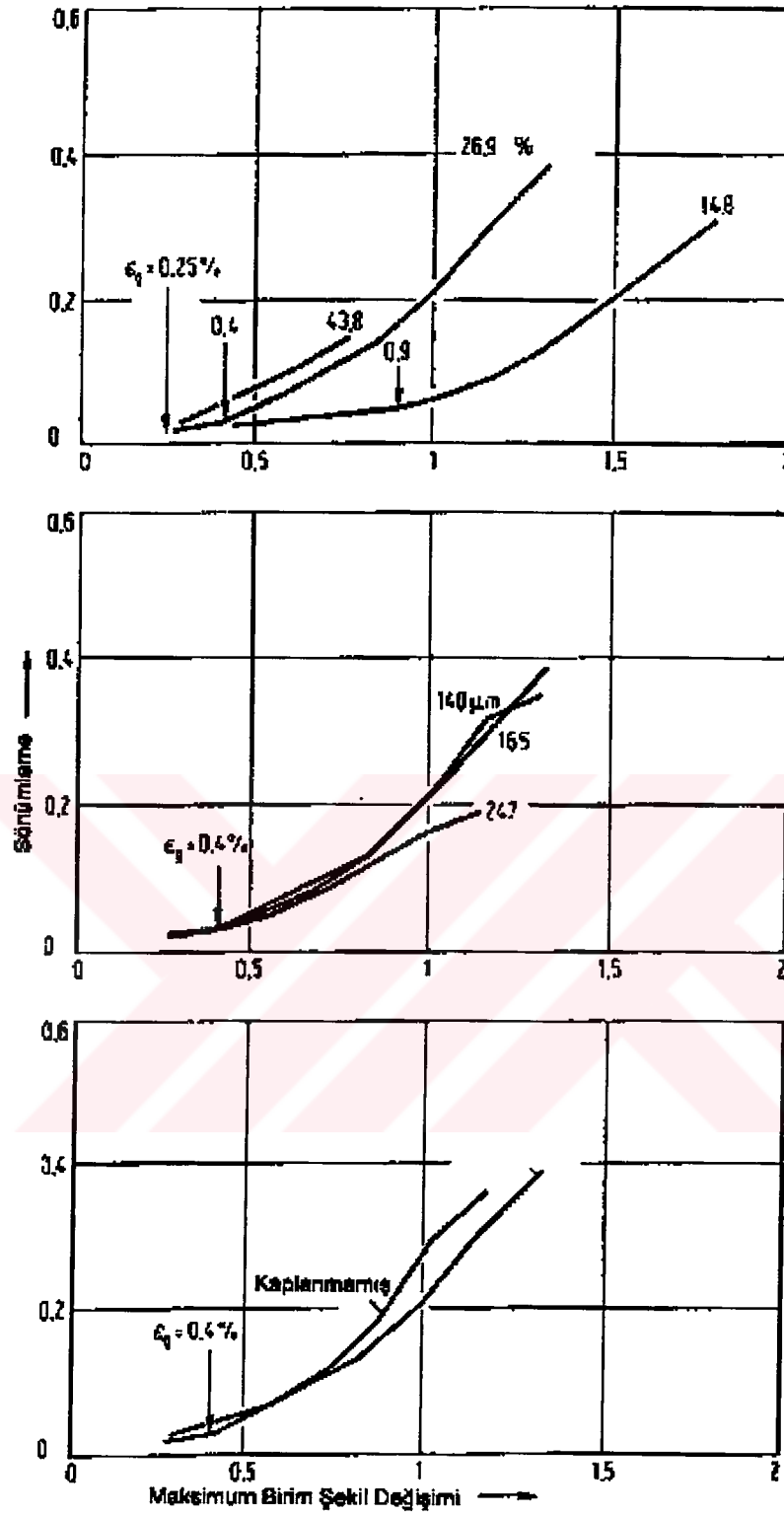
standart sapma altı adet gerilme artış deneyinden saptanır. Standart sapmanın düşük ve gerilmeden bağımsız bölgesi ile standart sapmanın yükselen ve gerilmeye bağımlı bölgesi arasındaki farkı açıkça ayırt etmek mümkündür. Bu iki bölge arasındaki hudut, sınır gerilmeyi göstermektedir (Şekil 5.40). Sınır gerilme değerleri artan elyaf oranı, elyaf uzunluğu ve elyaf-matris bağı ile artmaktadır (Şekil 5.41). PBT-GF'de sınır şekil değiştirme değeri gerilme kontrollu deneylere benzer şekilde şekil değişimi artış testlerinden saptanmaktadır (Şekil 5.42). Gerilme ağırlıklı yaklaşımın tersine, daha yüksek elyaf oranı gevrek malzeme davranışı vermektedir. Elyaf uzunluğundaki farklar ve elyaf-matris sınır tabakaları çok az bir etki göstermektedir. Sınır şekil değiştirme değeri %0,4 olarak saptanmıştır.



Şekil 5.40 Gerilmenin bir fonksiyonu olarak sönümlenmenin standart sapması [24]



Şekil 5.41 Elyaf yüzdesinin, elyaf uzunluğunun ve yüzey işleminin cam elyaf takviyeli PBT'nin gerilme sınırına etkisi [24]



Şekil 5.42 Elyaf yüzdesinin, elyaf uzunluğunun ve yüzey işleminin cam elyaf takviyeli PBT'nin maksimum birim şekil değişimine etkisi [24]

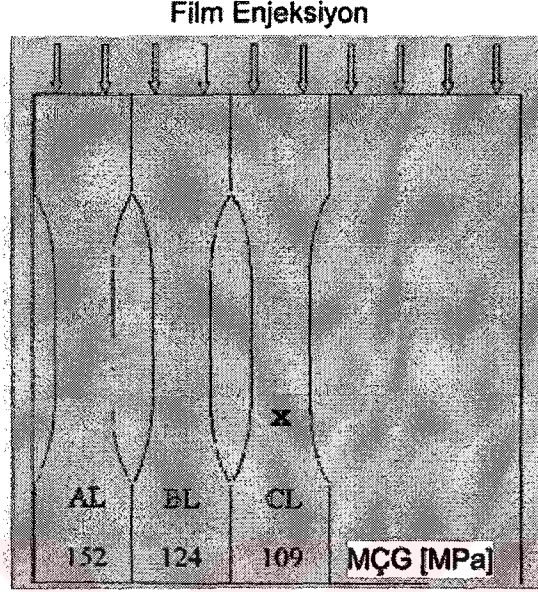
Horst [25], kısa cam elyaf takviyeli poliamidlerin yorulma davranışı ile ilgili önemli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Öncelikle elyaf takviyeli plastiklerin yüksek oranda anizotropi göstermesine dikkat çekmektedir. Oryantasyon neticesinde malzemenin dayanımı kalınlık boyunca olduğu kadar, enjeksiyonla basılan plakanın değişik bölgelerinde de farklılıklar göstermektedir. Bu plakanın değişik bölgelerinden çıkartılan numunelerle yapılan testlerde malzemenin çekme dayanımı 100 ile 160 MPa arasında değişmektedir (Şekil 5.43). Elastik modül de çekme dayanımına benzer bir durum göstermektedir.

İlk deneyler malzemenin yorulma dayanımının çekme dayanımı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir (Şekil 5.44). Bu durum Wöhler eğrilerinde gözlemlenmiştir ve farklı numune tipleri için normalize edilmiş "master eğri"ler kullanılmıştır (Şekil 5.45).

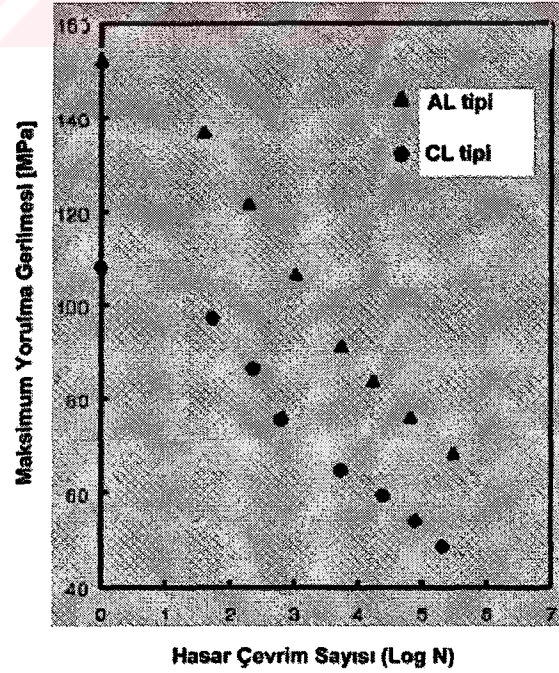
Deneylerinde ağırlıkça %30 cam elyaf takviyeli poliamid 6 kullanmıştır. Bu malzeme 100x100x5,75 mm'lik bir kare plaka şeklinde enjekte edilmiş ve düz akış sağlayabilmek için çizgisel yolluk (line gate) kullanılmıştır. Daha sonra bilgisayar kontrollü bir modelleme makinası yardımıyla bu plakadan çekme çubukları çıkartılmıştır.

Yorulma deneyleri servo-hidrolik MTS 810 test cihazında gerçekleştirilmiştir. Gerilme oranı olarak 0,1 kullanılmış ve farklı gerilme seviyelerinde testler gerçekleştirilmiştir. İlk deneylerde yüksek sönümlenme özelliği nedeniyle oluşan histeritik ısınma sonucu malzemenin test frekansına çok duyarlı olduğunu gözlemlenmiştir. Bunun üzerine numune yüzeyinden enfrazuj termometre ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. 1 Hz gibi düşük sıcaklıklarda bile sıcaklık artışları gözlemlenmiştir. 0,6ÇD'na (çekme dayanımının 0,6 katı) kadar olan düşük zorlamalarda denge konumuna erişilmekte ve sıcaklık artışı 5°C'dan düşük kalmaktadır. Yüksek zorlamalarda ise numune yüzeyindeki sıcaklık artışı dengeye erişememekte ve hasar oluşana kadar sürekli artmaktadır. Bu artış 10°C'a kadar ulaşabilmektedir. Bu ilk deneyler sonunda 0,5-1 Hz'de yapılan deneylerin maksimum yorulma ömrü verdiği tespit edilmiştir. Düşük frekanslarda sürünme etkisinin yorulma ömrüne negatif bir etkisi olmaktadır, bunun yanında yüksek frekanslarda ise numune ısı hasar nedeniyle kırılmaktadır.

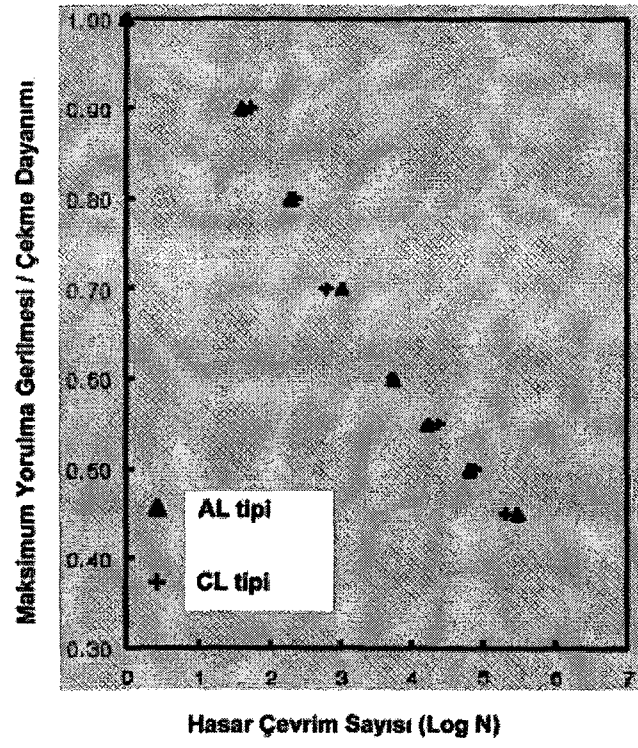
Yorulma testleri sırasında çenenin hareketini gözlemleyerek modül ve sürünme hesaplamaları yapılmıştır. Çevrimsel modül deney boyunca lineer olarak azalmaktadır. Azalma miktarı 0,8-0,7ÇD için %20, 0,6ÇD'dan daha düşük zorlamalar için %10 civarında olmaktadır.



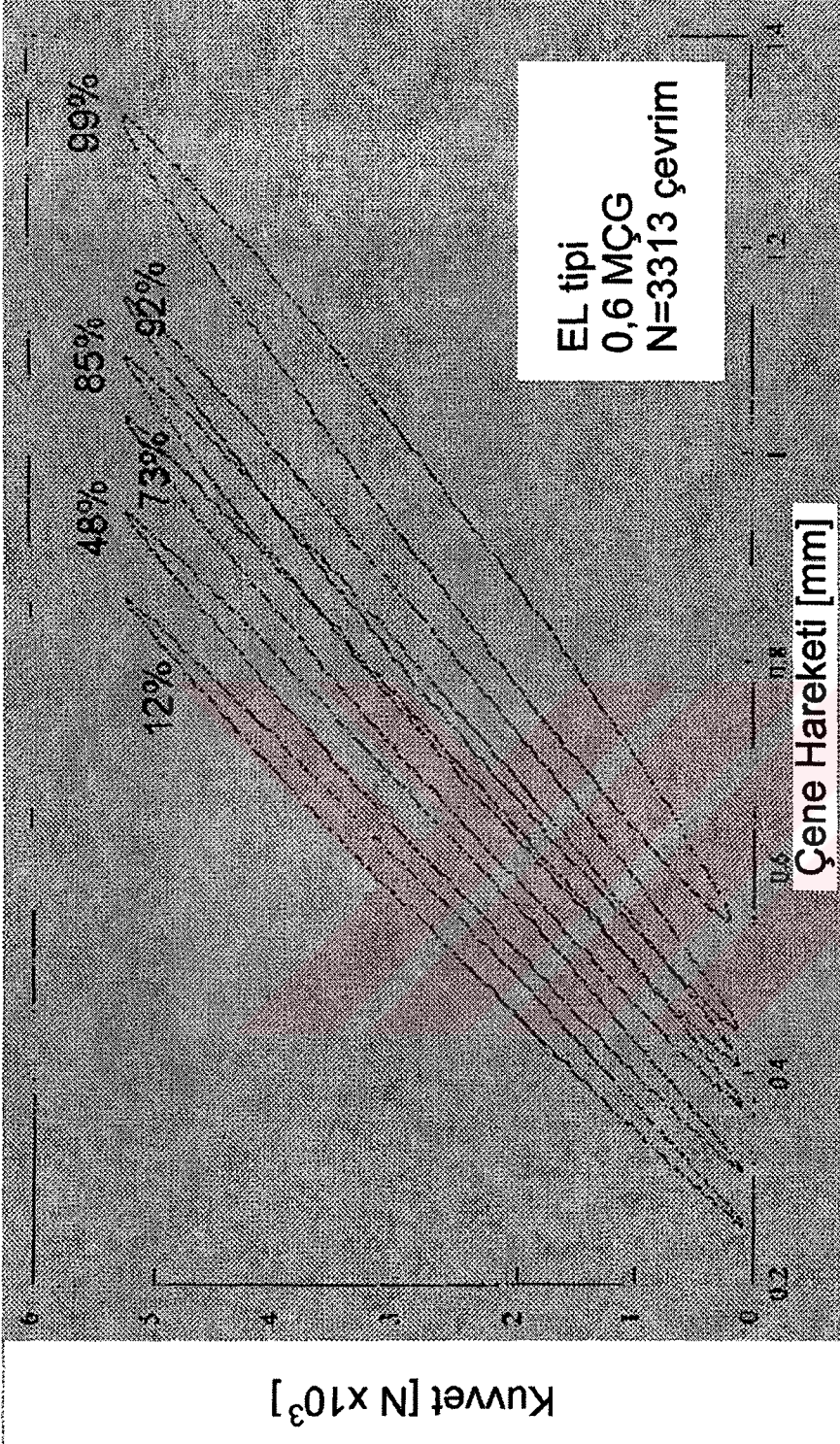
Şekil 5.43 Numunelerin plaka içindeki yerleri [25]



Şekil 5.44 İki farklı numune tipi için Wöhler eğrileri [25]



Şekil 5.45 İki farklı numune tipi için normalize edilmiş Wöhler eğrileri [25]

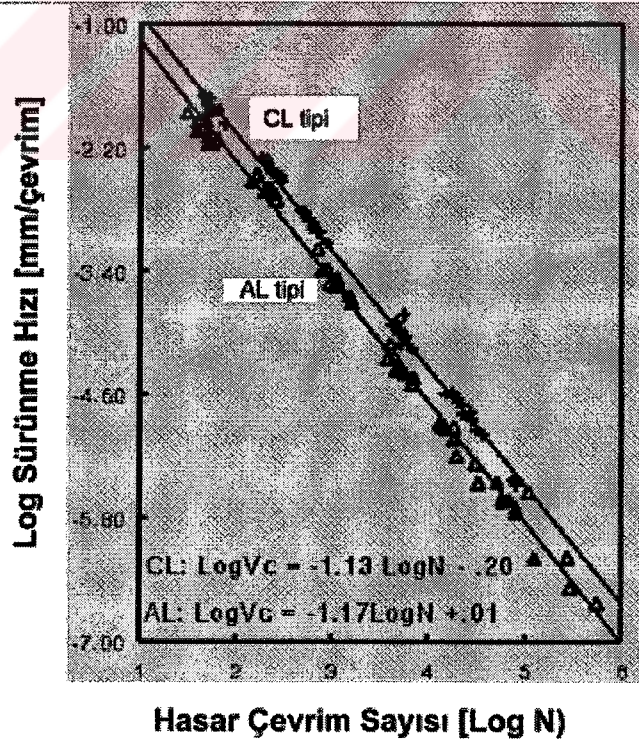


Şekil 5.46 Histerizis çevrimlerinin malzeme ömrü boyunca değişimi [25]

Enerji yayılımı deney boyunca lineer olarak artmaktadır. Çevrim başına enerji yayılımı düşük zorlamalarda yapılan deneylerde 100 mJ, yüksek zorlamalardaki deneylerde ise 500 mJ değerine çıkabilmektedir. Horst, histerizis çevrimlerinin orta eksenlerinin x eksenine göre azalan bir eğilim içinde olduğunu gözlemlemiştir. Bu durum azalan modülü ifade etmektedir. Histerizis çevrimlerinin alanları artmaktadır. Bu durum da artan enerji yayılımını temsil etmektedir. Histerizis çevrimlerinin pozisyonları yüksek şekil değiştirmelere kaymaktadır. Bu durum ise çevrimsel sürünme etkisini göstermektedir (Şekil 5.46).

İkinci sürünme bölgesindeki sürünme hızı ile ömür arasında bir ilişki olduğunu saptamıştır. Belli bir yüzde ile yorulan numunenin sürünme hızı eğrisi yardımıyla, o numune için yaklaşık bir ömür tahmini yapılabilir.

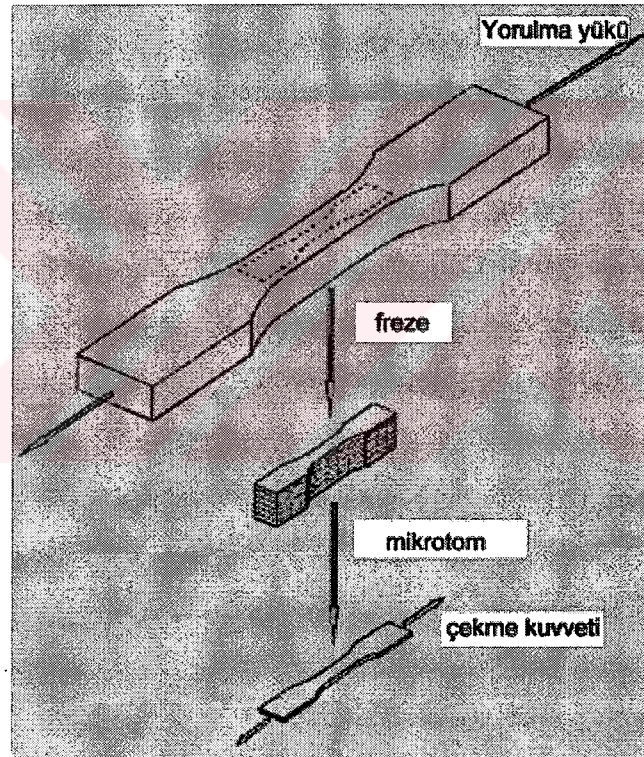
Sürünme hızı ile ömür arasındaki ilişki tüm zorlama değerleri için çizildiği takdirde plakanın ortasından çıkarılan numunenin plakanın dış yüzeylerine yakın yerlerden çıkarılanlara göre neredeyse 2 kat fazla sürünme hızı gösterdiği görülür. Plakanın ortasından çıkarılan bu numune çekme testinde iki kat fazla kırılma uzaması göstermektedir (Şekil 5.47).



Şekil 5.47 Tüm yük seviyelerinde çevrim sayısına karşılık sürünme hızı [25]

Oluşan hasarın tespiti amacıyla yorulmaya uğramış test numunelerinden önce minyatür çekme numuneleri çıkartılmış, daha sonra bu numunelerden mikrotom yardımıyla 2 mm genişliğinde ve 85 mikron kalınlığında dilimler çıkartılmıştır (Şekil 5.48). Yine minyatür bir çekme test cihazı yardımıyla bu numunelere çekme testi uygulanmıştır.

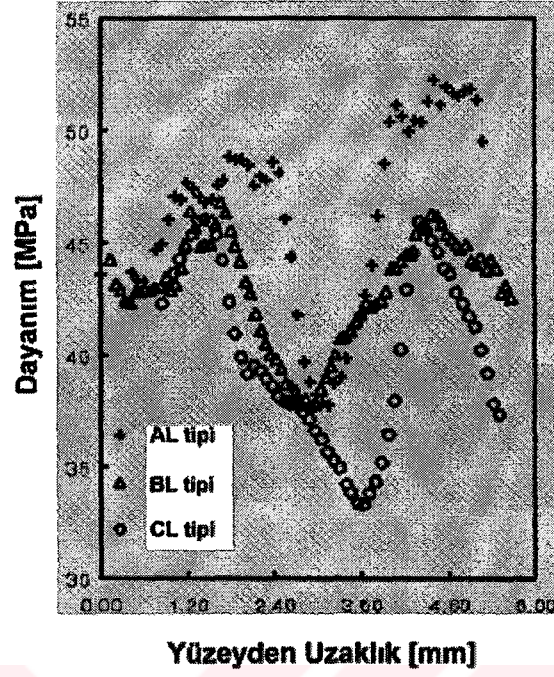
Yorulma deneyinin sonlarına doğru yüzeyde, plastik olarak deforme olan bölgeleri temsil eden ve giderek artan sayıda beyaz çizgiler oluşmaktadır. Bu durum SEM fotoğraflarında, matrisin yüksek oranda deformasyona uğradığı “yorulma bölgesi” ve matris malzemesinin kırılğan bir şekilde hasara uğradığı “son kırılma bölgesi” olarak ayırt edilebilmektedir. Yorulma zorlamasının miktarı azaldıkça sünek bölgenin alanı kırılğan bölgeninkine göre artış göstermektedir.



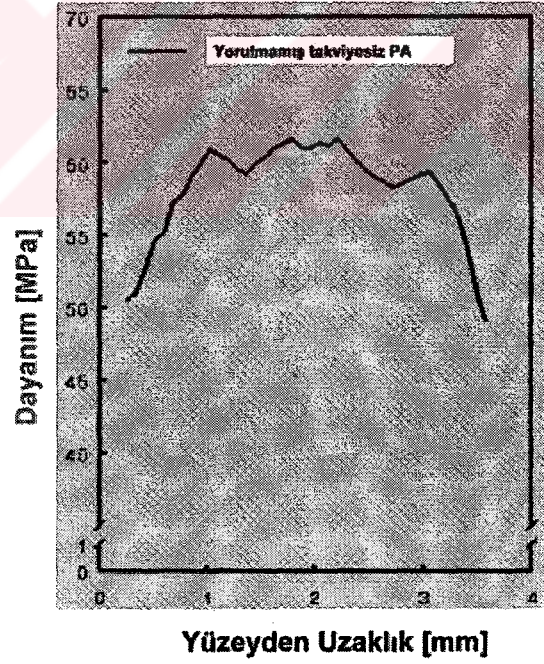
Şekil 5.48 Freze ve mikrotom yardımıyla minyatür çekme numunelerinin çıkarılması [25]

Plakanın ortasına doğru elyafların düzgün dağılmaması nedeniyle dayanımda önemli düşmelere rastlanmıştır. Plakanın ortasının yanısıra plakanın dış yüzeylerinde de dayanım düşüşleri olduğu görülmüştür (Şekil 5.49). Fakat katkısız poliamidle yapılan deneylerin sonucunda bunun sorumlusunun elyafların dağılışının

olmadığı, kalıbın dış yüzeyine yakın kesimlerin hızlı soğuması nedeniyle düşük kristalinite derecesi olduğu kanaatine varılmıştır (Şekil 5.50).



Şekil 5.49 AL, BL ve CL tipi numuneler için minyatür çekme numunelerinin sonuçları merkez bölgenin etkisinin arttığını göstermektedir [25]



Şekil 5.50 Yorulmamış takviyesiz poliamidin minyatür çekme sonuçları [25]

Lokal değişikliklerin (örneğin yarıklar, çentikler ve boşlukların) ömür üzerindeki etkileri oldukça düşüktür. Bu durum elyaf uçlarının çentik etkisi yaratması şeklinde açıklanmaktadır.

Yorulma hasar mekanizması aşağıdaki şekilde modellenmiştir:

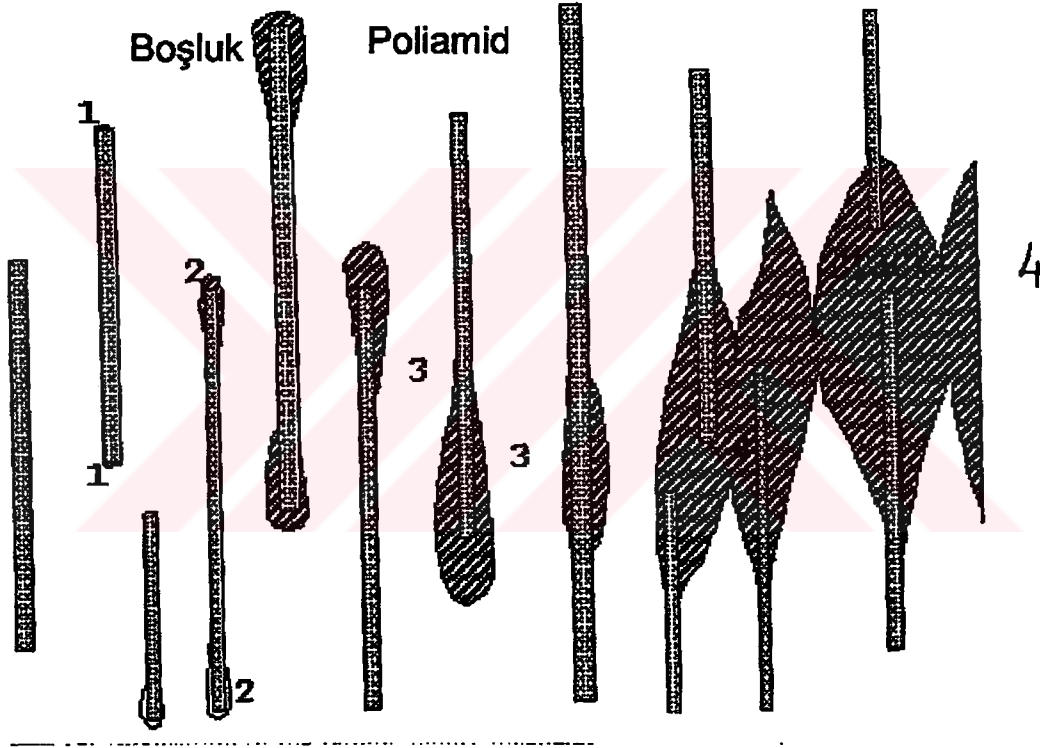
1. Hasar elyaf uçlarında başlar
2. Büyüyen bu hasar boşluklara dönüşür, ayrılma mekanizması buna eşlik eder
3. Boşluklar büyüyerek çatlaklara dönüşür
4. Ayrılma mekanizması matrisin daha kolay deforme olmasına yol açar
5. Çatlak büyür ve kritik bir boyaya ulaştığı zaman hasar gerçekleşir.

Elyafların dağınık oryantasyonu (misalignment), birbirlerine dokunmaları ve elyafların uçları, yerel gerilmeyi lokal hasarın başlaması için gerekli minimum gerilme seviyesine çıkartmaktadır. Bu seviyeye tüm yük kademelerinde ulaşılabilir, fakat söz konusu durum azalan yük miktarı ile birlikte daha az sayıda bölgede gerçekleşir. Geçişli çatlakların (bridged cracks) oluşumu ve ilerlemesi tüm yük seviyelerinde gerçekleşebilmektedir.

Yüzeyde ve mikrotomla dilimlendikten sonra içeride de görülen beyaz çizgiler plastik olarak deforme olmuş matris malzemesini göstermektedir. Matris malzemesinin ayrılma olmadan bu derece deforme olamayacağı ifade edilmektedir. Plastik deformasyon, elyafların tamamen matristen ayrıldığı bölgelerde gözlenmektedir. Bununla beraber bu plastik olarak deforme olmuş bölgeler gerçek çatlak değildirler. Bu durumu destekleyen bulgu, mikrofolyo çekme numunelerinden görünür derecede plastik deforme olmuş numunelerde çok düşük dayanımlara rastlanılmasına rağmen, hiç sıfır dayanımda numuneye rastlanılmamasıdır.

Horst benzer bir başka çalışmasında [26], cam elyaf takviyeli poliamidin yorulma mekanizmasını daha ayrıntılı olarak açıklamaktadır. Hasar en yüksek gerilme yoğunluğunun olduğu bölge olan elyaf uçlarında başlamaktadır (1) (Şekil 5.51). Elyaf uçlarında bağlanmayı arttıran kaplama bulunmadığı için elyaflar matrise çok zayıf bağlanmışlardır. Bu durum karıştırma ve enjeksiyon kalıplama işleminden sonra elyaf kırılmasına da neden olmaktadır. Bu hasarın büyümesiyle oluşan boşluklar elyaf boyunca ilerler (2). Bu boşluklar ve elyafların ayrılması elyafların

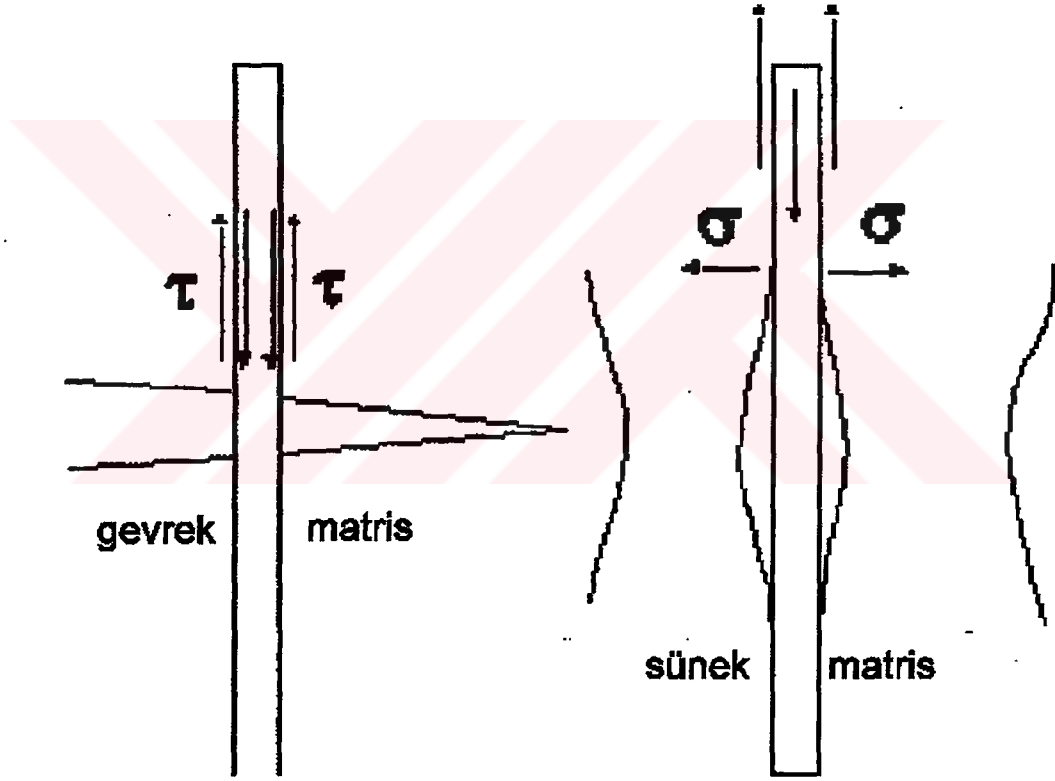
takviye etkisini önemli ölçüde azaltır. Bunun sonucunda matrise daha yüksek gerilmeler gelir ve bu durum hasar bölgesindeki matris malzemesinin plastik olarak deforme olmasına yol açmaktadır. Bu hasar bölgesinin açılmaya devam etmesi ile malzemenin şekil değişimi de artacak dolayısıyla yeni boşluklar ve ayrılmalar oluşacaktır (3). Boşluklar büyümeye devam edecek ve birleşerek çatlak alanları oluşturacaklardır (4). Bu çatlaklı bölgeler, çatlak duvarları sağlam bölgelerle temasta kaldığı sürece tek bir büyük çatlak haline dönüşmeyecektir. Bu hasarlar numune gerilme yönüne dik yönde ilerlemektedir. Yorulma prosesi sırasında oluşan sürünme, bu kılcal çatlak benzeri hasarların başlangıç, ilerleme ve açılması ile oluşmaktadır.



Şekil 5.51 Yorulma hasar mekanizmasının bir model sistem yardımıyla açıklanması, hasar soldan sağa doğru ilerlemekte [26]

Oluşan hasara elyaf-matris arayüzeyi açısından bakıldığında ise şunlar göze çarpmaktadır. Elyaf uçlarında yüksek yerel gerilmeler oluşacak, hasar başlayacak, kayma gerilmelerinin elyaf-matris arayüzeyinde maksimum olması nedeniyle elyaf uçlarında ayrılmalar başlayacaktır. Elyafların ayrılma ile yük taşınamaması nedeniyle matriste yerel gerilmeler artacak ve matris deforme olacaktır. Deforme olmak isteyen

matris yanal olarak daralmak isteyecek buna karşın elyaf-matris arabağı buna engel olacaktır. Bu durum elyaf-matris arayüzeyinde çekme gerilmeleri doğurur. Böylece yorulma davranışında yalnızca kayma gerilmeleri değil aynı zamanda çekme gerilmeleri de önem kazanır. Bu durum çekme ile yorulma testleri arasındaki en önemli farktır (Şekil 5.52). Çekme testinde matris kırılgan bir şekilde hasara uğrar. Elyafar yalnızca kayma gerilmeleri altındadır, matriste yanal daralma yoktur. Bu durumda elyaf-matris arayüzeyi değil, arayüzeye yakın matris bölgesi hasara uğrar (iyi bağlanmış sistemlerde). Bu durum çekilip çıkmış elyafların üzerinde kalan matris parçacıkları ile açıklanmaktadır. Yorulmada arayüzeyde oluşan çekme gerilmesi arayüzeyin kendisini hasara uğratır ve elyaflar üzerinde hiç matris malzemesi kalmaz.



Şekil 5.52 Elyaf – matris arayüzeyindeki yükleme şekli: soldaki şekilde çekme, sağdaki şekilde ise yorulma hasarı görülmektedir [26]

Horst ve Spoormaker [27], enjeksiyon yöntemiyle kalıplanmış cam elyaf takviyeli poliamid bir parçada elyaf yönlenmesinin yorulma davranışına etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmalarında %30 cam elyaf takviyeli poliamid 6 malzemesi

kullanmışlardır. Bu malzemeyi kullanarak enjeksiyon yöntemiyle 100 x 100 x 2 ve 5,75 mm kalınlıklarında plakalar kalıplamışlar ve test numunelerini bu plakalardan keserek çıkarmışlardır. Bahsi geçen malzemenin değişik şekillerde koşullanmış tiplerini kullanmışlardır. Bu tipler;

- nemsiz kalıplandığı şekilde (dry as moulded)
- 23°C ve %50 nem şartlarında koşullanmış
- %100 nemli (suda bekletilmiş)
- farklı elyaf kaplamaları kullanılarak elyaf-matris bağı geliştirilmiş
- malzemenin farklı davranışını gözlemleyebilmek amacıyla birtakım deneyler 50°C'da gerçekleştirilmiştir

Minimum/maksimum yük oranını 0,1 seçmişler ve 1 Hz frekansda deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

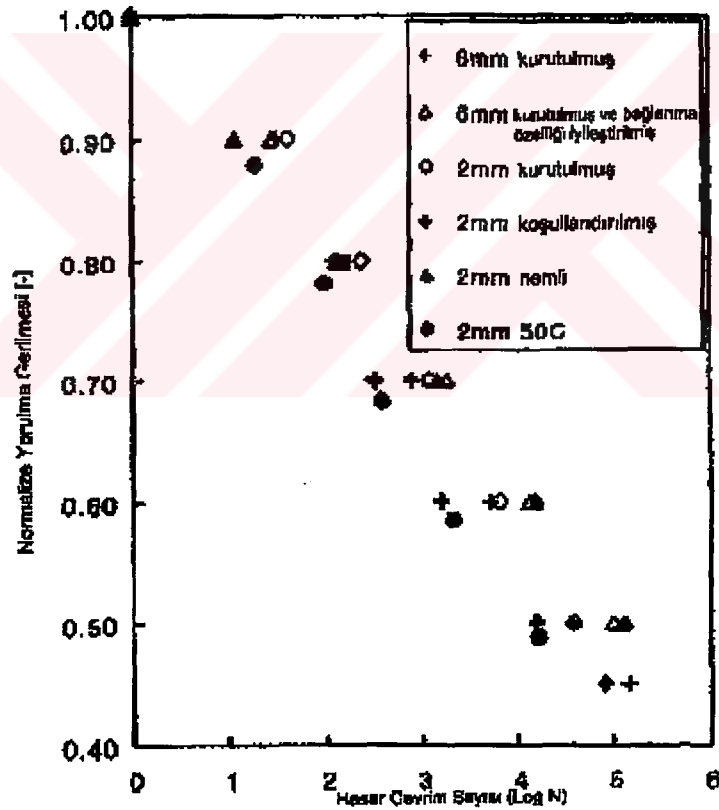
Malzeme kalınlığının yorulma performansını belirlemede önemli bir parametre olmadığını ortaya koymuşlardır (Şekil 5.53). SEM incelemesi sonucu koşullanmış ve suda bekletilmiş malzemelerin yorulma kırık yüzeylerinde matrisin çok yüksek oranda plastik deformasyona uğradığı gözlenmiştir. SEM fotoğraflarından elyaf ucu etrafında matris malzemesinin deformasyonu açıkça görülmektedir (Şekil 5.54).

Plakaların farklı bölümlerinden kesilerek çıkartılan numunelerin belli bir gerilme seviyesi için yorulma ömürlerinin, doğrudan numunelerin çekme dayanımları ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bu durum elyaf yönlenmesindeki değişimin yorulma mekanizmasında bir değişime yol açmayacağını göstermektedir. Ayrıca, elyaf-matris bağının iyileştirilmesi yalnızca yorulma davranışını iyileştirmiş, çekme dayanımını arttırmamıştır. Şartlandırılmış numuneler en kötü yorulma davranışını göstermişlerdir. Bu durum şöyle açıklanmaktadır; artan miktarda su emildiğinde, yorulma dayanımı çekme dayanımından daha önce etkilenmektedir. Nem açısından doygunluğa erişildiğinde ise yorulma davranışında nispi bir artışa neden olacak şekilde, çekme dayanımı yorulma dayanımından daha önce etkilenir.

Şartlandırılmış malzemeler için [25 ve 26] referanslarında bahsedilen geçişli çatlak mekanizmasının geçerli olduğu, buna karşın nemi alınmış malzemelerin mekanizmasının farklı olduğu ve bunlarda matris sünekliğinin çok az olduğu

dolayısıyla geçişlerin oluşmadığı belirtilmektedir. Nemi alınmış malzemelerin yorulma mekanizmalarının aşağıdaki dört aşamadan oluştuğu varsayılmaktadır:

1. Çevrimsel şekil değişimleri nedeniyle gerilme yoğunluğunun en yüksek olduğu elyaf uçlarında yerel hasarlar başlar.
2. Mikroçatlaklar oluşur.
3. Çevrimsel zorlamalar nedeniyle kararlı çatlak ilerlemesi başlar. Çatlak ilerlemesinin şiddeti yerel elyaf yönlenmesine, matris sünekliliğine ve arayüzey bağının kuvvetine bağlıdır.
4. Kırılma öncesi son yükleme çevriminde çekme testindeki hasar oluşumu ile karşılaştırılabilir düzeyde hızlı (kararsız) çatlak ilerlemesi gerçekleşir.



Şekil 5.53 Farklı malzeme koşulları için normalize S-N eğrileri [27]



Şekil 5.54 Yorulma nedeniyle elyafın ucunda deformasyon görülmektedir. Yükleme doğrultusu sağdan sola doğrudur. Büyütme miktarı 2000'dir [27]

Hitchen ve Ogin [28] ağırlıkça %50 uzun ve süreksiz cam elyaf takviyeli naylon'dan enjeksiyon yöntemiyle üretilen numunelerle çekme-çekme tipi yorulma testi gerçekleştirmişlerdir. 20 mm genişlikteki deney numunelerini askı (coathanger) tipi yolluk kullanarak enjeksiyon yöntemiyle kalıplanan, 160 mm'lik kare plakadan elmas testere ile keserek çıkarmışlardır. Oda sıcaklığında gerçekleştirdikleri yorulma testinde üçgen tip dalga şekli kullanmışlardır. Yorulma zorlaması sırasında numunenin dış yüzeylerindeki (skins) modül azalması, çekirdek bölgesi (core) ve ikinci dış yüzey freze ile kaldırılarak, tek dış yüzeyden oluşan numuneden ölçülmüştür.

Yalnızca dış yüzeyden oluşan numune ile yapılan yorulma testinde ilk önce modülün hızla azaldığı, daha sonra modül azalma hızının düştüğü gözlenmektedir (Şekil 5.55). Bu gözlemlerinin aşağıdaki forma uyduğunu ifade etmişlerdir.

$$-\left(\frac{1}{E_s}\right) \frac{dE_s'}{dN} = \frac{\alpha}{N^\beta} \quad (5.26)$$

α ve β sabitler, E_s ve E_s' sırasıyla ilk ve anlık modüllerdir. Bazı düzeltmelerden sonra dataların aşağıdaki ampirik bağıntı ile oldukça iyi ifade edilebildiği görülmüştür.

$$\left(1 - \frac{E_s'}{E_s}\right) = 2 \times 10^{-4} N^{\left(\frac{\sigma_s - 16}{115}\right)} \quad (5.27)$$

σ_s cidara uygulanan maksimum gerilmedir. Herbir maksimum gerilme için denklem (5.27) modül azalma eğilimini doğru tahmin etmektedir ve ampirik tahminler ile deneysel değerler arasında kabul edilebilir bir uyum vardır (Şekil 5.56). Deneysel olarak gözlemlenemelerine rağmen cidar tabakadaki hasar birikim mekanizmasının elyaf/matris ayrılması olduğunu ifade etmişlerdir.

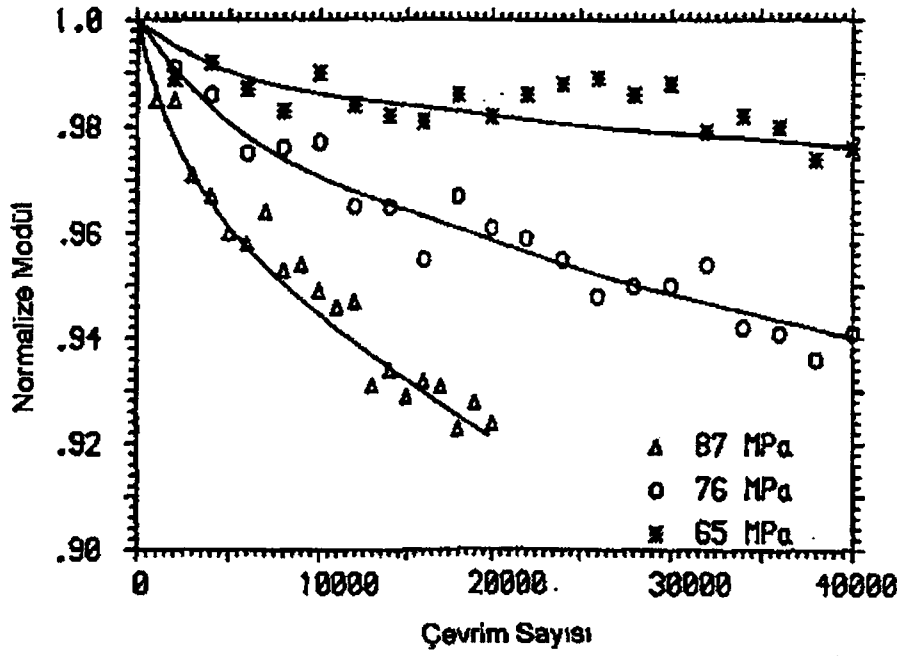
Numunenin iç bölgesinde oluşan hasarın ise, numunenin kenarlarında başlayan ve çevrim boyunca numunenin genişliği boyunca ilerleyen dikine kırılmalar (transverse cracking) olduğunu belirtmektedirler. Çatlak uzunluğu “a” ile temsil edilen merkezdeki çatlakın ilerlemesi deneysel sonuçlardan elde edilmiştir (Şekil 5.57). Çatlak uzunluğu için maksimum gerilme ve yorulma çevrim sayısı açısından aşağıdaki gibi bir ampirik bağıntı önermişlerdir.

$$a = 5 \times 10^{-6} N^{0.3} \sigma^{2.5} \quad (5.28)$$

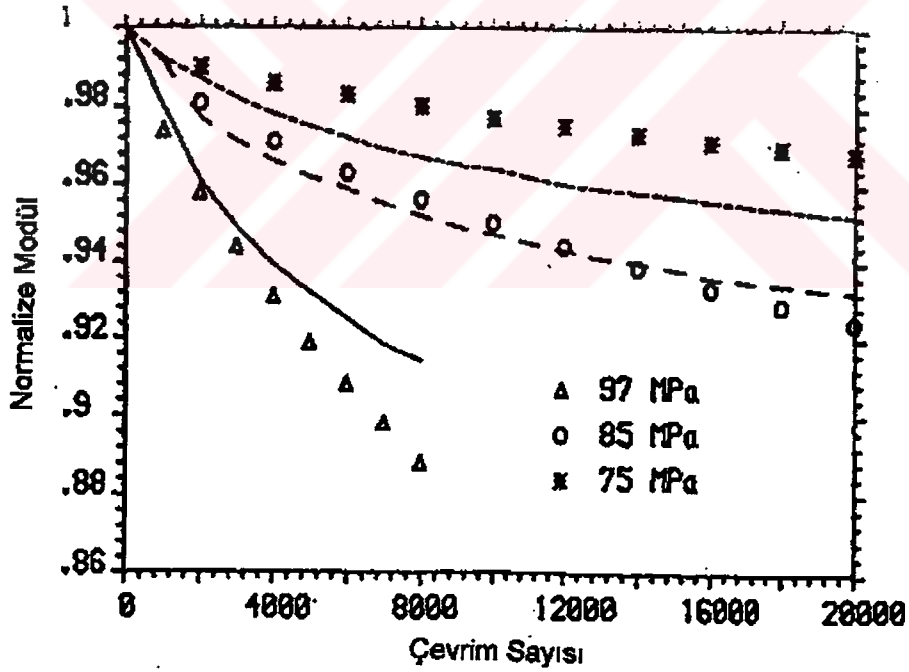
Kısmen hasara uğramış merkezin efektif modülü E_c için çatlak boyu a olmak üzere;

$$\bar{E}_c = E_c' \left(\frac{2a}{W} \right) + E_{c(0)} \left(W - \frac{2a}{W} \right) \quad (5.29)$$

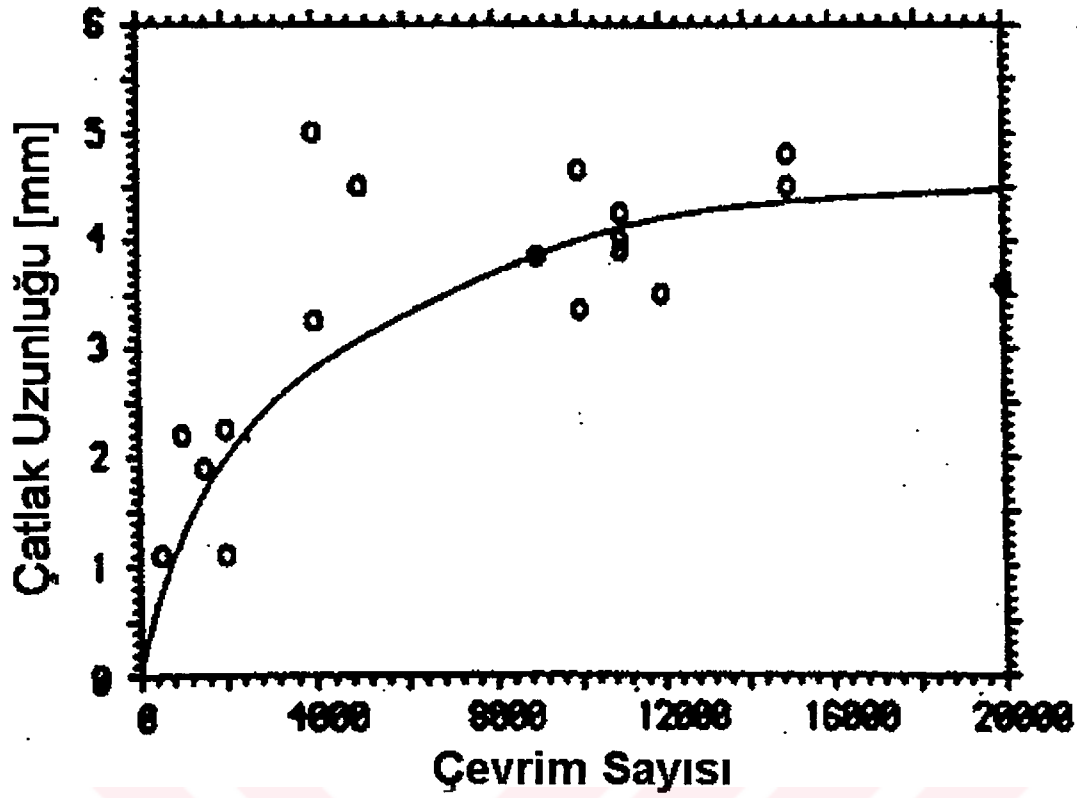
bağıntısı önerilmiştir. Burada $E_{c(0)}$ hasarsız merkez bölgenin boyuna Young modülü, E_c' tümü hasarlı merkez bölgenin efektif modülü ve W numune genişliğidir.



Şekil 5.55 Cedar numunelerin normalize modüllerinin çevrim sayısı ile değişimi. Noktalar deneysel değerler, eğriler ise en iyi uyan fonksiyonların eğrileridir [28]



Şekil 5.56 Cedar numuneler için 95, 85 ve 75 MPa gerilmelerde hesaplanan değerlerle deneysel verilerin karşılaştırılması. Noktalar deneysel değerleri, eğriler ise hesaplanan değerleri temsil etmektedirler [28]



Şekil 5.57 70 MPa maksimum gerilme için orta bölgedeki çatlak uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi [28]

Cidarlar ve merkez için ayrı ayrı tanımlanan modül azalma denklemleri kompozit malzeme için birleştirilmiştir. Cidarın taşıdığı ortalama gerilme, çevrelediği merkezin çatlaklı veya çatlaksız olmasına göre maksimum ve minimum değerler gösterebilmektedir. Merkez çatlaklı yapıda olursa cidar maksimum gerilme taşımaktadır. Cidar tabakaların efektif modülleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\bar{E}_s = \frac{2a}{W} E_s' + \left(1 - \frac{2a}{W}\right) E_s \quad (5.30)$$

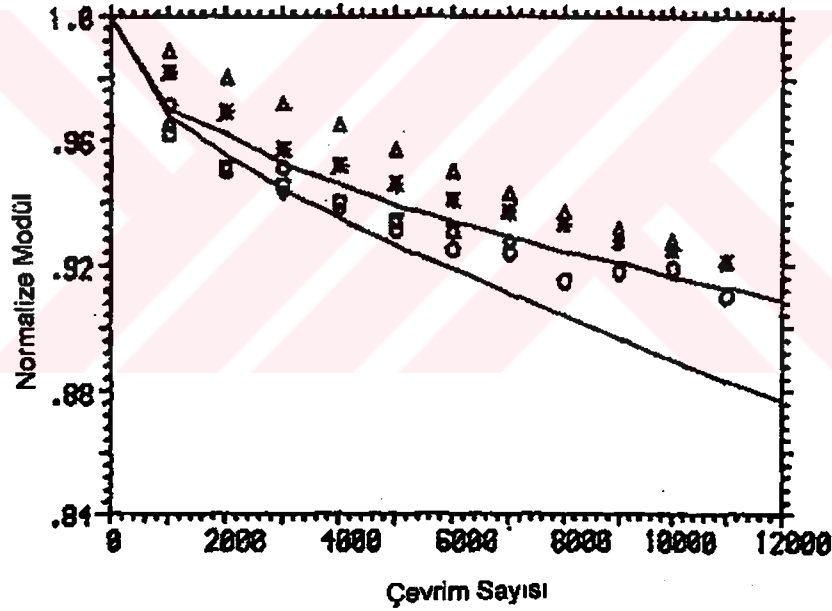
Denklem (5.28) kullanılarak "a" hesaplanabilir ve E_s' ise denklem (5.27)'de cidar tabaka tarafından taşınan gerilme için uygun değer, diğer bir deyişle yüksek veya düşük değerler kullanılarak hesaplanabilir. $\bar{E}_s$ cidar tabakanın normalize modülü, E_s' çatlaklı merkez yapıyı çevreleyen cidar tabakaların normalize modülü ve E_s ise çatlaksız merkez yapıyı çevreleyen cidar tabakaların normalize modülüdür.

Bir cidar/merkez'den oluşan kompozit numunenin modülü cidar ve merkez tabakaların katkıları ile karışımlar kuralı şeklinde açıklanabilir.

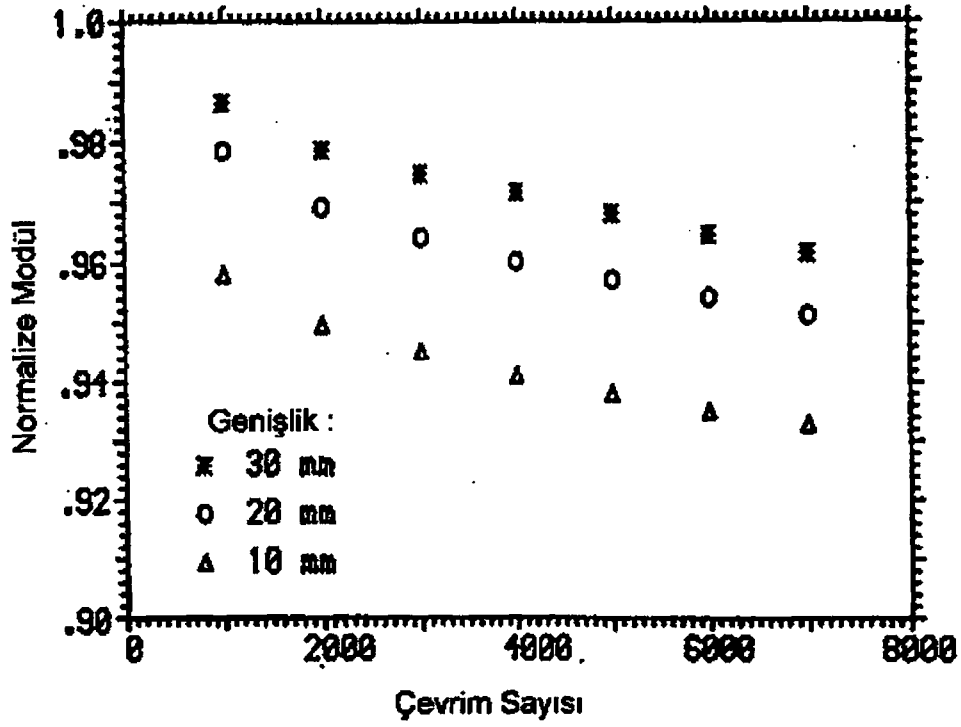
$$E = V_s \bar{E}_s + (1 - V_s) \bar{E}_c \quad (5.31)$$

E kompozitin modülü, E_s cidarın modülü ve E_c merkezin modülüdür. V_s cidarın hacimsel yüzdesidir.

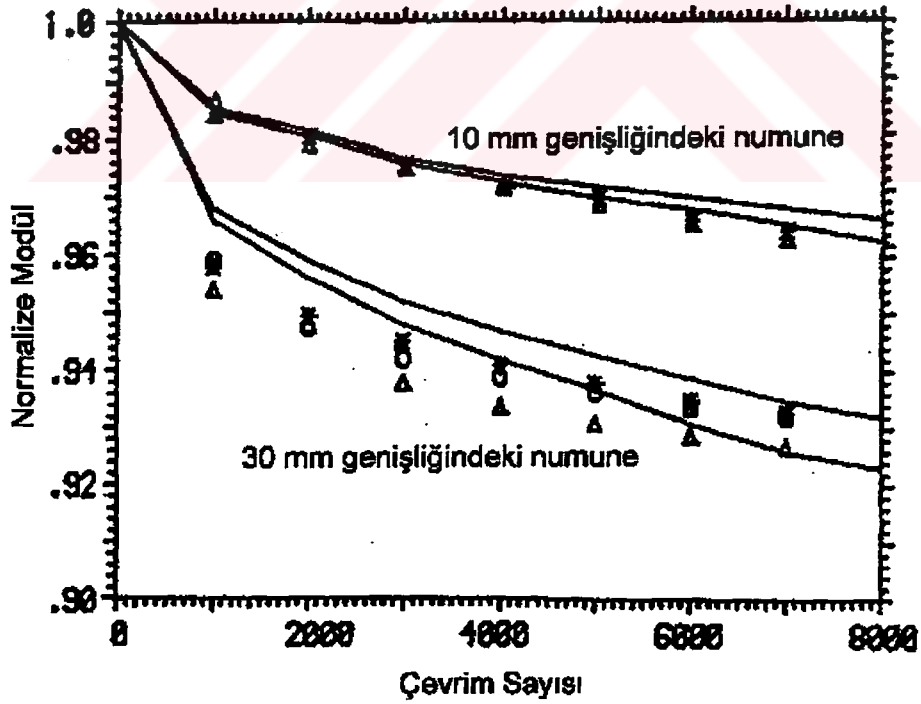
Modül azalma eğilimi doğru tahmin edildiği ve tahminler ile deneysel bulgular arasında mantıklı bir ilişki görüldüğü ifade edilmiştir (Şekil 5.58). Bulgular daha dar numuneler için belli çevrim sayılarında, normalize modül azalmasının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Numune genişliği ile modül azalması arasında güçlü bir ilişki olduğunu saptanmıştır (Şekil 5.59 ve Şekil 5.60).



Şekil 5.58 80 MPa gerilme için hesaplanan normalize modülün çevrim sayısına göre değişimi. Noktalar deneysel değerleri, eğriler ise hesaplanan değerleri temsil etmektedirler [28]



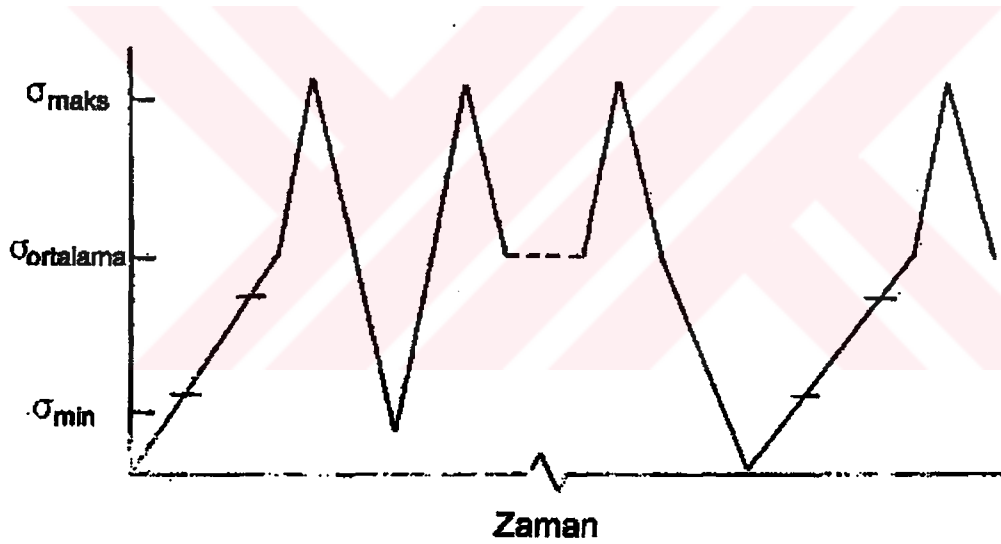
Şekil 5.59 70 MPa maksimum gerilmede üç farklı numune genişliği için normalize modüllerin çevrim sayıları ile değişimi [28]



Şekil 5.60 70 MPa maksimum gerilmede 10 ve 30 mm genişliğindeki numunelerin hesaplanan normalize modüllerinin çevrim sayıları ile değişimi. Noktalar deneysel değerleri, eğriler ise hesaplanan değerleri temsil etmektedirler [28]

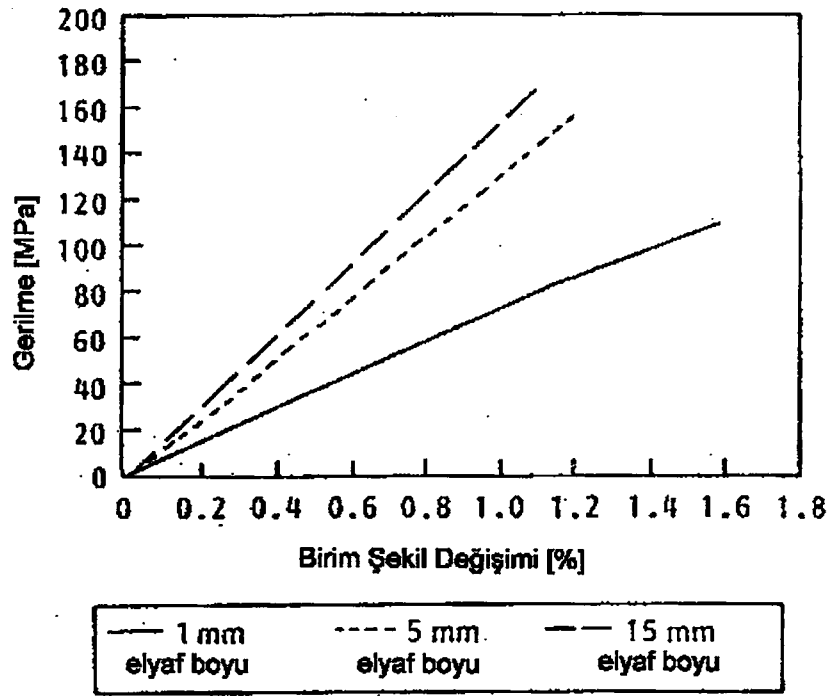
Hitchen ve arkadaşları [29] yine modül azalması ile yorulma davranışının incelenmesini kısa karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit levhalarla test etmişler ve bu çalışmalarında elyaf boyu ile yorulma dayanımının değişimini incelemişlerdir. Yük kontrollü bir yorulma testi uygulamışlar ve $R = 0,1$ ve 10 Hz frekans ve sinüzoidal dalga tipi kullanmışlardır. İlk önce her levha tipinin her gerilme seviyesinde dörder adet numune ile hasar ömrünü tespit etmişlerdir.

Bir başka test ise maksimum gerilmenin 0,8 katında, yorulma çevrimi boyunca modül azalmasını tespit etmek için gerçekleştirilmiştir. Burada ilk çekme stroğunda numune sıfırdan ortalama gerilmeye kadar yüklenirken gerilme ve birim şekil değişimi izlenmiş ve buradan önceden belirlenen şekil değişimi limitleri arasında başlangıç tanjant modülü (initial tangent modulus) hesaplanmıştır. Yorulma testi sırasında ise belli aralıklarla test kesilmiş ve bu bahsi geçen yöntemle modül ölçümü tekrarlanmıştır (Şekil 5.61).

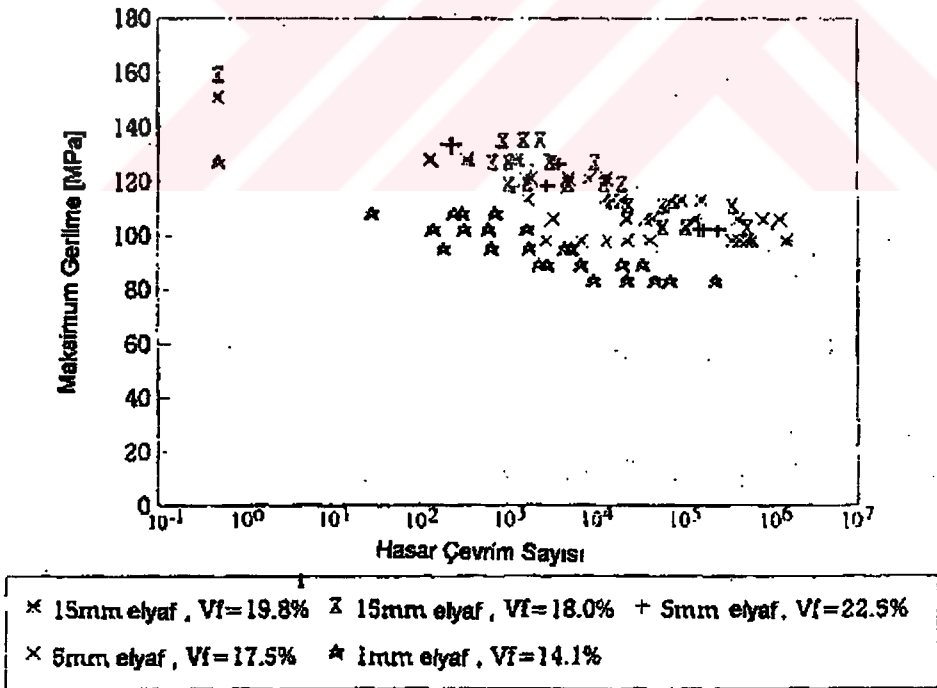


Şekil 5.61 Yorulma çevrimleri sırasında modül azalmasını izlemek için kullanılan test tekniği [29]

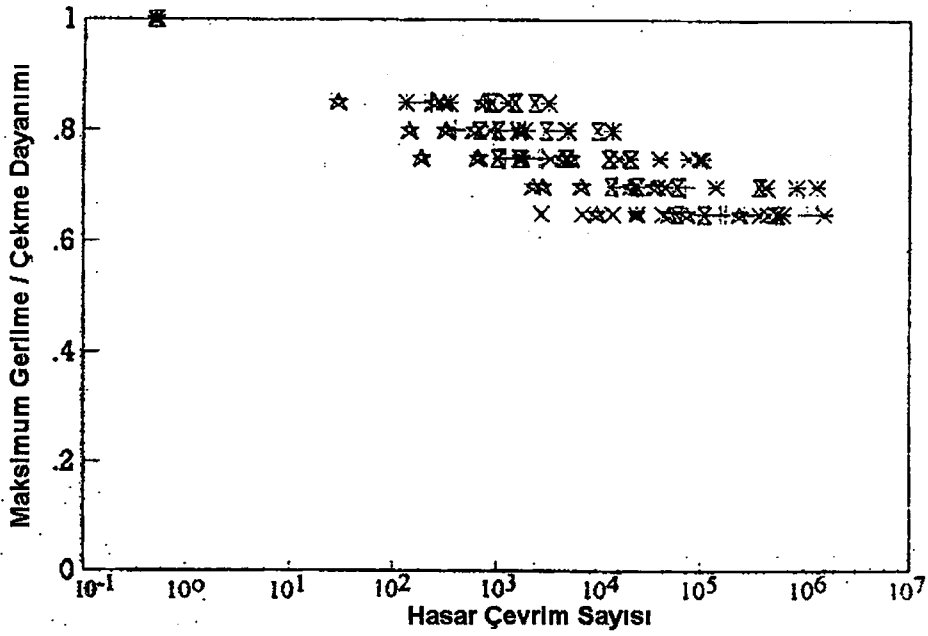
Üç farklı elyaf uzunluğuna sahip levhaların statik testlerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri tespit edilmiştir (Şekil 5.62). Tüm levhalar için azalan maksimum gerilmelere karşılık, artan yorulma ömürlerini ifade eden S-N eğrileri verilmektedir (Şekil 5.63). Değişik levhaların statik dayanımları da farklı olduğu için relatif performanslarını saptamak zordur, dolayısıyla maksimum gerilmeleri çekme dayanımlarına göre normalize edilirse daha açıklayıcı olmaktadır (Şekil 5.64).



Şekil 5.62 Değişik elyaf boyları içeren kompozitin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri



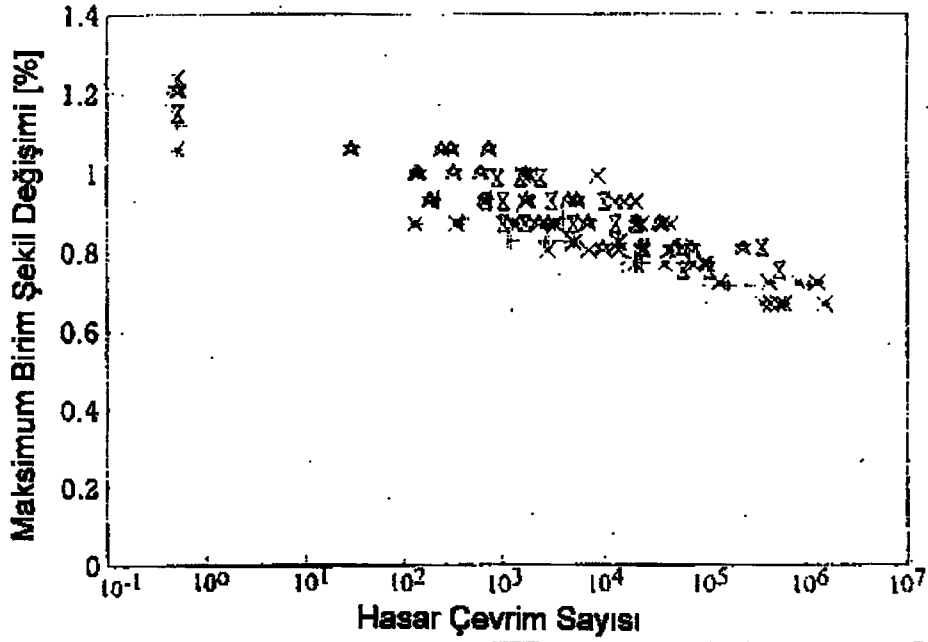
Şekil 5.63 Değişik elyaf boyları için maksimum gerilme-ömür diyagramı [29]



* 15mm elyaf, $V_f=19.8\%$ x 15mm elyaf, $V_f=18.0\%$ + 5mm elyaf, $V_f=22.5\%$
 X 5mm elyaf, $V_f=17.5\%$ * 1mm elyaf, $V_f=14.1\%$

Şekil 5.64 Değişik elyaf boyları için normalize maksimum gerilme-yorulma ömrü diyagramı [29]

Yorulma datalarını sunmanın bir alternatif yolu da maksimum birim şekil değişimi-yorulma ömrü eğrisini çizdirmektir (Şekil 5.65). Bu diyagram sürekli elyafli kompozitlerde sıkça kullanılır çünkü, yorulma çevrimi sırasında hem matris hem de elyaf aynı birim şekil değişimine maruz kalmaktadırlar, buna karşın elyaf hacim oranına bağlı olarak iki faz farklı gerilmelere maruzdurlar. Bu durum “sürekli elyaf takviyeli kompozitler”de geçerli olmasına rağmen, uygulanan yükün elyafa elyaf-matris arasında oluşan kayma etkisiyle aktarıldığı “sürekli elyafli kompozitler”de elyafların uçlarına yakın bölgeler yükün tamamını taşımazlar.

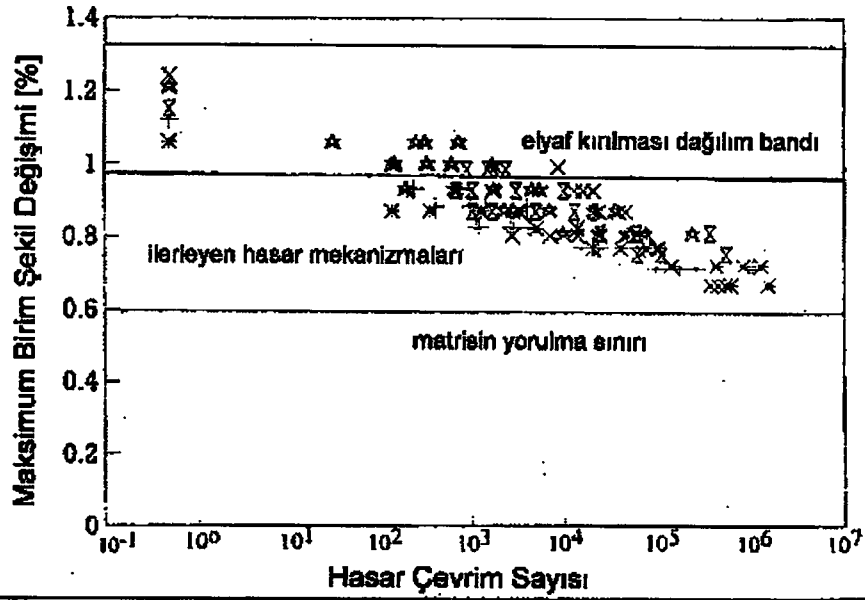


* 15mm elyaf, $V_f=19.8\%$ x 15mm elyaf, $V_f=18.0\%$ + 5mm elyaf, $V_f=22.5\%$
 x 5mm elyaf, $V_f=17.5\%$ * 1mm elyaf, $V_f=14.1\%$

Şekil 5.65 Farklı elyaf boyları için maksimum birim şekil değişimi-yorulma ömrü diyagramı [29]

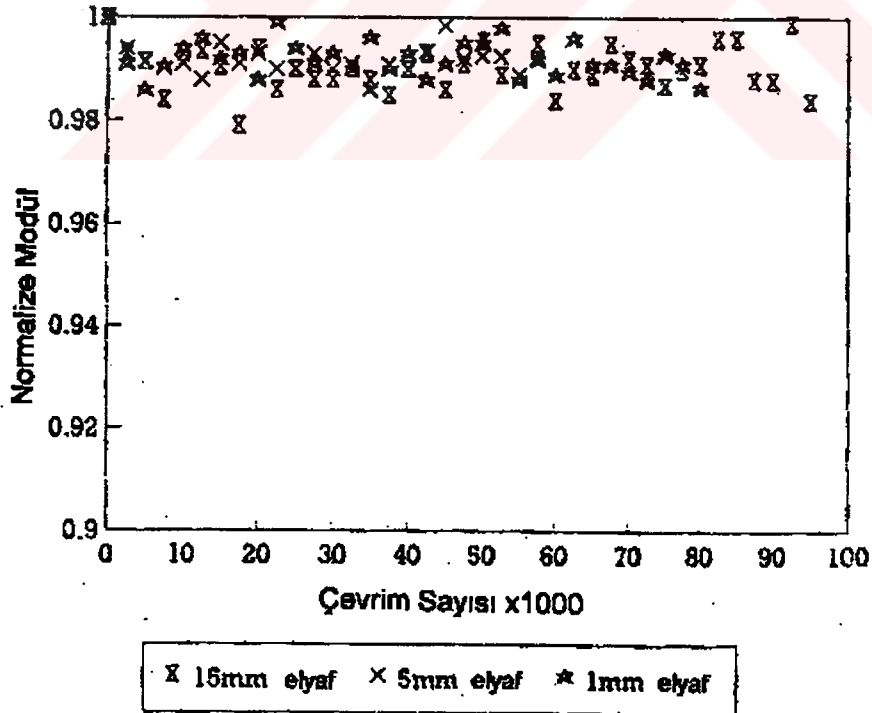
Statik hasarın birim şekil değişimlerine yakın değerlerde, etkin hasar mekanizmasının elyaf kırılması olduğu bir saçınım bandı söz konusudur (Şekil 5.66). Düşük birim şekil değişim değerlerinde yorulma limitini, matrisin yorulma limiti belirlemektedir. Bu iki band arasında elyaf-matris ayrılması ve/veya matris kırılması gibi ilerleyen hasar mekanizmaları etkindir.

Daha önce de bahsedildiği gibi hasar birikimini tespit etmenin bir yolu da modüldeki azalmanın tespiti ile mümkündür. Farklı elyaf boylarına sahip levhalarda benzer eğilim görülmüştür. Aynı zamanda önemli bir modül azalması tespit edilememiş ve numunelerin ani olarak kırıldığı görülmüştür (Şekil 5.67).



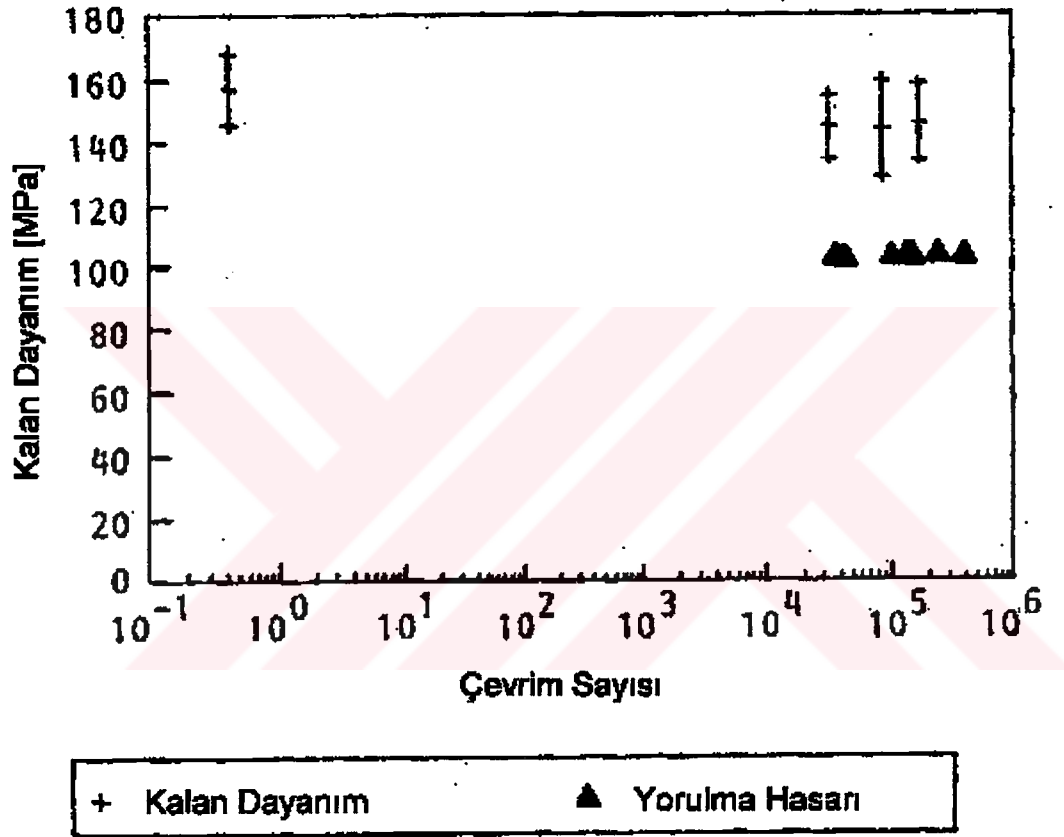
× 15mm elyaf, $V_f=19.8\%$ × 15mm elyaf, $V_f=18.0\%$ + 5mm elyaf, $V_f=22.5\%$
 × 5mm elyaf, $V_f=17.5\%$ ★ 1mm elyaf, $V_f=14.1\%$

Şekil 5.66 Farklı elyaf boyları için maksimum birim şekil değişimi-ömür dataları ve değişik hasar bölgeleri [29]



Şekil 5.67 Farklı elyaf boyları içeren levhalar için normalize edilmiş modül eğrileri [29]

Yorulma davranışını tayin edebilmek için bir başka alternatif yol ise yorulma ile değişen kalan dayanımlardır. Numuneler 0,7 maksimum dayanımda 40.000, 100.000 ve 200.000 çevrim zorlandıktan sonra çekme dayanımları ölçülmüştür. Yorulma testinin ilk aşamalarında kalan dayanımda azalma gözlenmiştir (Şekil 5.68). 40.000 ile 100.000 çevrim arasında kalan dayanım yorulma çevrim sayısından bağımsızdır, kırılma ani bir hasar modu şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu durum modül azalması testlerindeki benzer şekilde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.68 5 mm elyaf boyuna sahip levhanın kalan dayanımlarının yorulma ömrüne bağlı değişimi [29]

Hasar birikiminin muhtemel sırası şu şekilde açıklanmıştır: kompozit içinde elyaf kümeleri gibi hasar oluşumuna elverişli bölgelerde çatlaklar veya ayrılmalar oluşmaktadır. Bu hasar bölgeleri küçük olduğu için kalan dayanımlarda veya çevrim boyunca modül azalmalarında herhangi bir değişim gözlenememektedir. Bir bölgedeki çatlaklar/ayrılmalar hasar başlangıcını oluşturacak kritik büyüklüğe

ulaşırsa hasar çevrimle gittikçe ilerlemektedir. Bir kritik hasarın ilerlemesi azalan eğilimdeki yorulma dataları olarak gözlenmektedir. Statik ve yorulma hasar yüzeyleri elektron mikroskobunda incelendiğinde benzer yüzeyler görülmektedir. Bu da katastropik yorulma hasarının bir küçük hasar ile başladığı tezini doğrulamaktadır.

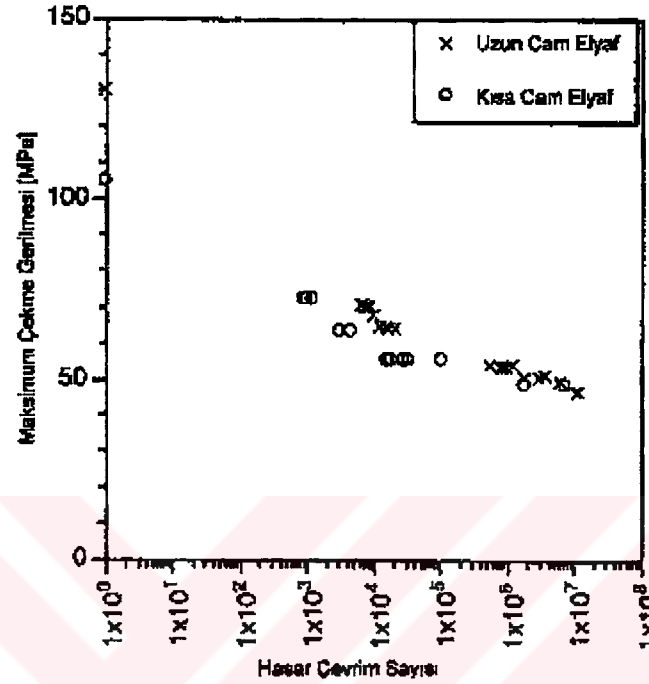
Grove ve arkadaşları [30] uzun ve kısa cam elyaf takviyeli polipropilen malzemelerin çekme ve eğilme yorulma davranışlarını incelemiştir. Bu çalışmalarında gerilme-çevrim sayısı ve hasarın mikroskobik olarak incelenmesi yöntemlerini kullanmışlardır. Kullanılan malzemeler ağırlıkça %50 uzun ve kısa cam elyaf takviyeli polipropilendir, uzun cam elyaflar boyları elyaf uzunluğu kadar kesilmiş olan 10 mm boyundaki granüllerin içerisinde bulunmaktadır. Yorulma testlerini, ASTM D638 1. tip çekme numunesi ve ASTM D671 B tipi eğilme numunesini doğrudan enjeksiyon yöntemiyle kalıplayarak gerçekleştirmişlerdir. Kalıplama sırasında özellikle uzun cam elyafların kırılmasını en aza indirmek amacıyla uygun yolluk (runner) ve giriş (gate) tasarımının yanısıra düşük geri tepme basıncı (back pressure) ve düşük enjeksiyon hızı (injection speed) kullanmışlardır. Çekme tipi yorulma testlerini MTS 810 tipi servo hidrolik test cihazında 10 Hz frekansta ve eğilme tipi yorulma testlerini 30 Hz frekansta gerçekleştirmişlerdir. Çekme tipi yorulma testlerinde belli bir maksimum çekme yükü ve düşük bir minimum çekme yükü kullanmışlardır. Düşük de olsa minimum çekme yükü kullanmalarının amacını, gerilme değeri sıfıra yaklaşınca oluşması muhtemel basma zorlamasından kaçınmak olarak belirtmişlerdir. Hasar yüzeylerini optik ve taramalı elektron mikroskobunda incelenmişlerdir. Uzun elyafların enjeksiyon kalıplama sırasında 1/7 oranında kırıldıklarını gözlemlemişlerdir.

Düşük yorulma çevrimlerinde uzun cam elyaf takviyeli polipropilen malzeme oldukça yüksek dayanım göstermiştir. Buna karşın çevrim sayısı arttıkça yorulma dayanımları birbirlerine yaklaşmaktadır (Şekil 5.69).

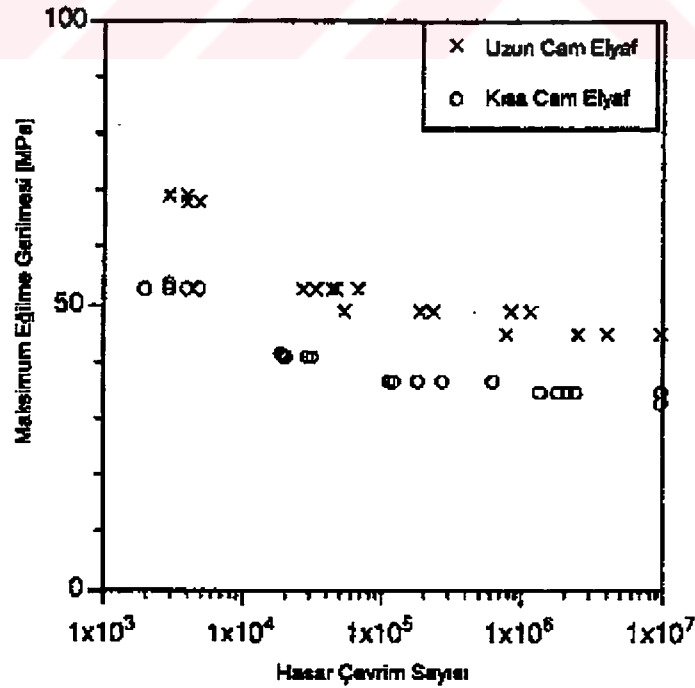
Çekme tipi zorlamada yorulma mekanizmasını şu şekilde tariflemişlerdir; önce matriste çatlak oluşmakta bunu takiben çatlak matriste ilerlemekte ve önemli derecede elyaf-matris ayrılmaları görülmektedir. Elyaf boylarının çekme tipi yorulma mekanizmasında önemli bir faktör olmadıklarını buna karşın, eğilme tipi yorulma mekanizmasını etkilediklerini gözlemişlerdir (Şekil 5.70).

Eğilme tipi yorulma koşullarında numunelerin dış yüzeylerinde oluşan maksimum çekme ve basma zorlamalarının önemli elyaf-matris ayrılmalarının yanısıra bir miktar elyaf kırılmalarına da yol açtığını belirtmişlerdir. Çatlakların bu ayrılmış ara

bölgelerden başlayarak kompozit kırılıncaya kadar içeriye doğru ilerlediğini ifade etmektedirler. Çatlağın ilerlemesinin; elyafların uzunluğuna, elyafları sıyrılma mekanizmasına, elyafların kırılmasına ve izlediği hattın daha engebeli olmasına bağlı olarak, uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin eğilme yorulma dayanımının çok yüksek olduğunu gözlemişlerdir.



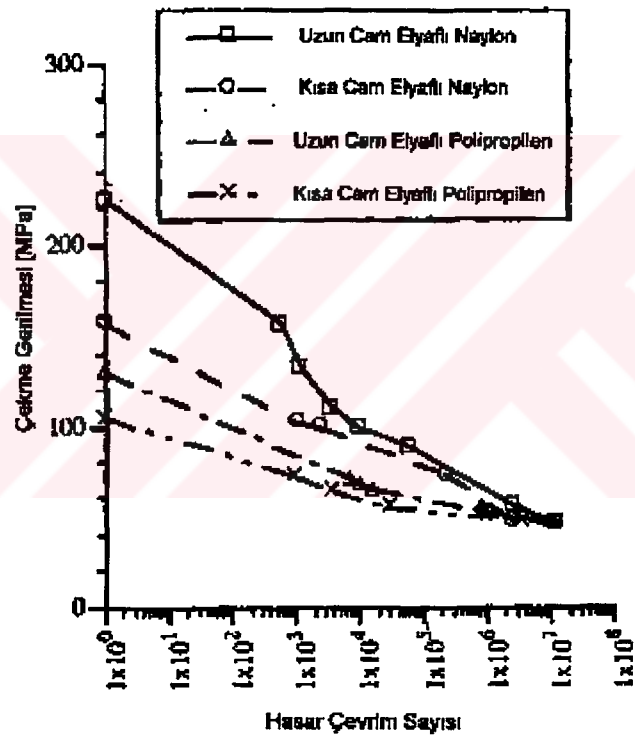
Şekil 5.69 Çekme yorulması sonuçları [30]



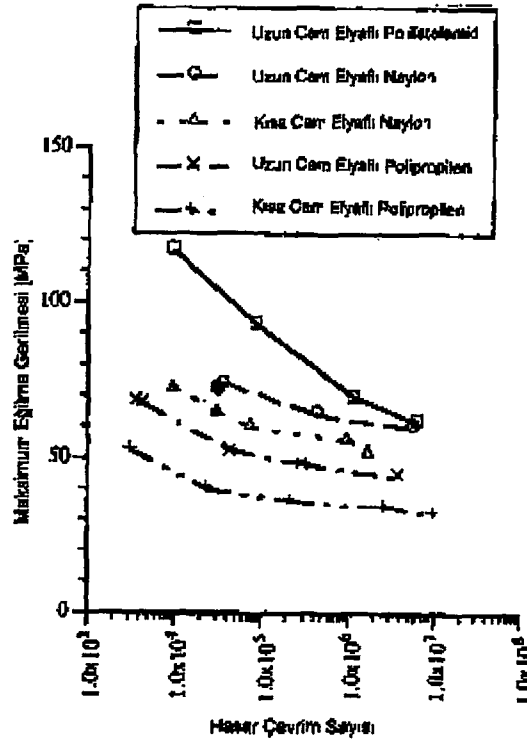
Şekil 5.70 Eğilme yorulması sonuçları [30]

Grove ve Kim [31] benzer bir çalışmada polipropilenin yanısıra uzun ve kısa cam elyaf takviyeli naylon 6.6 ve uzun cam elyaf takviyeli polifatlamidi (polyphthalamide) incelemişlerdir. Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin arayüzeylerinin (interface), cam takviyeli naylon kompozitlerin arayüzeylerinden önemli derecede daha zayıf olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 5.71).

Eğilme tipi yorulma koşullarında numunelerin dış yüzeylerinde oluşan maksimum çekme ve basma zorlamalarının naylon kompozitlerde elyafların kırılmasına, polipropilen kompozitlerde ise önemli elyaf-matris ayrılmalarına yol açtığını belirtmişlerdir (Şekil 5.72). Naylon kompozitlerde eğilme tipi yorulma koşullarında hasarın, başlangıç çatlakları veya kırılan elyaflardan kaynaklandığını belirtmişlerdir.



Şekil 5.71 Çekme yorulması sonuçları [31]



Şekil 5.72 Eğilme yorulması sonuçları [31]

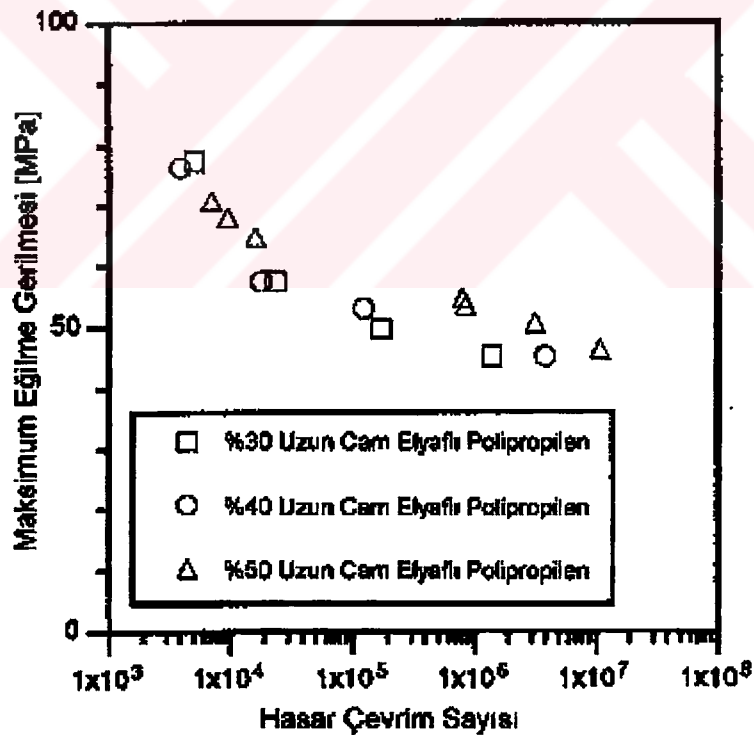
Farklı matris sistemlerinin yorulma dayanımlarının sıralanmasında, statik performanslarına benzer bir durumun görüldüğü belirtilmektedir. Naylon/cam elyaf kompozitle karşılaştırıldığında, sünekliğinin daha düşük olmasına rağmen, polifitalamid/cam elyaf kompozitin en yüksek yorulma dayanımına sahip olduğunu gözlemişlerdir. Polipropilen/cam elyaf kompozitlerin ise zayıf arayüzeyleri sebebiyle en düşük yorulma dayanımına sahip olduklarını belirtmektedirler. Polipropilen kompozitlerin zayıf arayüzeylerinin, yorulma performanslarını düşürücü çok sayıda çatlak başlangıç noktalarına yol açtığını ifade etmişlerdir.

Yine Grove ve Kim [32] bir başka çalışmalarında matris tipi ve elyaf boyunun yanısıra, matris reçinesinin molekül ağırlığı ve elyaf yüzdesinin malzemenin yorulma dayanımına etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışma uzun ve kısa cam elyaf takviyeli polipropilen ve naylon 6.6'nın yanısıra, uzun cam elyaf takviyeli polifitalamidi (polyphthalamide) kapsamaktadır.

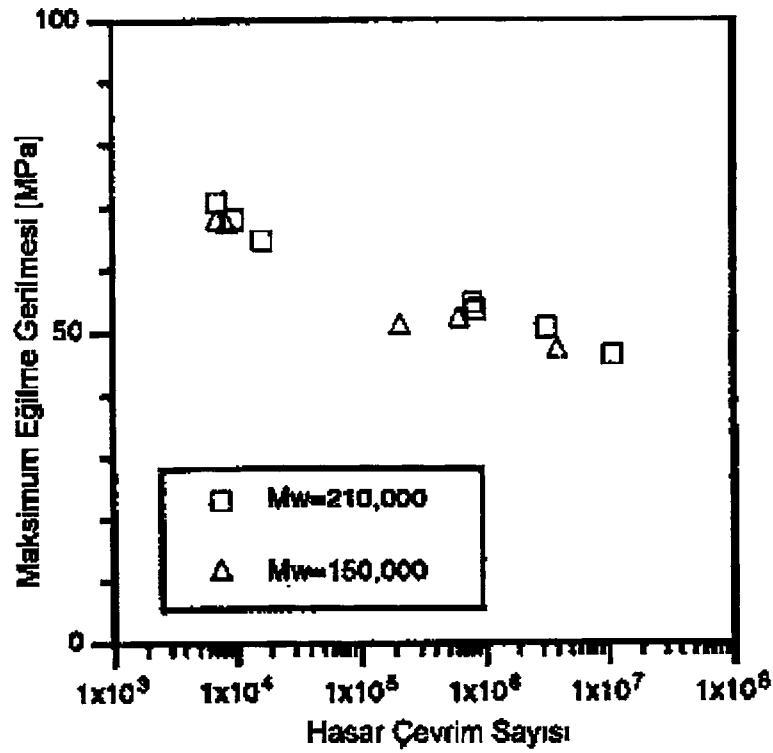
%30 ve %50 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin 1.000 ile 10.000 yorulma çevrim sayıları arasında benzer eğilme yorulma davranışını gözlemişlerdir. Buna karşın %50 cam elyaf takviyeli kompozitlerde 1.000.000 yorulma çevrim sayısının üzerinde, daha yüksek eğilme yorulma dayanımı görüldüğünü belirtmektedirler.

(Şekil 5.73). Bu durum, yüksek elyaf yüzdeli kompozitlerde daha fazla arayüzey çatlak başlangıç noktaları bulunması ve düşük elyaf yüzdeli kompozitlerde çatlak ilerleme hızının daha yüksek olması gibi birbirine zıt iki farklı durumu akla getirmektedir. Nylon kompozitler, çatlak başlangıçları arayüzeyleri içermediği ve yüksek elyaf yüzdelerinde de çatlak matris içinde daha yavaş ilerlediği için, yüksek elyaf yüzdeli nylon kompozitlerle daha iyi bir yorulma performansı gözlenmiştir.

Molekül ağırlığının eğilme tipi yorulma davranışına etkisini araştırmak amacıyla, 210.000 ve 150.000 ortalama molekül ağırlıklarından oluşmuş iki adet %50 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin yorulma davranışları incelenmiştir. Daha gevrek bir matrisin çatlak ilerleme hızını ters yönde etkileyebileceği düşünülmesine rağmen, düşük molekül ağırlıklı bir malzemenin benzer eğilme tipi yorulma davranışını gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 5.74). Düşük molekül ağırlıklı polimerin, daha iyi bir arayüzey bağı yaratılmasına katkıda bulunarak beklenen çatlak ilerleme hızındaki artışı dengelediği varsayılmaktadır.



Şekil 5.73 Cam elyaf yüzdesinin uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin eğilme yorulma davranışlarına etkisi [32]



Şekil 5.74 Molekül ağırlığının %50 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin eğilme yorulma performanslarına etkisi [32]

Dally ve Carrillo [33] enjeksiyon yöntemiyle üretilmiş ve cam elyafla kuvvetlendirilmiş değişik termoplastiklerin yorulma davranışlarını belirleme konularında önemli katkılarda bulunmuşlardır. Yorulma çalışmaları için iki farklı malzeme parametresi kullanmışlardır. Bu parametreler takviye amacıyla kullanılan süreksiz cam elyafların boyları ve matris malzemelerinin dayanım-uzama karakteristikleridir.

Elyaf uzunluğunun yorulma davranışı üzerine etkisini incelemek amacıyla, naylon 6/6 matris malzemesi olarak kullanılarak uzun ve kısa olmak üzere iki farklı elyaf boyu kullanılmıştır.

Geniş bir matris karakteristiğini kapsamak amacıyla ise üç farklı termoplastik tercih edilmiştir. Bu çalışmada naylon (nylon) yüksek dayanımının yanısıra nispeten büyük uzama göstermesi, polistiren (polysytrene) oldukça zayıf matris özellikleri diğer bir deyişle düşük dayanımın yanısıra düşük uzama göstermesi ve polietilen (polyethylene) ise düşük dayanımın yanısıra yüksek uzama özelliği göstermesi nedeniyle seçilmişlerdir. Dört malzeme için kullanılan elyaf hacim oranı ağırlıkça %40 olmuştur.

Tüm yorulma testleri iki istasyonlu eksenel gerilmeli bir yorulma test cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde düzensiz değişen çekme gerilmesi uygulanmış, gerilme oranı $R=0,05$ ve frekans ise 600 çevrim/dakika olarak seçilmiştir.

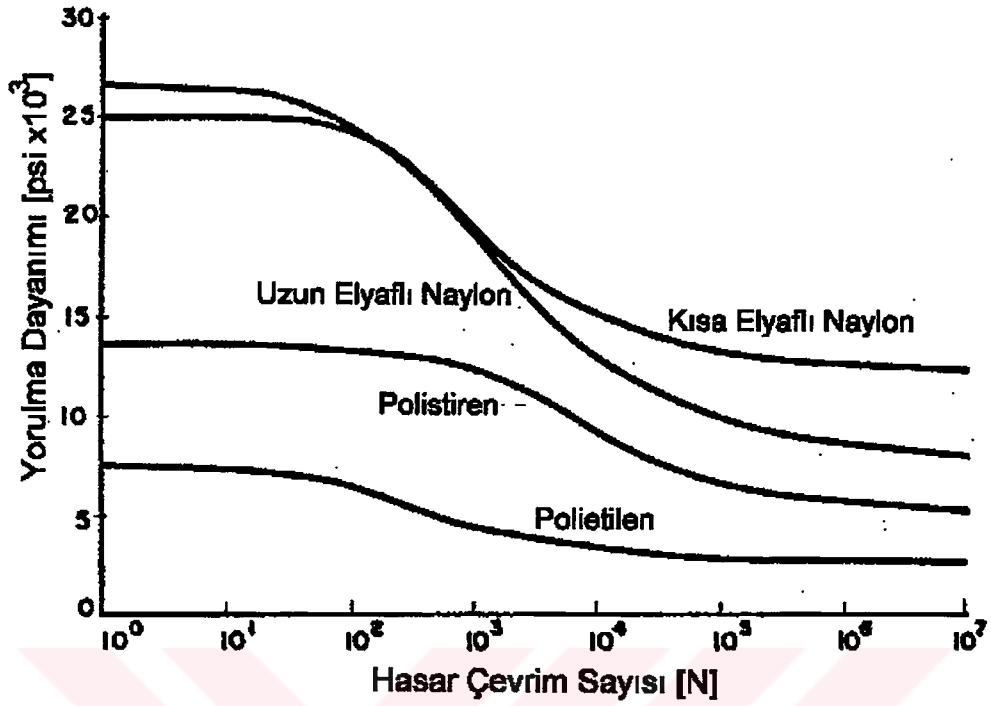
Yaptıkları çalışmalar sonucunda matris malzemesinin hem çekme hem de yorulma dayanımları üzerinde, takdir edilir bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek dayanım ve mükemmel deformasyon özellikleri nedeniyle naylon, bir matris malzemesi olarak diğer termoplastiklere göre üstün özellikler göstermektedir. Bundan başka $N>1.000$ çevrim için kısa elyaf takviyeli naylon kompozitlerin, uzun elyaf takviyeli naylon kompozitlerden daha üstün yorulma performansı gösterdiğini belirtmişlerdir (Şekil 5.75).

Takviyeli termoplastiklerin sürekli yorulma hasarı (progressive fatigue damage) bir miktar yorulmaya uğramış numunelerin kalan çekme dayanımlarında (residual tensile strength) azalma olarak ifade edilmektedir (Şekil 5.76). Kuvvetlendirilmiş polietilen, yorulma kaynaklı bir hasar nedeniyle dayanımında önemli bir azalma göstermemektedir (Şekil 5.77). Çok düşük çevrim sayılarında uzun elyaf takviyeli naylon ve polistiren malzemelerin dayanımlarında küçük yüzdelerde artış gözlenmiştir. Bu dayanım artışının kısa elyaf takviyeli naylon'da görülmemesi nedeniyle, söz konusu durumun elyaf dağılımı ile ilgili olduğu varsayılmıştır.

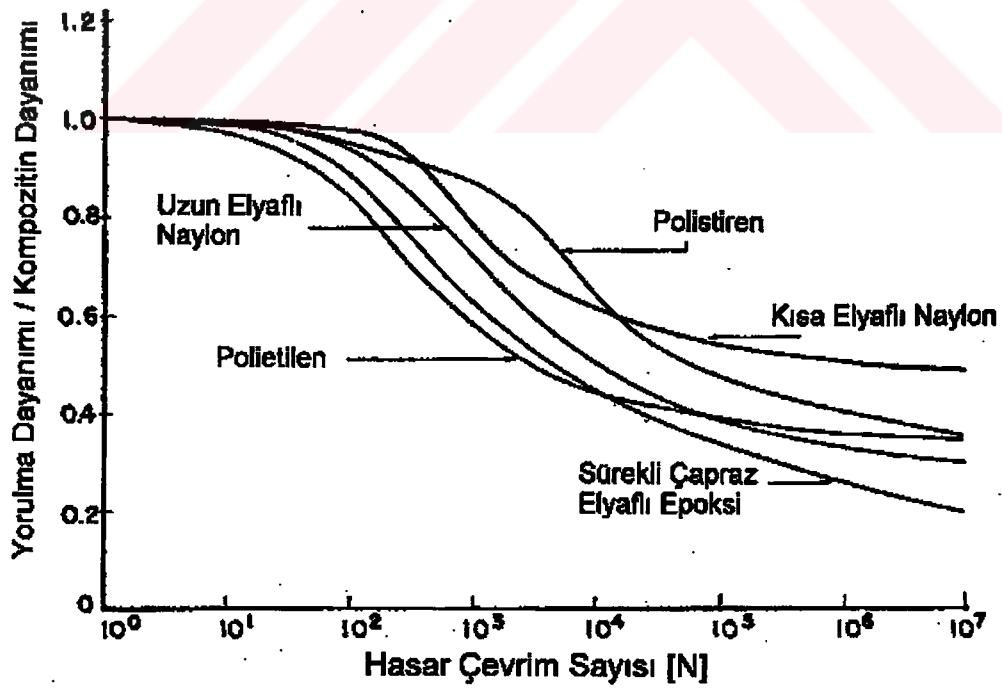
Dört kompozitin yorulma mekanizmaları birbirlerinden farklıdır. Mekanizmadaki bu farklılıklar matrisin karakteristikleri ve takviyelerin boyları ile ilgilidir. Yorulma çatlaklarının ilerlemesi, elyaf dağılımı ve matris malzemesinin tokluğu ile kontrol edilir.

Yorulma hasarı tüm malzemelerde ayrılma (debonding) mekanizması ile başlar. Uzun elyaf takviyeli naylon'da çatlaklar, yalnız cam elyafların yüksek oranda bulunduğu bazı yerel bölgelerde başlamakta ve ilerlemektedirler. Kısa cam elyaf takviyeli naylon'da hasar çokca bulunan ve nispeten üniform dağılmış son derece yerel alanlarda gözlenebilir. Naylon matriste çatlak ilerlemesi son derece sınırlı olmuştur. Elyafı kuvvetlendirilmiş polistiren'de çok sayıda nispeten küçük çatlaklar gözlenmiştir. Çatlaklar matrisin düşük tokluğunu ifade eden reçine zengin (resin-rich) bölgelere doğru kolayca ilerlemektedirler. Kuvvetlendirilmiş polietilenin matrisinde hiç çatlakla rastlanmamıştır ve hasar büyük ayrılmalar nedeniyle olmaktadır. Bu nedenle gevrek özelliği ve kılcal çatlamaya (craze) karşı eğilimi nedeniyle polistiren hariç, tüm kuvvetlendirilmiş termoplastiklerin yorulma

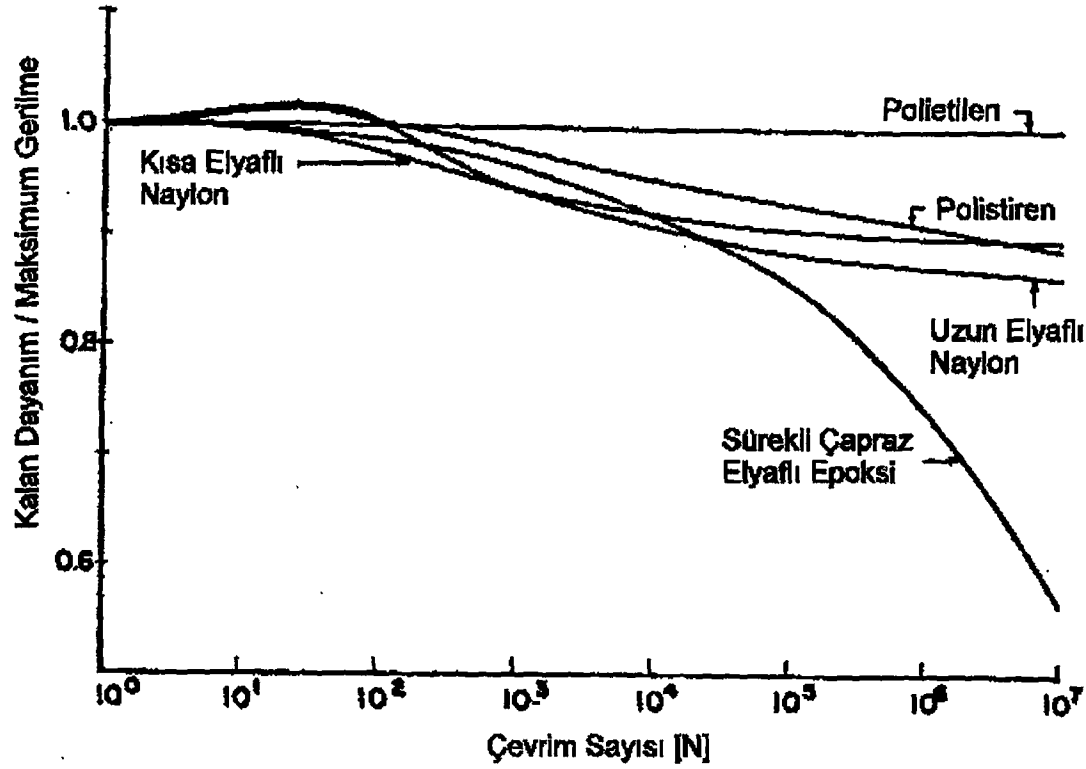
dayanımlarının matris ve elyaf arasındaki bağlanma dayanımını iyileştirerek artırılabilceği açıktır.



Şekil 5.75 Kuvvetlendirilmiş termoplastiklerin S-N eğrileri [33]



Şekil 5.76 Yorulma nedeniyle dayanım düşüşü [33]



Şekil 5.77 Farklı kompozitler için dayanım oranları [33]

5.2. Isıl Yorulma

Dao ve Dicken [34] daha önceki çalışmalarında talk dolgulu polipropilenin yorulma davranışına ait önemli bulgular edinmişlerdir (Şekil 5.78).

Bu çalışmalarında histerizis eğrisi altında kalan alanın, o çevrim sırasında kaybolan enerjiyi gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bu enerjinin, ısı şeklinde yayılan ve numunenin kırılması için kullanılan olmak üzere parçalara ayrılabilceğini belirtmişlerdir.

$$E_1 \rightarrow E_D + E_T + E_F \quad (5.32)$$

Bu formüldeki E_1 : kayıp enerjiyi, E_D : iletim (conduction) ve ısıtım (convection) yoluyla yayılan enerjiyi, E_T : numune tarafından yutulan enerjiyi ve E_F : numunenin kırılması için kullanılan enerjiyi ifade etmektedir. Dolayısıyla yayılan enerji olan $E_D + E_T$ analitik olarak saptanabilirse, kırılma enerjisinin hesaplanabileceğini ifade etmişlerdir.

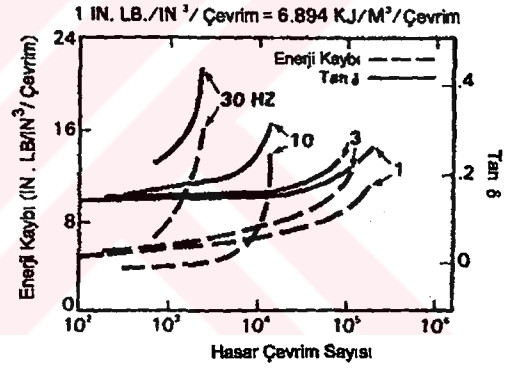
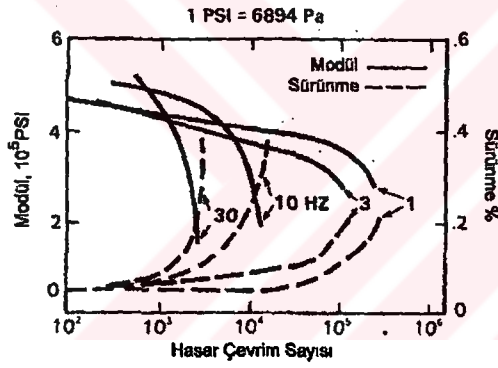
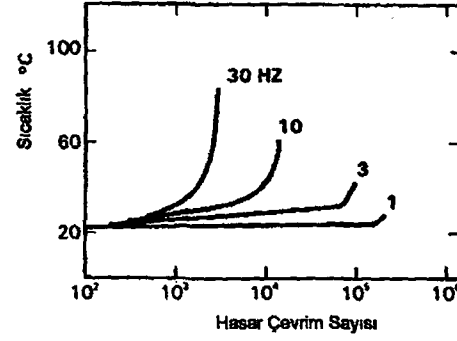
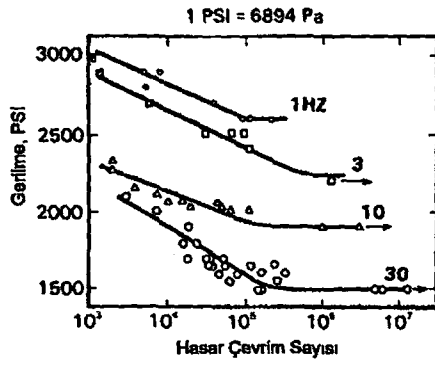
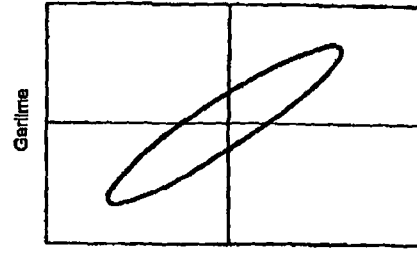
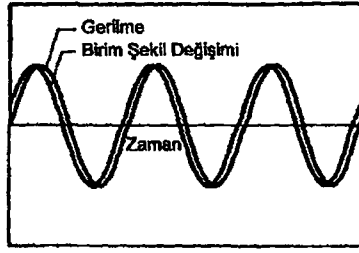
Yayılan enerji olan $E_D + E_T$ 'yi hesaplayabilmek amacıyla eksenel yorulma sırasındaki ısı transferinin bir modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. ANSYS sonlu

elemanlar programı yardımıyla üç boyutlu, doğrusal olmayan (nonlinear), süreksiz bir ısı analiz gerçekleştirilmiştir.

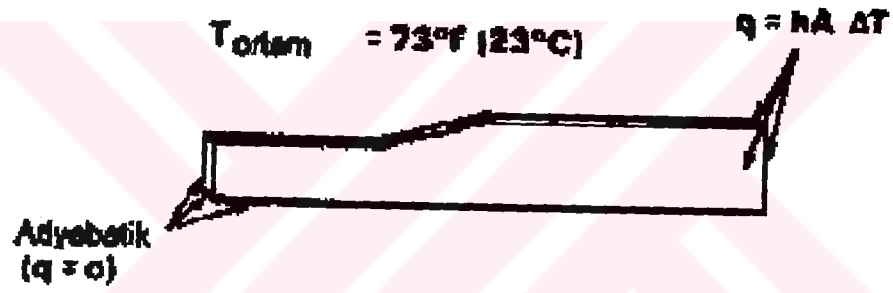
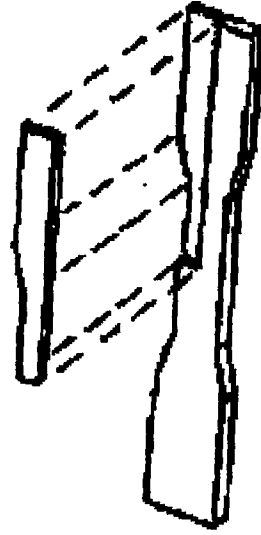
Deneyler %40 talk dolgulu polipropilen malzemeden doğrudan kalıplanarak elde edilen ASTM D638 çekme numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 10 Hz frekans, sıfır ortalama gerilme ve sinüzoidal yükleme kullanılmıştır. Test süresince deney numunesinin uzunluğu boyunca olan sıcaklık dağılımı, sıcaklıkların bir monitörde renkler yardımıyla ifade edildiği bir “Termovision” kızıl ötesi kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Kullanılan modeli basitleştirmek amacıyla 1/8 simetri kullanılmışlardır (Şekil 5.79).

Modelde kullanılan 68 adet eleman eşparametrik (isoparametric) ısı katı birimlerden oluşmuşlardır (Şekil 5.80).

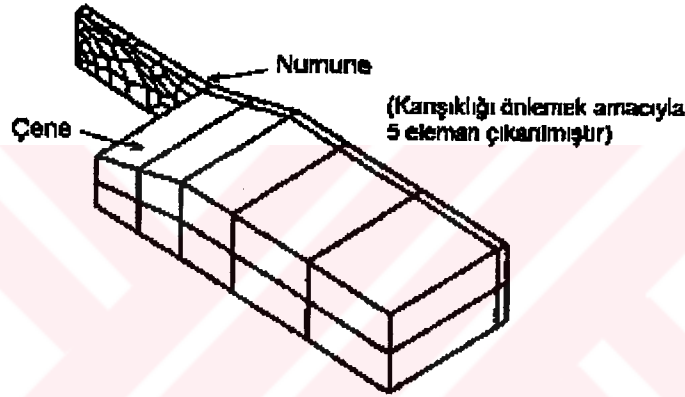
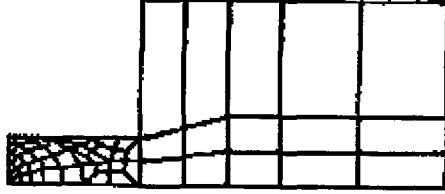
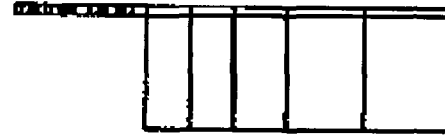




Şekil 5.78 %40 talk dolgulu polipropilenin eksenel yorulma testi sonuçları [34]



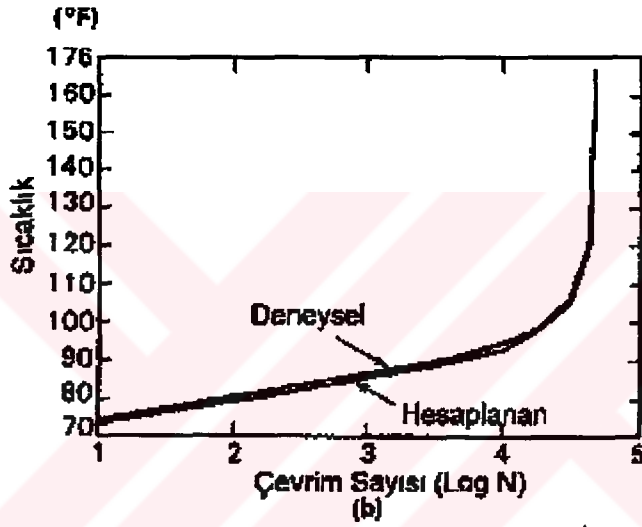
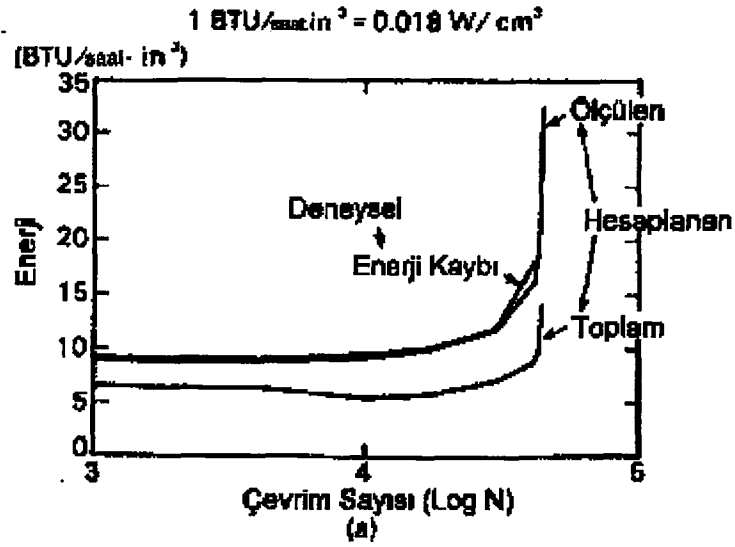
Şekil 5.79 Modelin simetrisi ve sınır koşulları [34]



Şekil 5.80 Sonlu eleman modeli [34]

Yorulma testinin başlangıç safhalarında hiç çatlak tespit edilememiş ve kaybedilen tüm enerji ısı olarak açığa çıkmıştır. Bir çatlak oluştuğunda ve ilerlediğinde kayıp enerjinin bir kısmı çatlak açmak ve ilerletmek için kullanılmaktadır. Yorulma testinin sonlarına doğru ise, çatlak açmak için kullanılan kayıp enerji kısmı artmaktadır.

Ölçülen enerji oluşumunun analitik değeri ve toplam enerji oluşumunun yanısıra test boyunca ölçülen enerji kaybı (Şekil 5.81-a)'da görülmektedir. Test numunesinin burkulması (buckled) ve test sırasında kırılma olmaması nedeniyle kırılma enerjisi gözlenememiştir, ayrıca kayıp enerji ve ölçülen enerji oluşumu eğrileri birbirlerini çok yakın takip etmektedirler. (Şekil 5.81-b)'de ise test numunesinin merkezinde hesaplanan ve deneysel olarak bulunan sıcaklık artışları görülmektedir.



Şekil 5.81 Yorulma testi sırasında oluşan enerji artışı, enerji kaybı ve sıcaklık artışı [34]

Yazarlar yukarıda özetlenen çekme-basma tipi yüklemeli ısı transferinin modellenmesi sırasında meydana gelen burkulmanın çalışmalarını karmaşıktırdığını belirtmişlerdir. Daha iyi anlaşılır bir ısı transferi prosesi için, burkulmanın oluşmayacağı ve çatlak başlangıcı ve ilerlemesinden daha fazla emin olunabileceği çekme-çekme tipi bir yükleme durumunun modellenmesinin faydalı olacağı belirtilmiştir.

5.3. Modelleme Çalışmaları

D'Amore ve arkadaşları [35] statik çekme ve eğilme testleri yardımıyla malzemelerin yorulma davranışlarını modellemeye çalışmışlardır. Çalışmalarında malzeme olarak hacimce %20 süreksiz kısa cam elyaf takviyeli polipropilen kullanmışlardır. Elyaf boyları 100 µm boyundadır. Eğilme tipi yorulma testlerinde 0,8 ve 2 Hz arasında değişen frekanslarda, R=0,5 gerilme oranı ve sinüzoidal yükleme kullanmışlardır. Çekme tipi yorulma testlerinde ise 1-2 Hz arasında değişen frekanslarda çalışmışlardır. Hem eğilme hem de çekme statik testlerinde ise çene hızı olarak 100 mm/dakika kullanarak yorulma testleriyle benzerlik kurulmasına çalışmışlardır.

Hipotezde öne sürülen modelin başlangıç noktası, yorulma nedeniyle malzeme dayanımının sürekli olarak üstel bir şekilde azalacağıdır.

$$\frac{d\sigma_n}{dn} = -a \cdot n^{-b} \quad (5.33)$$

σ_n n çevrim sonunda kalan malzeme dayanımı, a ve b ise pozitif tanımlı sabitlerdir. “a” sabitinin gerilme genliğinin $\Delta\sigma$ 'ya lineer olarak bağlı olduğu varsayılmıştır.

$$a = a_0 \cdot \Delta\sigma \quad (5.34)$$

Burada a_0 malzeme ve yükleme koşullarına bağlı bir sabit ve $\Delta\sigma$ uygulanan maksimum (σ_{maks}) ve minimum (σ_{min}) gerilmeler arasındaki farktır. Denklem (5.34) denklem (5.33)'de yerine konularak, σ_n 'i bulmak için denklem (5.33) integre edilir. Bu takdirde $n=1$ sınır koşulu için σ_0 malzemenin başlangıç dayanımı olmak üzere, $\sigma_n=\sigma_0$ bulunur. Benzer şekilde hasar anındaki kritik çevrim sayısı N olmak üzere $n=N$ için $\sigma_n=\sigma_{maks}$ bulunur. Gerilme oranını ($R=\sigma_{min} / \sigma_{maks}$) yerine koyarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$N = \left[1 + \frac{1}{\alpha \cdot (1 - R)} \cdot \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{maks}} - 1 \right) \right]^{1/\beta} \quad (5.35)$$

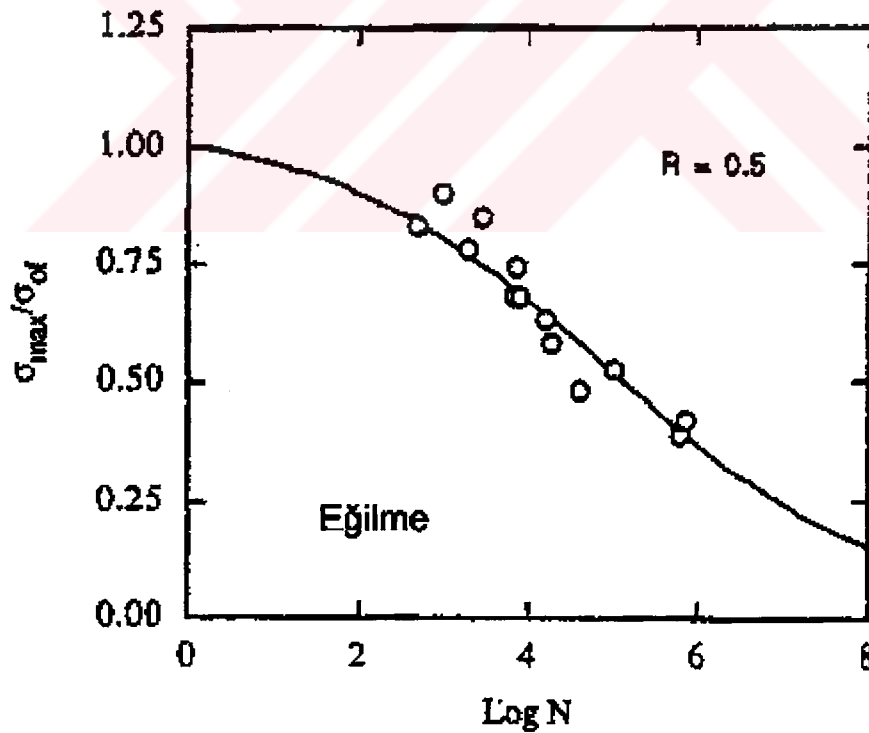
Yukarıdaki eşitlikteki α ve β yalnızca malzeme ve yükleme koşullarına bağlı bilinmeyen sabitlerdir. α ve β sabitlerini hesaplamak amacıyla (5.35) denklemi yeniden düzenlenir.

$$\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{1-R} = \alpha \cdot (N^\beta - 1) \quad (5.36)$$

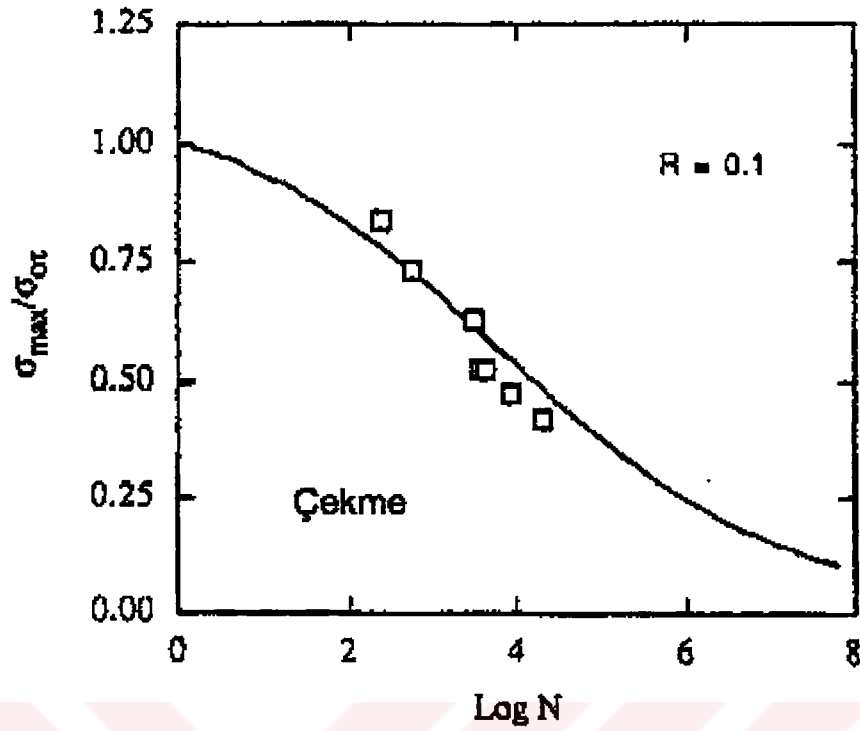
(5.36) numaralı denklemin sol tarafının değeri K ile ifade edilerek tüm yorulma dataları için $(N^\beta - 1)$ göre çizdirilmiştir. Bu grafikte α değeri doğru çizginin eğimi olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 5.82'de normalize edilmiş maksimum uygulanan gerilme $\sigma_{\max}/\sigma_0$ yorulma ömrü N olmak üzere yarı logaritmik bir grafikte gösterilmektedir. Burada numuneler $R=0,5$ olmak üzere dört nokta eğilme tipi bir yüklemeye maruz bırakılmışlardır.

Eğilme testinden elde edilen α ve β sabitleri $R=0,1$ değerinde çekme gerilmesine maruz numunelerin yorulma davranışlarını tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 5.83'de dolu çizgi teorik değerleri, data noktaları ise deneysel bulguları ifade etmektedir. Teori yüksek çevrimlerde bir miktar yüksek yorulma ömürleri öngörmesine rağmen deneysel datalarla iyi bir uyum sergilemektedir.



Şekil 5.82 Eğilme tipi yorulma zorlamasında normalize maksimum gerilmenin hasar çevrim sayısına göre değişimi. Eğri teorik olarak hesaplanmıştır [35]



Şekil 5.83 Çekme tipi yorulma zorlamasında normalize maksimum gerilmenin hasar çevrim sayısına göre değişimi. Eğri teorik olarak hesaplanmıştır [35]

Statik çekme ve eğilme testleri sonucunda yükleme koşulları farklı olmasına rağmen tüm numuneler benzer hasar özelliklerini göstermişlerdir. Matrisin çok yüksek şekil değişim hızında hasara uğraması neticesinde, herhangi bir mikro çatlak oluşumu gözlenmediği ifade edilmiştir. Çekme testinde hasar, son çevrimler sırasında numunenin tüm genişliği boyunca hızla yayılan tek bir çatlak yüzünden gerçekleşmiştir. Eğilme tipi yükleme sırasında da numunelerin çekme zorlamasına maruz kalan taraflarında benzer bir çatlak oluşmakta ve hızla ilerlemektedir. Dolayısıyla çekme ve eğilmede benzer temel mekanizmalar tarafından yönlendirilen ani hasarlar gözlenmiştir.

5.4. Yorulma Çatlağı İlerlemesi Çalışmaları

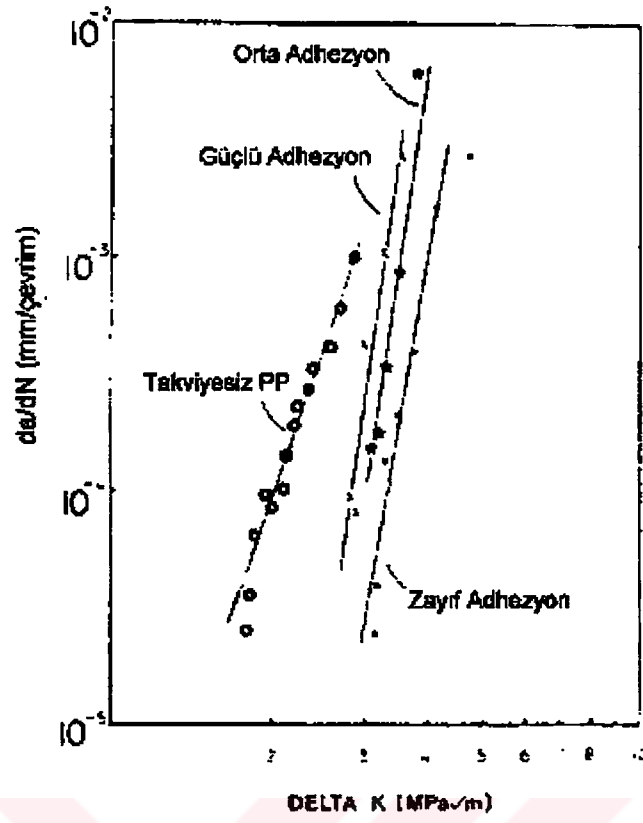
Carling ve arkadaşları [36] elyaf yönlenmesinin ve arayüzey bağlanmasının kısa cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerde yorulma çatlağı ilerlemesine etkilerini araştırmışlardır. Polipropilen olarak molekül ağırlığı 250.000 ve kristalinite oranı

DSC (differential scanning calorimetry) ile %33 X-ray difraksiyon (X-ray diffraction) ile %50 olarak ölçülmüş bir matris kullanmışlardır. Güçlü ve orta seviyede bağlanma yaratmak amacıyla hem işlem görmüş hem de işlem görmemiş, ağırlıkça %28 ve hacimce %12 oranında cam elyaf yukarıda bahsedilen polipropilenle karıştırılarak, elyafların boylamasına dizilmesini sağlayacak çubuk formu şeklinde ekstrüderden geçirilmiştir. Daha sonra kırılmış çubuk kesitleri bir yönde dizilerek 6 mm kalınlığında plakalar oluşturacak şekilde kalıplanmış ve çentikli kompakt çekme (compact-tension) numuneleri talaşlı işleme ile elde edilmiştir. Yükleme yönüne paralel yönde elyaf içeren numunelerin her iki yüzlerine, çatlağın çentik yönünde ilerlemesini sağlamak amacıyla 0,5 mm derinliğinde kanal açılmıştır. Deneylerde sinüzoidal dalga formu, minimum/maksimum yükleme oranı 0,1 ve 10 Hz frekans test şartları kullanılmıştır.

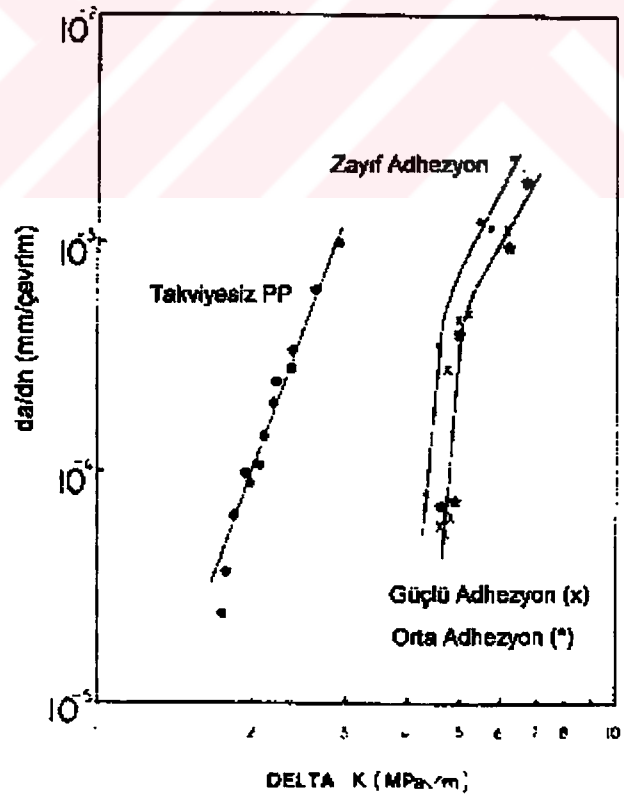
Cam elyaflar hemen tüm koşullarda matrisin “yorulma çatlağı ilerlemesi”ne (YÇİ’ne) karşı dayanımını arttırmaktadırlar (Şekil 5.84 ve Şekil 5.85). Böylece belli bir ΔK için çatlak daha yavaş ilerlemektedir. Elyaflar zorlama yönüne dik olarak dizildikleri takdirde, arayüzey bağlanmasının beklenmeyen bir etkisi dikkati çekmektedir. Bu etki YÇİ’ne karşı dayanımın, arayüzey bağlanmasının açısı ile ters orantılı olarak değişmesidir. Bu durumun tersine elyaflar zorlama yönüne paralel oldukları takdirde ise, numunelerin YÇİ’ne karşı dayanımları orta ve kuvvetli bağlanma için yaklaşık olarak aynı fakat her ikisi de zayıf bağlanmadan daha iyidir. Bu takdirde kuvvetli bağlanma içeren numunelerde kırılma kaçınılmaz bir şekilde elyaflar boyunca, bir başka deyişle yarıkların dışında gerçekleşmektedir.

Elyafların zorlama yönüne dik olarak dizildikleri numunelerde hasar bölgesinin boyutları azalan arayüzey bağlanma miktarı ile artmıştır. Buna karşın, elyafların zorlama yönüne paralel olarak dizildikleri numunelerde hasar bölgesinin boyutları bağlanmanın kuvvetinden bağımsızdır. Orta seviyede bir bağlanma miktarı iyi bir YÇİ dayanımı için yeterlidir.

Hızlı kırılma durumu hariç, yavaş çatlak ilerlemesi sırasında hemen tüm koşullarda matriste önemli derecede hasar tespit edilmiştir. Yavaş çatlak ilerleme bölgelerindeki elyaf yüzeylerinin düzgün ve pürüzsüz olduğu gözlenmiştir.



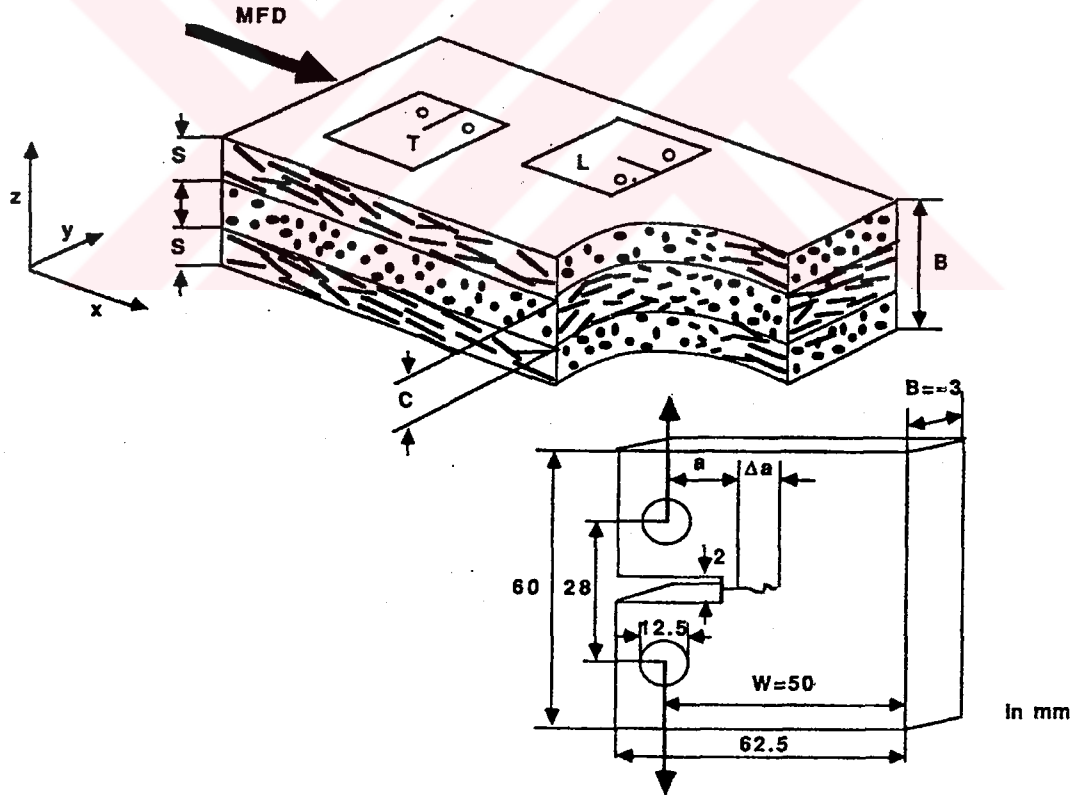
Şekil 5.84 Paralel yönlenmiş cam elyafların ve bağlanma kuvvetinin yorulma çatlakları ilerlemesine etkisi [36]



Şekil 5.85 Dik yönlenmiş cam elyafların ve bağlanma kuvvetinin yorulma çatlakları ilerlemesine etkisi [36]

Karger-Kocsis ve arkadaşları [37 ve 38] enjeksiyonla kalıplanan kısa ve uzun cam elyaf takviyeli polipropilen'in yorulma ve hasar davranışlarını araştırmışlardır. Bu çalışmalarında kısa ve uzun cam elyaf takviyeli polipropilen malzemeyi, film yolluk yardımıyla enjeksiyon yöntemiyle kalıplamış ve $160 \times 160 \times 3 \text{ mm}^3$ ölçülerinde temin ettikleri plakaları kullanmışlardır. Kısa ve uzun cam elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan nominal elyaf boyları ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve hacimce %3,9, %8,3, %13,4, %19,4'tür. Proses parametreleri arasında enjeksiyon hızı, kalıplanan parçalarda elyaf düzenlenmesi üzerine önemli rol oynamaktadır. Bu etkiyi incelemek amacıyla ağırlıkça %40 uzun cam elyaf takviyeli polipropilen malzeme düşük ve yüksek enjeksiyon hızlarında kalıplanmışlardır.

Kompakt çekme numuneleri enjeksiyonla kalıplanmış plakalardan işlenerek çıkartılmıştır (Şekil 5.86). Başlangıç çentiği kalıp doldurma yönüne paralel olarak hazırlanan numuneler "L" ve dik olarak hazırlanan numuneler ise "T" olarak adlandırılmıştır (Şekil 5.86).

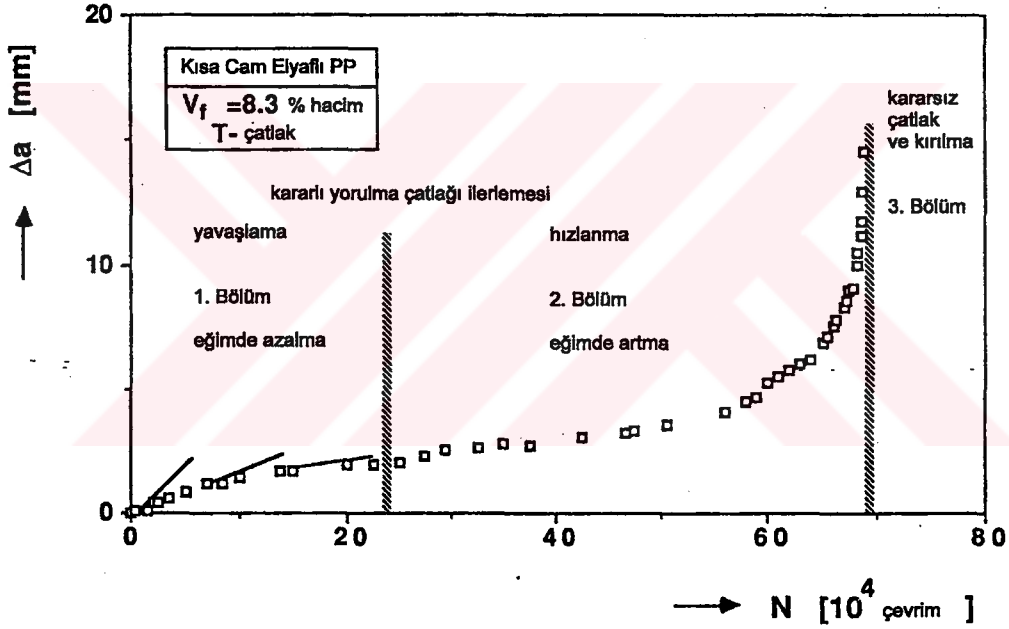


Şekil 5.86 Enjeksiyonla kalıplanmış plakalardan işlenerek çıkartılan kompakt çekme numunelerinin boyutları ve adlandırılmaları [38]

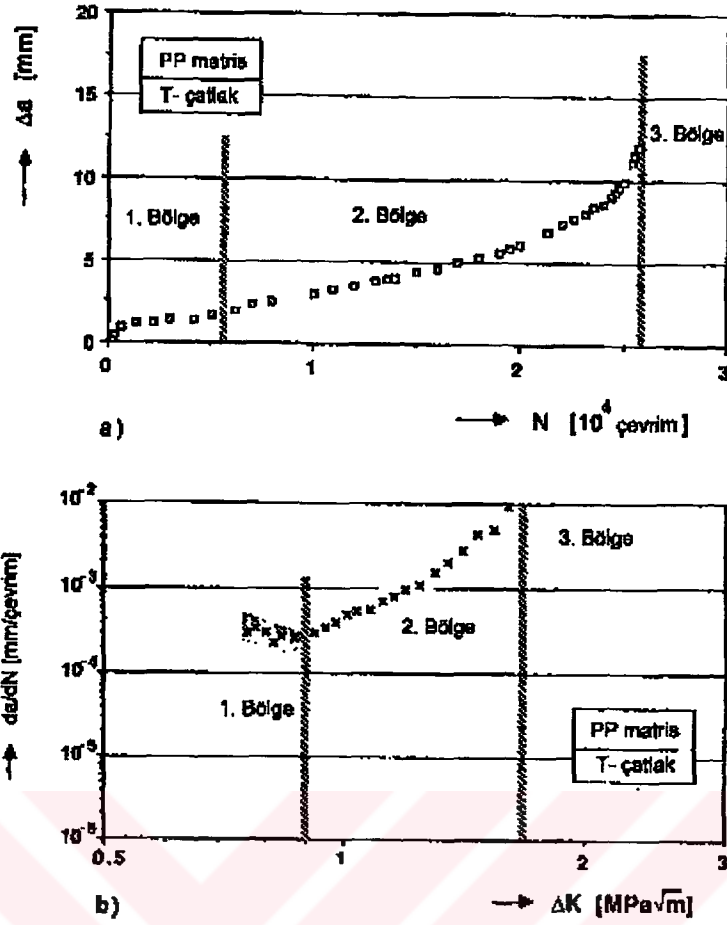
Yorulma deneyi çekme-çekme modunda ve yük oranı (F_{min}/F_{max}) $R=0,2$ olarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneyleri 5 Hz frekansda sinüzoidal dalga fonksiyonu kullanılarak yük kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma ölçümlerinden önce testere ile açılan çentik bir traş bıçağı yardımıyla keskinleştirilmiştir.

Kompakt çekme numunelerinin yüzeylerinin kırılma profilleri ve yorulma kırığı yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscopy) yardımıyla incelenmiştir.

Yorulma davranışının incelenmesi sonucu takviyeli ve takviyesiz polipropilen için yorulma çatlak ilerleme hızının kararlı azalma (1) ve kararlı artış (2) bölgelerinden oluştuğu anlaşılmaktadır (Şekil 5.87 ve Şekil 5.88). 1. bölge kritik büyüklük veya kritik hasar yoğunluğunun hasar bölgesinin gelişimi ile ilişkilidir buna karşın 2. Bölge Paris-Erdoğan üstel kuralı yardımıyla açıklanabilmektedir.

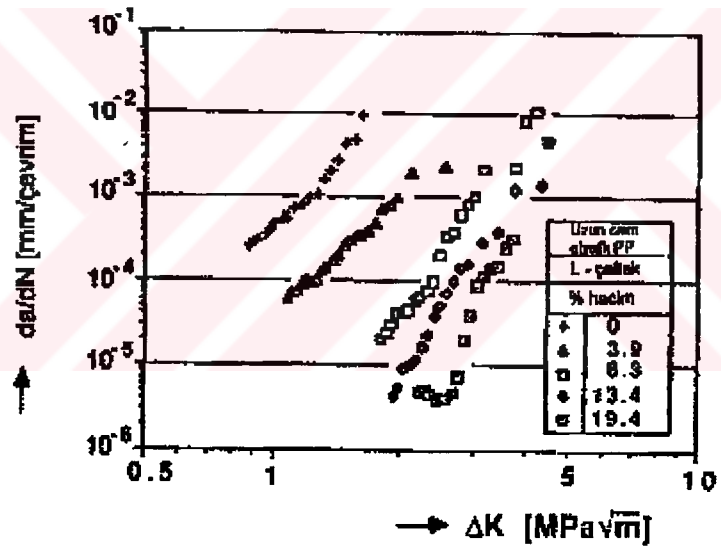
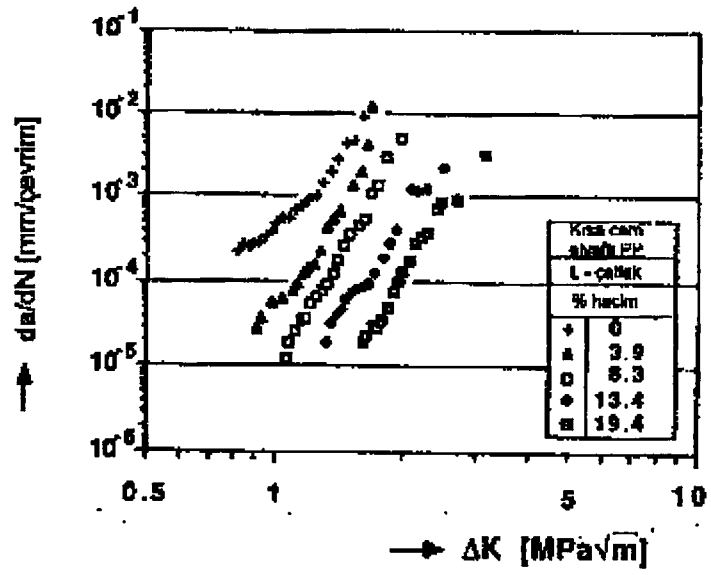


Şekil 5.87 Ağırlıkça %20 (hacimce %8,3) kısa cam elyaf takviyeli enjeksiyona dik yönde çıkartılmış polipropilen çatlak açılma miktarının hasar çevrim sayısı ile değişimi [38]

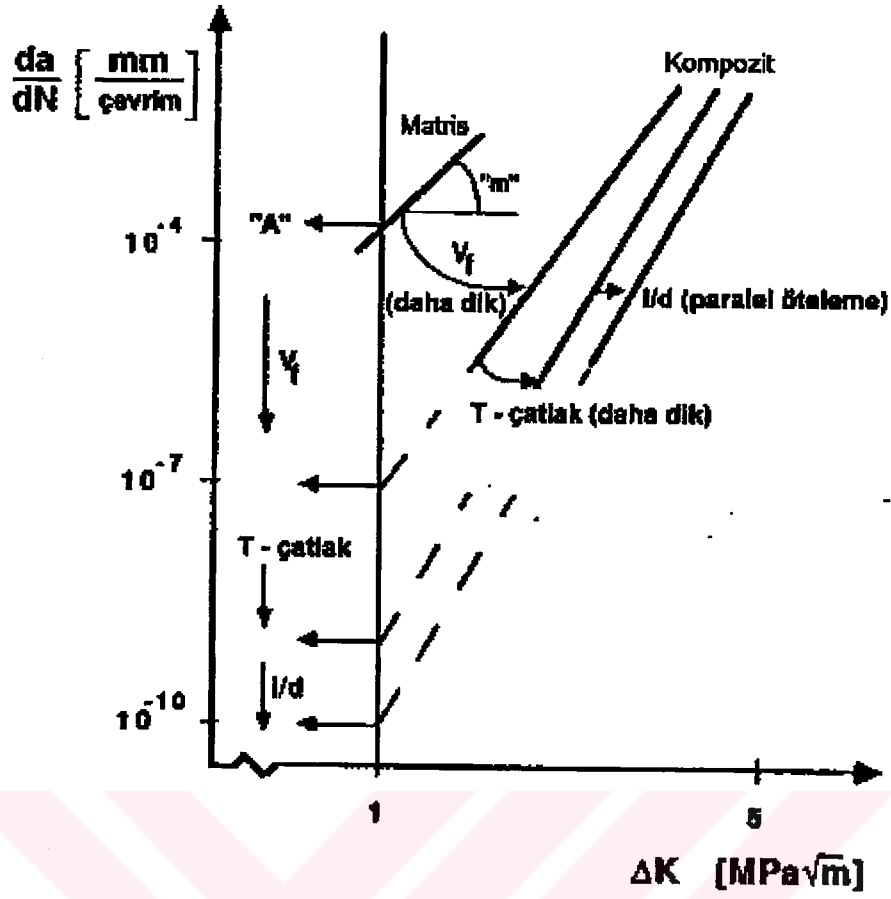


Şekil 5.88 Polipropilen matrisin a) çatlak açılma miktarının çevrim sayısı ile değişimi ve b) yorulma çatlakları ilerlemesi [38]

Elyaf dizilmesinin yorulma çatlakları ilerlemesi (YÇİ) üzerine etkisine işaret etmek amacıyla ölçümler L (enjeksiyon yönüne paralel) ve T (enjeksiyon yönüne dik) çentikli numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir ve ne kadar çok elyaf zorlama yönüne paralel dizilirse, malzemenin yorulma dayanımı o kadar büyük olmaktadır. Artan elyaf hacim oranı YÇİ eğrilerini daha dik eğimle birlikte daha yüksek ΔK değerlerine ötelemektedir (Şekil 5.89). Buna karşın paralel öteleme takviyenin artan şekil oranı (aspect ratio) nedeni ile gerçekleşmektedir (Şekil 5.90).

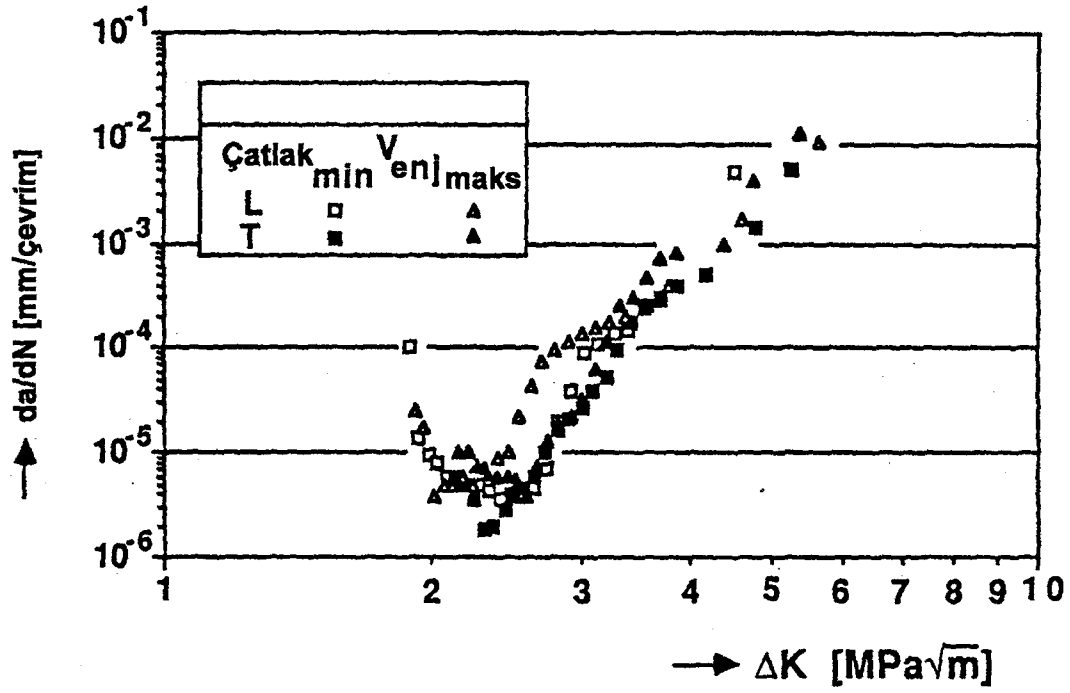


Şekil 5.89 Enjeksiyonla kalıplanmış kısa ve uzun cam elyaflı L tipi çentikli numunelerin yorulma çatlakları ilerleme eğrileri [38]



Şekil 5.90 Elyaf yüzdesi, elyaf düzenlenme şekli ve elyaf şekil oranının (aspect ratio) yorulma çatlakları ilerlemesine etkileri [38]

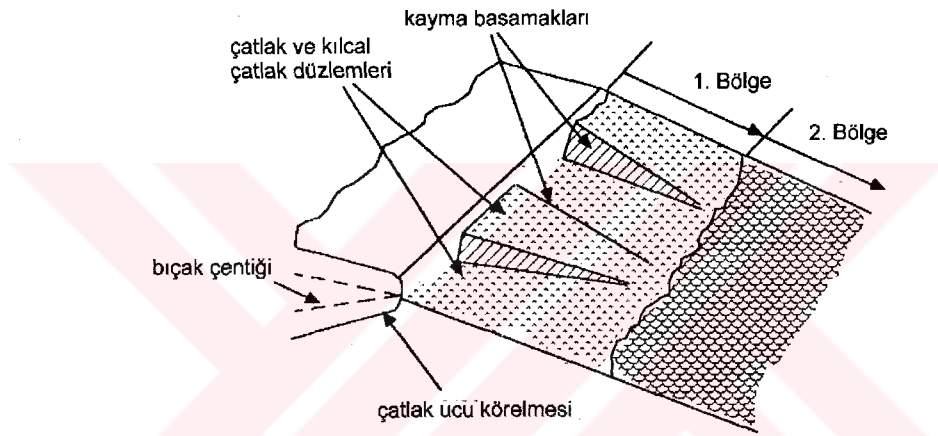
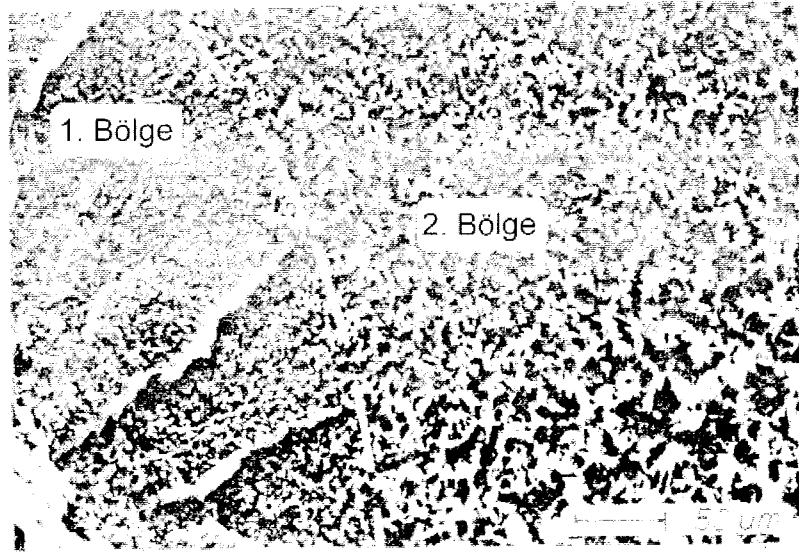
Uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin YÇİ, çentik yönü ve elyaf dizilmesine kısa cam elyaf takviyeli tipinden daha az bağımlılık göstermektedir. Artan elyaf hacim oranı ile uzun cam elyaf takviyeli kompozitlerin izotropik benzeri (quasi-isotropic) YÇİ davranışları, kısa cam elyaf takviyeli polipropilende gözlenenin tersine daha belirgin olmaktadır. Bu durum, söz konusu sistemlerde ki takviye eden elyafların yönlendirilmesi ve tabakalı yapı nedeniyle olmaktadır. Uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin yorulma dayanımı, kalıplama sırasındaki enjeksiyon hızından çok az etkilenmektedir (Şekil 5.91).



Şekil 5.91 Farklı enjeksiyon hızlarının ağırlıkça %40 (hacimce 19,4) uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin yorulma çatlakları ilerlemesine etkileri [38]

Fraktografik incelemeye dayanarak matris, nispeten düşük molekül ağırlığı nedeniyle takviyesiz ve takviyeli polipropilende yoğun kılcı çatlaklarla hasara uğramaktadır (Şekil 5.92). Artan YÇİ hızı ile çatlak ucu ısınması sebebiyle matris makroskopik görünümde daha sünek olmaktadır (Şekil 5.93).

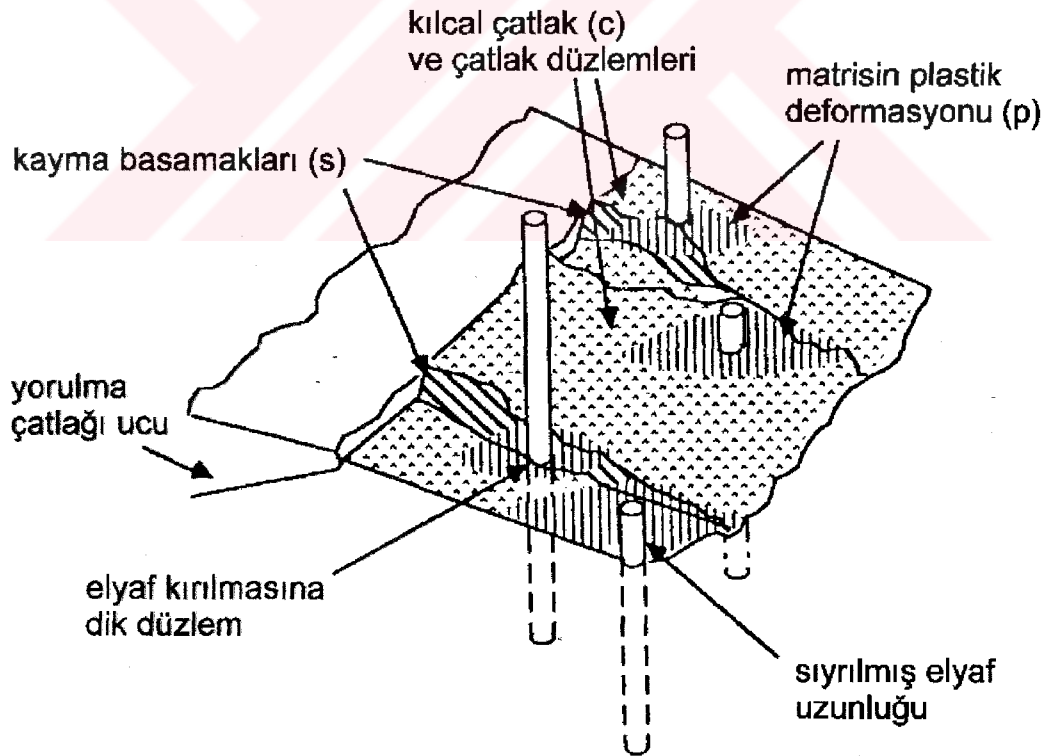
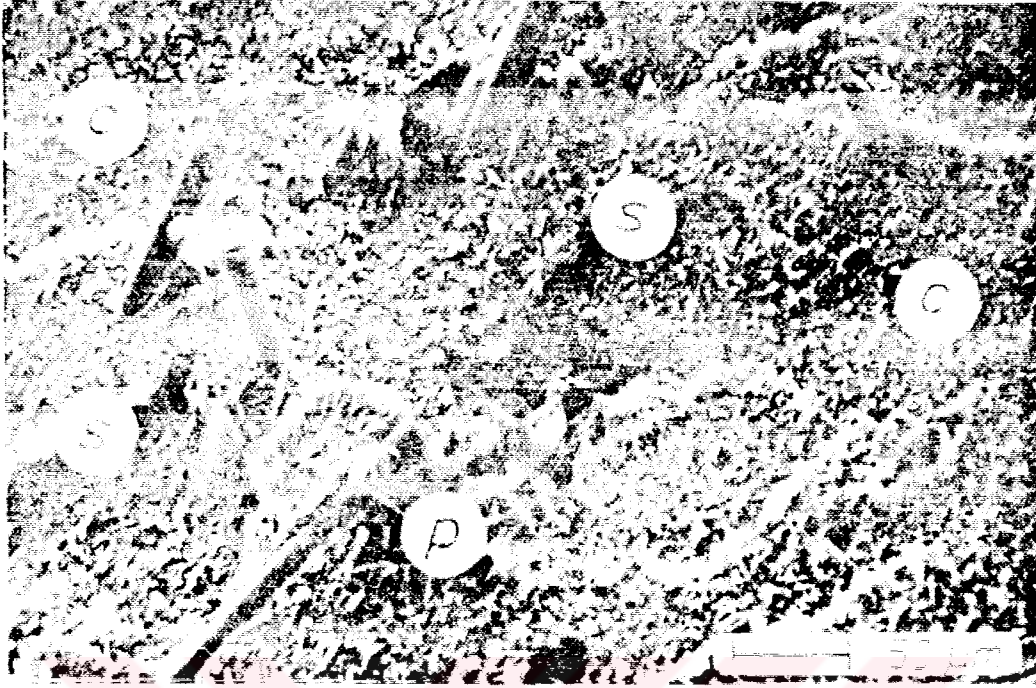
Bu durum özellikle uzun cam elyaf takviye için, elyafların sıyrılarak çıkan uzunluklarının artışı ile ilişkilidir. Uzun cam elyaf takviyeli polipropilende daha yüksek YÇİ dayanımı gözlenmekte ve bu durum çatlak ucundaki hasar bölgesinin uzaması ile açıklanmaktadır. Matris hasarı, ayrılan (debonded) ve kısmen sıyrılarak çıkan (pulled-out) elyafların doğurduğu plastik akma (plastic flow) ve kılcı çatlakların birleşiminden oluşmaktadır (Şekil 5.94). Uzun cam elyaf takviyeli kompozitlerde çatlak ucu hasar bölgesinin büyüklüğü, kısa cam elyaflı kompozitlerden daha büyüktür. Bu durum uzun cam elyafların daha büyük şekil oranlarına sahip olmaları nedeniyle, çatlak ucunda daha geniş bir alanda gerilme dağılımına katılmaları ile açıklanmaktadır.



Şekil 5.92 Polipropilen matrisin yorulma kırığı yüzeyi. Çentik ucunda 1 ve 2 bölgeleri ve 1 bölgesinin topolojisi görülmektedir [38]



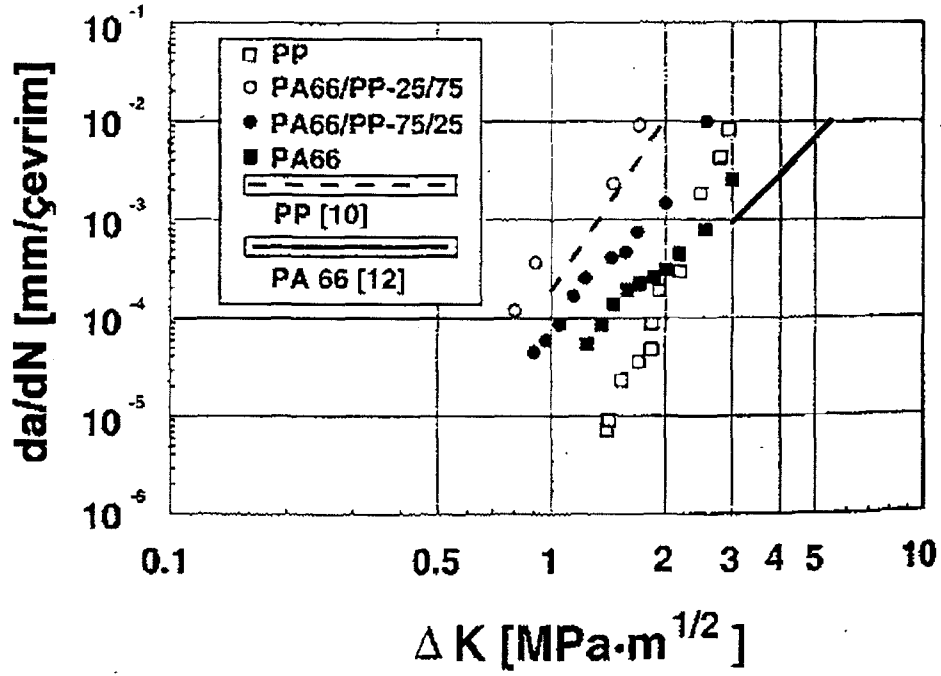
Şekil 5.93 Numune yüzeyine yakın bir yerde 2 ve 3 bölgelerinin arasındaki sınırdaki matrisin kılcal çatlak alanı [38]



Şekil 5.94 1 bölgesinde düşük elyaf yüzdesinde (%10 kısa cam elyaf) polipropilen kompozitin yorulma kırığı yüzeyi ve kırık düzlemindeki topolojiyi açıklayan model [38]

Harmia [39] takviyesiz ve uzun cam elyaf takviyeli polipropilen (PP), naylon (PA) ve PP/PA harmanlarının yorulma davranışları üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarında matris olarak orta akışkanlığa sahip izotaktik homopolimer polipropilen ve naylon 66 kullanmıştır. Üçüncü bir komponent olarak ikili bir fonksiyona sahip maleik anhidrid aşılı (maleic anhydride grafted) polipropilen kullanılmıştır. Maleik anhidrid aşılı polipropilen (PP-g-MAH) hem polipropilen ve naylon 66 arasında uyuşum sağlayan bir eleman (compatibilizer) hem de polipropilen ve cam elyafların birbirlerine bağlanmasını arttıran bir bağlayıcı ajan (coupling agent) olarak kullanılmıştır. Uzun cam elyaflı granüller kullanılarak enjeksiyon kalıplama yöntemi yardımıyla 100 x 100 x 3 mm boyutlarında plakalar basılmıştır. Daha sonra bu plakalardan kompakt çekme numuneleri çıkartılmıştır. Yorulma testleri çekme-çekme modunda, $R=0,1$ gerilme oranında, sinüzoidal dalga fonksiyonunda ve 5 Hz frekansda gerçekleştirilmiştir.

Naylon 66 içerisine PP veya PP içerisine naylon 66 katılması matris malzemelerinin yorulma performansını düşürmektedir (Şekil 5.95). Bu durum yüksek ΔK değerlerinden daha düşük değerlere kayma ve YÇİ grafiğinde daha yüksek yorulma hızını ifade eden artan eğimle anlaşılmaktadır. Yorulma performansındaki azalma miktarı naylon 66, PP ile harmanlandığı takdirde daha yüksek ve PP, naylon 66 ile harmanlandığı (blended) takdirde daha düşüktür. Statik kırılma tokluğu (static fracture toughness) ağırlıkça %25 naylon 66, PP ile harmanlandığı takdirde %30, bunun aksine ağırlıkça %25 PP, naylon 66 ile harmanlandığı takdirde %20 azalma göstermektedir. Naylon 66/PP 25/75 harmanının hem yorulma performansında hem de kırılma tokluğunda açık bir azalma gözlenmektedir. Kırılma tokluğunda gözlenen bu azalma, PP ve naylon 66'nın ısıl genleşme katsayılarının farklı olması nedeniyle oluşan ısıl gerilmeler ile açıklanabilmektedir.

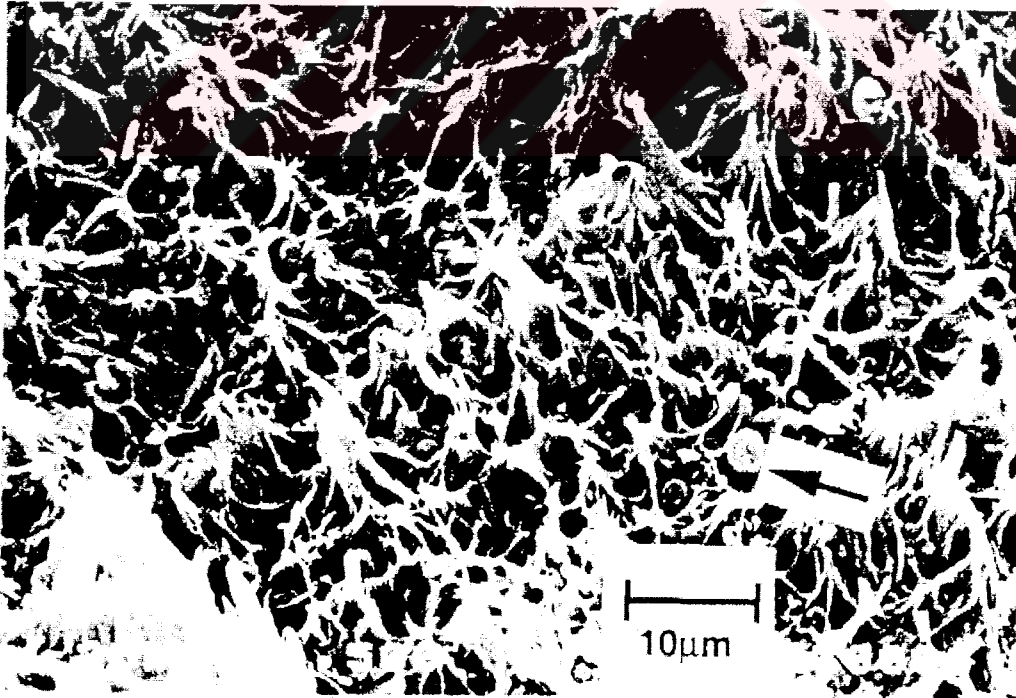


Şekil 5.95 Takviyesiz PA66, PP ve PA66/PP karışımlarının yorulma çatlağı ilerleme davranışları [39]

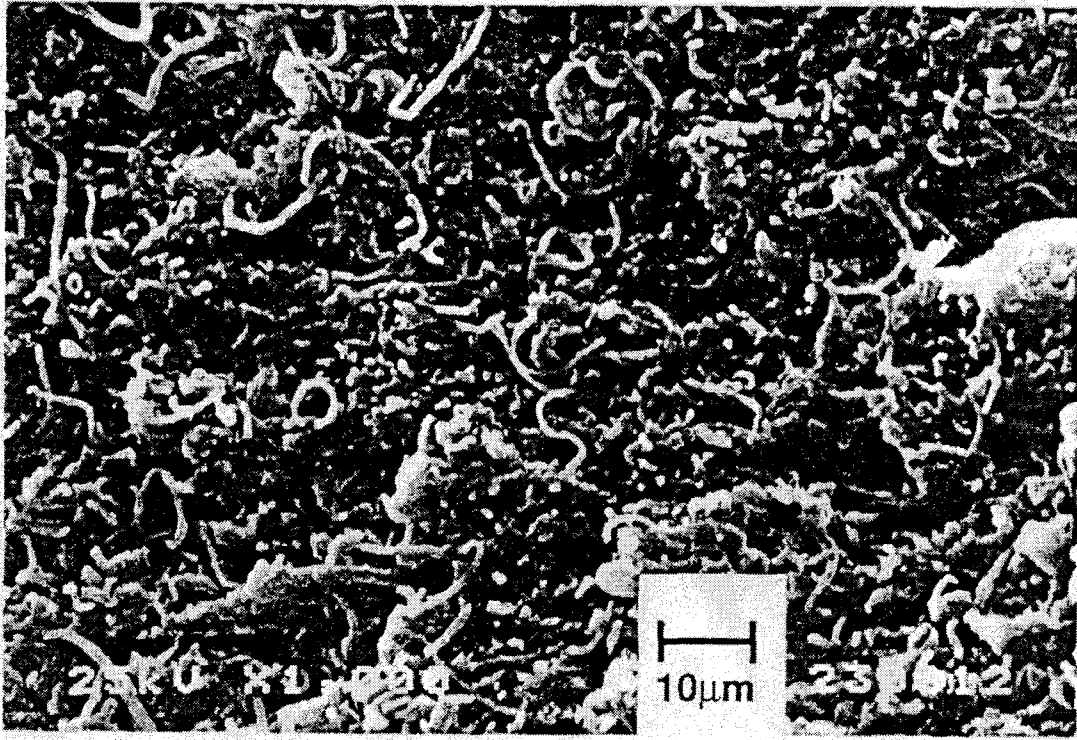
Merkezde boyut dağılımı 1 mm'den birkaç mm'ye kadar değişen dağılmış damlacık (droplet) türünde oluşumlar gözlenmiştir (Şekil 5.96, Şekil 5.97 ve Şekil 5.98). Statik zorlamadaki kırılmada, bu damlacıkların etrafındaki matris yüksek oranda deforme olmuş ve deforme olmuş matrisin uzamış uçları gözlenmiştir. Bunun tersine aynı harmanın yorulma zorlaması ile hasara uğramış kırık yüzeyinde, dağılmış damlacıkları arasında matris uçları görülmemiştir. Dağılmış damlacıklar kendilerini çevreleyen matristen ayrılma şeklinde ortaya çıkmaktadır. Benzer bir gözlem enjeksiyonla kalıplanmış plakaların yüzeylerine yakın yerlerdeki kırık yüzeylerinde de yapılabilmektedir. Kalıp boşluğunun duvarlarına yakın kısımlarında oluşan yüksek kayma kuvvetleri nedeniyle dağılmış faz, uzamış damlacıklar veya elyafçıklar (fibrils) şeklinde deforme olurlar (Şekil 5.99). Yüzey tabakalarının hızlı soğuması nedeniyle bu deforme olmuş elyafçıklar tekrar ters yönde deforme olarak dairesel damlacıklar halini alacak yeterli zaman bulamazlar ve oldukları şekilde katılaşır. Statik zorlamadaki kırılmada bu elyafçıklar özellikle kırılma düzlemine dik olarak dizildikleri takdirde, polimer içinde elyafı takviye gibi davranıp kırılma prosesinde etkin bir şekilde rol alırlar. Bu yolla malzemenin kırılma tokluğunu artırırlar. Yorulmada yüzey tabakalarındaki bu elyafçıklar merkezdeki damlacıklarda olduğu gibi, kırılma prosesine katılımı ifade eden görünür bir deformasyon olmaksızın matristen ayrılırlar.



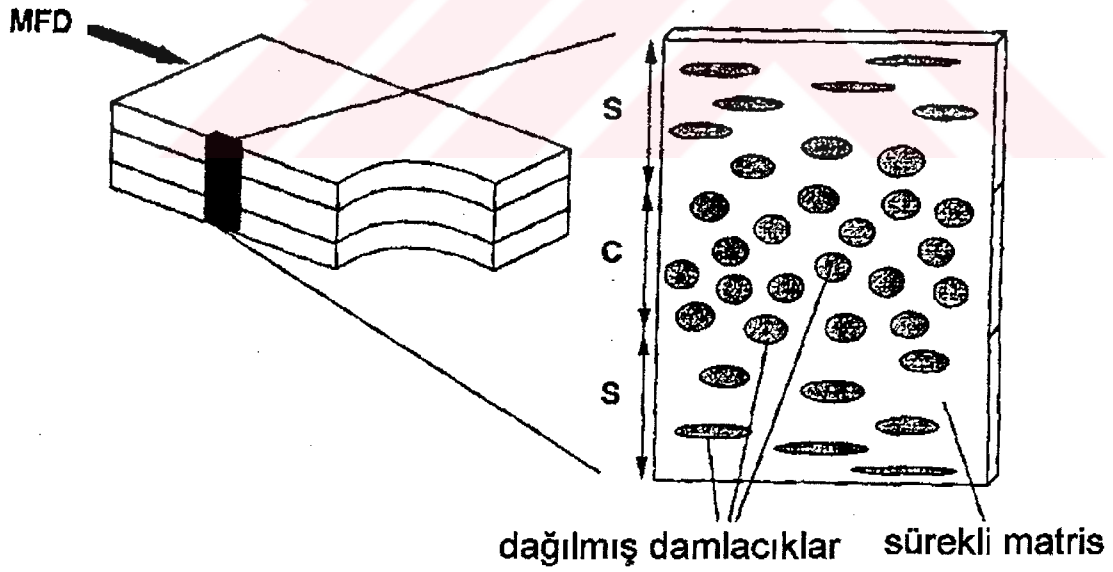
Şekil 5.96 Yorulma hasarına uğramış PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin görünümü, numunenin orta bölgesi [39]



Şekil 5.97 Statik olarak hasara uğramış PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin görünümü, numunenin orta bölgesi [39]



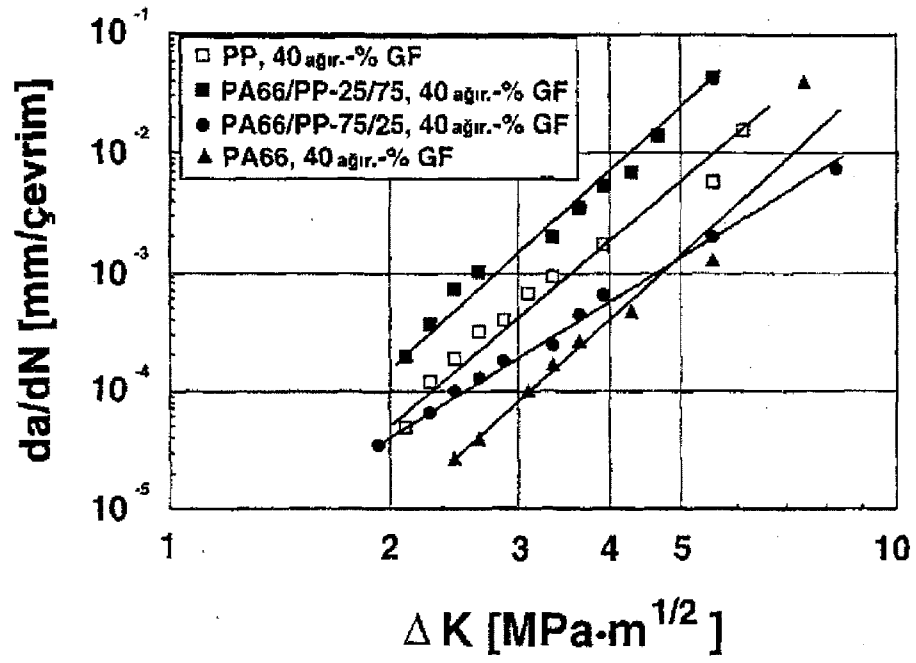
Şekil 5.98 Yorulma hasarına uğramış PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin görünümü, numunenin cidar bölgesi [39]



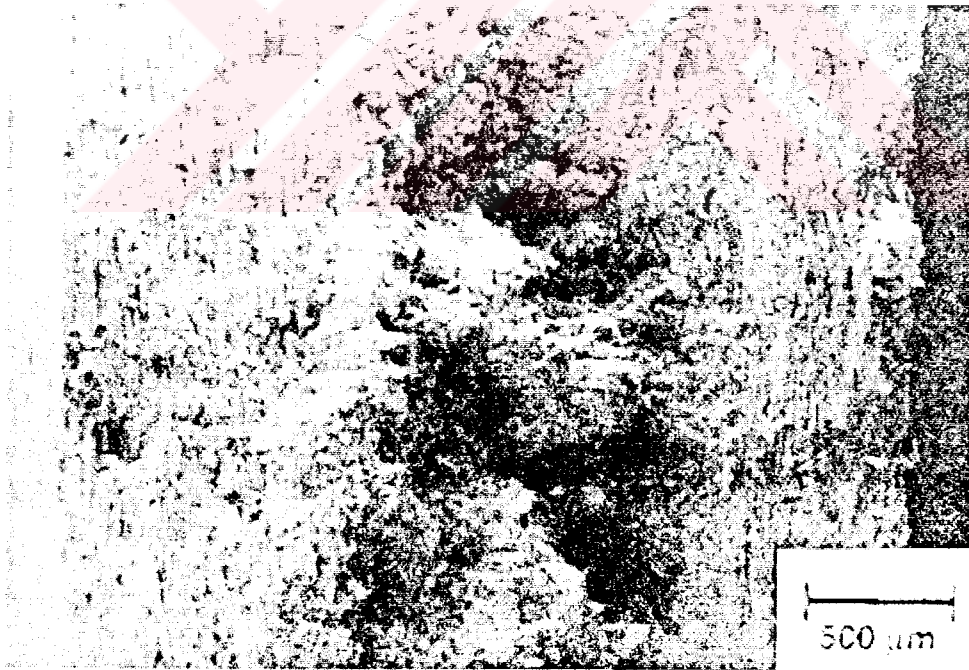
Şekil 5.99 Enjeksiyon kalıplama sonrasında dağılmış parçacıkların (damlacıkların) deformasyonunun şematik gösterimi [39]

Bu gözlemler, polimerler arasındaki bağlanmanın zayıf olduğunu göstermektedir. Polimer fazları arasındaki zayıf bağlanma, çatlağın zayıf arayüzeylerde sürekli matris fazından daha kolay ilerlemesi nedeniyle, yorulma performansının azalmasına neden olmaktadır. Birtakım matris uçları bazı damlacıklara hala bağlı kalmakta veya bazı damlacıkların yüzeylerinde hasara uğramış bağlar görülmektedir (Şekil 5.97). Statik halde polimerler arasında zayıf bağlanma olmasına rağmen bağlanma kuvveti, matristeki gerilme durumunu düzlem şekil değişimi (plane strain) halinden düzlem gerilme (plane stress) haline değiştirmeye yetecek seviyededir. Bunun tersine çevrimsel zorlama durumunda düşük çatlak ilerleme hızı yüzünden, polimerler arasındaki bağlanma gerilme durumunu değiştirmeye yetecek kadar yüksek değildir. Bu takdirde malzeme, gevrek kırılma (brittle fracture) ile sonuçlanan ve yorulma performansını azaltan düzlem şekil değişimi koşullarında hasara uğrar.

Çalışılan matrislerde UCE (uzun cam elyaf) takviye kırılma tokluğunu arttırmıştır. UCE oranının artışı ile kırılma tokluğundaki artışa benzer şekilde yorulma performansında da benzer bir artış gözlenmiştir. Benzer kompozitlerin yorulma performansları statik kırılma toklukları ile karşılaştırıldıklarında, her iki zorlama durumunda da benzer performanslar saptanmıştır (Şekil 5.100). Tüm malzemeler için elyafların büyük oranda çentik yönüne paralel yönlendikleri yüzey tabakalarında elyaf ayrılmaları gözlenmiştir (Şekil 5.101). Merkezde elyafla ilgili kırılma mekanizması UCE'lı PP için sıyrılma ve UCE'lı naylon 66/PP-75/25 içinse elyaf kırılması şeklinde olmuştur (Şekil 5.102 ve Şekil 5.103). UCE'lı PP'de elyaflar ve matris arasındaki bağlanma zayıftır. Bu sonuç hasar sonrası elyafların üzerinde sınırlı miktarda matris malzemesi kalmasından da anlaşılmaktadır. Diğer taraftan UCE'lı naylon 66/PP-75/25 harmanında elyaflarla matris arasında iyi bir bağlanmayı işaret edecek şekilde elyaflar neredeyse tamamen matris malzemesi ile kaplanmış durumdadırlar. Bu durum yorulma performansı ile birlikte düşünüldüğünde, yorulmanın öncelikle elyaf-matris bağlanmasının kalitesi ile kontrol edildiği belirtilmiştir.



Şekil 5.100 Ağırlıkça %40 uzun cam elyaf takviyeli PA66/PP karışımının yorulma çatlaklı ilerleme davranışı [39]



Şekil 5.101 Yorulma hasarına uğramış uzun cam elyaf takviyeli PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin genel görünümü [39]



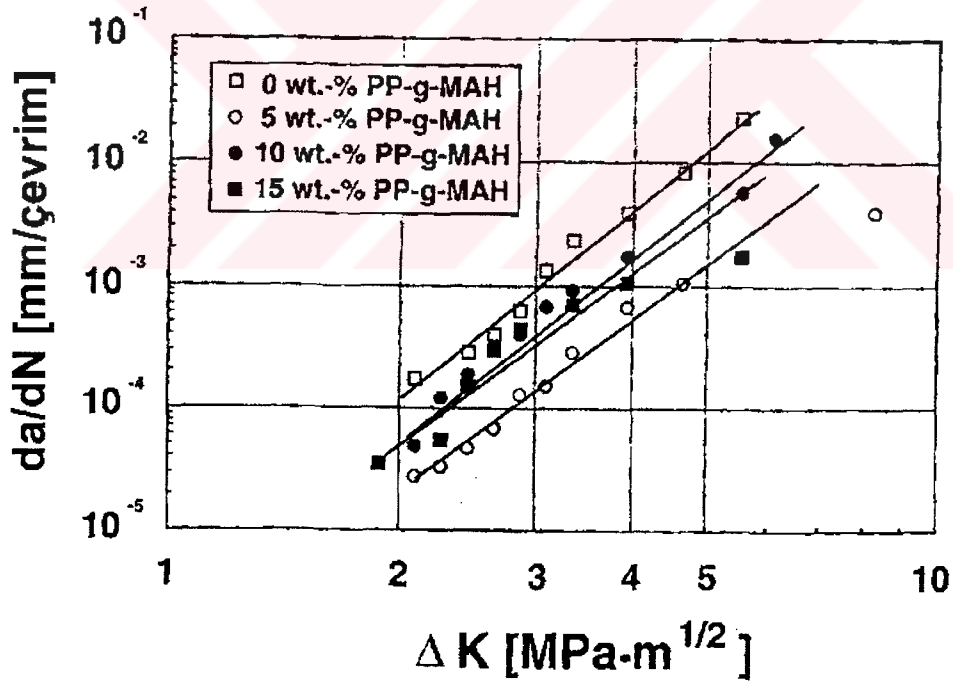
Şekil 5.102 Yorulma hasarına uğramış uzun cam elyaf takviyeli PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırık yüzeyinin genel görünümü [39]



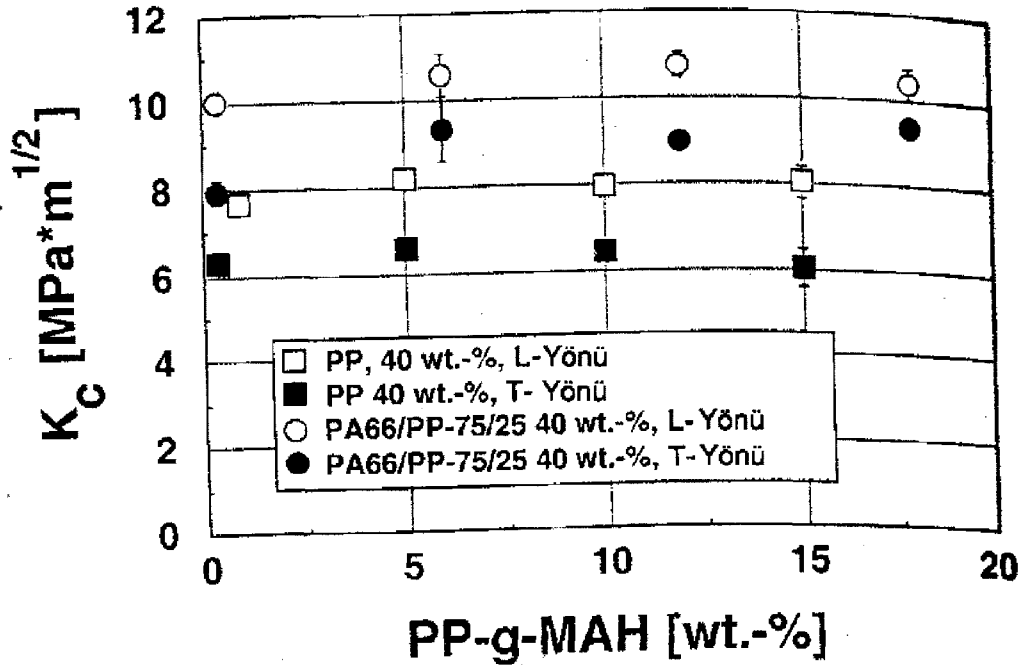
Şekil 5.103 Yorulma hasarına uğramış ağırlıkça %10 PP-g-MAH içeren uzun cam elyaf takviyeli PP'nin kırık yüzeyinin görünümü [39]

PP-g-MAH katılması her iki zorlama şekli içinde malzemenin çatlak ilerlemesine karşı direncini arttırmıştır (Şekil 5.104 ve Şekil 5.105). Statik kırılma durumunda kırılma tokluğundaki iyileşme daha küçük olmakta ve ağırlıkça %5 PP-g-MAH katılımı ile sınırlı kalmaktadır. Yorulmada ise ağırlıkça %5 PP-g-MAH katılımı ile yorulma prosesinde çok daha büyük iyileşmeler ölçülmüştür. PP-g-MAH'in %5'den daha yüksek oranlarda katılımı yorulma davranışını kötüleştirmiştir ve dolayısıyla %5 değeri optimum değer olarak saptanmıştır.

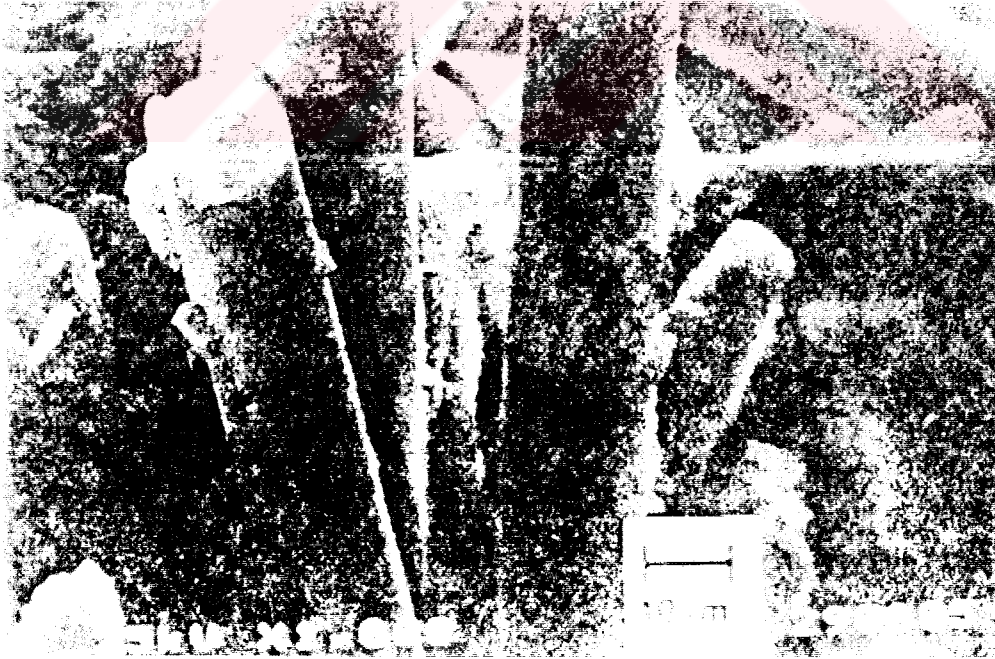
%5 PP-g-MAH katıldığı takdirde, kompozitin hasara uğradıktan sonra cam elyafların üzerlerinde çok daha fazla matris malzemesi kalmaktadır (Şekil 5.106 ve Şekil 5.107). Bu gözlem cam elyaflar ve matris arasındaki bağlanmanın iyileştiğini göstermektedir. PP-g-MAH oranının daha fazla artması ile cam elyafların üzerinde kalan matris miktarı değişmemektedir. Daha fazla oranda PP-g-MAH katılması cam elyaflar ve matris arasındaki bağlanmayı iyileştirmemesinin yanısıra, kompozit içinde matrisin molekül ağırlığını azaltarak yorulma performansında azalmaya yol açmaktadır.



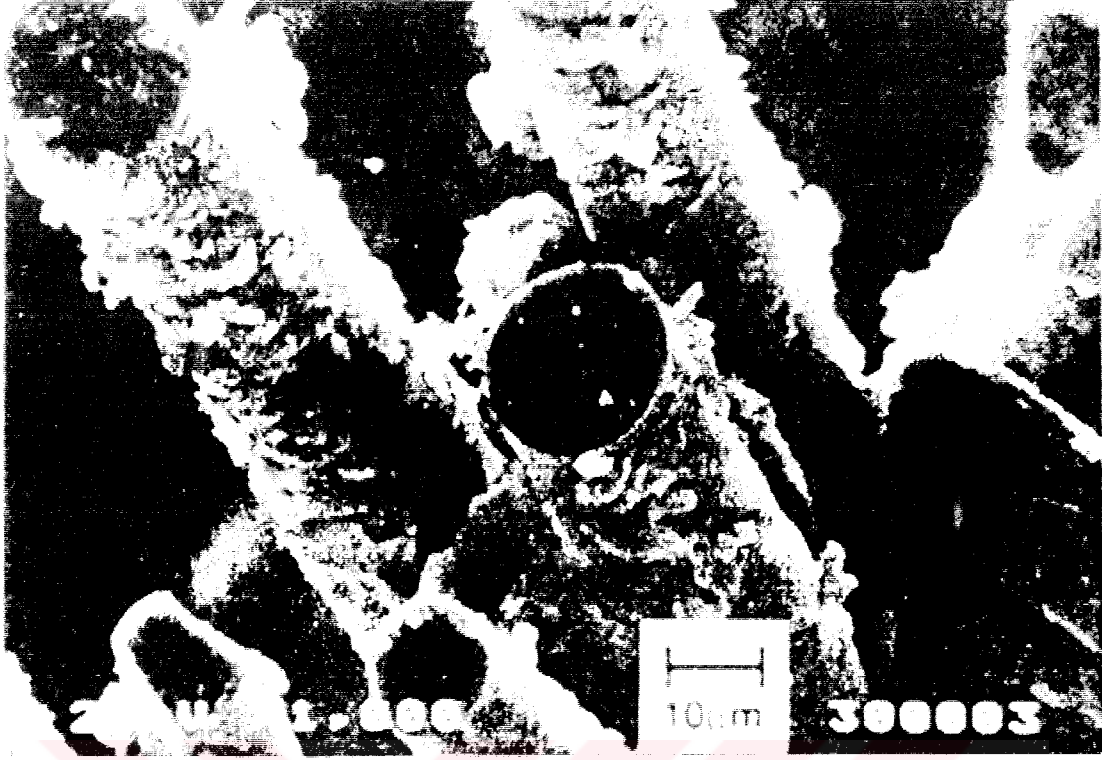
Şekil 5.104 Değişen oranlarda PP-g-MAH katkısının uzun cam elyaf takviyeli PP'nin yorulma çatlaklı ilerleme davranışına etkisi [39]



Şekil 5.105 Değişen oranlarda PP-g-MAH katkısı içeren uzun cam elyaf takviyeli PP ve uzun cam elyaf takviyeli PA66(%75)/PP(%25) karışımının kırılma tokluğu davranışları [39]



Şekil 5.106 PP-g-MAH katkısı içermeyen uzun cam elyaf takviyeli PP'nin yorulma hasarı sonrası kırık yüzeyinin görünümü [39]

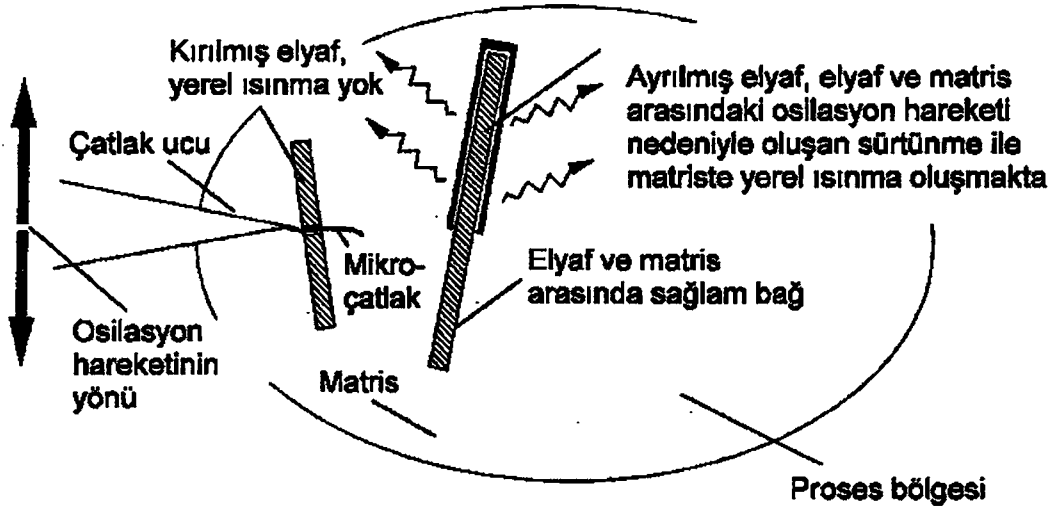


Şekil 5.107 Ağırlıkça %5 PP-g-MAH katkısı içeren uzun cam elyaf takviyeli PP'nin yorulma hasarı sonrası kırık yüzeyinin görünümü [39]

Elyaf ve matris arasında nispeten zayıf bir bağlanma söz konusu olduğunda, elyaf ile ilgili başlıca hasar mekanizması elyaf-matris ayrılması ve bunun sonucunda meydana gelen elyafın sıyrılması olmaktadır. Zayıf bağlanma durumunda düşük zorlamalar veya şekil değişimleri dahi cam elyaf ve matrisin arayüzeyinde boşluklar oluşturmakta veya cam elyafın matristen kısmen ayrılması ile sonuçlanan mikroçatlakların gelişmesine neden olmaktadır. Elyaf-matris ayrılmaları, zorlamalar veya şekil değişimleri nedeniyle mevcut çatlak ucunun bir hayli önünde (≤ 20 mm) oluşmaktadır. Ayrılmanın meydana geldiği bölgede elyaf, ayrılma prosesi sonucunda oluşan boşluklarda çevrimsel yüklemenin sonucu olarak titreşmektedirler (Şekil 5.108). Bu hareketin ve elyaf ile matris arasındaki sürtünmenin nedeniyle, matriste küçük yerel ısınmalar meydana gelir. Elyaf ile matris arasındaki zayıf bağlanma nedeniyle matriste nispeten yüksek derecede ısınmış bölgeler oluşur.

PP-g-MAH ilavesiyle elyaf ve matris arasındaki bağlanma artırıldığı takdirde, elyafın ayrılması çatlak ucuna daha yakın olmaktadır ve böylece çatlak ucu etrafındaki ısınan bölgenin büyüklüğü azalmaktadır. Elyaf ve matris arasındaki

bağlanma arttırıldığı takdirde, ana hasar mekanizması elyaf-matris ayrılmasından elyaf kırılmasına dönüşmüştür. Kırılmış bir elyaf, matrisin ısınmasına lokal olarak katkıda bulunamayacağı için, matristeki sıcaklık alanları gittikçe azalacaktır.



Şekil 5.108 Elyaf/matris ayrılması ve elyaf kırılması gerçekeştiği takdirde yorulma sırasında ısı oluşumunun (artışının) şematik gösterimi [39]

6. DENEY MALZEMELERİ, CİHAZLARI VE YÖNTEM

6.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda TARGOR firmasının ağırlıkça %30 kısa cam elyafı GC30H251 ticari kodlu kimyasal bağli polipropilen (KBPP) ve GF30H152 ticari kodlu dolgulu (kimyasal bağ içermeyen) polipropilen (DPP) malzemeleri kullanılmıştır. GC30H251 malzemesi, elyaf ve matris arasındaki bağlanmayı arttırmak amacıyla kimyasal bağlanma (chemical coupling) özelliği içermektedir. Matris malzemesi olarak kullanılan polipropilen homopolimer, izotaktik ve ısı stabilizatörlüdür. Testlerde kullanılan malzemeler cam elyaf ve polipropilenin önceden karıştırılması ile oluşturulmuş enjeksiyona hazır granül halindedirler.

Takviye elemanı olarak kullanılan cam elyaf E-camı'dır. Ticari olarak ağırlıkça elyaf oranı çok kullanılmasına rağmen, kompozit malzeme özelliklerinin hesaplanmasında, örneğin karışımlar kuralında hacimce elyaf oranı daha sık kullanılmaktadır. Hacimce ve ağırlıkça elyaf oranları aşağıdaki eşitlik sayesinde kolayca birbirlerine çevrilebilirler.

$$V_1 = \frac{W_1/\rho_1}{W_1/\rho_1 + W_2/\rho_2 + W_3/\rho_3 \dots} \quad (6.1)$$
$$W_1 = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \rho_3 V_3 \dots}$$

Yukarıdaki eşitliklerde V_1 , V_2 vb. kompoziti oluşturan elemanların (elyaf, dolgu, matris vb.) hacim oranları, W_1 , W_2 vb. elemanların ağırlık oranları ve ρ_1 , ρ_2 vb.

elemanların yoğunluklarıdır. Ağırlıkça %30 kısa cam elyafı polipropilenin hacimce elyaf oranı %25,6'dır.

Granül içindeki cam elyaflar enjeksiyon işlemi sırasında vida hareketi, yolluk ve memeden geçişleri, kalıptaki ilerlemeleri ve birbirleriyle etkileşimleri nedeniyle kırılabilmektedirler. Elyaf boyunun kompozit malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemesi nedeniyle bu konuda bir ön çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, önce malzemeler 600°C'lık fırında seramik krozeler içinde 2 saat tutularak yakılmış ve polipropilen'in tümüyle uzaklaştırılması sağlanmıştır. Daha sonra, cam elyaflar el değmeden cam kültür kabına (petridish) rastgele dökülmüştür. Okuma işlemine yardımcı olması amacıyla, kültür kabının altına üzerinde kare bölümler bulunan bir film yapıştırılmıştır. Ölçümler OLYMPUS PME3 metal mikroskopunun üstten uygun şekilde ışıklandırılması sonucu, 100 büyütmede gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için enjeksiyon öncesi ve sonrası, 500'er adet elyafın değerlendirilmesi ile sonuca ulaşılmıştır. Bu ölçümlerin sonucuna göre, deneylerde kullanılan granül malzemenin içindeki cam elyafların ortalama çapları 10 mikrondur ve enjeksiyon öncesi ortalama boyları 636 mikron iken, enjeksiyon sonrası ortalama boyları 542 mikron olmaktadır. Diğer bir deyişle, enjeksiyon işlemi sırasında cam elyafların boyları yaklaşık %15 oranında kırılarak kısalmaktadır. Grove, Kim, Cooper ve Ellis uzun elyaf polipropilen kompozitlerle yaptıkları çalışmalarda, enjeksiyon sırasında elyafların boylarının 1/7 oranında kırıldıklarını tespit etmişlerdir [30].

Deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 6.1'de verilmektedir.

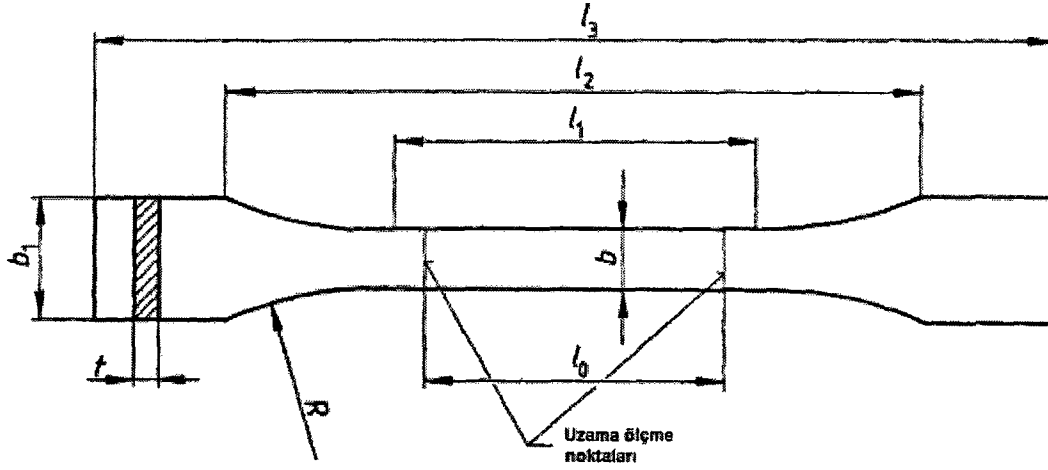
Tablo 6.1 Deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri

	Birim	Test Koşulları	Standart	KBPP	DPP
Yoğunluk	g/cm ³	-	ISO 1183	1,112	1,112
Takviye Miktarı	% ağırlık	-	ISO 3451/1	29	29
Erime Akış Oranı	g/10 dk	230°C, 2,16 kg	ISO 1133	4	4
Çekme Dayanımı	MPa	23°C, 5 mm/dk	ISO 527	67	41
Elastik Modül	MPa	23°C, 1 mm/dk	ISO 527	6645	5773
Akmadaki Uzama	%	23°C, 5 mm/dk	ISO 527	2,2	1,3
Izod Darbe Dayanımı	kJ/m ²	23°C, çentikli	ISO 180 1/A	10	4
Sertlik	Shore D		ISO 868	79	79
Vicat Yumuşama Sıcaklığı /A	°C	10 N	ISO 306	165	156
Isı Etkisiyle Eğilme Sıcaklığı /A	°C	1,8 MPa	ISO 75	151	95
Isı Etkisiyle Eğilme Sıcaklığı /B	°C	0,45 MPa	ISO 75	162	130

6.2. Yorulma Deney Numunesi ve Hazırlama Yöntemleri

Bu çalışmada kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli polipropilen ve cam elyaf dolgulu polipropilenin yorulma davranışlarını ve yorulma hasar mekanizmalarını incelemek amacıyla, yorulma çentiksiz numuneler kullanılmıştır.

Yorulma ve statik çekme deneylerinde, Şekil 6.1'de verilen ISO 527 Tip I çekme numunesi kullanılmıştır. Bu numunenin ölçüleri Tablo 6.2'de verilmektedir.



Şekil 6.1 Yorulma ve çekme test numunesi (ISO 527 Tip I)

Tablo 6.2 ISO 527 Tip I çekme numunesi ölçüleri

Sembol	Açıklama	Numune Boyutları (mm)
l_3	Minimum toplam boy	150
b_1	Dış genişlik	20
l_1	Paralel kısmın uzunluğu	60
b	Paralel kısmın genişliği	10
R	Minimum yarıçap	60
l_0	Ölçü boyu	50
l_2	Çeneler arası uzunluk	115
t	Kalınlık	4

Testlerde kullanılan numuneler 30 ton kapama kuvvetine sahip, MANUMOLD 77/30 yarı otomatik enjeksiyon makinası ile 5 numune gözlü test kalıbı kullanılarak elde edilmiştir. Enjeksiyon kalıplama parametreleri, hammadde firması tarafından önerilen değerlerin yanısıra ISO 294 ve ISO 1873-2 talimatları dikkate alınarak tespit edilmiştir. Numuneler Tablo 6.3'de verilen koşullar altında kalıplanmıştır.

Tablo 6.3 Enjeksiyon parametreleri.

Enjeksiyon basıncı	bar	50
Tutma basıncı	bar	25
Kalıp kapama basıncı	bar	120
Enjeksiyon zamanı	sn.	30
Toplam kalıplama zamanı	sn.	50
Enjeksiyon hızı		maksimum hızın $\frac{3}{4}$ 'ü
Vida hızı		maksimum hızın $\frac{1}{2}$ 'si
Silindir sıcaklıkları A (arka)	°C	230
Silindir sıcaklıkları B (orta)	°C	235
Silindir sıcaklıkları C (ön)	°C	225
Kalıp sıcaklığı	°C	30 - 35

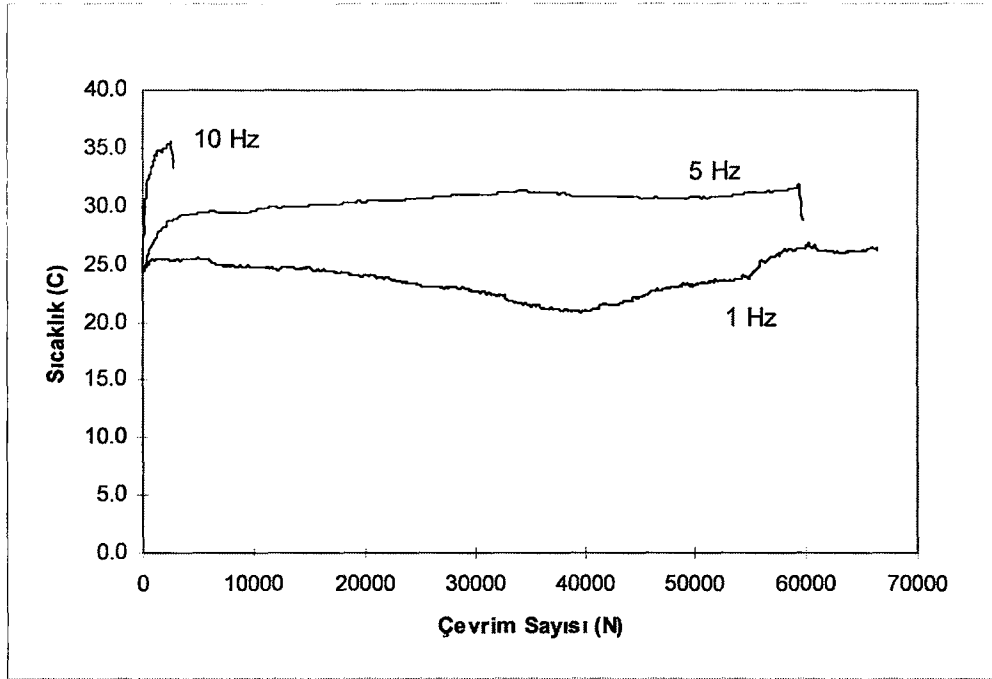
Yukarıda belirtilen parametrelerle kalıplanan numuneler, testler öncesi ISO 291'e uygun olarak HERAUS HC 4030 sirkülasyonlu klimatize kabinde 23°C ve %50 nem koşullarında 96 saat bekletilmişlerdir.

6.3. Frekansın Yorulma Dayanımına Etkisi

İlk testler sonucunda malzemenin yükleme frekansına hassas olduğu belirlenmiştir. 1 Hz, 5 Hz ve 10 Hz frekanslarda 0,6ÇD'da (çekme dayanımının 0,6 katı) çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. 5 Hz ve 10 Hz frekanslarda yapılan testlerde 1 Hz frekansta yapılan testlere göre hep erken hasarlar oluşmuştur (Şekil 6.2). Bunun üzerine 1 Hz, 5 Hz ve 10 Hz frekanslarında yapılan testlerde önce enfraruj termometre ile test numunelerinde sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. 5 Hz ve 10 Hz frekanslarda yapılan testlerde önemli sıcaklık artışları ölçülmüştür. Sıcaklık artışları

ile malzemenin yorulma ömrü arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek amacıyla yeni ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümde, yorulma test numunelerinin orta noktalarına bir adet ve çeneye bağlantı noktalarına yakın (doğrusallığın bozulduğu noktalar) iki adet termokupul bağlanmıştır. İlk ölçümlerde sıcaklık artışları açısından, ölçüm yapılan noktaların konumları arasında önemli bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra sıcaklık ölçümlerine numunenin orta noktasına bir termokupul bağlayarak devam edilmiştir. Termokupullar yüzey tipi termokupullardır ve numune üzerine siyanoakrilat tipi bir sıvı yapıştırıcı ile tespit edilmişlerdir. Ölçümün ortamdaki ani sıcaklık değişimlerinden etkilenmemesini sağlamak amacıyla, termokupulların üstleri polietilen köpük ile kaplanarak yalıtılmıştır. Uzun süreli ölçümlerde ise (özellikle 1 Hz deneyinde) ortamda oluşan sıcaklık değişimlerini de gözlemlemek için, tüm deneylerde bir adet ortam sıcaklığını ölçen termokupul kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümlerinde "Grant 1200 Series" data toplayıcısı kullanılmıştır ve sıcaklık ölçüm sıklığı 30 saniye olarak tespit edilmiştir. Cihazın hafızasında toplanan datalar, yine "Grant"ın bilgisayar programı yardımıyla "Excel" programında açılabilir hale getirilmiştir. Şekil 6.2'de gözlenen sonuçlar çerçevesinde 5 Hz ve 10 Hz'de yapılan testlerde numunelerin erken hasarlarının nedenlerinin ısı veya ısı/mekanik hasar oluşumları olduğuna karar verilmiştir. 5 Hz ve 10 Hz'de gerçekleştirilen testlerde numuneler, histerizis nedeniyle ısınmakta ve oluşan iç ısılarını bünyelerinden atmak için yeterli zaman bulamamaktadırlar. Bu durum, numunelerde hasarın olduğu çevrime kadar ölçülen numune sıcaklığının artması ile açıklanabilir. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi 1 Hz frekans ile yapılan yorulma deneylerinde ise sıcaklık artışlarına rastlanmamıştır ve ayrıca yorulma ömrü her zaman 5 Hz ve 10 Hz frekanslarda yapılan testlerden yüksek çıkmıştır. Janzen ve Ehrenstein [22 ve 23] cam elyaf takviyeli PBT ile yaptıkları yorulma çalışmasında test frekansı olarak benzer sebeplerle 1 Hz'i seçmiştir. Horst [24-26] ise cam elyaflı naylonla yaptığı çalışmalarda 0,6ÇD gibi düşük zorlamalarda 1 Hz frekansda bile sıcaklığın 5°C artarak sabit kaldığını tespit etmiştir. 0,6ÇD'dan daha yüksek zorlamalarda ise sıcaklığın dengeye gelmediğini ve 10°C'a kadar sıcaklık artışları gözlediğini belirtmiştir.

Söz konusu testler kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli polipropilenle, maksimum gerilme olarak çekme dayanımının 0,6 katı seçilerek, 0,1 gerilme oranında ve çekme-çekme yorulması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Açıklanan bulgular çerçevesinde bundan sonraki deneylere 1 Hz frekansta devam edilmesine karar verilmiştir.



Şekil 6.2 Frekansa bağlı olarak numune yüzey sıcaklığının değişimi

6.4. Test Yöntemleri

6.4.1. Mekanik Testler

6.4.1.1. Test Yöntemi, Cihazları ve Parametreleri

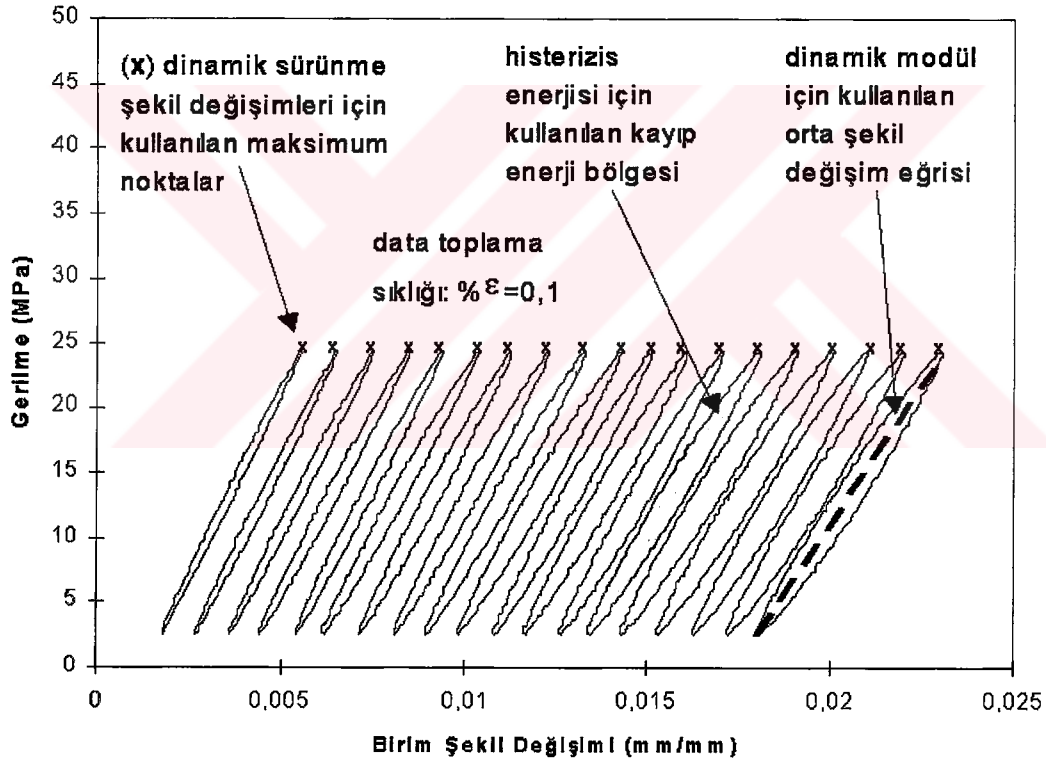
Çatlak ilerlemesi yönteminin sıkça kullanılmasına karşın, bu çalışmada yorulma çatlaksız test çubuklarıyla gerçekleştirilen “kümülatif hasar yöntemi” tercih edilmiştir. “Kümülatif hasar yöntemi”nin tercih edilmesinin nedeni, çatlak ilerlemesi yöntemi sadece var olan bir çatlağın ilerlemesini incelerken bu yöntem sayesinde çatlak oluşumu, ilerlemesi ve kırılma safhalarını birarada incelemek mümkün olmaktadır. Bu yöntem özellikle süreksiz elyaf veya benzeri takviyeler içeren ve takviye-matris bağlanma kuvvetinin çok yüksek olmadığı sistemler için çok uygundur. Çünkü, bu sistemlerde genellikle metallerde olduğu gibi homojen bir iç yapı bulunmamakta ve yukarıda bahsi geçen heterojenliği yaratan etkenler (elyaf, takviye-matris arayüzeyi gibi) potansiyel çatlak başlangıç noktaları olmaktadır. Kompozit malzeme içinde bu sayılan kusurlar metallerdeki iç yapı hatalarını başlatan enkilüzyonlar (inclusions)

ve kafes hataları gibi süreksizliklere karşı gelmektedir. Özellikle elyaf takviyeli kompozitlerde söz konusu olan güçlü bir anizotropi (özelliklerde yöne bağımlılık), yorulma hasarlarının çoğu zaman yüzeysel hasarlar yerine iç kusurlardan oluşması ihtimalini kuvvetlendirmektedir. Çatlaksız test çubuklarıyla gerçekleştirilen “kümülatif hasar yöntemi”nin diğer üstünlükleri ise, doğrusal olmayan malzeme davranışlarının araştırılabilmesi ve malzemenin basma tipindeki yorulma zorlamalarına karşı gösterdiği etkinin de incelenebilmesine olanak sağlamasıdır.

Statik çekme deneyleri, sonsuz vida tahrikli elektromekanik 10 ton kapasiteli Instron 8505 çekme-basma test cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneyleri ise, servo-hidrolik kapalı çevrimli 2,5 ton kapasiteli MTS 810 test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Testlerde gerilme oranı (minimum gerilme / maksimum gerilme) olarak 0,1 seçilmiştir. Uygulanan zorlamanın dalga şekli sinüzoidaldir. Yükleme tipi çekme-çekme tipi yorulma zorlamasıdır. Çekme-çekme tipi test kullanılmasının nedeni sıfır gerilme civarında numunede oluşabilecek basma gerilmelerinden kaçınmaktır. Deneyler sırasında çenelerin numune üzerindeki deformasyon etkisini en aza indirebilmek amacıyla, çene kapama basınçları çeşitli denemelerden sonra numuneyi kaydırmayacak en düşük basınç değeri olarak 3 MPa seçilmiştir. MTS test cihazının uzama ölçme doğruluğunu sağlamak amacıyla “KODAK EKTAPRO Motion Analysis” hızlı video kaydedici sistemden yararlanılmıştır. Yorulma testlerinde kullanılan MTS test cihazı Şekil 6.3’de görülmektedir.

6.4.1.2. Histerizis Enerjisi, Dinamik Modül, Dinamik Sürünme Şekil Değişimi ve Karşılaştırmalar

Yorulma testleri sırasında toplanan datalar histerizis alanı, dinamik modül ve dinamik sürünme başlıkları altında incelenmiştir. Yorulma deneyleri sırasında birim şekil değişiminde meydana gelen her % 0,1'lik artış sonucu bir data kümesi toplanmıştır. Histerizis alanı (enerjisi), deney sırasında toplanan datalardan elde edilen histerizis eğrilerinin oluşturdukları kapalı alanların, "Origin" isimli bir bilgisayar programı yardımıyla integre edilmesiyle hesaplanmıştır (Şekil 6.4). Dinamik modül yine bu toplanan data kümesinden elde edilen histerizis eğrilerinin eğimleridir (Şekil 6.4). Dinamik sürünme ise toplanan data kümesindeki maksimum birim şekil değişimleriyle elde edilmektedir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Yorulma testi sırasında toplanan dataların yorumlanması için kullanılan yöntemler

6.4.1.3. Kalan Dayanım ve Kalan Modül

KBPP ve DPP artan çevrim sayılarında yorulma testine tabi tutulduktan sonra, "Instron" çekme test cihazı yardımı ile 5 mm/dak. çekme hızı ile test edilerek, kalan çekme dayanımları ve kalan elastik modülleri elde edilmiştir. KBPP'den enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen test numuneleri önce 10, 100, 1.000, 10.000, 25.000 çevrim sayılarında yorulma testine tabi tutulmuş ve bu numunelere ek olarak hiç yorulmamış numune ile birlikte çekme testi uygulanmıştır. DPP test numuneleri ise 10, 100, 1.000, 10.000, 100.000, 300.000 çevrim sayılarında yorulma testine tabi tutulmuş ve yine hiç yorulmamış numunelerle birlikte çekme testi yardımıyla karşılaştırmaları yapılmıştır. Gerçekleştirilen tüm testlerde yine her grup için en az beşer adet numune kullanılmaya çalışılmıştır.

Kalan elastik modül hesaplamalarında genellikle uygulanan yöntem, belirli çevrim sayılarında yorulma zorlamasına maruz kalmış numuneleri, çekme testine tabi tutarak elastik modüllerini tespit etmektir. Buna karşın Hitchen, Ogin ve Smith [29], ayrıntılarının mevcut çalışmalar bölümünde anlatıldığı şekilde, yorulma testi sırasında (testi kesmeden) belli aralıklarla elastik modül tespit etmişlerdir. Bu ölçüm yöntemi az sayıda numune ile farklı çevrim sayılarındaki modülleri elde etme imkanı vermektedir. Buna karşın, yorulma testi sırasında modül ölçümü için verilen araların malzemelerin iç yapısında yaratacağı etki bilinmediği için, bahsi geçen test yöntemi tercih edilmemiştir.

6.4.2. Mikroskopik İncelemeler

Mikroskopik incelemeler sırasında yorulma hasarının gelişimini takip edebilmek açısından zorlama seviyesi olarak, kırılma hasarının yeterince uzun bir sürede olduğu 0,6ÇD seçilmiştir. Mekanik testlerde olduğu gibi mikroskopik incelemelerde de ısı yorulma hasarını önlemek amacıyla frekans olarak 1 Hz seçilmiş ve kuvvet kontrollü bir test uygulanmıştır. Yine aynı şekilde basma tipi zorlamalardan kaçınmak ve özellikle elyaf kırılmalarını önlemek amacıyla çekme-çekme tipi yorulma testi tercih edilmiştir. Kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli polipropilenin mikroskop incelemeleri: yorulmamış (çekme testi kırılması), 10, 100, 1.000, 10.000 ve 25.000 çevrimlerde yorulmuş numunelerin yanısıra, yorularak kendiliğinden kırılmış numunelerden oluşmaktadır. Cam elyaf dolgulu polipropilenin mikroskop incelemeleri ise: yorulmamış (çekme testi kırılması), 10, 100, 1.000, 10.000, 100.000, 300.000 çevrimlerde yorulmuş numunelerin yanısıra, yine yorularak kendiliğinden kırılmış numunelerden oluşmaktadır.

Mikroskopik incelemeler için önce yorulma zorlaması uygulanan ve daha sonra statik çekme deneyi ile kırılan test numunelerinin kırık yüzeyleri, önce altınla kaplanarak iletken hale getirilmiştir. Daha sonra kaplanmış numunelerin yüzeyleri Jeol JSM 6400 taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir.

6.4.3. Wöhler (S-N) Diyagramları

KBPP ve DPP'in Wöhler deneyleri için %95 güvenilirlik çalışması yapılmıştır (Şekil 7.60 ve Şekil 7.61). Bu grafiklerde ortadaki "sürekli çizgiler" dataların ortalamalarını en iyi temsil eden eğrilerdir. Grafiklerin üstlerinde söz konusu "sürekli çizgiler" denklemleri de verilmektedir. "Noktalı çizgiler" (CI: Confidence Interval) %95 olasılıkla deney datalarının ortalamalarının içerisinde kalacağı bandı göstermektedir. Diğer bir deyişle, bundan sonra yapılacak herhangi bir deney serisinin ortalamaları %95 olasılıkla bu bant içinde kalacaktır. "Çizgi-nokta eğriler" (PI: Predicted Interval) %95 olasılıkla tüm deney datalarının içerisinde kalacağı bandı göstermektedir. Benzer şekilde, bundan sonra yapılacak herhangi bir deney %95 olasılıkla bu bant içinde kalacaktır.

Yorulma testlerinin sonuçlarının gerilme yüzdelerine göre dağılımları kutu grafikler (box plot) yardımıyla incelenmiştir (Şekil 7.62 ve Şekil 7.63). Kutu grafikler, verilerin dağıldığı aralığı dört bölgeye ayırarak göstermektedir. Test verileri en büyükten en küçüğe sıralandığı takdirde, verilerin %25'i kutuların üstündeki dikey çizginin tanımladığı bölgede yer almaktadır. Test verilerinin en küçük %25'i kutuların altındaki dikey çizginin tanımladığı bölgede yer almaktadır. Dolayısıyla kutu, test verilerinin kalan %50'sini tanımlamaktadır. Üstteki çizginin en üst noktası test verilerinin en büyük değerini, alttaki çizginin en alt noktası test verilerinin en küçük değerini göstermektedir. Kutuların ortalarındaki çizgiler, yorulma test verilerinin medyan'larını (median) göstermektedir. Kutu grafiğin boyu ölçüm verilerinin aralığını (range) tanımlamaktadır.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen yorulma testlerinin sonuçları üç ayrı bölümde tartışılacaktır. Bunlardan ilki olan “Mekanik Davranışlar” bölümünde, öncelikle yorulma testleri boyunca toplanan dataların değişik formatlarda yorumlanması gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ayrıca, farklı çevrim sayılarında yorulma zorlamasına maruz kalmış numunelerin çekme testi yardımıyla, kalan çekme dayanımları ve kalan elastik modülleri de incelenmiştir. Bu bölümün amacı, kimyasal bağlı %30 cam elyaf takviyeli ve %30 cam elyaf dolgulu (kimyasal bağlı olmayan) polipropilenlerin yorulma davranışlarını ve mekanizmalarını yorulma ve çekme testleri yardımıyla incelemek, açıklamak ve söz konusu malzemelerle gerçekleştirilecek tasarımlar için faydalı bilgiler üretmektir.

İkinci bölüm olan “Mikroskopik İncelemeler”de, yorulma testlerine tabi tutulmuş malzemelerin taramalı elektron mikroskobu yardımıyla kırık yüzeyleri incelenmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmaların amacı, birinci bölümde mekanik çalışmalar yardımıyla açıklanmaya çalışılan yorulma mekanizmalarını görsel bulgularla destekleyerek, söz konusu malzemelerin hasar mekanizmalarını açıklamaktır.

Üçüncü bölüm olan “Wöhler Eğrileri”nde ise, yorulma testleri yardımıyla incelenen malzemelerin Wöhler (S-N) diyagramları oluşturulmuştur. Ayrıca deney datalarının kendi içindeki güvenilirliği de sorgulanmıştır. Bu bilgiler yardımıyla, sıkça kullanılan kimyasal bağlı polipropilen (KBPP) ve dolgulu polipropilen (DPP) malzemeleri, dinamik (çevrimli) yüklere maruz uygulamalarda kullanmak isteyen tasarımcıların kullanabileceği tasarım bilgilerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Özellikle plastikler için bu tür dinamik tasarım bilgileri metallere nazaran çok daha zor bulunabilmektedir.

7.1. Mekanik Davranışlar

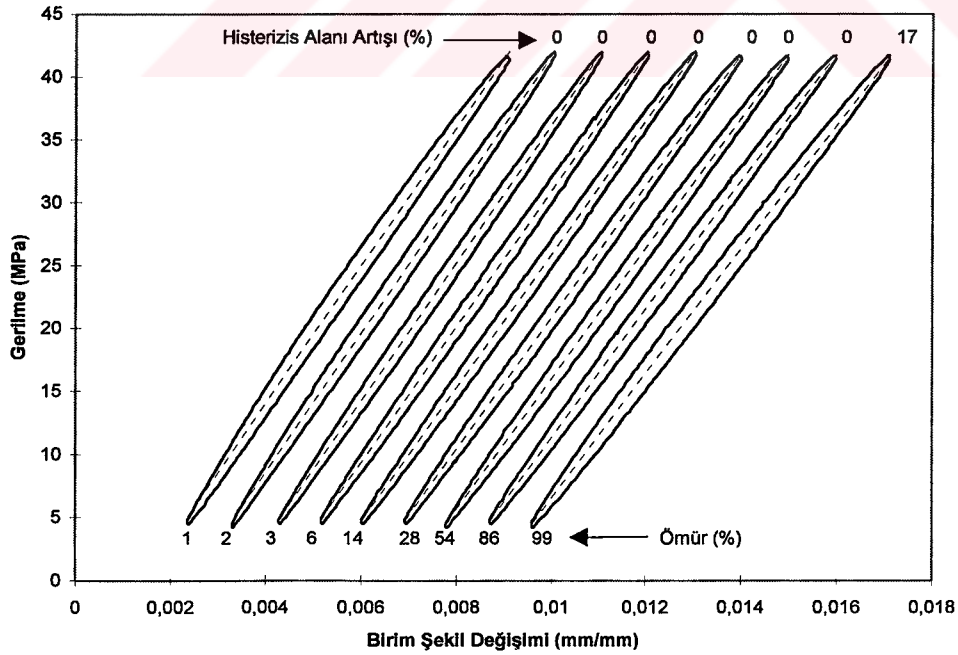
7.1.1. Histerizis Eğrileri

Yorulma testleri sırasında hareketli alt çeneden alınan uzama bilgileri ve yük hücresinden (load cell) gelen kuvvet değerleri derlenerek, incelenen malzemelerin

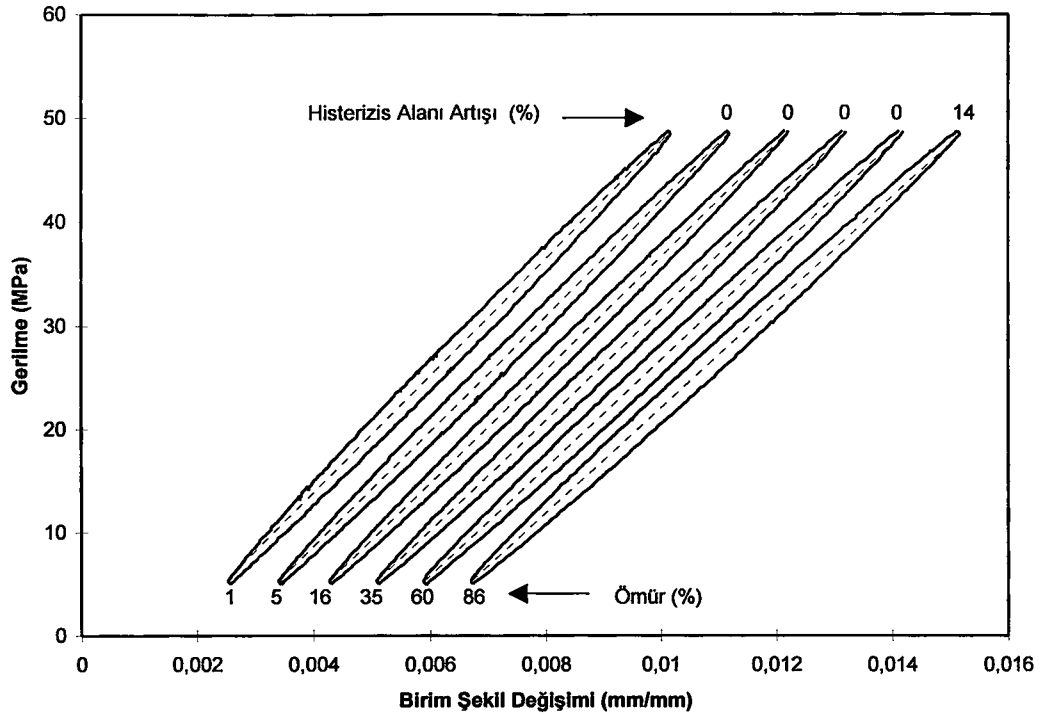
farklı gerilme katsayılarında histerizis eğrileri kaydedilmiştir. Daha sonra “Origin” isimli bilgisayar programı yardımıyla, kaydedilen histerizis eğrilerinin oluşturduğu kapalı alanlar integre edilerek hesaplanmıştır. Bu eğriler aşağıda KBPP ve DPP'lerin çekme dayanımlarının (ÇD) dört farklı yüzdesi (0,6ÇD; 0,7ÇD; 0,8ÇD ve 0,9ÇD) için ayrı ayrı verilmektedir (Şekil 7.1 - Şekil 7.8). Bu grafiklerde histerizis eğrilerinin üzerlerinde görülen ve kapalı eğri alanlarının integrasyonları yardımıyla saptanan histerizis alanlarının değişimi, ilk kaydedilen histerizis eğrisinin alanına göre relatif olarak verilmiştir. Histerizis eğrilerinin altlarında verilen yorulma ömürleri ise, numunenin toplam ömrünün yüzdeleri cinsinden verilmektedir.

Histerizis eğrilerinin alanların hesaplanmasının amacı, malzemelerin yorulma zorlaması altında harcadıkları enerjiyi hesaplayarak, bu enerjideki değişimler yardımıyla elyafli polipropilenlerin hasar mekanizmaları hakkında fikir sahibi olabilmektir.

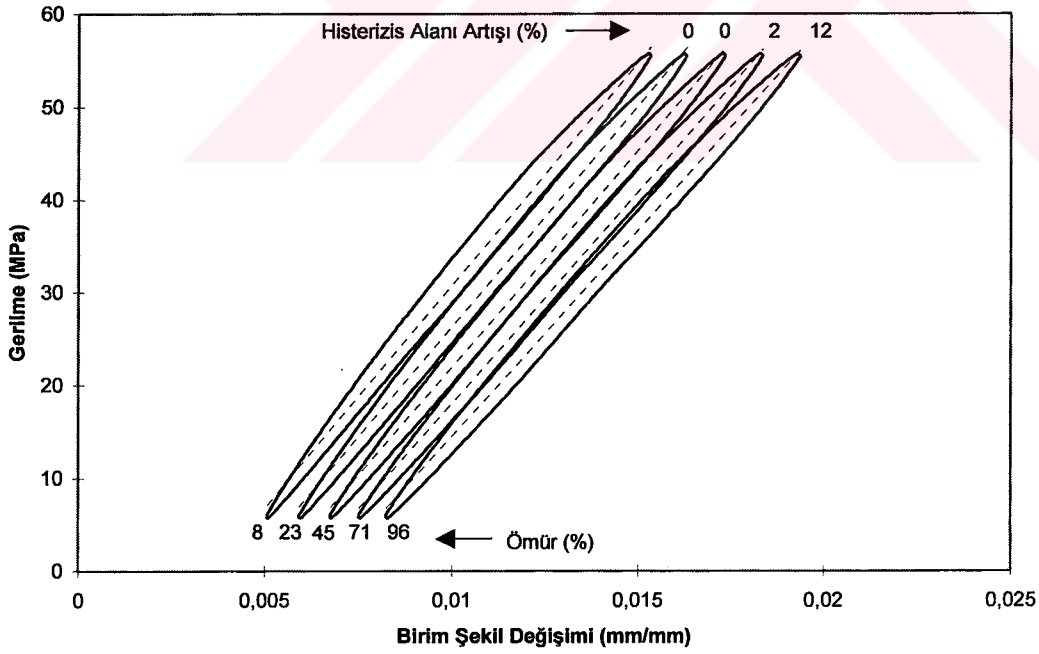
Bu amaçla, incelenen malzemeler için her gerilme yüzdesinden en az beşer adet deney gerçekleştirilmesine çalışılmıştır. Aşağıdaki grafiklerde verilen eğriler, o gerilme yüzdesi grubunu en iyi temsil edebilen tek bir deneyin eğrileridir. Herbir gerilme yüzdesine ait tüm deney dataları (en az beş adet deneyin dataları), histerizis alanlarının yorulma çevrim sayılarına bağlı olarak değişimlerinin verildiği bir sonraki bölümde (7.1.2.) incelenmektedir.



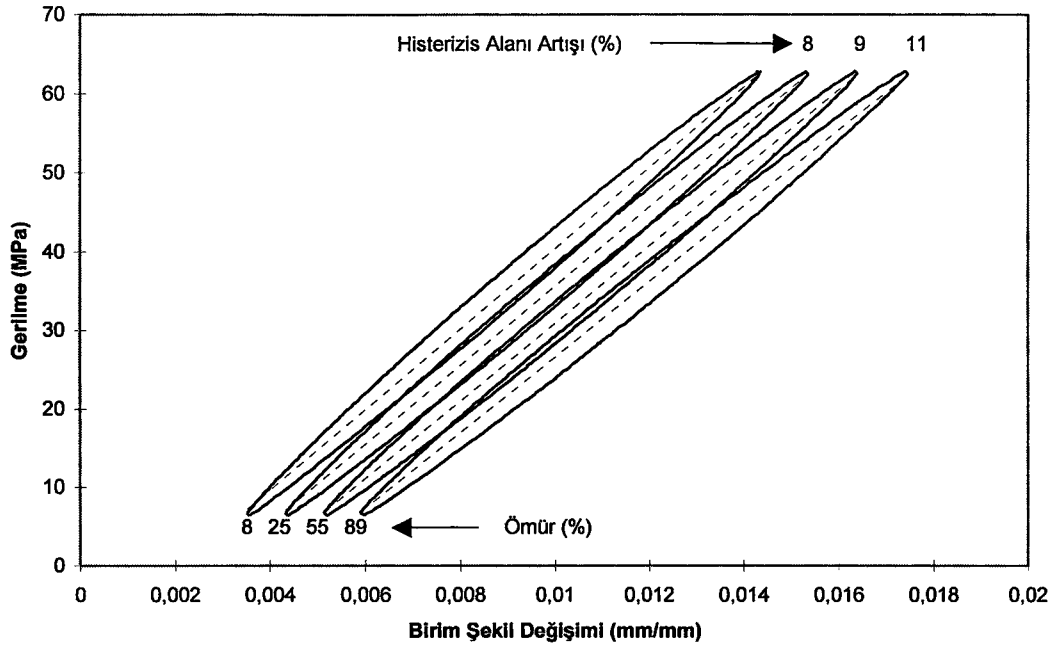
Şekil 7.1 0,6ÇD için KBPP'in histerizis alanının değişimi



Şekil.7.2 0,7ÇD için KBPP'in histerizis alanının değişimi



Şekil.7.3 0,8ÇD için KBPP'in histerizis alanının değişimi



Şekil.7.4 0,9ÇD için KBPP'in histerizis alanının değişimi

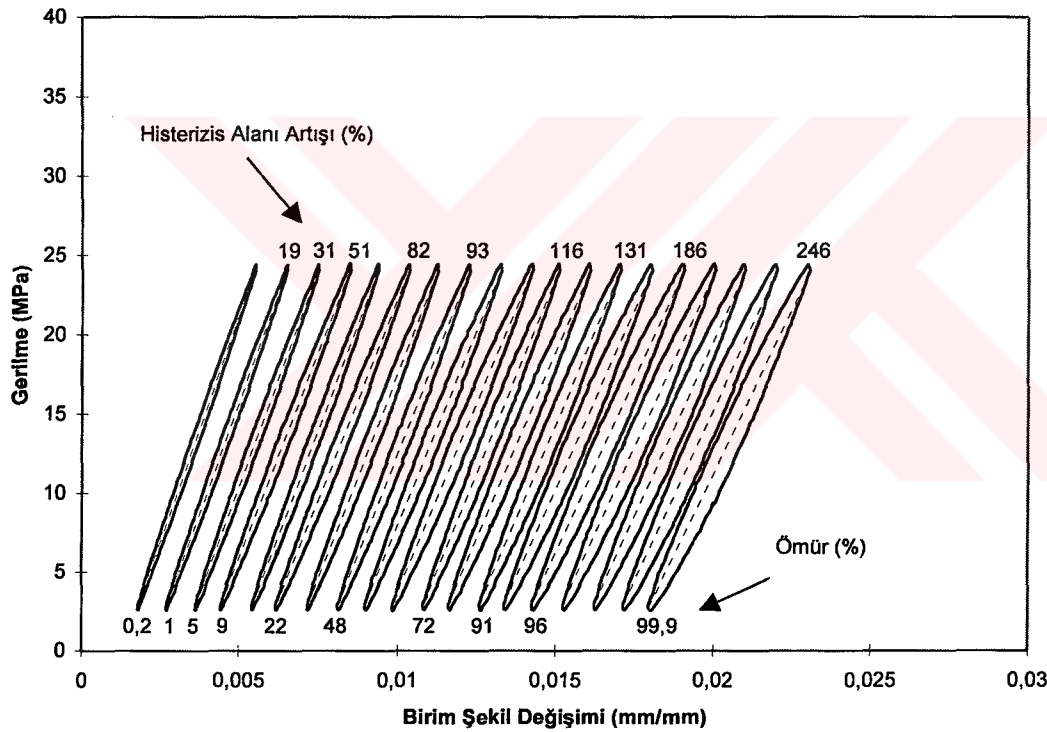
KBPP maksimum yorulma gerilmesinin 0,6ÇD (çekme dayanımının 0,6 katı) olduğu yorulma testinde, toplam ömrünün %86'sına kadar başlangıç histerizis alanı değişmemiş, toplam ömrünün %99'unda ise histerizis enerjisi ilk değerin %17'si kadar artarak hasara uğramıştır (Şekil 7.1).

0,7ÇD değerinde, yine çevrim sayısı artmasına karşın histerizis enerjisinde değişim görülmemektedir. Malzemenin toplam ömrünün %60'ındaki histerizis enerjisi ilk çevrimde saptanan histerizis enerjisiyle aynıdır. Malzemenin histerizis enerjisi hasardan hemen önce (toplam ömrünün %86'sında) %14 oranında artarak hasar gerçekleşmiştir (Şekil.7.2).

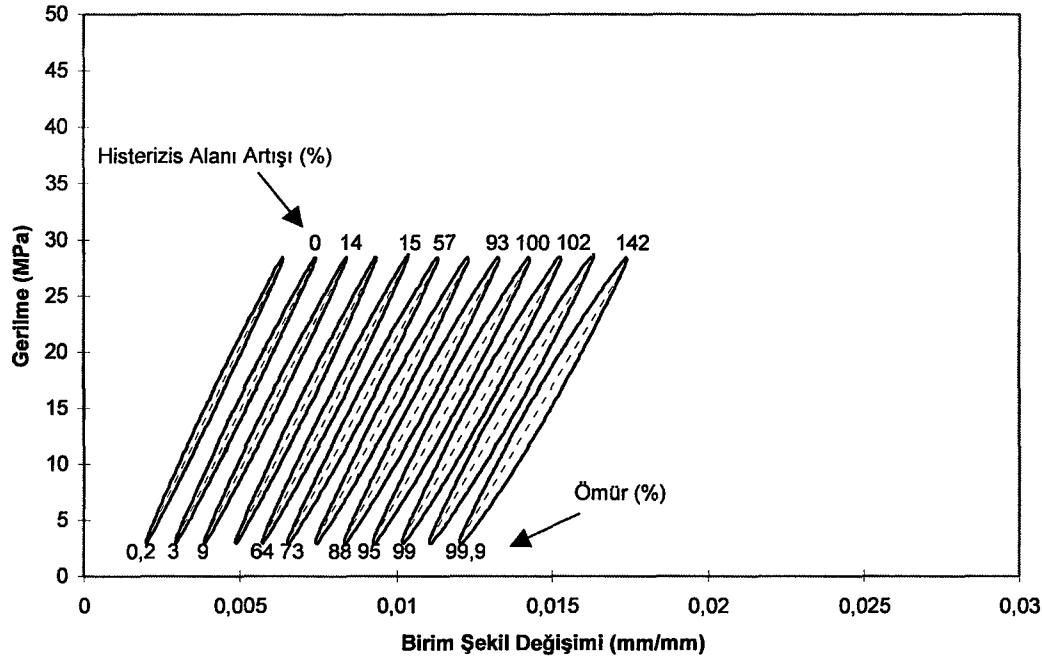
0,8ÇD değerinde, malzemenin histerizis enerjisinde yine önemli artışlar gözlenmemiştir. Malzeme toplam ömrünün %71'ine ulaştığında, histerizis enerjisi toplam ömrünün %8'inde elde edilen değere göre yalnızca %2 kadar artmıştır. Kırılmadan hemen önce (toplam ömrünün %96'sında) ise, malzemenin histerizis enerjisi artışı %12 olarak gerçekleşmiştir (Şekil.7.3).

0,9ÇD değerinde ise, malzemenin histerizis enerjisi ilk çevrimden itibaren sürekli olarak artmaktadır. Buna karşılık hasar oluşmadan önce kaydedilen en son çevrimde (malzemenin toplam ömrünün %89'unda), malzemenin histerizis enerjisinin artışı sadece %11 kadar olmuştur (Şekil.7.4).

KBPP'in histerizis enerjisi 0,6ÇD ve 0,7ÇD testlerinde hasar oluşana kadar değişmemiştir (0,8ÇD testi de bu grupta sayılabilir) buna karşın, 0,9ÇD testinde histerizis enerjisi çevrim sayısı ile artış göstermiştir. 0,9ÇD testi hariç tutulursa, düşük gerilme yüzdelerinde KBPP'in histerizis enerjisi yorulma testi boyunca değişmemekte ve histerizis enerjisindeki artış malzemenin tam hasara uğradığı anda olmaktadır, söz konusu artış düşük oranlarda gerçekleşmektedir (Şekil 7.1 - Şekil.7.3).



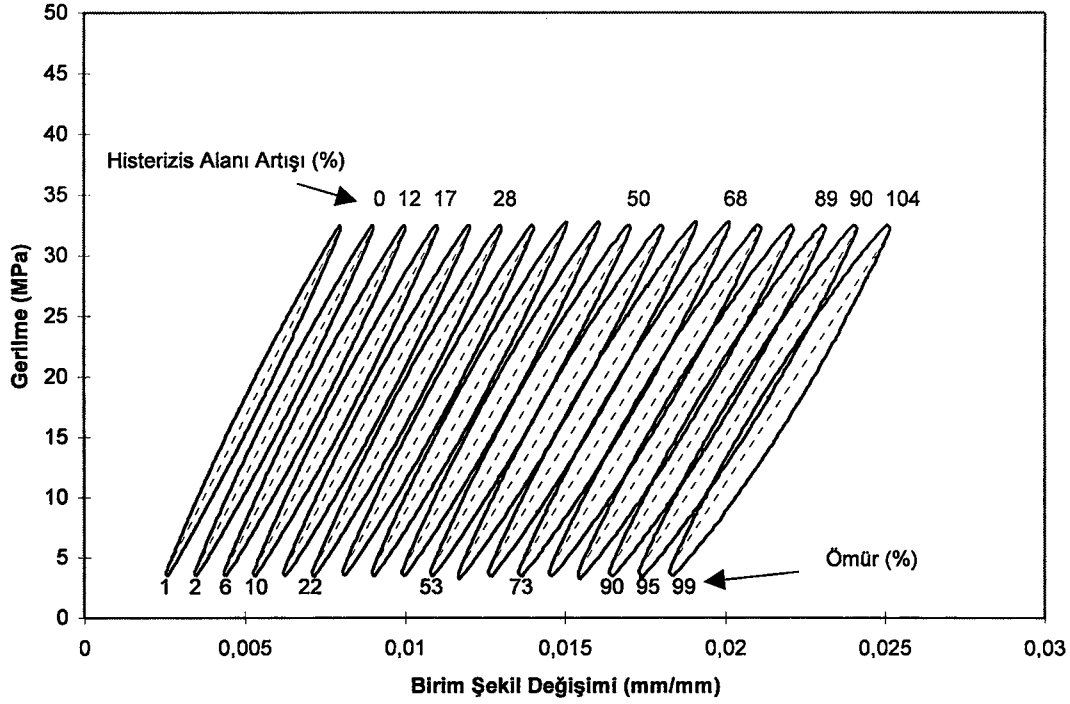
Şekil 7.5 0,6ÇD için DPP'in histerizis alanının değişimi



Şekil.7.6 0,7ÇD için DPP'in histerizis alanının değişimi

0,6ÇD değerinde malzeme toplam ömrünün %1'indeyken histerizis enerjisi artışı %19 olarak gerçekleşmektedir, malzemenin ömrü %9'a ulaştığında histerizis enerjisi %51 artmıştır (Şekil 7.5). Malzemenin ömrü %72'ye ulaştığında histerizis enerjisi artışı %116 ve malzemenin ömrü %96'ya ulaştığında ise, histerizis enerjisi artışı %186 olarak gerçekleşmektedir. Hasardan hemen önce (malzeme toplam ömrünün %99,9'undayken) histerizis enerjisi artışı %246 olmaktadır.

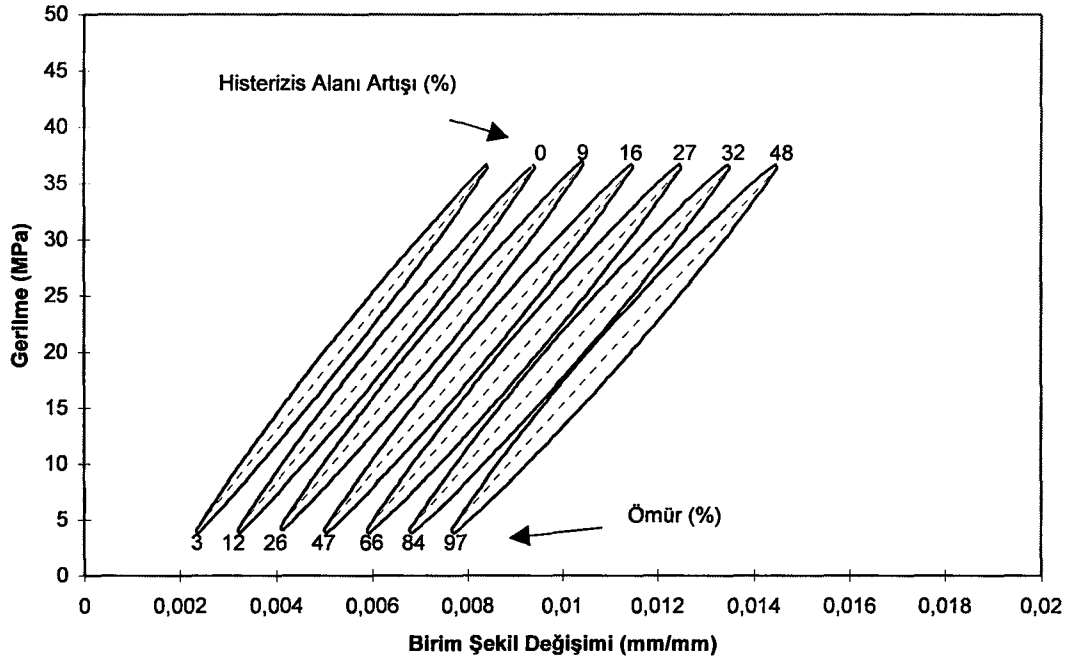
0,7ÇD değerinde malzeme toplam ömrünün %9'undayken histerizis enerjisi artışı %14 olarak gerçekleşmektedir (Şekil.7.6). Malzeme toplam ömrünün %73'üne ulaştığında histerizis enerjisi artışı %57 ve malzeme toplam ömrünün %95'ine ulaştığında ise, histerizis enerjisi artışı %100 olmaktadır. Malzemenin histerizis enerjisi artışı hasardan hemen önce (toplam ömrünün %99,9'unda) %142 olarak gerçekleşmektedir.



Şekil.7.7 0,8ÇD için DPP'in histerizis alanının değişimi

0,8ÇD değerinde, malzeme toplam ömrünün %10'undayken histerizis enerjisi artışı %17 olarak gerçekleşmektedir (Şekil.7.7). Malzeme toplam ömrünün %53'üne ulaştığında histerizis enerjisi artışı %50 ve toplam ömrünün %90'ına ulaştığında ise histerizis enerjisi artışı %89 olmaktadır. Hasardan hemen önce (toplam ömrünün %99'unda) malzemenin histerizis enerjisi artışı %104 olarak gerçekleşmektedir.

0,9ÇD değerinde, malzeme toplam ömrünün %26'sındayken histerizis enerjisi artışı % 9 olarak gerçekleşmektedir (Şekil 7.8). Malzemenin histerizis enerjisi yorulma çevrimi boyunca artmakta ve malzemenin toplam ömrünün %84'üne ulaşıldığında histerizis enerjisi %32 artmaktadır. Hasardan hemen önce (toplam ömrünün %97'sinde) histerizis enerjisi artışı %48 olmaktadır.



Şekil 7.8 0,9ÇD için DPP'in histerizis alanının değişimi

DPP histerizis enerjisinin değişimi tüm gerilme yüzdelerinde ortak özellikler taşımaktadır. Histerizis enerjileri yorulma çevrimleri boyunca artmış ve yüksek artışlar göstererek kırılmalar gerçekleşmiştir (Şekil 7.5 - Şekil 7.8). DPP'in histerizis enerjisinin değişimini veren grafiklerde dikkati çeken bir başka nokta ise, gerilme yüzdesi ile malzeme hasara uğramadan hemen önce kaydedilen histerizis enerjisinin ters orantılı olarak değiştiğidir. Gerilme yüzdesi arttıkça, malzeme daha düşük histerizis enerjisi artışlarıyla hasara uğramaktadır.

KBPP ile DPP'in yorulma testlerinde, histerizis alanları açısından önemli farklar göze çarpmaktadır. Kimyasal bağlı malzemede histerizis alanı hasar oluşana kadar değişmemekte, hasar oluşmadan hemen önce ise düşük sayılabilecek miktarlarda (06ÇD için %17, 07ÇD için %14, 08ÇD için %12 ve 09ÇD için %11) artış göstererek kırılma gerçekleşmektedir. Cam elyaf dolgulu polipropilende ise histerizis alanı yorulma testinin başından itibaren artmaya başlamakta, test boyunca artış sürmekte ve kimyasal bağlı polipropilene göre çok yüksek artışlar (06ÇD için %246, 07ÇD için %142, 08ÇD için %104 ve 09ÇD için %48) göstererek kırılma gerçekleşmektedir.

DPP'in histerizis enerjisinde gözlenen bu yüksek artışların nedeninin zayıf elyaf-matris arabağı olduğu düşünülmektedir. Elyaf-matris arabağı zayıf olduğu için yük elyafa yeterince aktarılamamakta, dolayısıyla yük yalnızca elyaf ve arayüzey tarafından değil matris tarafından da taşınmaktadır. Polipropilen matris sünek bir malzeme olduğu için, düşük seviyeli zorlamaları hasara uğramadan büyük şekil değişimleri karşılayabilmektedir. Bu yüzden DPP malzeme hasara uğramadan önce, yüksek oranda histerizis enerjisi artışı gösterebilmektedir. Histerizis enerjisinin yorulma testi başlangıcından itibaren artış göstermesinin nedeni ise, yine zayıf elyaf-matris arabağıdır. Bu histerizis enerjisindeki artışlar malzeme içinde sürekli bir hasar oluşumu olduğunun göstergesidir.

KBPP'de, elyaf-matris arabağı nispeten daha kuvvetli olduğu için yük elyafa daha iyi aktarılmakta, yükün elyaf ve arayüzey tarafından birlikte taşınması gerçekleşmektedir. Cam elyaf, PP matrise göre daha rijit olduğu için yorulma zorlaması sırasında ancak düşük seviyede elastik şekil değişimleri söz konusu olmaktadır. Bu yüzden yorulma testi boyunca histerizis enerjisi belirgin olarak değişmemektedir. Hasar, elyaf-matris arabağının uygulanan gerilmeyi taşıyamayacak şekilde bozulduğu anda, ani olarak gerçekleşmektedir. Çünkü bu defa uygulanan zorlama DPP'de olduğu gibi PP matrisin taşıyabileceği seviyenin çok üzerindedir. Hitchen [31] cam elyaf takviyeli polipropilende hasar oluşumunu ani hasar (sudden failure) şeklinde ifade etmiştir.

7.1.2. Histerizis Enerjisi, Dinamik Modül, Dinamik Sürünme Şekil Değişimi ve Karşılaştırmalar

Bu bölümde KBPP ve DPP malzemelerin yorulma davranışları, dinamik deneyler sırasında toplanan datalarla oluşturulan histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik birim şekil değişimi yöntemleriyle tartışılacaktır.

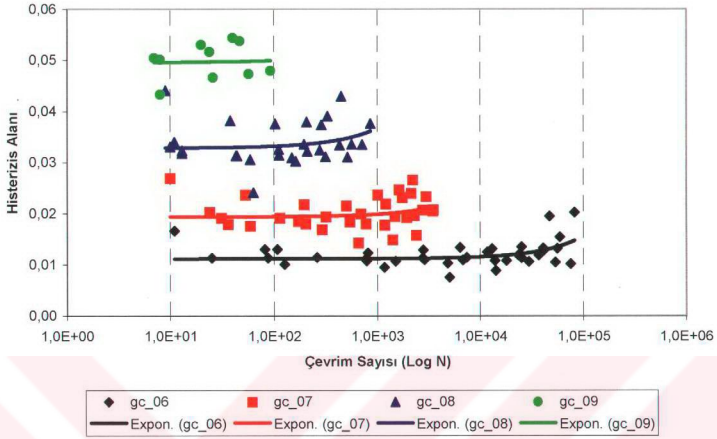
Polimerlerin yorulma davranışlarının, histerizis ölçümü yöntemiyle saptanması literatürde sıkça kullanılmıştır [16-23]. Bu çalışmalarda Altstadt, Ehrenstein ve çalışma arkadaşları, histerizis eğrilerini malzemelerin sönümleme katsayılarını saptamak amacıyla kullanmışlardır. Örnek olarak Altstadt, Loth ve Schlarb [16] sönümleme katsayısını kayıp enerjinin depolanan enerjiye oranı olarak tariflemişlerdir. Kayıp enerji histerizis eğrilerinin arasında kalan alandır. Depolanan enerji ise orta gerilme eğrisi gibi bir doğru kullanarak, bu doğru ile x ekseninde kalan alan olarak tarif edilmiştir. Sönümleme parametresinin kullanıldığı sözkonusu çalışmaların benzer noktaları çekme-basma tarzında çalışmalardır.

Çalışmalar sırasında cam elyaf takviyeli plastikler gibi, lineer viskoelastik özellik gösteren malzemelerle çekme-çekme tarzında yapılan çalışmalarda, sönümleme olarak tariflenen değerin yalnızca kayıp enerji komponenti ile doğru bir şekilde tarif edilebileceğini gözlemlenmiştir. Sönümleme olarak verilen diyagramlarla, burada yalnızca kayıp enerji kullanarak tariflenen histerizis enerjileri benzer eğilimler göstermektedir. Yorulma hasarı arttıkça sönümleme değeri ve histerizis enerjisi (alanı) artmaktadır. Bizim kritik çevrim sayıları şeklinde belirlediğimiz çevrim sayılarını ise Janzen ve Ehrenstein [23] cam elyaf takviyeli PBT ile yaptığı çalışmada, sönümleme değerlerindeki hızlı artış görülen bölgeleri sürünmede 3. bölge olarak tanımlamışlardır. Sönümleme parametresinde depolanan enerjinin etkisi, orta gerilme eğrisinin eğimi ile değişmektedir. Biz bu etkiyi dinamik modül olarak tariflediğimiz parametre yardımıyla dikkate aldık.

Yorulma testi yük kontrollu olduğu takdirde değişken, şekil değişimi olacaktır. Bu takdirde orta gerilme eksenini, şekil değişimlerinden faydalanarak orta şekil değişim eksenini olarak çizmek daha doğru sonuçlar verecektir. Renz ve arkadaşları da [17 ve 18] sönümleme ve diğer parametrelerin tariflenmesinde orta şekil değişim eksenini kullanmışlardır.

Önceki bölümde histerizis grafiklerinde herbir gerilme yüzdesini (0,6ÇD; 0,7ÇD; 0,8ÇD ve 0,9ÇD) temsilen verilen eğriler, eğri alanları integre edildikten sonra aşağıda toplu olarak verilmiştir. Herbir gerilme yüzdesi değeri için en az beşer adet deney sonucu verilmektedir.

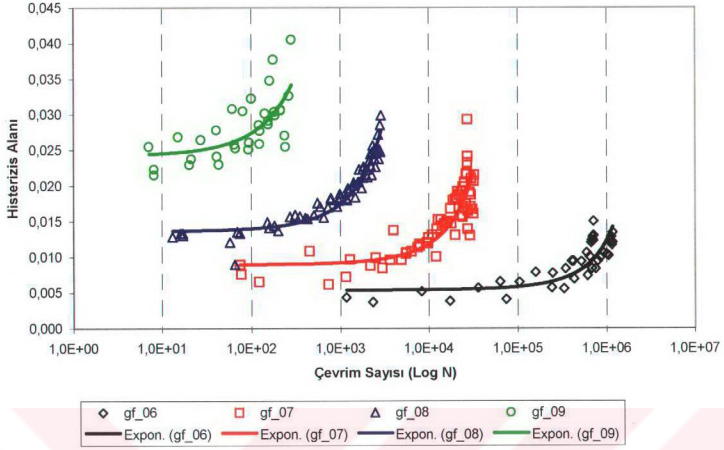
Kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli polipropilenin histerizis eğrilerinde, başlangıç çevrimlerinde artan çevrim oranlarına karşılık eğrilerin paralel kaldığı gözlenmektedir (Şekil.7.9). Her eğriye özgü kritik çevrim sayılarından sonra ise, bu paralel bölge bozulmakta ve histerizis enerjisi artmaya başlamaktadır. Bu kritik çevrim sayıları yaklaşık olarak 0,6ÇD eğrisi için $1,0E+04$, 0,7ÇD eğrisi için $1,0E+03$ ve 0,8ÇD eğrisi için $1,0E+02$ olarak gözlenmektedir. 0,9ÇD eğrisi için ise kritik bir çevrim sayısı yoktur. Hasar, bu gerilme oranında hızla ilerleyerek, kırılma anı olarak gerçekleşmektedir. Histerizis enerjisi artışları gerilme oranı azaldıkça daha geç gerçekleşmeye başlamaktadır. KBPP'in histerizis enerjisinin başlangıç çevrimlerinde sabit kalması ve hasardan hemen önce artış göstermesi daha önceki bahislerde sunulan histerizis eğrilerinin alanları ile uyum sağlamaktadır (Şekil 7.1 - Şekil.7.3). Burada sunulan bilgilere benzer şekilde, 09ÇD yüzdesi için verilen histerizis eğrilerinin alanlarının artışlarında da ilk çevrimlerden itibaren sürekli artış gözlenmiştir (Şekil.7.4).



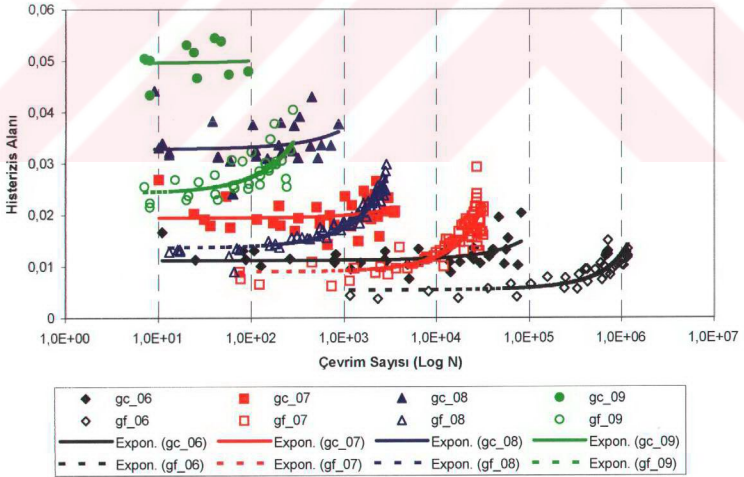
Şekil.7.9 KBPP'in (gc: glass coupled) histerizis alanının yorulma çevrim sayısı ile değişimi

DPP'de histerizis enerjisi artışı, daha uzun zamanda gerçekleşmiştir (Şekil 7.10). Malzemede 0,6ÇD için 1,0E+03 ve 0,7ÇD için 1,0E+02 çevrime kadar histerizis enerjisi artışı saptanmamıştır. DPP'in histerizis eğrilerinde, paralel bölgeler çok küçük alanları kapsamaktadır (Şekil 7.10). Buradaki kritik çevrim sayıları, histerizis enerjisi artışının şiddetlendiği noktalar olarak tanımlanabilir. Bu kritik çevrim sayıları ise yaklaşık olarak 0,6ÇD eğrisi için 1,0E+05, 0,7ÇD eğrisi için 1,0E+03 ve 0,8ÇD eğrisi için 1,0E+02 olarak gözlenmektedir. 0,9ÇD eğrisi için yine, test başlangıcından itibaren histerizis enerjisi artmaktadır. DPP'in histerizis enerjisinin başlangıç çevrimlerinden itibaren artışı ve hasardan önce yüksek artışlar göstermesi daha önceki bahislerde sunulan histerizis eğrilerinin alanlarıyla da uyum sağlamaktadır (Şekil 7.5 - Şekil 7.8).

KBPP ve DPP'in histerizis enerjilerinin artışları karşılaştırıldığı takdirde, KBPP'de yorulma çevrim sayısı artmasına rağmen histerizis enerjisinin başlangıç çevrimlerinde bir süre sabit kaldığı buna karşın, DPP'in histerizis enerjisinin yorulma zorlaması uygulanmasıyla beraber artış eğilimi gösterdiği görülmektedir (Şekil 7.11).



Şekil 7.10 DPP'in (gf: glass filled) histerizis alanının yorulma çevrim sayısı ile değişimi

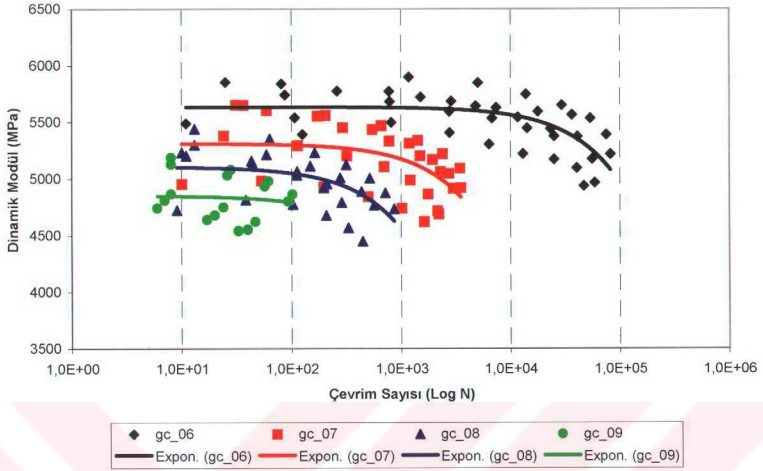


Şekil 7.11 KBPP ve DPP'lerin histerizis alanlarının yorulma çevrim sayısı ile değişimleri

Renz ve arkadaşları [17 ve 18] dinamik zorlamalar altında zorlanan malzemelerde mühendislik yaklaşımı açısından, yalnızca hasarın olduğu ömrün değil aynı zamanda malzemenin rijitliğindeki değişimin de vurgulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Horst tek başına [24 ve 25] ve Spoormaker ile [26] yaptığı çalışmalarda, yorulma testi sırasında ölçtükleri orta şekil değişim eğrisinin eğimi yardımıyla cam elyaf takviyeli naylonun çevrimsel yorulmasını tariflemişlerdir. Aynı şekilde benzer yöntemle Altstadt [16] ve Janzen ile Ehrenstein [22] çalışmalarında dinamik modül ölçümleri gerçekleştirerek yorulmayı tarif etmeye çalışmışlardır.

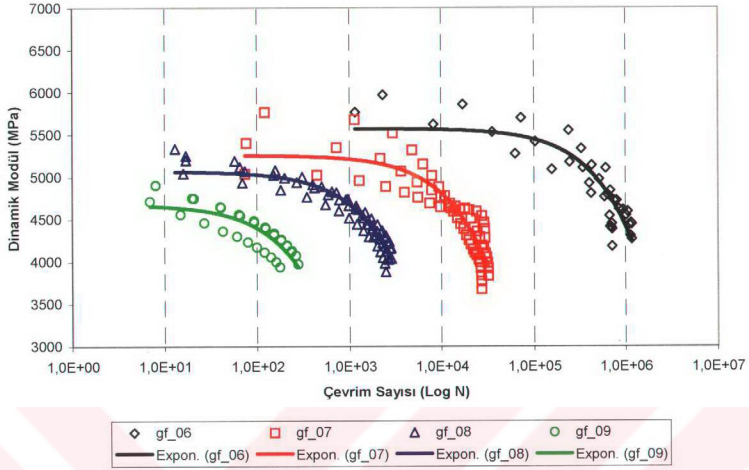
Bu çalışmada ise histerizis eğrilerinin maksimum ve minimum birim şekil değişimleri arasında çizilen ve grafiklerde kesikli çizgiyle gösterilen doğrular dinamik modüllerin hesaplanmasında kullanılmıştır (Şekil 7.1 – Şekil 7.8). Daha sonra bu kesikli çizgilerle ifade edilen doğruların eğimleri bulunarak, bunlar dinamik modül olarak adlandırılmıştır. Dinamik modüllerin hesaplanmasının amacı, incelenen malzemelerin yorulma davranışlarının malzemenin rijitliği yardımıyla açıklanmasını sağlamaktır.

Yine her bir gerilme yüzdesi için en az beşer adet test gerçekleştirilmiştir. KBPP'de başlangıçta dinamik modül çevrim sayısı ile değişmezken, belli çevrim sayılarından sonra malzemenin rijitliğinde azalma gözlenmektedir (Şekil 7.12). Eğrilerde paralel kısımlar olarak gözlenen bölgeler belli çevrim sayılarına kadar hasar oluşmadığını veya malzemenin rijitliğinin oluşan hasardan fazla etkilenmediğini, kritik çevrim sayılarından sonra ise hasar oluşumunun başladığını veya malzemenin rijitliğinin gelişen hasardan etkilendiğini göstermektedir. Bu kritik çevrim sayıları 0,6ÇD eğrisinde 1,0E+03, 0,7ÇD için 1,0E+02 olmakla beraber, 0,8ÇD ve 0,9ÇD için ise 1,0E+02'den küçük çevrim sayılarına düşmüşlerdir.



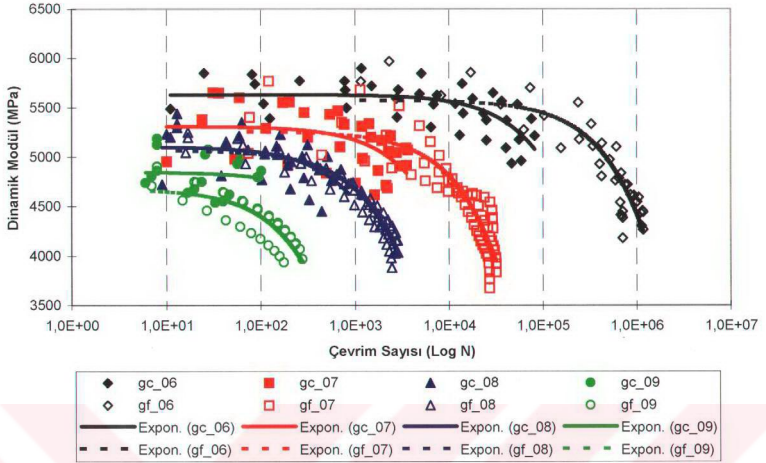
Şekil 7.12 KBPP'in dinamik modülünün yorulma çevrim sayısı ile değişimi

DPP'de histerizis enerjisi artışı yöntemine benzer şekilde (Şekil 7.10), modül azalması daha uzun zamanda gerçekleşmiştir (Şekil 7.13). 0,6ÇD için $1,0E+03$ ve 0,7ÇD için $1,0E+02$ çevrime kadar malzeme rijitliğinde bir değişim saptanmamıştır. DPP'nin rijitliğinde azalmanın başladığı kritik çevrim sayıları 0,6ÇD için $1,0E+04$, 0,7ÇD için $1,0E+03$, 0,8ÇD için $1,0E+02$ olarak tespit edilmiştir. 0,9ÇD için ise malzemenin rijitliği yine KBPP'de olduğu gibi, testin başlaması ile azalma eğilimine girmektedir.



Şekil 7.13 DPP'in dinamik modülünün yorulma çevrim sayısı ile değişimi

Histerizis enerjisinde olduğu gibi (Şekil.7.9), dinamik modül eğrilerinde de kimyasal bağlı malzemede ani kırılma eğilimi gözlenmektedir (Şekil 7.14). 0,9ÇD eğrileri hariç KBPP ve DPP'in testlerin başında saptanan dinamik modülleri yaklaşık aynıdır. Artan çevrim sayıları ile KBPP, DPP'ye göre daha önce hasara uğramaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi elyaf-matris arabağı bozulmaya başladığı takdirde, KBPP'de uygulanan yük matrisin tek başına taşıyabileceğinin çok üzerinde olmakta ve ani kırılma gerçekleşmektedir. DPP'de ise yük matris tarafından da taşınabilecek seviyelerde olduğu için elyaf-matris ayrılmaları gerçekleşmesine rağmen, matris bir süre daha yük taşımakta ve DPP daha uzun sürede hasara uğramaktadır.

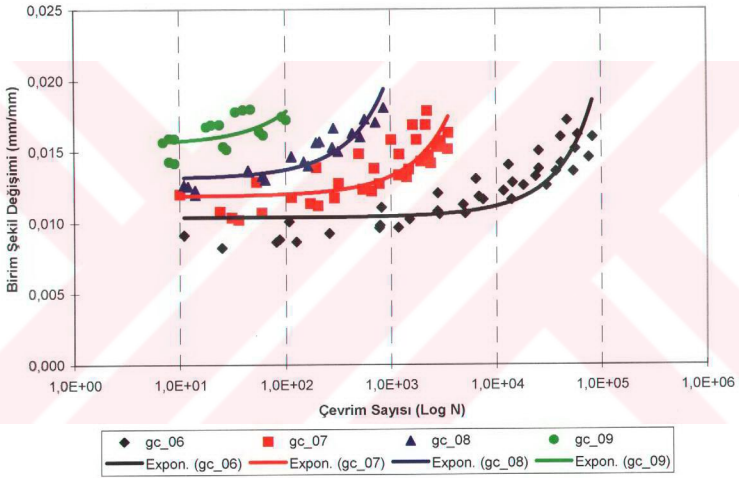


Şekil 7.14 KBPP ve DPP'in dinamik modüllerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimi

Literatürde malzemelerin yorulma davranışlarının tespit edilmesinde histerizis enerjisi ve dinamik modül kadar sık kullanılan bir yöntem de, malzemelerin birim şekil değişimlerinin yorulma çevrimleri boyunca değişimidir. Horst ve Spoormaker yaptıkları çalışmalarda [24, 25 ve 26], cam elyaf takviyeli naylonun yorulma zorlanması altında sürünme hızlarını tespit etmişlerdir. Yazarlar sürünme hızları ile malzemenin yorulma davranışı arasında doğrudan ilişki olduğunu ortaya koyarak, bu yöntemin yorulma hasarının tespit edilmesinde güvenilir bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir. Hitchen ve arkadaşları da [27 ve 28] yaptıkları çalışmalarda, birim şekil değişimleriyle yorulma çevrim sayıları arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu çalışmada ayrıca elde edilen verilerin, histerizis enerjisi ve dinamik modül ile karşılaştırmaları yapılmıştır.

Histerizis enerjisi ve dinamik modül bilgilerinde olduğu gibi, KBPP'in dinamik sürünme (dinamik birim şekil değişimi) grafiğinde hasarın başladığı/etkin olduğu ana kadar eğrilerin paralel sayılabilecek bölgelerinin olduğu gözlenmektedir (Şekil 7.15). Bu paralel bölgeler birim şekil değişiminin çevrim sayısı ile değişmediğini

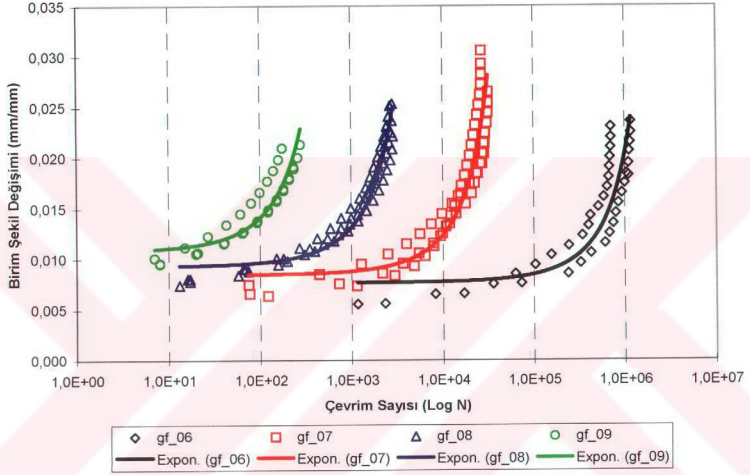
göstermektedir. Paralel bölgeler artan gerilme ile azalmakta ve 0,9 ÇD için hemen hemen hiç paralel bölge kalmamaktadır. Paralel sayılabilecek bölgelerin sonunda da birim şekil değişimi kademeli olarak artmakta, ani bir artış gözlenmemektedir. Kritik çevrim sayıları 0,6ÇD eğrisinde $1,0E+03$, 0,7ÇD için $1,0E+02$ olmakla beraber, 0,8ÇD ve 0,9ÇD için ise paralel bölge yoktur. 0,8ÇD ve 0,9ÇD gerilme yüzdelilerinin dinamik sürünme eğrilerinde yorulma testi başlangıcından itibaren artış görülmektedir. Tipik bir sürünme eğrisinde olduğu gibi paralel bölge “2. bölge” ve hasarın hızla arttığı bölge ise “3. bölge” olarak tanımlanabilir.



Şekil 7.15 KBPP'in birim şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi

DPP'de dinamik sürünme, daha uzun sürede gerçekleşmiştir (Şekil 7.16). DPP malzemede 0,6ÇD için $1,0E+03$ ve 0,7ÇD için $1,0E+02$ çevrime kadar birim şekil değişimlerinde artış saptanmamıştır. DPP'in birim şekil değişimi eğrilerinin paralel kısımlarının histerizis enerji artışı (Şekil 7.10) ve dinamik modül azalması (Şekil 7.13) grafiklerinde olduğu gibi çok az olduğu görülmektedir (Şekil 7.16). Bu paralellik artan gerilme ile azalmakta ve 0,8ÇD ile 0,9ÇD için hiç paralel bölge kalmamaktadır.

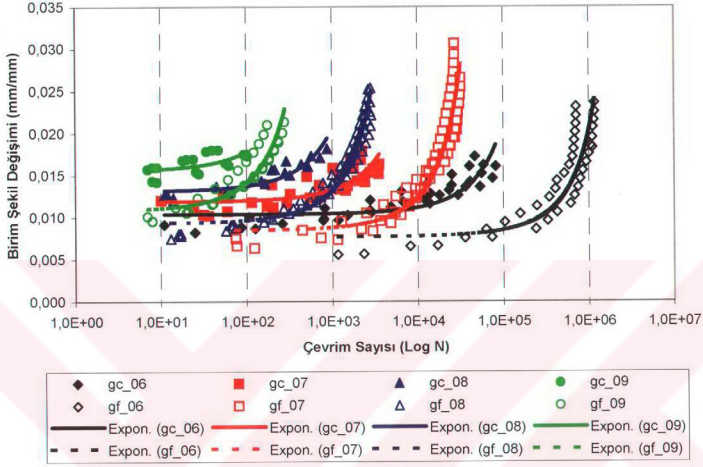
Buradaki kritik çevrim sayıları dinamik sürünme şekil değişimi hızının arttığı noktalar olarak tanımlanabilir. Bu kritik çevrim sayıları ise yaklaşık olarak 0,6ÇD için $1,0E+05$, 0,7ÇD için $1,0E+03$ ve 0,8ÇD eğrisi için $1,0E+02$ olarak gözlenmektedir. 0,9ÇD eğrisi için yine test başlangıcından itibaren birim şekil değişimlerinde sürekli artış gözlenmektedir.



Şekil 7.16 DPP'in birim şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi

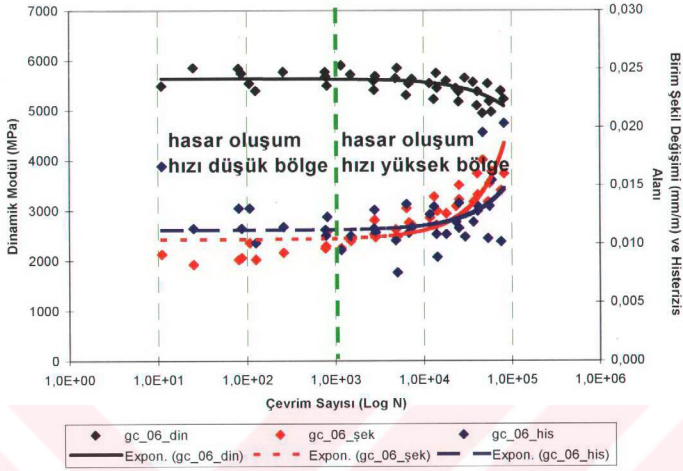
KBPP ve DPP'i birlikte incelediğimiz takdirde, DPP'lerde kırılma hasarının daha uzun sürdüğü, diğer bir deyişle DPP malzemenin daha sünek bir davranış gösterdiği farkedilmektedir (Şekil 7.17). "3. bölgede" hasar hızla ilerlemesine rağmen DPP bu duruma KBPP'in aksine çok büyük şekil değişimleriyle karşılık verebilmektedir. Bu da cam elyaf-PP matris bağının zayıf olması sonucu gittikçe artan oranda elyaf-matris sıyrılması oluştuğunu ve matrisin artan oranda sünek olarak deforme olmaya başladığını düşündürmektedir. Aynı durumun KBPP'de söz konusu olmamasının nedeni, elyaf-matris bağının daha iyi olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 7.17). Bunun yanı sıra KBPP'de uygulanan gerilme matrisin taşıyabileceğinin çok üzerinde

olduğu için, elyaf-matris ayrılmaları başladıktan sonra ani kırılmaların gerçekleştiği varsayılmaktadır (Şekil 7.17).

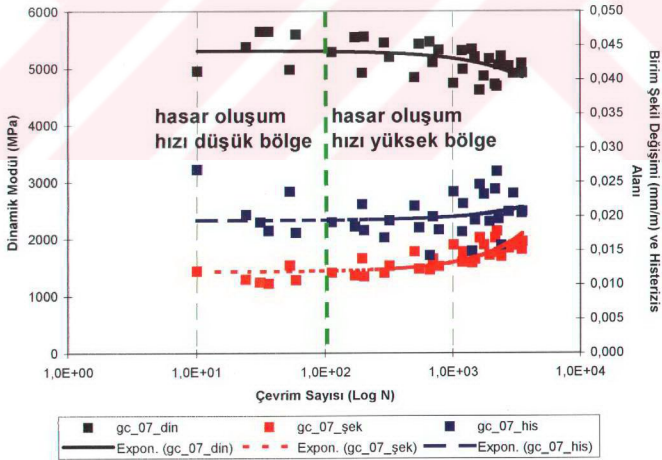


Şekil 7.17 KBPP ve DPP'lerin birim şekil değişimlerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimleri

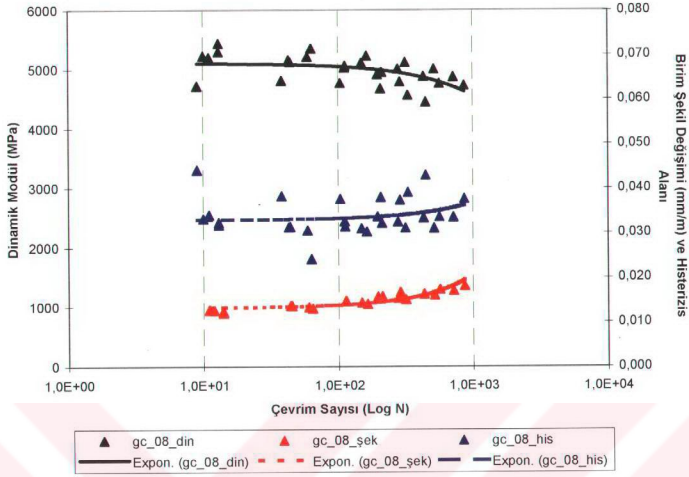
Şimdiye kadar ayrı ayrı incelenen ve yorumlanan histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişimi bilgileri, aşağıda birarada değerlendirileceklerdir. Böylece hem daha önceki yorumların yeniden gözden geçirilmesi sağlanacak, hem de temelde aynı sonuçları vurgulayan bu farklı yöntemlerin birbirleriyle tutarlılıkları tartışılacaktır. Kolay anlaşılabilir olması amacıyla, grafikler öncelikle KBPP ve DPP, daha sonra da 0,6ÇD, 0,7ÇD, 0,8ÇD ve 0,9ÇD gerilme yüzdeleri için ayrı ayrı inceleneceklerdir.



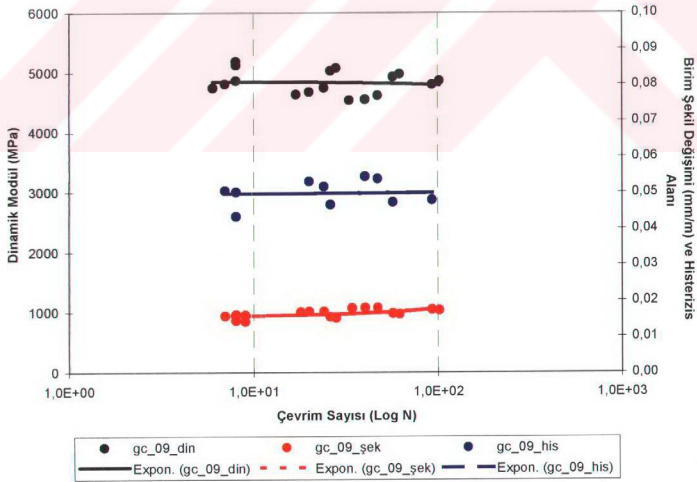
Şekil 7.18 0,6ÇD'da KBPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi



Şekil 7.19 0,7ÇD'da KBPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi

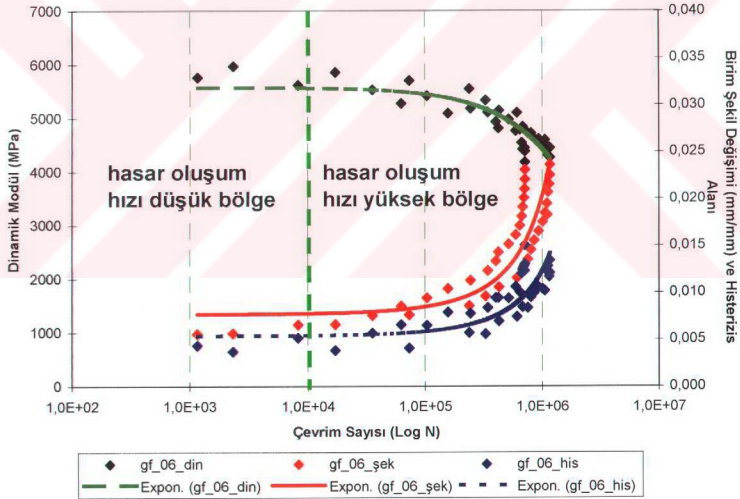


Şekil 7.20 0,8ÇD'da KBPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi

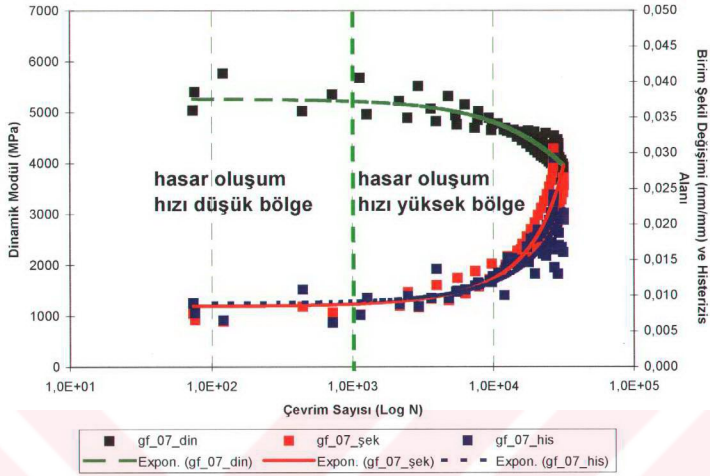


Şekil 7.21 0,9ÇD'da KBPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi

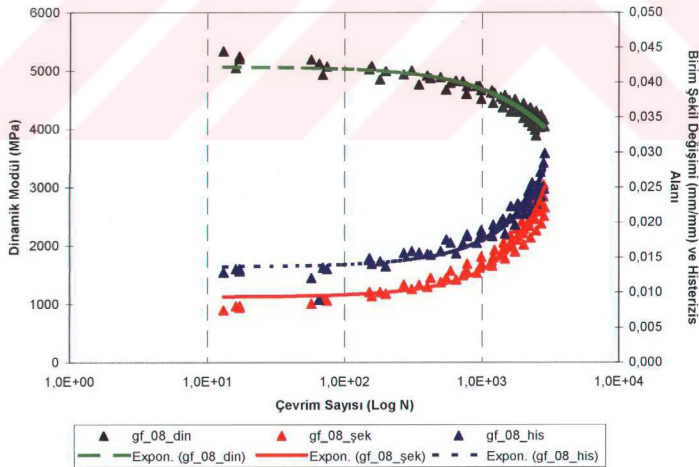
KBPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişimi eğrileri incelendiği takdirde, eğrilerin paralel bölgelerinin ve kırınım noktalarının tam anlamıyla uyum sağladığı gözlenmektedir. Bu durum, deney datalarının oldukça tutarlı olduğunu göstermektedir. Eğrilerin kırınım noktaları (paralelliğin bozulduğu noktalar) diğer bir deyişle hasarın etkin olmaya başladığı noktalar 06ÇD eğrisi için $1,0E+03$ ve deformasyonun hızla artmaya başladığı çevrim sayısı ise $1,0E+04$ olarak kabul edilebilir (Şekil 7.18). 07ÇD gerilme yüzdesi için ise malzeme, $1,0E+02$ çevrim sayısına kadar başlangıç dayanım özelliklerini sürdürmektedir, bu çevrim sayısından sonra malzemenin dayanım özellikleri kötüleşmeye başlamaktadır ve $1,0E+03$ çevrim sayısından itibaren ise hasar oluşumu şiddetlenerek malzeme hızla kırılma hasarına doğru ilerlemektedir (Şekil 7.19). 08ÇD ve 09ÇD gerilme yüzdesinde yapılan testler birlikte incelendiği takdirde ise, benzer şekilde histerizis enerjisi, birim şekil değişimi ve dinamik modül eğrilerinin birbirleriyle tutarlı olduğu gözlenmektedir (Şekil 7.20 ve Şekil 7.21).



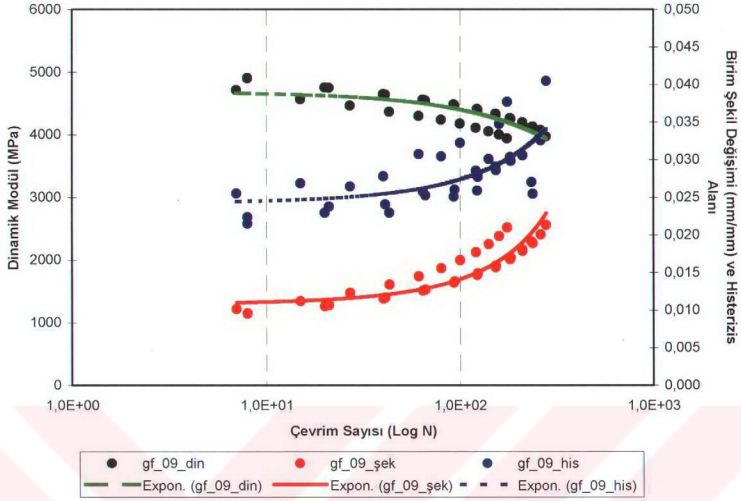
Şekil 7.22 0,6ÇD'da DPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi



Şekil 7.23 0,7ÇD'da DPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi



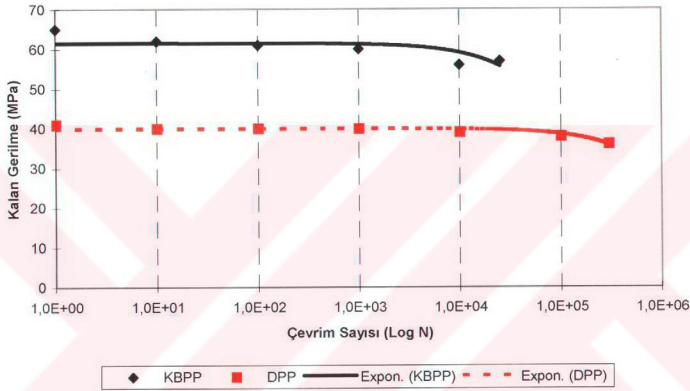
Şekil 7.24 0,8ÇD'da DPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi



Şekil 7.25 0,9ÇD'da DPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin yorulma çevrim sayısı ile değişimi

DPP'in 06ÇD gerilme yüzdesinde gerçekleştirilen testlerinde yaklaşık olarak $1,0E+04$ çevrim sayısına kadar malzeme özellikleri değişmemektedir (Şekil 7.22). Bu çevrim sayısından itibaren birim şekil değişimi ve histerizis değerleri artarken, dinamik modül değeri azalmaya başlamaktadır. $1,0E+05$ çevrim sayısından itibaren ise birim şekil değişimi ve histerizis değerlerindeki artışın yanı sıra, dinamik modüldeki azalma şiddetlenmektedir. 07ÇD test değerleri incelendiğinde ise hasar oluşumunun şiddetlendiği çevrim sayısı yaklaşık olarak $1,0E+03$ olarak görülmektedir (Şekil 7.23). 08ÇD için hasar oluşumunun şiddetlendiği çevrim sayısı yaklaşık olarak $1,0E+02$ 'ye düşmektedir (Şekil 7.24). 09ÇD test değerleri incelendiği takdirde ise, kimyasal bağlı polipropilende olduğu gibi bu gerilme değerinin, ani kırılma hasarı oluşturmamasına karşın, cam elyaf dolgulu polipropilenin dinamik olarak uzun süre taşıyamayacağı kadar yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 7.25).

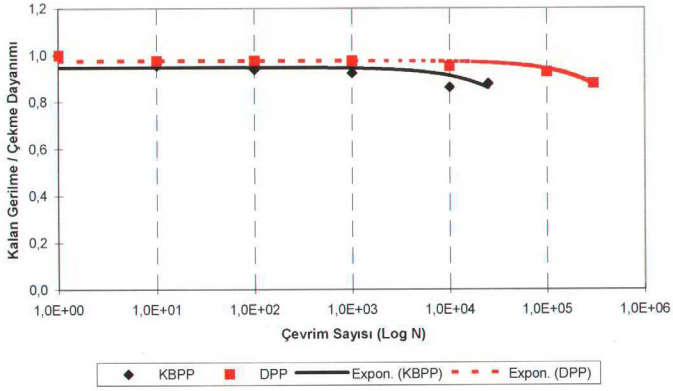
KBPP ve DPP'lerin her ikisinde de eğrilerin başlangıçtan itibaren önemli bir bölümünün paralel olduğu, diğer bir deyişle dayanım değerlerinin uzun bir süre yorulma çevrim sayısı ile değişmediği görülmektedir (Şekil.7.26). Malzemelerin dayanımlarının azalmaya başladığı kritik değerler KBPP için $1,0E+03$ ve DPP için $1,0E+04$ olarak kabul edilebilir. Söz konusu değerlerden sonra her iki malzemenin dayanımları, hızlı bir şekilde azalmaktadır.



Şekil.7.26 KBPP ve DPP'in kalan çekme dayanımlarının yorulma çevrim sayısı ile değişimleri

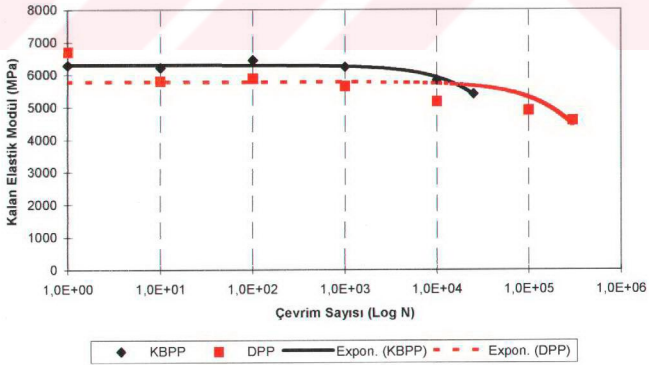
Horst [24] malzemelerin yorulma dayanımlarının çekme dayanımları ile doğrudan ilişkili olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmada kullanılan DPP'in çekme dayanımının, KBPP'in çekme dayanımının 0,6 katına eşit olması nedeniyle, söz konusu malzemeleri normalize kalan (çekme) dayanımları açısından karşılaştırmak daha doğru olacaktır.

Normalize kalan dayanım değerleri incelendiği takdirde, dolgulu malzemenin ömrü bir onluk birim kadar daha uzun sürmesi dışında eğri karakteristikleri aynıdır (Şekil.7.27). Ayrıca DPP, KBPP'den daha yüksek normalize kalan dayanıma sahiptir.



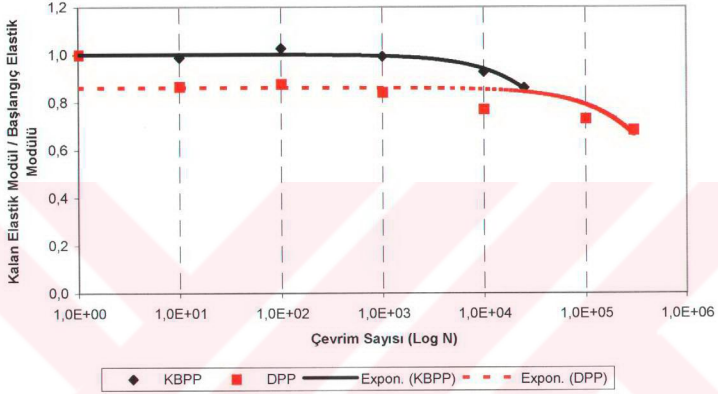
Şekil.7.27 KBPP ve DPP'in normalize çekme dayanımlarının yorulma çevrim sayısı ile değişimi

Kalan elastik modül hesaplanırken ayrıca, $\varepsilon=0-0,001$ için sekant modül, $\varepsilon=0-0,002$ için sekant modül ve $\varepsilon=0,001-0,002$ için kord (chord) modülleri hesaplanmıştır. Modüllerin hepsinin eğilimleri (trend) benzer olduğu ve mühendislik hesaplamalarında da sıkça kullanıldığı için burada yalnızca elastik modülün verilmesi tercih edilmiştir.



Şekil.7.28 KBPP ve DPP'in elastik modüllerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimi

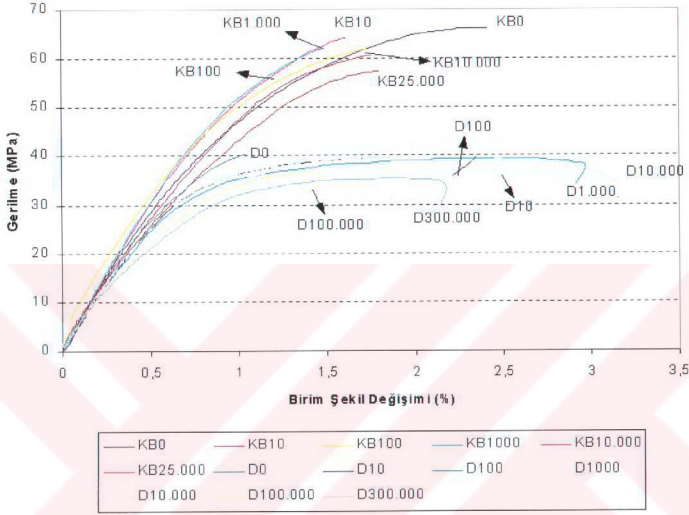
Her iki grafikte de belli çevrim sayılarına kadar malzemelerin kalan elastik modüllerinin çevrim sayısı ile değişmediği görülmektedir (Şekil.7.28). Yine kalan gerilme değerlerine benzer şekilde KBPP için $1,0E+03$ ve DPP için $1,0E+04$ çevrim sayılarından sonra kalan elastik modüller azalmaya başlamaktadırlar. Normalize kalan gerilmenin aksine, kimyasal bağlı malzemenin normalize kalan elastik modülü daha yüksektir (Şekil.7.29).



Şekil.7.29 KBPP ve DPP'in normalize kalan elastik modülünün yorulma çevrim sayısı ile değişimi

KBPP'in gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde, yorulma zorlamasına maruz kalmamış (yorulmamış) numunenin kalan çekme dayanımının yorulmuş numunelerin kalan çekme dayanımlarından daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil.7.30). Şekil.7.30'daki grafikte KBPP'i ifade eden "KB" ve DPP'i ifade eden "D" harflerinin yanlarındaki sayılar o malzemenin yorulmaya zorlandığı çevrim sayısını göstermektedir. Ayrıca, yorulmamış malzemenin birim şekil değiştirme değeri de yorulmuş numunelere göre daha yüksektir. Bu fark 10 çevrim yorulmuş malzemede dahi gözlenebilmektedir. Dolayısıyla daha önce değişik grafiklerde yorulma testinin başlangıcından itibaren eğrilerde paralel veya paralele yakın kısımlar görülmesine rağmen (Şekil.7.26 ve Şekil.7.27), yorulma testinin başlamasıyla KBPP'de hasar oluşumunun başladığı söylenebilir. Kalan çekme dayanımı değerleri incelendiği

takdirde, artan yorulma çevrim sayısı ile malzemenin kalan çekme dayanımının azaldığı diğer bir deyişle hasarın arttığı görülmektedir.



Şekil.7.30 KBPP (KB) ve DPP (D)'in gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

DPP'de de yorulmamış numunenin kalan çekme dayanımı diğer yorulma testi uygulanmış malzemelere göre daha yüksektir (Şekil.7.30). Birim şekil değişimleri arasındaki fark ise malzemenin hem kendi iç yapısından hem de, enjeksiyon kalıplama yönteminden gelen anizotropi ile açıklanabilir.

KBPP ve DPP gerilme-birim şekil değişimi eğrileri karşılaştırıldığında, kalan çekme dayanımları arasındaki fark açıkça görülebilmektedir (Şekil.7.30). KBPP'in kalan çekme dayanımının DPP'e göre daha yüksek olmasının yanısıra, bir başka önemli fark da yüksek şekil değişimlerinde (yaklaşık $\% \epsilon > 0,5$) KBPP'in daha rijit bir davranış göstermesidir. Bu rijitlik farkı plastiklerde çoğu zaman elastik modül (Young modülü) yerine kullanılan başlangıç tanjant modülü (initial tangent modulus) ve düşük şekil değişimlerinden ($\% \epsilon < 0,5$) elde edilen sekant modülde (secant modulus) önemli

olmazken, yüksek şekil değişimleri ($\epsilon > 1$) için kullanılacak sekant modülde kendini göstermektedir (Şekil.7.30).

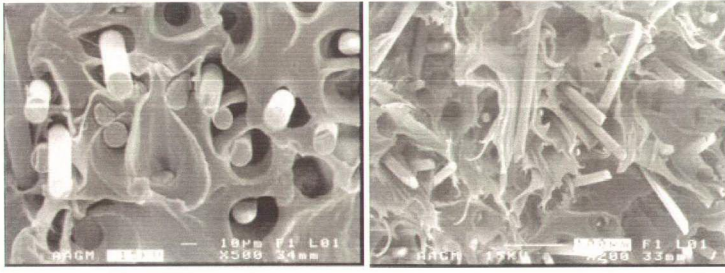
7.2. Mikroskobik İncelemeler

Cam elyaf takviyeli polipropilenin yorulma kırılmalarında, farklı yüzey görünümüne sahip iki bölge gözlenmiştir. Bu bölgeler sünek kırılma davranışı gösteren "yorulma bölgesi" (Şekil 7.31) ve gevrek kırılma davranışı gösteren "son (ani) kırılma bölgesi"dir (Şekil 7.32). Horst [24 - 26] cam elyaf takviyeli naylon ile yaptığı yorulma çalışmalarında matriste yoğun deformasyonun gözlemlendiği bölgeyi "yorulma kırılması alanı" (fatigue crack area) ve matris malzemesinin gevrek kırılma gösterdiği alanı "son hızlı kırılma alanı" (final fast fracture area) olarak adlandırmıştır.

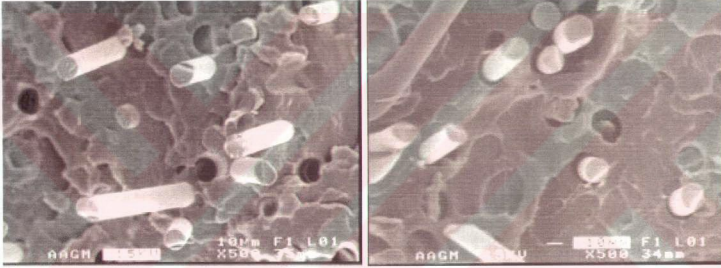
"Yorulma bölgesi"ndeki elyafların matristen sıyrılmış olduğu görülmekte, sıyrılan elyafların üzerlerinde matris parçacıklarına rastlanılmamakta ve yük taşıması nedeniyle matriste de yoğun olarak sünek kırılma gözlenmektedir (Şekil 7.31). Kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli polipropilenin çekme kırığı yüzeyi gevrek bir görünüm sergilemektedir (Şekil 7.34). Buna karşın 10 çevrim yorulmuş polipropilende dahi yorulma bölgesine rastlanılmaktadır (Şekil 7.35). Cam elyaf dolgulu polipropilende (kimyasal bağlı olmayan) elyaf-matris bağlanma kuvveti çok düşük olduğundan dolayı, çekme kırığı yüzeyinde yorulma bölgesine benzer sünek kırılma bölgesi gözlenebilmektedir (Şekil 7.44).

"Son kırılma bölgesi"nde ise elyafların hala matrise sıkıca tutunmuş olduğu gözlenmektedir. Kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli polipropilende kırık yüzeyindeki elyafların üzerinde elyaf parçacıkları bulunmaktadır. Bu görüntü numunenin bu bölgesinin yorulmaya zorlanmadan, ani olarak kırıldığını göstermektedir. Ayrıca, matris de gevrek bir kırılma görüntüsü çizmektedir (Şekil 7.32).

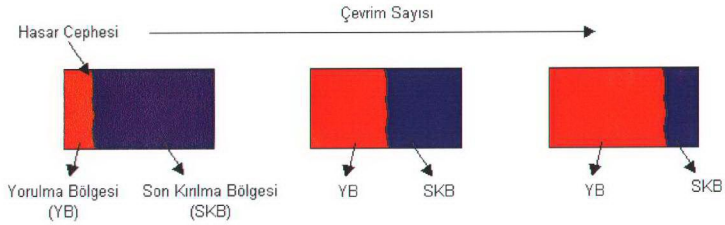
Yorulma zorlamasına maruz kalan malzemede hasar derhal oluşmakta ve çevrimsel yükleme sürdüğü sürece ilerlemektedir (Şekil 7.33). Daha önce bahsedildiği gibi bu çalışmada, 10 çevrim yorulma zorlamasına maruz kalmış malzemelerde dahi yorulma bölgelerine rastlanmıştır. Gerilme oranı yükseldikçe hasar daha hızlı ilerlemektedir.



Şekil 7.31 Yorulma ile kırılmış KBPP (soldaki resim) ve DPP'in (sağdaki resim) yorulma bölgeleri



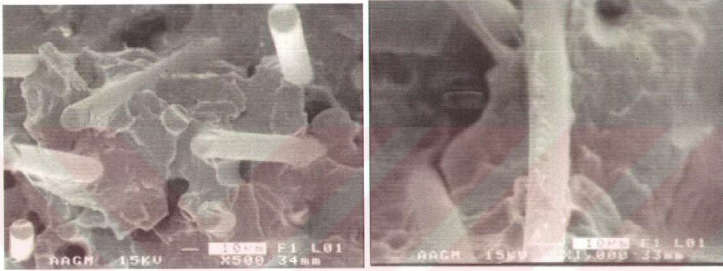
Şekil 7.32 Yorulma ile kırılmış KBPP (soldaki resim) ve DPP'in (sağdaki resim) son kırılma bölgeleri



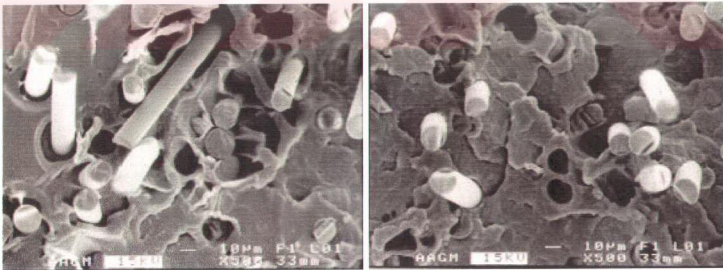
Şekil 7.33 Yorulma ve son kırılma bölgelerinin çevrim sayısı ile değişimleri

7.2.1. Kimyasal Bağlı Cam Elyaf Takviyeli Polipropilenin Mikroskopik İncelemesi

Yorulmamış numune kırığı (çekme testi kırığı) incelendiği takdirde gevrek bir kırılma gözlenmektedir (Şekil 7.34). Cam elyafların dipleri hala matrise sıkıca bağlıdır. Kırık yüzeyindeki sıyrılmış elyafların üzerlerinde matris parçacıkları kalmıştır (Şekil 7.34). Bu görüntü elyaf-matris arabasının oldukça kuvvetli olduğunun bir göstergesidir.

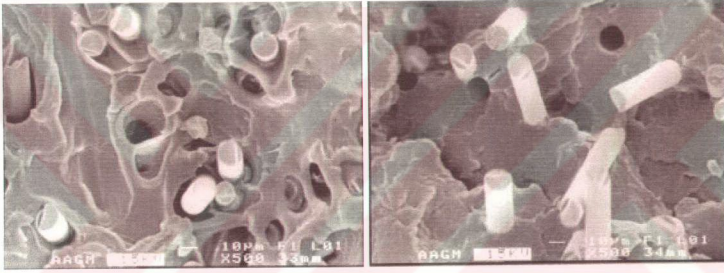


Şekil 7.34 Yorulmamış KBPP'in kırık yüzeyinin (solda, 500 büyütmede) ve kırılma yüzeyindeki bir elyaflın (sağda, 1.000 büyütmede) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

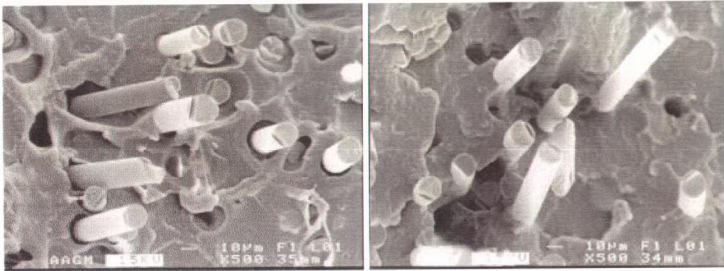


Şekil 7.35 10 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

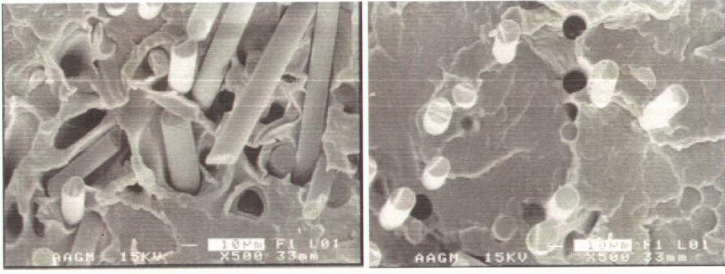
10, 100, 1.000, 10.000, 25000 çevrim yorulmuş ve daha sonra çekme testi ile kırılmış numunelerle, yorularak kırılmış numunenin kırık yüzeyleri incelendiğinde iki farklı görünüm farkedilmektedir (Şekil 7.35 - Şekil 7.40). Matriste elyaf dipleri genişlemiştir, bu durum bu bölgelerde elyaf-matris arabağının bozulduğunu ve matrisin önemli ölçüde yük taşımaya başladığının bir göstergesidir. Matrisin sünek olarak hasara uğradığı görülmektedir. Bu bölge daha önce açıklandığı gibi "yorulma bölgesi" olarak adlandırılacaktır. Görünümü yorulma bölgesinden farklı olan diğer bölgede ise, daha önce çekme testi kırığındaki gibi gevrek bir kırılma görüntüsü vardır. Burada matrisin uzun süre yük taşımadan ani olarak kırıldığı ve elyaf-matris arabağının hala yük taşımaya devam edebilecek şekilde bozulmamış olduğu görülmektedir. Bu bölge daha önce belirtildiği gibi "son kırılma bölgesi" olarak adlandırılacaktır. Son kırılma bölgesi çevrim sayısı ile doğru orantılı olarak genişlemektedir (Şekil 7.33).



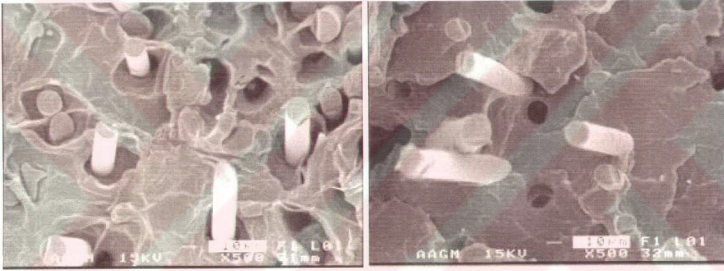
Şekil 7.36 100 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri



Şekil 7.37 1.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

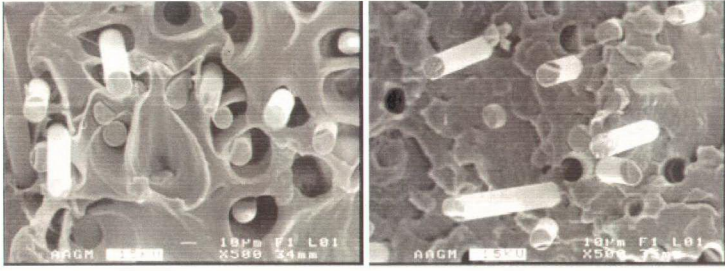


Şekil 7.38 10.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri



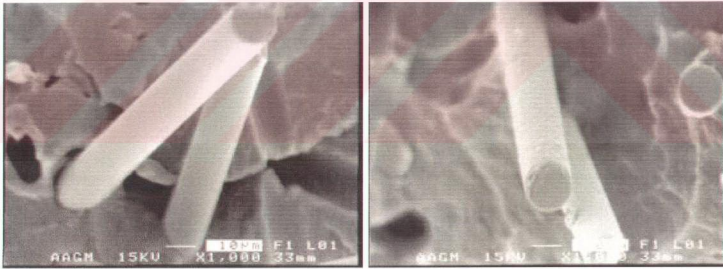
Şekil 7.39 25.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Yorularak kendiliğinden kırılmış numunenin yorulma bölgesinde yoğun bir şekilde sünek kırılma izlerine rastlanmaktadır ve elyaf-matris arabağının bozularak elyaf diplerinin boşaldığı görülmektedir (Şekil 7.40). Çok küçük bir alan kaplamasına karşın yine de son kırılma bölgesi gözlenmektedir ve bu bölgede elyaf dipleri nispeten matrise iyi bir şekilde tutunmaktadır (Şekil 7.40).

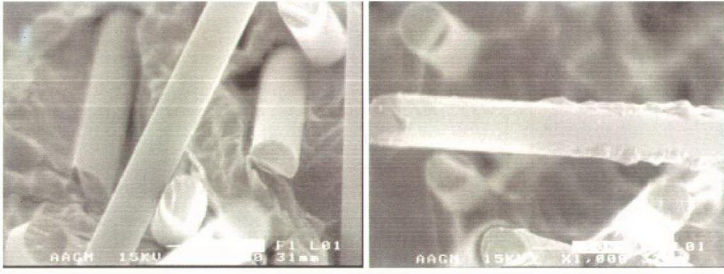


Şekil 7.40 Yorularak kendiliğinden kırılmış KBPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

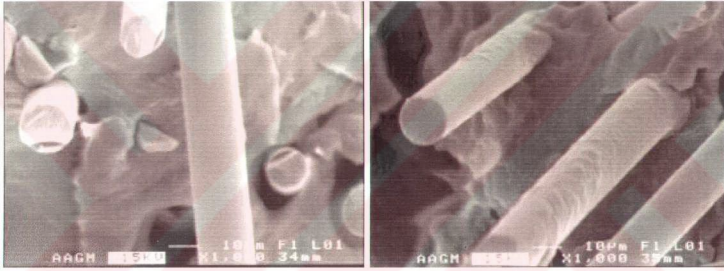
Yorulma bölgesindeki elyafların yüzeylerinde matris parçacıkları bulunmazken, son kırılma bölgesindeki elyafların yüzeyleri ani kırılmayı ve elyaf-matris arabağının kuvvetini temsil edecek tarzda yoğun bir şekilde matris parçacıkları ile kaplıdır (Şekil 7.41 - Şekil 7.43).



Şekil 7.41 10.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyinin yorulma (solda) ve son kırılma (sağda) bölgelerinde bulunan elyafların 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri



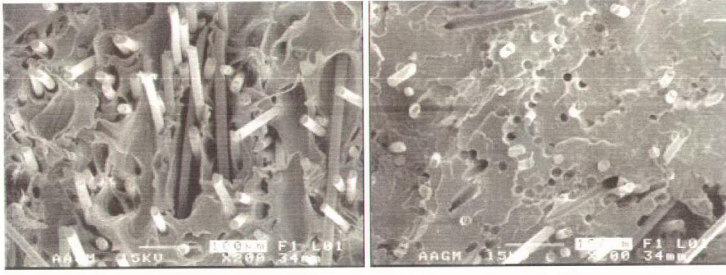
Şekil 7.42 25.000 çevrim yorulmuş KBPP'in kırık yüzeyinin yorulma (solda) ve son kırılma (sağda) bölgelerinde bulunan elyafların 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri



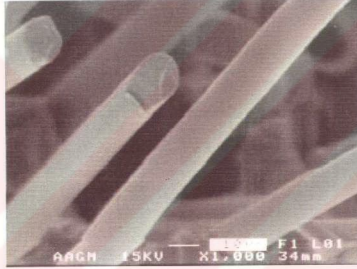
Şekil 7.43 Yorularak kendiliğinden kırılmış KBPP'in kırık yüzeyinin yorulma (solda) ve son kırılma (sağda) bölgelerinde bulunan elyafların 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

7.2.2. Cam Elyaf Dolgulu Polipropilenin Mikroskobik İncelemesi

Cam elyaf dolgulu polipropilende yorulmamış numunenin çekme testi sırasında elyaf-matris arabağının bozulduğu gözlenmiştir. Yorulmamış numunenin kırık yüzeyinde matrisin önemli ölçüde yük taşıdığı "sünek kırılma bölgesi" (bu bölge "yorulma bölgesi" özellikleri taşımasına rağmen, yorulma zorlaması söz konusu olmadığı için burada "sünek kırılma bölgesi" olarak bahsetmek daha doğru olacaktır) ve matrisin gevrek olarak kırıldığı "son kırılma bölgesi" gözlenmiştir (Şekil 7.44). Ayrıca son kırılma bölgesindeki elyafların yüzeylerinde matris parçacıklarına rastlanmamıştır (Şekil 7.45). Bu durum elyaf-matris arabağının zayıf olduğunun bir göstergesidir.

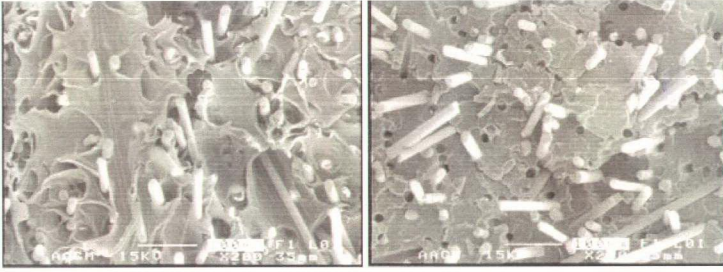


Şekil 7.44 Yorulmamış DPP'in kırık yüzeyindeki sünek kırılma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 200 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

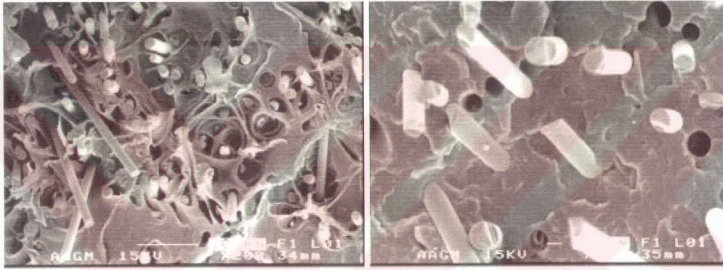


Şekil 7.45 Yorulmamış DPP'in kırık yüzeyinin son kırılma bölgesinde bulunan elyafın 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüsü

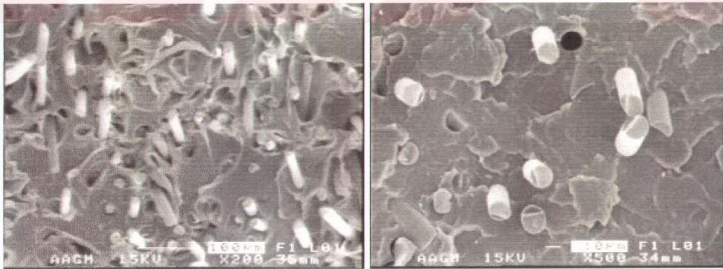
10, 100, 1.000, 10.000, 100.000 ve 300.000 çevrim sayılarında yorulmuş ve daha sonra çekme testi ile kırılmış cam elyaf dolgulu polipropilen numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde yine iki farklı bölge göze çarpmaktadır (Şekil 7.46 - Şekil 7.51). Bu şekillerde yorulma bölgesi ve son kırılma bölgeleri rahatlıkla seçilebilmektedir. Kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli ve cam elyaf dolgulu polipropilen malzemelerin kırık yüzeylerindeki son kırılma bölgeleri açısından önemli bir fark gözlenmemektedir. Buna karşın DPP'in yorulma bölgesindeki sünek hasar oluşumunun KBPP'e göre daha yoğun olduğu dikkati çekmektedir. Son kırılma bölgesi daha önce de açıklandığı şekilde çevrim sayısı ile doğru orantılı olarak genişlemektedir (Şekil 7.33).



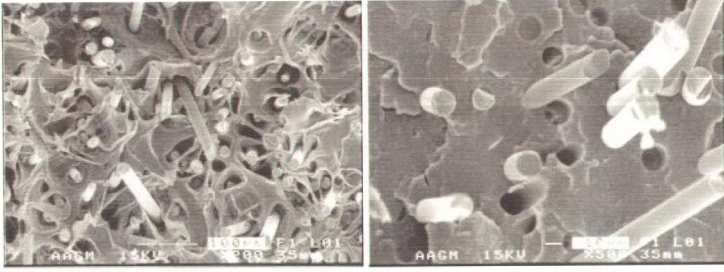
Şekil 7.46 10 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 200 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri



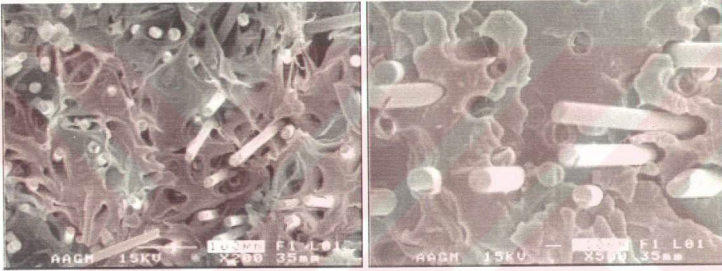
Şekil 7.47 100 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri



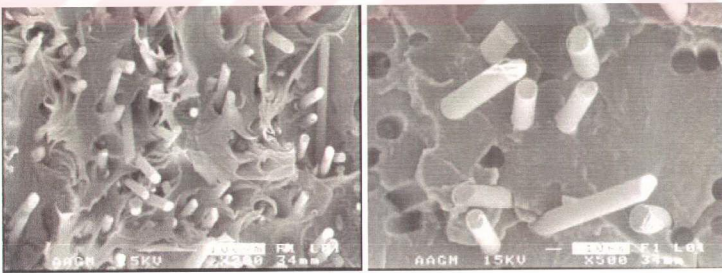
Şekil 7.48 1.000 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri



Şekil 7.49 10.000 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

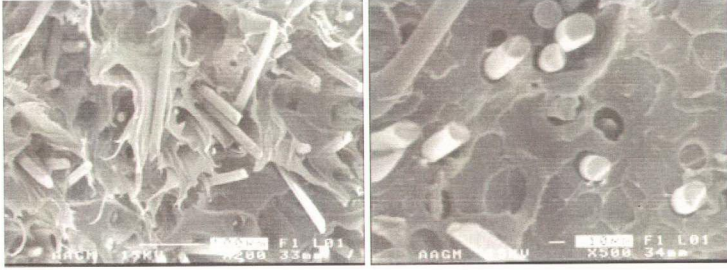


Şekil 7.50 100.000 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri



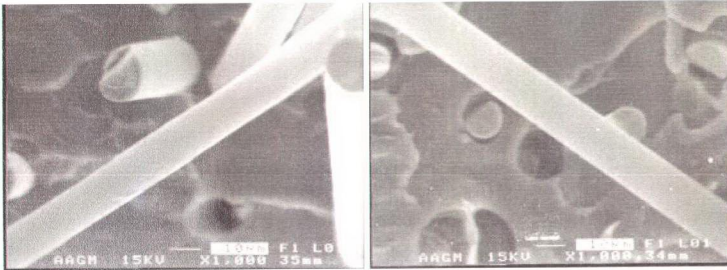
Şekil 7.51 300.000 çevrim yorulmuş DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Yorularak kendiliğinden kırılmış numunede yorulma bölgesindeki matrisin deformasyonun çekme ile kırılanlara göre çok daha büyük olduğu gözlenmiştir (Şekil 7.52). Son kırılma bölgesinde gevrek bir kırılma görüntüsü ve elyaf diplerinde matrisden ayrılmalar gözlenmiştir (Şekil 7.52).



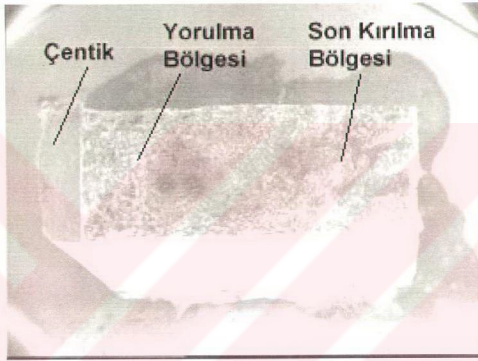
Şekil 7.52 Yorularak kendiliğinden kırılmış DPP'in kırık yüzeyindeki yorulma (solda, 200 büyütme) ve son kırılma bölgelerinin (sağda, 500 büyütme) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

DPP'in yorulma bölgesindeki elyafların yüzeylerinde matris parçacıkları olmamasının yanı sıra, son kırılma bölgesindeki elyafların yüzeylerinde dahi matris parçacıklarına rastlanamamıştır (Şekil 7.53). Bu bulgu, son kırılma bölgesindeki hasarın KBPP'de olduğu gibi matrisden değil, zayıf elyaf-matris arayüzeyinden olduğunu göstermektedir.

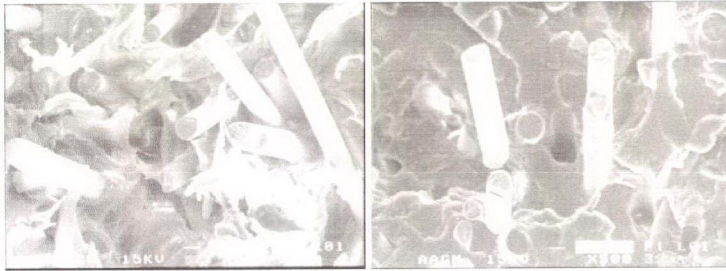


Şekil 7.53 100.000 çevrim yorulmuş (solda) ve yorularak kendiliğinden kırılmış (sağda) DPP'lerin kırık yüzeylerindeki son kırılma bölgelerinde bulunan elyafların 1000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Yukarıdaki şekillerde görülen yorulma ve son kırılma bölgelerinin çekme testinde oluşan hasar ile ilişkisini tanımlamak amacıyla, sadece kimyasal bağlı malzeme ile ek bir çalışma daha gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada çekme numunelerinin tam ortalarına tek taraflı olarak 2 mm derinliğinde ve 45° keskin köşeli bir çentik açılmıştır (Şekil 7.54). Daha sonra bu numuneler 0,6ÇD gerilme değerinde benzer yorulma testine tabi tutulmuşlardır. Yorulma testi sırasında kırılan bu numuneler taramalı elektron mikroskobunda incelendiğinde aşağıdaki bulgulara rastlanılmıştır.



Şekil 7.54 Yorularak kendiliğinden kırılmış çentikli KBPP'nin kırık yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu yardımıyla 10 büyütmede genel görünümü



Şekil 7.55 Yorularak kendiliğinden kırılmış çentikli KBPP'nin, kırık yüzeyindeki yorulma (solda) ve son kırılma bölgelerinin (sağda) 500 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Öncelikle numune kesitini iki ayrı bölge altında incelemek gerekmektedir (Şekil 7.54). Başlangıç çentiğine en yakın olan bölge yorulma bölgesi özelliklerine sahiptir (Şekil 7.55). Tahmin edilebileceği gibi bu bölge yorulma hasarının en yoğun olarak gözleendiği bölgedir. Bu bölgede çok yüksek düzeyde elyaf-matris ayrılması dolayısıyla, matrisin yük taşımaya başlaması neticesi matriste çok yoğun bir sünek kırılma gözlenmektedir. Sıyrılan elyafların yüzeylerinde matris parçacıklarına rastlanılmamıştır.

Çentikten en uzak olan bölge "son kırılma bölgesi"nin özelliklerini göstermektedir (Şekil 7.54). Bu bölgede gevrek kırılma görüntüsü hakimdir, elyaf-matris arabağı hala sağlam ve matriste de gevrek tarzda bir kırılma görüntüsü vardır (Şekil 7.55). Diğer bir deyişle matrisin bu bölgede yük taşıdığına dair bir kanıt yoktur. Buna karşın bu bölgede sıyrılmış elyafların yüzeylerinde matris parçacıklarına rastlanılmaktadır (Şekil 7.56). Bu iki bölge arasında ise diğer çalışmalarda da fark edilen bir geçiş bölgesi gözlenmiştir.



Şekil 7.56 Yorularak kendiliğinden kırılmış çentikli KBPP'in kırık yüzeyinin son kırılma bölgesinde bulunan elyafların 2000 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüsü

Mikroskop incelemelerinden çıkartılan sonuca göre hasar, tekrarlı zorlamalar altında kompozit malzemeden üretilmiş numunenin gerilmeye dik olan kesitinde, dayanımı en düşük olan bölgesinde başlamaktadır. Bu dayanımı en düşük olan bölgeler; doğal olarak bir iç çentik etkisi gösteren ve üstelik silan kaplamanın en az olduğu/olmadığı elyaf uçları, iyi kaplanmamış elyaflar ve dolayısıyla zayıf bir arabağ oluşmuş elyaf-matris arayüzeyleri, enjeksiyon sonucu zorlama yönüne dik veya yataya yakın açıda yerleşmiş elyafların bulunduğu bölgeler (numunenin orta tabakası) ve elyaf hacim

oranının nispeten az olduğu elyaf fakir (matris zengin) bölgelerdir. Hitchen ve Ogin [28] numunelerin cidar tabakalarındaki hasar mekanizmasının elyaf/matris ayrılması şeklinde olduğunu ifade etmişlerdir. Grove, Kim, Cooper ve Ellis [30] cam elyafli polipropilen kompozitlerde hasarın, zayıf elyaf-matris arayüzeylerinde oluşan çok sayıda çatlak ile başladığını belirtmişlerdir.

Horst [25] benzer şekilde çekme testi sonucunda gevrek kırılma yüzeyi ve yorulma testi sonucunda matriste yoğun deformasyon gözlemiştir. Hasarın ilerleme mekanizması ise, mikroskop görüntülerinden görüldüğü üzere metallerdeki yorulma çatlığının ilerlemesi şeklinde, numunenin tüm kesiti boyunca bir çizgi halinde (hasar cephesi şeklinde) olmaktadır. Dayanımı en düşük olan bir veya birden fazla noktada başlayan hasar, hasar cephesi şeklinde ilerleyerek numunenin tüm kesitine yayılmaktadır. Hasar cephesi şeklinde ilerleyen hasar oluşumu, arkasında elyaf-matris arayüzeyi bozulmuş, matristen sıyrılmış elyafların bulunduğu ve dolayısıyla yük taşıma görevinin elyafa aktarılamaması nedeniyle bizzat matris tarafından taşındığı bir alan bırakarak ilerlemektedir.

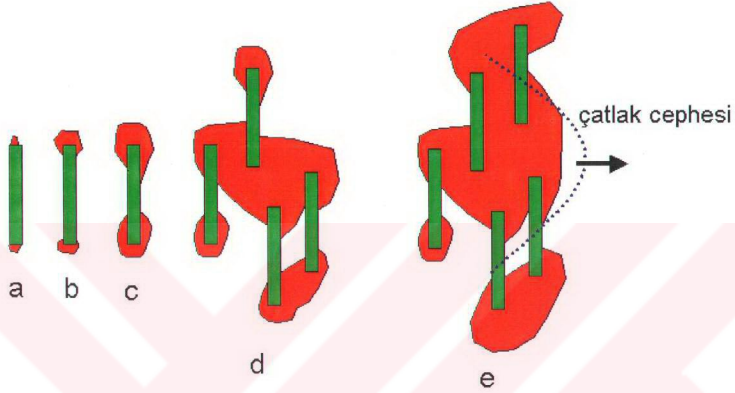
Yorulma bölgesi olarak adlandırılan bu bölge, statik şartlarda tespit edilmiş çekme yükünü elyafın yardımı olmadan taşıyamayacağından dolayı, yeterli büyüklüğe ulaştıktan sonra kırılma gerçekleşmektedir. Kırılma gerçekleşikten sonra numune kesitinde sünek olarak kırılan yorulma bölgesinin yanısıra, zorla kırılan ve gevrek bir görüntü sergileyen son kırılma bölgesi de gözlenmektedir. Başta çok düşük bir alan kaplayan yorulma bölgesi yorulma çevrim sayısı arttıkça alanını büyötmekte ve baştakinin tersine gittikçe son kırılma bölgesinden daha fazla bir alan kaplamaktadır (düşük gerilme oranlarında 0,6ÇD gibi). Yine Carling, Manson, Hertzberg ve Attalla [36] cam elyaf takviyeli polipropilenle yorulma çatlğı ilerlemesi çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaları sırasında hızlı kırılma durumu hariç, yavaş çatlak ilerlemesi sırasında matriste önemli derecede hasar oluştuğunu gözlemişlerdir. Ayrıca yine bizim çalışmamızda da vurguladığımız gibi, yavaş çatlak ilerlemesi söz konusu olduğunda sıyrılan elyafların yüzeylerinde matris parçacıklarının olmadığı gözlenmiştir. Horst [25] çekme testinde sıyrılan elyafların yüzeylerinde elyaf parçacıkları bulurken, yorulma sonrası elyaf yüzeylerinde matris parçacıklarının görülmediğini belirtmiştir. Daha önce bahsettiğimiz gibi kimyasal bağının tersine cam elyaf dolgulu polipropilenin çekme testi sonucunda bile, cam elyafların yüzeylerinde elyaf parçacıkları görölememiş ve bu durumun da elyaf-matris bağının zayıf olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Janzen ve Ehrenstein [23 ve 24] farklı yüzey işlemlerine sahip cam elyaf takviyeli PBT malzemelerle yaptıkları çalışmalarda,

herhangi bir yüzey işlemi uygulanmamış elyafların yüzeylerinde yorulma sonrası matris parçacıkları görülemediğini belirtmişlerdir. D'amore, Caprino ve Facciolo [35] çekme sırasında oluşan gevrek kırılmanın nedenini, son anda oluşan ve numunenin genişliği boyunca hızla ilerleyen tek bir çatlak olarak açıklamışlardır. Harmia [39] takviyesiz ve cam elyaf takviyeli polipropilen, naylon ve PP/PA harmanları ile yaptığı çalışmada yine elyaf-matris arasındaki bağlanmanın zayıf olduğunu sıyrılan elyafların üzerinde az miktarda matris kalmasıyla açıklamıştır. %5'e kadar katılan maleik anhidridin yorulma dayanımını arttırarak, sıyrılan elyaf yüzeylerinde daha fazla miktarda matris parçacığı gözlemlediğini belirtmiştir. Uygun oranda maleik anhidridin katılmasıyla hasar mekanizmasının elyaf-matris ayrılmasından, elyaf kırılmasına döndüğünü açıklamıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli ve cam elyaf dolgulu polipropilenlerin yorulma hasarı mekanizmaları aşağıdaki şekilde tariflenebilir:

- Hasar elyaf uçlarında başlamaktadır (Şekil 7.57-a). Çünkü hem elyaf uçları doğal bir çentiktir, hem de sürekli elyaf kaplı olmasına rağmen süreksiz elyafta kırılan uçlar kaplamasızdır. Üstelik enjeksiyon işlemi sırasında elyafar yeniden kırılmaktadır.
- Elyaf uçlarında başlayan matrsten ayrılmalar, çevrimsel hareket nedeniyle elyaflar boyunca matrsten ayrılmalara dönüşmektedir (Şekil 7.57-b).
- Bu ayrılmalar nedeniyle matris yük taşımaya başlamakta ve polipropilen matrste sünek olarak deformasyon gözlenmektedir.
- Sıyrılan elyafların etkisiyle kompozit, uygulanan gerilmelere daha yüksek birim şekil değişimleri ile cevap vermektedir. Çalışma içinde şekil değişiminin artması ile gözlenen bu durum ise yeni elyaf-matris ayrılmalarına yol açmaktadır (Şekil 7.57-c).
- Ayrılmalardan oluşan boşluklar büyümekte ve mikro boşluklara dönüşmektedir. Oluşan mikro boşluklar büyük bir çatlak oluşturacak şekilde gelişmektedirler (Şekil 7.57-d).
- Söz konusu çatlak hasar cephesi (metalik malzemelere benzer) şeklinde tüm kesite yayılarak ilerlemektedir (Şekil 7.57-e).

- Sıyrılan elyaflar nedeniyle kompozitin yük taşıma kapasitesi gittikçe azalmaktadır. Yorulma bölgesi belli bir büyüklüğe ulaştıktan sonra kalan kesit uygulanan yükü taşıyamamakta ve son kırılma bölgesi tek bir çatlağın hızla numune kesidine yayılması sonucunu, kompozit gevrek bir şekilde hasara uğramaktadır.



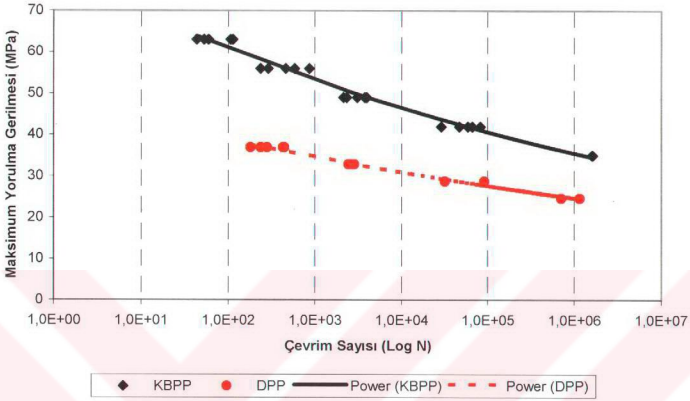
Şekil 7.57 KBPP ve DPP'in yorulma hasarı mekanizmalarının şematik gösterimi

Dolgulu polipropilende hasar, zayıf elyaf-matris arayüzeyi nedeniyle kimyasal bağlı polipropilene göre daha kolay başlamakta ve daha hızlı ilerlemektedir. Bu çalışma sırasında dikkatimizi çeken önemli bir nokta yukarıda da belirtildiği gibi hasarın, mikroskop görüntülerinden görüldüğü üzere metallerdeki yorulma çatlağının ilerlemesi şeklinde, numunenin tüm kesiti boyunca bir çizgi halinde (hasar cephesi şeklinde) ilerlemesidir.

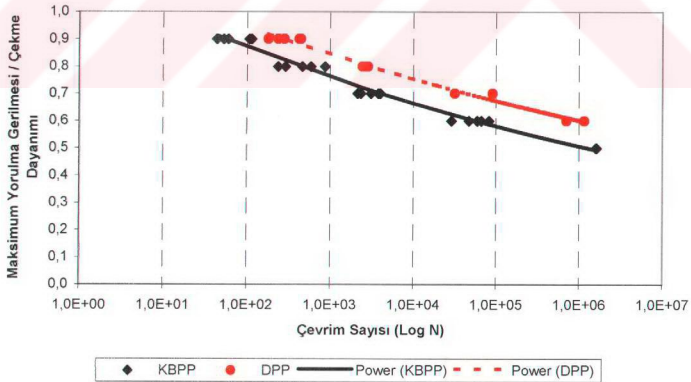
7.3. Wöhler (S-N) Diyagramları

KBPP'in maksimum yorulma gerilmesi DPP'den daha yüksektir buna karşın, KBPP'in yorulma dayanımı DPP'ye göre daha hızlı azalmaktadır (Şekil 7.58). Çekme dayanımları farklı olduğu için bu malzemelerin normalize Wöhler grafiklerini incelemek daha doğru olacaktır. DPP'in normalize yorulma dayanımı KBPP'den daha

yüksektir (Şekil 7.59). Normalize yorulma dayanımlarının azalma eğilimlerinin benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 7.58 KBPP ve DPP'in maksimum yorulma gerilmelerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimi (Wöhler eğrisi)



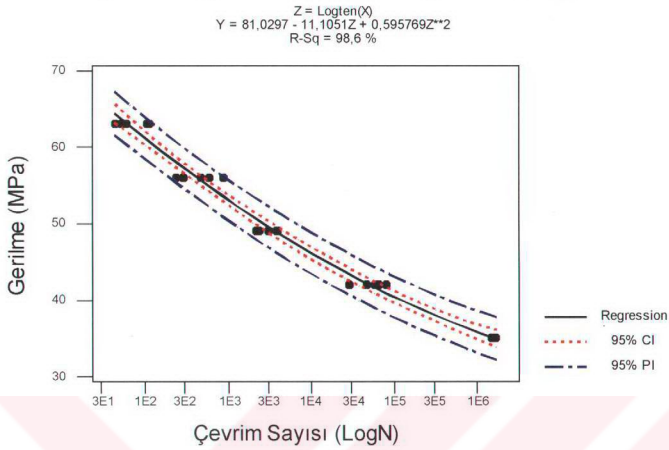
Şekil 7.59 KBPP ve DPP'in normalize maksimum yorulma gerilmelerinin yorulma çevrim sayısı ile değişimi (normalize Wöhler eğrisi)

1 Hz frekansla $R=0,1$ gerilme yüzdesinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde, DPP 0,6ÇD gerilme yüzdesinde, KBPP ise 0,5ÇD gerilme yüzdesinde $1,0E+06$ yorulma çevrim sayısını aşabilmektedirler (Şekil 7.58 ve Şekil 7.59). Buna karşın S-N diyagramlarından da görüldüğü gibi her iki malzeme için de sonsuz ömrü ifade eden bir yorulma dayanım sınırı tespit edilememiştir (Şekil 7.58 ve Şekil 7.59).

KBPP'in %95 güvenilirlik analizine göre elde edilen Wöhler bandının çok geniş olmadığı görülmektedir (Şekil 7.60). Özellikle 0,5ÇD değerinde yapılan yorulma testinin sonuçları birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermişlerdir (grafikte üst üste görülmektedirler). Benzer şekilde, DPP'in %95 güvenilirlik analizine göre elde edilen Wöhler bandının da çok geniş olmadığı görülmektedir (Şekil 7.61). Bu diyagramlara göre her iki malzemenin yorulma testi datalarının ortalamalarını temsil eden eğriler dataları oldukça iyi temsil etmektedirler (KBPP için $R^2=\%98,6$ ve DPP için $R^2=\%99,0$). Dolayısıyla, tüm yorulma datalarının %95 olasılıkla içinde kalacakları bandlar tasarımda güvenle kullanılabilir şekilde çok geniş olmadıkları görülmektedir.

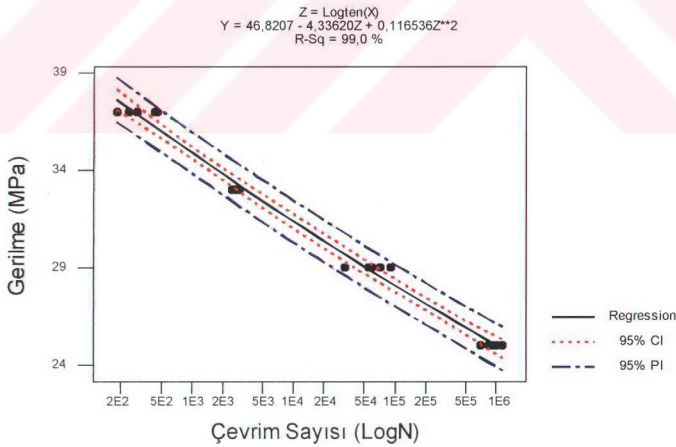
Test verilerinin dağılımını gösteren kutu grafiklerin (box plot) aralıklarının oldukça dar olması nedeniyle, yorulma test verilerinin dağılımlarının düşük olduğu ayrıca, test verilerinin dağılımlarının gerilme yüzdelere bağımsız olduğu görülmektedir (Şekil 7.62 ve Şekil 7.63).

Kimyasal Bağlı Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen

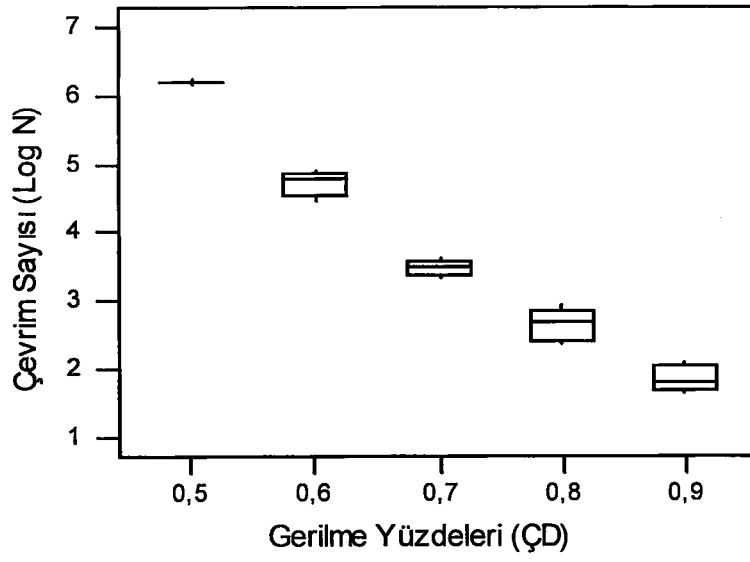


Şekil 7.60 KBPP'le gerçekleştirilen yorulma testleri sonuçlarının %95 güvenirlilik aralığında gösterimi

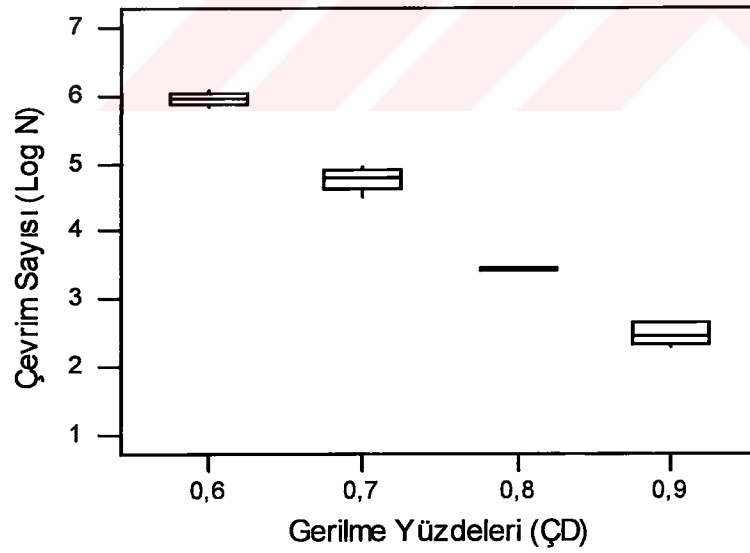
Cam Elyaf Dolgulu Polipropilen



Şekil 7.61 DPP'le gerçekleştirilen yorulma testleri sonuçlarının %95 güvenirlilik aralığında gösterimi



Şekil 7.62 KBPP'le gerçekleştirilen yorulma testleri sonuçlarının gerilme yüzdelere göre dağılımı



Şekil 7.63 DPP'le gerçekleştirilen yorulma testleri sonuçlarının gerilme yüzdelere göre dağılımı

8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Genel Sonuçlar

1. Yorulma testleri sırasında elde edilen datalardan oluşturulan histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişiminin incelenmesinin, hasar mekanizmasının gelişimini incelemek için uygun teknikler olduğu görülmüştür. Yalnızca bu çalışmada incelenen KBPP ve DPP'in değil, hemen tüm takviyeli polimer malzemelerin yorulma davranışları hakkında bilgi sahibi olabilmek için bahsi geçen çalışmaların herhangi biri kullanılabilir.
2. KBPP'de histerizis alanı hasar oluşana kadar değişmemekte, hasardan hemen önce düşük miktarlarda artış göstererek kırılma gerçekleşmektedir. DPP'de ise histerizis alanı yorulma testinin başından itibaren artmaya başlamakta, test boyunca artış sürmekte ve KBPP'e göre çok yüksek artışlar göstererek kırılma gerçekleşmektedir. Kimyasal bağlı polipropilende elyaf-matris arabağı daha kuvvetli olduğu için yük elyafa aktarılabilmekte böylece yük elyaf ve arayüzey tarafından taşınmaktadır. Dolgulu polipropilende ise elyaf-matris arabağı zayıf olduğu için yük elyafa aktarılamamakta, dolayısıyla yük matris tarafından taşınmaktadır. Bu durum cam elyaf dolgulu polipropilenin histerizis alanının her çevrimde büyümesine neden olmaktadır.
3. KBPP ve DPP'in histerizis enerjisi, dinamik modül ve dinamik sürünme şekil değişimi eğrileri birbirleriyle uyum sağlamaktadır. Bu eğrileri, sayılan özelliklerin yorulma çevrim sayısı artışına karşın sabit kaldığı veya önemli miktarda değişmediği "hasar oluşum hızı düşük" ve yorulma çevrim sayısına bağlı olarak histerizis enerjisi ve dinamik sürünmenin arttığı, buna karşın dinamik modülün azaldığı "hasar oluşum hızı yüksek" bölgelerine ayırmak mümkündür.
4. Hasar elyaf uçlarında başlamaktadır. Elyaf uçlarında başlayan matristen ayrılmalar, çevrimsel hareket nedeniyle elyaflar boyunca matristen ayrılmalara dönüşmektedir. Bu ayrılmalar nedeniyle matris yük taşımaya başlamakta ve polipropilen matriste sünek olarak deformasyon gözlenmektedir. Sıyrılan

elyafların etkisiyle kompozit, uygulanan gerilmelere daha yüksek birim şekil değişimleri ile cevap vermektedir. Çalışma içinde şekil değişiminin artması ile gözlenen bu durum ise yeni elyaf-matris ayrılmalarına yol açmaktadır. Ayrılmalardan oluşan boşluklar büyümekte ve mikro boşluklara dönüşmektedir. Oluşan mikro boşluklar büyük bir çatlak oluşturacak şekilde gelişmektedirler. Söz konusu çatlak, “hasar cephesi” (metalik malzemelere benzer şekilde) şeklinde tüm kesite yayılarak ilerlemektedir. Sıyrılan elyaflar nedeniyle kompozitin yük taşıma kapasitesi gittikçe azalmaktadır. Yorulma bölgesi belli bir büyüklüğe ulaştığında, kalan kesit uygulanan yükü taşıyamamakta ve tek bir çatlağın hızla numune kesidine yayılması ile, kompozit gevrek bir şekilde hasara uğramaktadır. Dolgulu polipropilende hasar, zayıf elyaf-matris arayüzeyi nedeniyle kimyasal bağlı polipropilene göre daha kolay başlamakta ve daha hızlı ilerlemektedir.

5. Yorulma hasarı zorlanan kesitte yerel olarak başlamakta, metal malzemelerde görülen hasar ilerlemesine benzer şekilde tüm kesite yayılarak bir çizgi halinde (hasar cephesi şeklinde) ilerlemektedir. Konuyla ilgili yapılan literatür çalışmalarında, yorulma hasarının “hasar cephesi” şeklinde ilerlemesi bulgusuna rastlanılmamıştır.
6. Malzemelerin yorulma dayanım değerlerindeki sapmalar, mekanik tasarımlarda güvenle kullanılacak sınırlarda kalmaktadır. Yorulma dataları tipik S-N eğrileri şeklinde sunulabilmekte ve her iki malzemede yorulma sınırı (endurance limit) göstermemektedirler.
7. Literatür açısından KBPP ve DPP’in genelde statik olarak karşılaştırma çalışmalarına rastlanabilirken, yorulma açısından farklarını ortaya koyan benzeri bir çalışmaya rastlanamamıştır.

8.2. Öneriler

Yukarıdaki sonuçların değerlendirilmesinin ışığında ve günümüzde enjeksiyon yöntemiyle kalıplanan termoplastik matrisli kompozitlerin gittikçe artan oranda endüstride kullanıldığı gözönüne alındığı takdirde, ileride araştırılması faydalı olabilecek konular şunlar olabilir:

1. Benzer alışmalar farklı cam elyaf hacim oranları, farklı cam elyaf boyları, farklı arayüzey kuvvetlerine sahip kimyasal bağlı cam elyaf takviyeli polipropilenler için yapılabilir.
2. Yine aynı çalışmalar cam elyaf dışında diğer elyaf eşitleri (karbon elyaf, aramid elyaf gibi) veya değişik dolgu malzemeleri (talk, kalsiyum karbonat, baryum sülfat gibi) ile karıştırılmış polipropilen veya başka termoplastik matrisler kullanılarak gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Güleç, Ş. ve Aran A.**, 1983. Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, MBEAE Matbaası, Gebze.
- [2] **Eryürek, İ. B.**, 1993. Hasar Analizi, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [3] **Suresh, S.**, 1991. Fatigue of Materials, Cambridge Solid State Science Series, pp. 457-498, Cambridge.
- [4] **Hoechst Celanese**, 1991. Designing with Plastics, the Fundamentals, New Jersey.
- [5] **Rubin, I. I.**, 1990. Handbook of Plastic Materials and Technology, John Wiley & Sons Inc, New York.
- [6] **Juran R.**, 1990. Modern Plastics Encyclopedia Mid-October 67 no:11, McGraw-Hill Inc New York.
- [7] **Greene R.**, 1991. Modern Plastics Encyclopedia Mid-October 68 no:11, McGraw-Hill Inc, New York.
- [8] **Seymour R. B.**, 1991. Reinforced Plastics & Applications, ASM International, Ohio.
- [9] **Seymour R. B.**, 1987. Polymers for Engineering Applications, ASM International, Ohio.

- [10] **Milewski, J. V. and Katz H. S.**, 1987. Handbook of Reinforcements for Plastics, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York.
- [11] **Carlsson L. A.**, 1990. Thermoplastic Composite Materials, Elsevier Science Publishing Company Inc., New York.
- [12] **Tooley F. V.**, 1991. Ceramics and Glasses, Engineered Materials Handbook 4, ASM International, Ohio.
- [13] **De Boest, J. F.**, 1988. Engineering Plastics, Engineered Materials Handbook 2, ASM International, Ohio.
- [14] **Hull, D.**, 1988. An Introduction to Composite Materials, Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press, Cambridge.
- [15] **Clegg D. W., Collyer A. A.**, 1986. Mechanical Properties of Reinforced Thermoplastics, Elsevier Science Publishing Company Inc., New York.
- [16] **BP Chemicals**, 1992. Glass Fiber for Polypropylene, PPG Internal Report.
- [17] **Altstadt, V., Loth, W. and Schlarb, A.**, 1986. Comparison of Fatigue Test Methods for Research and Development of Polymers and Polymer Composites, Report, BASF AG, Polymer Research Laboratory.
- [18] **Renz, R., Altstadt, V. and Ehrenstein, G. W.**, 1986. Hysteresis Measurement for Characterizing the Dynamic Fatigue of R-SMC, *41st Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute*, The Society of the Plastics Industry Inc., January 27-31, Session 16-A, 1-9.
- [19] **Renz, R., Altstadt, V. And Ehrenstein, G. W.**, 1988. Hysteresis Measurement for Characterizing the Dynamic Fatigue of R-SMC, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 7, 413-434.

- [20] **Ehrenstein G. W.**, 1988. The Influence of Fillers on the Mechanical Properties of SMC Materials, *Kunststoffe German Plastics*, **78**, 20-23, 59-65.
- [21] **Bernstorff, B. V. and Ehrenstein G. W.**, 1990. Failure Mechanism in SMC Subjected to Alternating Stresses, *Journal of Materials Science*, **25**, 4087-4097.
- [22] **Orth, F. and Ehrenstein G. W.**, 1989. Selection of Materials, *Kunststoffe German Plastics*, **79**, 43-45, 727-731.
- [23] **Janzen, W. and Ehrenstein G. W.**, 1989. Hysteresis Measurements for Characterizing the Cyclic Strain and Stress Sensitivity of Glass Fibre Reinforced PBT, *ANTEC'89*, SPE, New York, USA, May 1-4, 659-662.
- [24] **Janzen, W. and Ehrenstein G. W.**, 1991. Dimensioning Limits of Glass Fibre Reinforced Polybutylene Terephthalate under Dynamic Fatigue Load, *Kunststoffe German Plastics*, **81**, 31-33 and 231-236.
- [25] **Horst, J. J.**, 1995. Determination of Fatigue Damage in Short Glassfibre Reinforced Polyamide, *3rd International Conference on Deformation and Fracture of Composites*, Surrey, UK, March 27-29, 473-482.
- [26] **Horst, J. J.**, 1996. Fatigue Fracture Mechanism of Fibre Reinforced Injection Moulded Polyamide, *Localised Damage 96*, Fukuoka, Japan, June 1996.
- [27] **Horst, J. J. and Spoormaker J. L.**, 1997. Influence of Fibre Orientation on Fatigue of Glassfibre Reinforced Injection Moulded Polyamide, *International Conference on Fatigue of Composites, ICFC 1*, Paris, France, June 3-5.
- [28] **Hitchen, S. A. and Ogin, S. L.**, 1993. A Model for the Modulus Reduction During Fatigue Cycling of an Injection Moulded Glass/Nylon Composite, *Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials*, Madrid, Spain, July 12-16, 259-266.

- [29] **Hitchen, S. A., Ogin, S. L. and Smith, P. A.**, 1995. Effect of Fibre Length on Fatigue of Short Carbon Fibre/Epoxy Composite, *Composites*, **26**, No. 4, 303-308.
- [30] **Grove, D., Kim, H., Cooper, D. and Ellis C.**, 1994. Longitudinal Fatigue Behavior of Long and Short Glass Reinforced, Injection Moldable, Polypropylene Composites, *26th International SAMPE Conference*, October 17-20, 281-295.
- [31] **Grove, D. and Kim, H.**, 1995. Fatigue Behavior of Long and Short Glass Reinforced Thermoplastics, *Advances in Automotive Plastic Components and Technology SP-1099*, SAE Inc., February, 77-83.
- [32] **Grove, D. A. and Kim, H. C.**, 1995. Effect of Constituents on the Fatigue Behavior of Long Fiber Reinforced Thermoplastics, *ANTEC'95*, SPE, Boston, USA, May 7-11, 3003-3007.
- [33] **Dally, J. W. and Carrillo, D. H.**, 1969. Fatigue Behavior of Glass-Fiber Fortified Thermoplastics, *Polymer Engineering and Science*, **9**, No. 6, 434-444.
- [34] **Dao, K. C. and Dicken J. D.**, 1987. Fatigue Failure Mechanisms in Polymers, *Polymer Engineering and Science*, **27**, No. 4, 271-276.
- [35] **D'amore, A., Caprino, G. and Facciolo, F.**, 1996. Correlation between Flexural and Tensile Fatigue Response of Short Glass Fibre Reinforced Plastics, *Advanced Composites Letters*, **5**, No. 2, 53-58.
- [36] **Carling, M. J., Manson, J. A., Hertzberg, R. W. and Attalla, G.**, 1985. Effects of Fiber Orientation and Interfacial Adhesion on Fatigue Crack Propagation in Short-Glass-Fiber Reinforced Polypropylene Composites, *ANTEC'85*, SPE, Washington, USA, April 29-May 2, 396-398.

- [37] **Karger-Kocsis, J., Freidrich, K. and Bailey R. S., 1991.** Fatigue Crack Propagation in Short and Long Glass Fiber Reinforced Injection-Molded Polypropylene Composites, *Advanced Composite Materials*, **1**, No. 2, 103-121.
- [38] **Karger-Kocsis, J., Freidrich, K. and Bailey R. S., 1991.** Fatigue and Failure Behavior of Short and Long Glass Fiber Reinforced Injection-Molded Polypropylene, *Science and Engineering of Composite Materials*, **2**, No. 1, 50-67.
- [39] **Harmia, T., 1996.** Fatigue Behavior of Neat and Long Glass Fiber (LGF) Reinforced Blends of Nylon 66 and Isotactic PP, *Polymer Composites*, **17**, No. 6, 926-936.



ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Sezer, 12.08.1964'de İstanbul'da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamlamış, Yeşilköy 50. Yıl Lisesi'ni bitirdikten sonra 1982 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Bölümü'ne girmiştir. 1986 yılında Makina Mühendisi ünvanını almış ve İ.T.Ü. Yabancı Diller Yüksek Okulu'nda bir yıl süreli İngilizce hazırlık eğitiminden sonra, 1987 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Makina Anabilimdalı Konstrüksiyon ve İmalat programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 1989 yılında Yüksek Mühendis olan Mustafa Sezer, 1991 yılında aynı enstitüde Makina Anabilimdalının İmalat programında doktora çalışmalarına başlamıştır. 1987 yılı Mayıs ayında İ.T.Ü. Makina Fakültesi Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilimdalında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamış ve bu görevine 1991 yılı Ağustos ayına kadar devam etmiştir. 1.8.1991'den itibaren Arçelik A.Ş.'de çalışmaya başlayan Mustafa Sezer sırasıyla, Mamul Mühendisliği Bölümü ve Araştırma Geliştirme Merkezi'nde çalışmıştır. Halen, Arçelik A.Ş. Çamaşır Makinası İşletmesi Ürün Geliştirme Bölümü'nde görevini sürdürmektedir. İki adet uluslararası ve bir adet ulusal sempozyumlarda sunulmuş bildirileri ve bir adet uluslararası bilimsel periyodik yayın organında yayınlanmış makalesi bulunan Mustafa Sezer, 1993 yılında Tübitak yurtdışı yayın ödülü almıştır.