TEL TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERDE KIRILMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖMER FARUK ERKENDİRCİ

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ A.B.D.

KONYA, 2006

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TEL TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERDE KIRILMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖMER FARUK ERKENDİRCİ

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2006 – 103 Sayfa

JÜRİ

Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Alaattin ARPACI
Prof. Dr. Faruk ÜNSAÇAR
Doç. Dr. Reşat ÖZCAN
Doç. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Bu çalışmada, merkezine farklı açılarda çatlak açılmış yüksek yoğunluklu polietilen matris ve iki yönlü krom-nikel çelik tel örgülü fiberden üretilmiş, termoplastik kompozitin yorulma yükü altında kırılma davranışı araştırılmıştır.

Farklı yönlerde açılmış merkez çatlakları üzerinde durulmuştur. Deneyler sırasında çatlak başlangıcı, yorulma çatlak büyüme oranı (da/dN), gerilme şiddet faktörleri ve kırılma tokluğu incelenmiştir. Çatlak büyüme oranı, çatlak geometrisi ile ilgili bir hasar parametresi olarak kullanılmıştır. Sonuçlarda, çatlak büyüme oranı, çevrimsel gerilim şiddet faktörü (ΔK) ile kontrol edilmiştir. Ve da/dN-ΔK grafikleri yorulma çatlak ilerlemesi, bir malzeme özeliği gibi düşünülerek çizilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer-matris kompozitler, yorulma dayanımı, merkez çatlağı, kırılma mekaniği.

ABSTRACT

PHILOSOPHY OF DOCTORATE THESIS

INVESTIGATION OF FRACTURE BEHAVIOURS WIRE REINFORCED THERMOPLASTICS COMPOSITES

ÖMER FARUK ERKENDİRCİ

SELÇUK UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2006 – 103 Pages

JURY

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Alaattin ARPACI

Prof. Dr. Faruk ÜNSAÇAR

Assoc.Prof. Dr. Reşat ÖZCAN

Assoc.Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

In this study, fracture behaviour of woven steel wire reinforced thermoplastics composites which have bi-directional woven Cr-Ni steel fibres and high density polyethylene matrix, with middle-through-thickness crack under fatique loading, were investigated.

The effects of orientation angles middle-through-thickness fracture behaviour of the composite material under fatique loading were investigated. The crack initiation, fatique crack-growth rate (da/dN), stress intensity factors and fracture toughness are discussed during this study. The crack-growth rate are determined related to crack orientations. The results show that, crack-growth rate (da/dN) is controlled by cyclic stress intensity factors (ΔK). da/dN-ΔK was plotted for determining fatique constants of the composite material.

Key words: Polymer-matrix composites, fatigue strength, middle through thickness crack, fracture mechanics

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen Tez Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Avcı' ya minnet ve şükranlarımı sunarım.

Deneyleri gerçekleştirmem sırasında her türlü yardımı sağlayan Gaziantep KOSGEB Laboratuar Müdürü Sedat Karslı ve laboratuar personeline teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu çalışmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan, eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim.

KISALTMALAR ve SEMBOLLER

LEKM	Lineer elastik kırılma mekaniği
GŞF	Gerilme şiddet faktörü
COD	Çatlak açılma miktarı (crack opening displacement)
E	Elastisite modülü
G	Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
R	Yorulma yük oranı
W	Genişlik
K	Gerilme şiddet faktörü
ΔK	Gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
$\Delta K_{eş}$	Eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
K_I	Mod I gerilme şiddet faktörü
ΔK_I	Mod I gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
$\Delta K_{I\ eş}$	Mod I eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
K_{II}	Mod II gerilme şiddet faktörü
ΔK_{II}	Mod II gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
$\Delta K_{II\ eş}$	Mod II eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
K_{III}	Mod III gerilme şiddet faktörü
2a	Çatlak boyu
a	ÇatIak ilerleme miktarı
N	Çevrim sayısı
C	Kompliyans
da/dN	Çatlağın ilerleme hızı
P	Uygulanan yük
B	Malzeme kalınlığı
σ_n	Nominal gerilme
σ_{max}	Maksimum gerilme
σ_{min}	Minimum gerilme
σ_m	Ortalama gerilme
σ_a	Gerilme genliği
σ_{zz}	Eksenel gerilme bileşeni
u,v,w	x, y, z yönündeki yer değiştirmeler
ν	Poisson oranı
w_f	Elyafın ağırlığı
w_m	Matriksin ağırlığı
w_c	Kompozitin ağırlığı

ρ_f	Elyafın yoğunluğu
ρ_m	Matriksin yoğunluğu
ρ_c	Kompozitin yoğunluğu
V_f	Elyaf hacimsel oranı

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	iv
İÇİNDEKİLER	vi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER	8
3.1.GİRİŞ	8
3.2.KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI	9
3.2.1. Fiber Takviyeli Kompozitler	9
3.2.2. Tabakalı Kompozitler	10
3.2.3. Parçacıklı Kompozitler	10
3.2.3. Çok Bileşenli Kompozitler	10
3.4.PLASTİKLER VE PLASTİK TEKNOLOJİSİ	12
3.4.1 Giriş	12
3.4.2 Plastiklerin Sınıflandırılması	13
3.4.3 Polietilen	14
3.4.3.1 Alçak Yoğunluklu Polietilen	15
3.4.3.2 Yüksek Yoğunluklu Polietilen	15
3.4.4 Polipropilen	16
4.YORULMA	18
4.1. GİRİŞ	18
4.2. YORULMA DENEYLERİ	19
4.3. TEKRARLI YÜKLEMELER VE GERİLME TİPLERİ	20
4.4. YORULMA (S/N) GRAFİĞİ	22
4.5. KOMPOZİT MALZEMELERDE YORULMA	23

4.5.1. Kompozit Malzemelerde Yorulmayı Etkileyen Faktörler 25
4.5.2.Kompozit Malzemelerde Yorulma Olayının ve Çatlağın Gelişimi 26
4.5.3.Yorulma Çatlak Başlaması 27
4.5.4 Yorulma Çatlak İlerlemesi 28
5.KIRILMA MEKANİĞİ 29
5.1. GİRİŞ 29
5.2. LİNEER ELASTİK KIRILMA MEKANİĞİ 31
5.2.1 Düzlem Gerilme Ve Düzlem Şekil Değiştirme 34
5.3. ELASTİK-PLASTİK KIRILMA MEKANİĞİ 35
5.4. GERİLME ŞİDDET FAKTÖRÜ DEĞİŞİMİ 35
5.5. ŞEKİL DEĞİŞTİRME ENERJİSİ BOŞALMA MİKTARI . 37
6. DENEYLER 41
6.1. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI 41
6.2. YAKMA DENEYİ 45
6.3. ÇEKME DENEYİ 45
6.4. YORULMA DENEYLERİ 47
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 49
7.1 YORULMA DENEYLERİ 49
7.2. 0º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI 50
7.2.1 0º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 52
7.3. 15º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI 56
7.3.1 15º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 61
7.4. 30º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI 62
7.4.1 30º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 66
7.5. 45º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI 68
7.5.1 45º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 72
7.6. 60º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI 74
7.6.1 60º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 78
7.7. 75º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI 79
7.7.1 75º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 83
7.8. 0º VE 60º ÇATLAKLI NUMUNELERDE KOMPLİYANS YÖNTEMİYLE ΔG' NİN İNCELENMESİ 85

7.8.1 0º Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG'nin İncelenmesi 85
7.8.2 60º Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG'nin İncelenmesi 87
7.9 TÜM ÇATLAK AÇILARINDA GRAFİKLERİN KIYASLANMASI 89
7.9.1. Tüm Çatlak Açılarında (da/dN~ΔK) Grafikleri'nin Kıyaslanması 89
7.9.2. Tüm Çatlak Açılarında (da/dN~ΔG) Grafikleri'nin Kıyaslanması 90
8.SONUÇ VE ÖNERİLER 92
KAYNAKLAR 94
10.EKLER 99
EK I a 0º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI 99
EK I b 15º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI 99
EK I c 30º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI 100
EK I d 45º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI 100
EK I e 60º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI 101
EK I f 75º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI 103

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler ilk çağlardan beri kullanılmakta olup özellikle 20. yy ortalarına doğru hızlı bir biçimde gelişme göstermiştir. Son yıllarda kompozit malzeme teknolojisinin gelişmesi ve yaygınlaşması ile beraber de bu malzemelerden üretilen kompozitlerin de çeşitleri artmış, böylece mekanik ve kimyasal özellikleri artırılmış yeni malzemeler ortaya çıkmıştır.

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan termosetler yerine termoplastik-lerde bu alanda yerini almaya başlamıştır. Ucuz üretim maliyeti, yüksek kırılma tokluğu, darbe dayanımı, mikro çatlaklara karşı gösterdiği direnç, kalite kontrol ve termosetlerin aksine geri dönüşebilir malzeme olması termoplastik veya polimer kompozit malzemelerin önemini ayrıca artırmaktadır.

Polimer malzemeler uygun fiyatlarının yanında fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleriyle günümüzde pek çok malzeme yerine kullanılmaktadır. Polimerlerin yerini aldığı malzemeler, metallerden ipeğe, tahtadan cama kadar geniş bir spektrum çerçevesinde yer almaktadır.

Özellikle matris olarak kullanılan ve ticari termoplastikler olarak da adlandırılan polipropilen, polietilen, naylon, polietermid, polieterketon v.b. termoplastikler; otomotiv endüstrisi, inşaat, elektrik-elektronik, uzay ve uçak sanayi, alt yapılarda boru ve tank olarak v.b. gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

Bunlardan en önemlilerinden birisi olan polietilende özellikle otomotiv gövde panellerinde, mutfak eşyalarında, ambalaj malzemelerinde, boru ve tank üretminde, havacılık ve uzay sanayi v.b. gibi daha birçok alanda kullanılmakta ve bunlardan üretilen fiber takviyeli kompozitlerin de aynı oranda kullanımı artmaktadır.

Bunun yanı sıra son yıllarda yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) den yapılan borular diğer termoplastik borularla (polipropilen, PVC gibi) rekabet eder hale gelmiştir. Ancak uzama miktarının fazla oluşu ve dayanımının daha az oluşu

kullanımını sınırlamaktadır (Tüfekçioğlu ve ark.). Yine borular ve tanklar, değişken yükleme şartlarından dolayı *yorulma* etkisine maruz kaldıklarından dolayı, bu tür malzemeler statik olmayan ve sürekli değişen iç basınç nedeniyle, statik mukavemet değerlerinin altında hasara uğrarlar. YYPE malzemenin daha yaygın ve güvenilir bir şekilde kullanımını sağlamak için fiber olabilecek bir malzemeyle takviye edilerek mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gereklidir.

Ülkemizde fiber takviye malzemesi olarak en çok cam elyafı ve karbon kullanılmaktadır. Diğer takviye malzemeleri ile ilgili çalışmalar da devam etmektedir. Örneğin en çok kullanılan kompozitler; cam elyaf takviyeli, karbon fiber takviyeli, metal panel takviyeli v.b. gibi türlerdir. Ancak bunlardan bazılarının kimyasal maddelere özellikle de suya karşı korozyon dirençleri düşüktür.

Bu sebeplerden ötürü bu çalışmada fiber olarak bez ayağı yöntemiyle üretilmiş (plane wave) krom nikel çelik tel örgü ve matris olarak da yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kullanılarak tabakalı kompozit malzeme üretilmiş ve YYPE nin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Daha sonra üretilen bu kompozit malzemenin mekanik özellikleri incelenmiş, kendisini oluşturan malzemelere göre olan üstünlükleri araştırılmıştır. Ayrıca kırılma mekaniği ile ilgili özelliklerden olan ve ortasında boyuna çatlak bulunan malzemenin çeşitli açılarda yorulma yükü altında kırılma davranışları incelenmiştir. Yorulma dayanımı, çevrim sayısına karşılık çatlak ilerleme miktarına göre incelenmiş, da/dN-ΔK ve da/dN-ΔG grafikleri çizilmiştir. Paris-Erdoğan eşitliği kullanılarak da malzeme sabitleri elde edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Makine ve mühendislik yapı elemanlarında yorulma ve çatlak önemli iki parametredir. Çünkü yorulma ile meydana gelen yüzey çatlakları hızlı şekilde gelişebilir, ciddi tahribat ve kırılmalar oluşabilir. Ayrıca malzemede var olan çatlaklar da, yorulmanın etkisiyle aynı sonuçlara yol açarak, maddi kayıplara ve hatta can kayıplarına sebep olabilir. Dolayısıyla yorulma ve çatlağa bağlı olarak oluşan kırılma mekanizmasının bilinmesi mühendislik açısından çözülmesi gerekli problemlerdir.

Özellikle her biri yeni bir malzeme olan kompozit malzemelerin kırılma ve hasar davranışlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Tekrarlı gerilme durumu olan yorulma olayında malzemelerdeki süreksizlikler, çatlaklar ve hasarların sürekli olarak gelişmesi, ilerlemesi ve malzemenin hasar görmesiyle sonuçlanır. Dolayısıyla çatlak boyutları ve ilerleme tarzı bilinirse eleman tasarım aşamasında iken hasar önlenebilir.

Yorulma sırasında hasar mekanizmasının tespiti ve karakteristikleri oldukça karmaşık konulardır. Bununla ilgili olarak birçok teorik ve deneysel çalışma yapılmış ve önemli sonuçlar alınmıştır.

Çatlakların ilerleme davranışlarını belirleyen iki özellik vardır. Bunlar uygulanan yük ve ortamın etkisidir. Malzemelerin yorulma altında gevrek olarak kırıldığını (Rankine 1840) gözlemlemiş ve uygulanan tekrarlı değişken yüklerin etkisiyle malzemenin dayanım gücünün azaldığı ve yorulduğu sonucuna varılmıştır.

Bir makine elemanındaki çatlağın ilerlemesine çatlağın geometrisi etki eder. Çatlak farklı geometrilerde farklı davranışlar gösterir. Dolayısı ile her biri için farklı bir model ve analiz gerekir. Kenar, yüzey ve boylamasına çatlak türlerinden en karmaşık olanı yüzey çatlağıdır. Çünkü yüzey çatlağında merkez açıya benzer bir açı yoktur. Yüzey çatlağında çatlak ilerlemesi uzunluğa, derinliğe, malzemenin

kalınlığına, merkez açısına göre değişirken, diğerlerinde sadece çatlak uzunluğu ve malzemenin kalınlığı önemlidir (Lin 1999).

Yüzey çatlaklı numunelerde gerilme şiddet faktörünü (Irwin 1957) hesaplamıştır. Yorulma çatlak ilerleme hızını (Paris ve Erdoğan 1960) hesaplamış ve bunu gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır.

Kompozit malzemelerle ilgili olarak da yapılan birçok çalışmada önemli sonuçlar rapor edilmiştir. Ferreira ve ark. cam fiber takviyeli polipropilen kompozit malzemelerde yorulma davranışına kompozit tasarımın ve yük koşullarının etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada kompozit malzemede ki fiber olarak kullanılan cam elyaf 0º, +30º/0º/-30º, +45º/0º/-45º olmak üzere üç farklı geometride yapılmış ve tabakalanma geometrisinin yorulma dayanımını etkilediği gözlenmiştir. Deneylerde numunelerin farklı sıcaklıklarda ve farklı yük oranlarında yorulma davranışları incelenmiş S/N grafikleri oluşturulmuştur. Sıcaklığa bağlı değişen katılık kaybı, bir hasar parametresi olarak ele alınmış ve bunun sıcaklıkla doğru orantılı olduğu ve yorulma ömrünü etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. (Ferreira ve ark. 1999)

Yine Ferreira ve ark. cam fiber takviyeli kompozit malzemelerde farklı çaplarda delik açılmış numunelerde, deliğin yorulma ömrüne etkisini, hasar mekanizmasını, çatlak ağzı ve çatlak ilerleme davranışlarını farklı yüklerde incelemişlerdir. Bu çalışmada delik çapı büyüklüğünün ve pozisyonunun yorulma performansını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca değişik yükleme şartlarının ve sıcaklık değerlerinin de yorulma ömrünü etkilediğini deneysel sonuçlarıyla beraber rapor etmişlerdir. (Ferreira ve ark. 1997)

Newman-Raju eliptik yüzey çatlağının ilerleme davranışlarını, sonlu kalınlıktaki ve genişlikteki numuneler üzerinde incelemiş, bu konuda ampirik formüller geliştirmişlerdir. (Newman-Raju 1976)

Akdemir ve ark. korozif ortamda filaman sarım cam-polyester kompozit levhaların gerilmeli korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada üzerine değişik a/c ve a/t oranlarına sahip yüzey çatlakları açılmış numunelerin bir tarafını gerilme korozyonu altında bırakarak çatlağın ilerleme davranışlarını incelemişlerdir. Gerilme şiddet faktörünün, parametrik açı Ø ile değişimini, Nishioka-Sen ve Newman-Raju formüllerini kullanarak hesaplamış ve mukayese etmişlerdir. Ve

Ø=90º için yaklaşık olarak aynı sonuçları verdiğini bulmuşlardır.(Akdemir ve ark.2001)

Başka bir çalışmada S.C. Pradhan ve ark. termoplastik kompozit tabakalarda kırılma parametrelerini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişler ve şekil değiştirme enerji boşalma hızını deneysel çalışmalar da ki sonuçlara yakın değerlerde hesaplamışlardır. (S.C. Pradhan ve ark 2000)

Czigany and Karger-Kocsis örgü takviye ile güçlendirilmiş polipropilen kompozitlerde hasar bölgesinin büyüklüğünün yorulma performansına etkilerini incelemişlerdir. (Czigany ve ark. 1993)

J.L. Thomason cam elyafı ile güçlendirilmiş kompozitler de makro-mekanik ölçümlerle modeller oluşturmuş ve bunlarla mikro-mekanik parametreleri incelemiştir. Bulduğu modellerle deneysel sonuçları kıyaslamış ve birbirine yakın değerler bulmuştur. (J.L. Thomason 2002)

Paepegem ve ark, yorulma sonucu tabaka ayrılması olayını incelemiş ve bu olayı sonlu elemanlar analizi ile doğrulamışlardır. (Paepegem ve ark. 2001)

Krujjer ve ark., çelik takviyeli YYPE borularda visko-elastik davranışları incelemişler ve bununla ilgili modelleme yaparak sonuçlarını rapor etmişlerdir. (M.P. Krujjer ve ark., 2005)

Tabakalı cam fiber takviyeli polyester kompozit malzemeler üzerinde sabit genlikte ki yükler altında yorulma olayı Tong tarafından çalışılmıştır. Bu çalışma da çatlak ilerleme safhaları incelenmiş ve matris çatlaması sonucu oluşan ek gerilme dağılımını ve rijitlikte ki azalmayı sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemiştir. Yorulma sırasında çatlakların, başlangıç, kararlı halde ilerleme ve çatlak etkileşimi olarak üç aşamada geliştiğini gözlemlemiştir.(Tong 2002)

Güldü cam kumaş polyester, grafit epoksi ve kevlar epoksi kompozitlerden oluşturduğu kompakt çekme numuneleri ile yaptığı çalışmada takviye açılarının kırılma davranışlarına ve kırılma tokluğuna etkisini deneysel olarak incelemiştir (Güldü 1995).

Nesar Merah ve ark. klorlanmış polivinilklorid malzemede yorulma çatlak ilerlemesinin, sıcaklık ve frekans değişimine karşı gösterdiği direnci incelemişlerdir. Çatlak ilerleme hızının, GŞF ile doğrudan orantılı olduğunu, yorulma ve frekansın

artmasıyla yorulma çatlak ilerlemesinin de hızlandığını rapor etmişlerdir. (Nesar Merah ve ark. 2004)

Polietilen cam çubuklar üzerinde çentik açıldıktan sonraki yorulma davranışları da V. Favier ve ark. tarafından incelenmiştir. Burada farklı GŞF ile çatlak ilerleme miktarları arasında ilişkiyi inceleyen deneyler yapılmış ve ilgili grafikler çizilmiştir. Sonuç olarak da GŞF nin değeri arttıkça yorulma ömrünün azaldığı rapor edilmiştir. (V Favier ve ark. 2001)

Farklı oryantasyonlarda üretilmiş örgü fiberlerin ve bunlarla takviye edilmiş çimento kompozitlerin mekanik özellikleri A. Peded ve ark. tarafından incelenmiştir. Burada örgü fiber malzemesi olarak PE, YYPE ve PP malzemeler kullanılmıştır. (A Peled ve ark. 2002)

Yine D. Stevanoviç ve ark. cam fiberle takviye edilmiş vinil ester kompozit malzemeler üzerinde, mod I ve mod II deleminasyonuna başlangıç çatlak şartlarının etkisini incelemişler ve yorulma ön çatlağı ile çatlak ilerleme miktarlarının, enerji boşalma miktarına olan etkilerini bileşik mod testleri uygulayarak, sonuçlarını rapor etmişlerdir. (D. Stevanoviç ve ark. 2000)

Kısa E-cam fiberle takviye edilmiş polietilen terafalat termoplastik kompozitler de kırılma davranışları da C.Lhymn ve ark. tarafından çalışılmıştır. Deneyler sonucunda farklı fiber oryantasyonlarında kırılma tokluğu hesaplanmış, matris ve fiber arasındaki kırılma ilişkileri açıklanarak rapor edilmiştir. (C. Lhymn ve ark. 1983)

Lacroix ve ark., yüksek moleküler ağırlıklı polietilenle takviye edilmiş yüksek yoğunluklu polietilenin kristalleşme davranışlarını ve morfolojilerini mikroskobik görüntüler ve SEM tekniği ile incelemişlerdir. (F.V. Lacroix ve ark. 1998)

Grafit ve camla güçlendirilmiş polimer kompozitlerin üzerlerine 2024-T3 ve 7075-T6 alüminyum alaşımlı levhalar yapıştırılarak yeni bir hibrid kompozit malzeme W. Sun tarafından üretilmiştir. Daha sonra bu malzeme üzerinde hasar mekanizması ve akma sınırları araştırılmıştır. Bu çalışmada kalıcı termal gerilmelerin ve hacimsel oranların, akma sınırları ile hasar mekanizmasına olan etkilerini incelemiştir. (W. Sun 1997)

Shan ve ark., cam ve karbon takviyeli epoksi matris malzemelerin çekme-çekme durumundaki yorulma davranışlarını hem havada hem de 25^{o}C de saf su içinde deneylere tabi tutmuşlardır. Maksimum dayanımın %85'inde yapılan deneylerde, yorulma ömründe belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Ancak maksimum dayanımın %65 ve %45'inde yapılan deneylerde yorulma ömrünün azaldığını rapor etmişlerdir. (Shan ve ark. 2002)

Yine başka bir çalışmada bileşik mod (mod I ve mod II) uygulanarak, yüksek çevrimli yorulma deneylerinde ki çatlak ilerleme davranışlarını R.K. Nalla ve ark. aluminyum alaşımları üzerinde (Ti6Al-4V) incelemişlerdir. Bu çalışmada özellikle küçük boyuttaki çatlakların etkileri araştırılmış ve sonuçları rapor edilmiştir. (R.K. Nalla ve ark. 2002)

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. GİRİŞ

İki veya daha fazla malzemenin makro seviyede fiziksel olarak birleştirilmesinden elde edilen yeni malzemelere kompozit malzemeler denir. Alaşımlar gibi mikro seviyede oluşturulan malzemeler, makro seviyede homojen olmasına rağmen, kompozit malzemeler böyle değillerdir. Dolayısıyla kompoziti oluşturan malzemeler özelliklerini korurken bunlardan tasarımda istenen özellikleri verebilecek yeni ve daha üstün bir malzeme meydana gelir.

Konvansiyonel malzemelerde malzeme kombinasyonu sınırlı iken kompozit malzemelerde sonsuz sayıda kombinasyon imkanı mevcuttur. Bu da kompozit malzemeleri diğerlerinden ayıran en önemli özelliklerden birisidir.

Kompozit malzemeler oluşturulurken dayanım, rijitlik, korozyon direnci, yorulma ömrü, ısıl yalıtkanlık ve ısıl iletim, akustik izolasyon, sıcaklığa bağımlı özellikler, ağırlık, elektrik iletkenliği gibi özelliklerden bazılarının geliştirilmesi amaçlanır. Bunların hepsinin birlikte geliştirilmesi beklenemez, sadece tasarımda en çok istenen özelliklerin iyileştirilmesi kompozit malzeme için yeterli olacaktır.

Kompozit malzemeler ekonomik olmalarının yanı sıra, var olan doğal kaynakların daha iyi kullanılmasını sağlar. Bu malzemeler ilk çağlardan beri kullanılmaktadır. Örneğin İsrail oğullarının çamur ve saman karışımından yaptıkları kerpiçler, ortaçağ da kullanılan bazı kılıç ve zırhlar bunlardan bazılarıdır. Günümüzde ise başta uzay ve havacılık sanayi olmak üzere bir çok alanda kullanılmaktadır. Bu kadar avantajına rağmen en büyük dezavantajı, henüz yeni malzemeler oldukları için tanımlanmamış birçok parametresinin bulunmasıdır. Bu sebeple araştırılması gerekli geniş bir alandır.(Jones, 1998)

3.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemeler matris adı verilen bir ana bileşenle, yüksek dayanım ve yüksek elastisite modülüne sahip olan takviye edici eleman (fiber, tane, tanecik, parçacık, dolgu) adı verilen yapısal bileşenlerden oluşur. Kompozitler bileşenlerin türleri ve yapısal açıdan dört grupta sınıflandırılabilirler. Bunlar:

1- Fiber takviyeli Kompozitler
2- Tabakalı kompozitler
3- Parçacıklı kompozitler
4- Çok bileşenli (Hibrid) kompozitler

3.2.1. Fiber Takviyeli Kompozitler

Takviye malzemesi elyaf halindedir ve en çok kullanılan kompozit malzeme türüdür. Yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olan elyaf ile daha düşük dayanıma sahip matrisin fiziksel olarak birleşmesinden meydana gelir. Özellikleri fiber/matris karışım oranına, fiber geometrisine bağlı olarak değişim gösterir. Birleşimde ki kristal yapı fiber ekseni boyunca dizilirler ve içyapı kusurları diğer türlere göre azdır. Örneğin sünek ve yumuşak matris ile sert, dayanıklı, elastikliği yüksek elyaflar ilave edilirse çekme dayanımı, yorulma performansı ve elastisite modülü iyileştirilmiş yeni bir kompozit malzeme elde edilebilir. Fiber takviyeli kompozitler kendi içerisinde fiber geometrisine bağlı olarak beş sınıfa ayrılırlar. Bunlar Şekil 3.1. de görüldüğü gibi tek yönlü sürekli elyaflı, kırpılmış elyaflı, ortagonal elyaflı, çapraz dizilmiş sürekli elyaflı ve rasgele dizilmiş sürekli elyaflı kompozit malzemelerdir. (Şahin,2000)

Bu kompozit malzemelerde fiber olarak kullanım sırasına göre en çok cam, grafit, karbon v.b. malzemeler kullanılmaktadır. Özellikle cam elyafın geniş olarak kullanılmasının nedeni, diğerlerine göre daha ucuz olması, kolay temin edilebilmesi, çeşitliliğinin fazla olması ve yüksek dayanıma sahip olmasındandır. Dezavantajı ise neme karşı duyarlı olmasıdır. Ayrıca gelişen teknolojiyle özellikle kumaş türü örneğin çelik tel örgü, plastik örgü, krom-nikel tel örgü gibi değişik fiberlerde

kullanılmaya başlanmış ve bu sayede yeni kompozit malzemeler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bir fiber uzunluk/çap oranı ve kristal büyüklüğü ile karekterize edilir. Boyut küçüldükçe kompozit malzemede sertlik ve dayanımın arttığı görülmüştür.

Matris malzeme olarak da termosetler, termoplastikler, epoksi v.b. malzemeler kullanılmaktadır. Termosetler ile kompozit malzeme yapıldıktan sonra tekrar geri dönüşüm imkanı yoktur. Fakat termoplastikler bunların aksine geri dönüşebilir malzeme olduğundan defalarca kullanılabilir. En yaygın kullanılan termoplastikler polietilen, polipropilen, naylon v.b. plastiklerdir.

3.2.2. Tabakalı Kompozitler

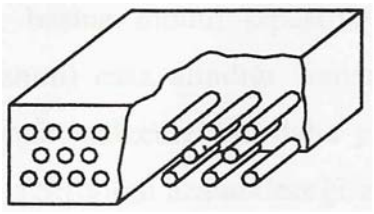
Tabakalı kompozitler en az iki farklı malzemenin birbirine yapıştırılması ile elde edilen malzemelerdir. Organik veya inorganik malzemeler tabakalar halindedir. Teflon ve kauçuk kaplı metalik levhalar örnek olarak sayılabilir. Bu kompozitler de tabakaların dayanımı, rijitlik, korozyon direnci, yalıtkanlık gibi özellikleri geliştirilebilir.

3.2.3. Parçacıklı Kompozitler

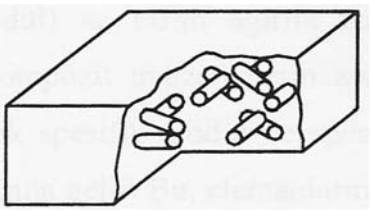
Bir veya birkaç farklı malzemenin matris görevi görerek oluşturduğu kompozitlerdir. Beton bunlara en iyi örneklerden biridir. Metal veya metal olmayan malzemeler kendi içerisinde değişik kompozitler oluşturabilir ve sınıflandırılabilirler. Son yıllarda özellikle inşaat sektöründe betonarme içerisine çok değişik fiber uygulamaları uygulanmakta ve geliştirilmektedir.

3.2.3. Çok Bileşenli (Hibrid) Kompozitler

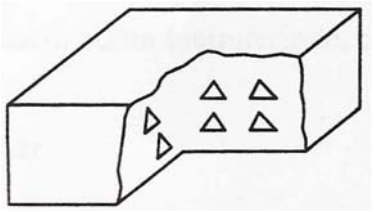
Birden fazla çeşit takviye malzemesi birlikte kullanılarak yapılan kompozit malzemelerdir. Metal ve polimer hatta seramik malzemeler beraber kullanılabilir. Jüt ve cam elyafının birlikte kullanılması ile yapılan bir malzeme buna örnek olarak gösterilebilir. (Akdemir 1993)



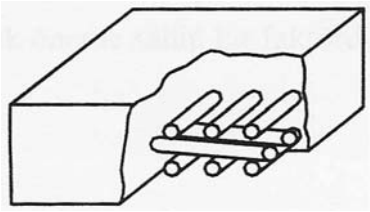
(a)



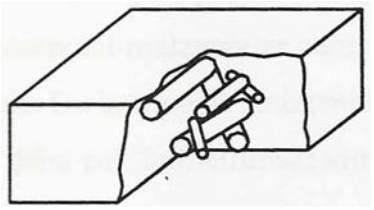
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 3.1 Fiber takviyeli kompozit malzemeler

a) Tek yönlü sürekli elyaflar

b) Kırpılmış elyaflar

c) Ortagonal elyaflar

d) Çapraz dizilmiş sürekli elyaflar

e) Rasgele dizilmiş sürekli elyaflar

3.4. PLASTİKLER VE PLASTİK TEKNOLOJİSİ

3.4.1 Giriş

Plastik sanayi'nin, nitroselülozun ticari üretimi ile (1868) başladığı kabul edilir. Bu ise, yaklaşık 130 yıl öncesi demektir. Nitroselülozu takiben, tarihsel süreçte ikinci sentetik plastik olan fenol-formaldehit esaslı polimerler gelir. Bunların üretimleri ise, bu tarihten yaklaşık 40 yıl sonra gerçekleştirilmiştir. Bu ve bunları izleyen diğer plastik malzemelerin temel yapı taşları ve ham maddeleri olan polimerler, 19. yüzyılın ikinci yarısındaki bazı deney çalışmaları sonunda ve birçoğu tesadüfen ortaya çıkmıştır

Temel olarak, doğada; üç farklı malzeme olduğunu ve bunların yaygın olarak kullanıldığını biliyoruz. Bunlar polimer, metal ve seramik malzemeler olarak sıralanabilir

Kimyaya başlayan bir öğrenci, öncelikle elementleri ve bunları bir arada gösteren periyotlar cetvelini öğrenir. Periyotlar cetvelinde, sol tarafta hep metalik elementler sağ tarafta ise ametaller vardır. Bunlardan kolaylıkla elektron veren ve metalleri oluşturan metalik elementleri biliyoruz. Ametaller ise, polimerleri oluşturan ana yapı taşlarıdır. Metalik ve ametalik elementlerin karışımı ise, seramiklere yol açar. Bu üç temel malzeme türünün şu temel farklı özellikleri vardır: metaller elektrik ve ısıyı iyi iletirler, parlaktırlar, genellikle serttirler, elektron vererek tepkimeye girerler, yoğunlukları 1 g/cm^3'den yüksektir. Polimerler elektrik ve ısıyı iyi iletmezler, genellikle saydam veya donuk görünümlüdürler. Yoğunlukları küçüktür (yoğunlukları 1 g/cm^3 civarındadır); hafiftirler.

Özelliklerdeki bu farklılıklar nedeni ile de, farklı uygulamalar için metaller veya polimerler tercih edilir. Tarihsel gelişimi içinde polimer malzemeler hep metalik olanlara rakip olarak düşünülmüş olup, polimer malzemelerin üretim ve kullanımları devamlı olarak artmış ve 1980 yılında; hacimce toplam polimer malzeme üretimi dünya metalik malzeme üretim miktarını geçmiştir (plastik yılı). Günümüzde, geliştirilmiş polimer malzemeler, pek çok metal malzeme yerine tercihen kullanılır hale gelmiştir ve geleceğe ilişkin tahminler, bu "yerine kullanılabilirliğin" daha da büyük bir hızla devam edeceğini göstermektedir. Bugün

artık pek çok istenilen özelliğin polimer malzemelere kazandırılması olasıdır. Böylece polimer malzemeler, değişik özelliklerde katı plastikler, çeşitli lifler (elyaf), köpük malzemeler, filmler, kaplamalar, yapıştırıcılar vb. gibi çeşitli değişik kullanım alanlarına yönelik olarak üretilebilmektedir. Polimer maddeler sert veya yumuşak, rijit veya esnek, kauçuğumsu veya camsı yapıda olabilmektedir. Polimer maddelere ayrıca değişik fiziksel yapılar kazandırılarak gözenekli/gözeneksiz, ısı ile sertleşip şekillenen veya ısı ile tekrar eriyebilen türlerde üretilebilmektedir. Son yıllarda bu özellik kazandırma daha da uç noktalara taşınmış olup; örneğin, ısıtıldıklarında akkor halde hala bozunmayan ve yanmayan türler dahi yapılabilmektedir

Günümüzde tüketilen farklı plastik türlerinin sayısı fazla olmakla birlikte, içlerinden bazıları büyük tonajlarda üretilmekte ve bunlar genel amaçlı plastikler olarak tanımlanmaktadır. Genel amaçlı plastiklerin üretim miktarları diğerlerine kıyasla çok daha fazla olduğundan, genellikle istatistiksel verilerde sadece bu plastikler dikkate alınmaktadır.

3.4.2 Plastiklerin Sınıflandırılması

Polimer zincirlerinden oluşan bir kütleye (polimer madde) ısı şeklinde enerji verildiğinde, polimer zincirlerinin hareketliliğinde artışlar meydana gelir. Başlangıçta polimer zincirinin küçük parçalarında oluşan bu hareketlilik, ısı arttıkça giderek büyük parçaları kapsar ve tümüne yayılır. Bu konumda polimer zincirleri birbiri üzerinden kaymaya başlayacak ve katı polimer, ergiyerek akacaktır. Polimerleri şekillendirirken; polimer malzemenin belli sıcaklık değerlerinde sıvı hale geçmesi olayından yararlanıyoruz. Böylece karışım, daha sonra ters işlemle (sıcaklığın azaltılması ile) soğutulup katılaştırılmakta ve plastik parça kalıptan çıkartılarak kullanıma sokulabilmektedir. Bazı plastiklerde istenildiğinde bu katı plastik, tekrar ısıtılıp ergitilebilir-soğutulup katılaştırılabilir ve tamamen fiziksel ve tersinir olan bu dönüşüm tekrarlanabilir. Bu tür plastiklere; (Latince ısı ile şekillendirilebilen anlamına gelmek üzere) ***"termoplastik"*** adı verilmektedir. Çok yaygın kullanılan polimerlerin hemen hepsi (PE, PVC, PS gibi) termoplastiktir.

Bunun yanı sıra, ısı ile farklı bir davranış gösteren ikinci grup polimer ailesi de bulunmaktadır. Isı ile bir kez şekil verildikten sonra tekrar ısıtıldıklarında bozunan

bu grup "***termoset"*** polimerlerdir ve bunlar ısıtıldıklarında yumuşamaz ve ergimezler. Isının yükselmesine karşın ilk katı konumlarını korurlar. Ancak polimer sistemini oluşturan polimer zincirlerindeki bağlar, ısıtılmaya karşı bir sınır değere kadar direnebilir. Belli yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığında bağlar kopabilir ve termoset malzeme bozunarak tersinmez şekilde tepkime verir. Yani termoset plastikler, klasik yöntemle (ısıtılıp soğutularak) şekillendirilemezler. Bunlar, özel olarak şekillendirilecekleri kalıpta tepkimeye sokulup termoset malzeme üretimi sağlanabilir. Aslında, bazı özel uygulamalarda (elektrik prizleri ve malzemeleri gibi) termoset malzemeye de gerek duyuyoruz. Isıtılarak yumuşatılıp ergitilemeyen bu tür polimer maddelere fenol-formaldehit veya üre-formaldehit polimerleri (fenolik polimerler) ve çapraz bağlı polietilen örnek olarak verilebilir. Fenolik polimerler, genellikle, başlangıçta, lineer ve akışkan bir kademede elde edilirler ve daha sonra, kimyasal maddeler, ışıma, sıcaklık ve/veya basıncın etkisiyle çapraz bağlanarak sertleştirilip, son kullanım şekillerine sokulurlar.

Genel amaçlı veya ticari plastikler arasında, alçak ve yüksek yoğunluklu polietilen (kısaca AYPE ve YYPE), polipropilen (PP), polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC) bulunmaktadır. Bunlara, kısaca 5 kardeşler de denilmektedir. Bu listeye, zaman zaman akrilonitril-butadien-stiren üçlü kopolimeri (terpolimer, ABS) ile stiren-akrilonitril kopolimeri (SAN) da dahil edilmektedir

3.4.3 Polietilen

Yoğunluğu en az olan termoplastik türündendir. 1990'Iı yılların verilerine göre polietilen, ambalaj sanayinde kullanılan plastiklerin yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır. Polietilenin yoğunluğuna bağlı olarak değişik türleri mevcuttur.

Polietilen çok ucuz, kimyasal olarak kararlı, kaynak yapılması nisbeten kolay, gerilmeye karşı mukavemetli ve dayanıklı olup düşük sıcaklıklara hassas değildir. Geniş bir sıcaklık aralığında kullanılmasının yanı sıra su buharına karşı mükemmel bir bariyerdir. Buna karşılık, gaz, aroma ve yağ geçirgenliği açısından vasat özelliktedir. Oda sıcaklığında esnek ve kırılmaya karşı olan direnci yüksektir. Su emme özelliği çok azdır. İçerisinde is oranı % 2- % 2,5'dan az olduğunda havadan etkilenmez. 60 ºC'nin altındaki sıcaklıklarda iyi bir izolasyon maddesidir. Asitlerden, alkalilerden, deterjanlardan ve kimyasal ergiyiklerden etkilenmez.

Bariyer özellikleri, yoğunluğun artmasıyla birlikte artan kristal derecesi, dayanıklılık, sertlik ve erime sıcaklığına bağlı olarak artar. Ancak buna karşın yoğunluğun artması; darbe dayanımını, ışık geçirgenliğini, düşük sıcaklıklara olan hassasiyeti ve gerilme çatlamaları (stress cracking) değerlerini olumsuz yönde etkiler. Polietilen malzemelerin diğer özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir.

Genellikle enjeksiyon kalıplama işlemlerini içeren kalıplamayla; kova ev eşyası, çocuk oyuncakları, ilaç ve laboratuar eşyası yapımında, ayrıca döşemecilikte çok kullanılır.

3.4.3.1 Alçak Yoğunluklu Polietilen (AYPE)

Yoğunluğu 0.91-0.925 gr/cm^3 arasında değişir. Ucuz bir ürün olup genellikle film, kaplama ve laminatlarda kullanılır. Diğer bir türü olan lineer alçak yoğunluklu polietilen ise daha dayanımlı ve bunun sonucu olarak da kalınlığının azaltılabilmesinin mümkün olması, kaynaklama için daha yüksek sıcaklıklara olan dayanımı olması nedeniyle alçak yoğunluklu polietilen yerine giderek artan oranda kullanılmaktadır. Tipik uygulamaları arasında buzdolabı torbaları, alışveriş torbaları, ağır eşyaları taşımaya uygun çuvalların ağız kısımları; laminatlar ve esnek filmler, sayılabilir

3.4.3.2 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)

Yoğunluğu 0.941 ile 0.965 gr/cm^3 arasında değişir. Yukarıda sayılan genel özelliklere ve kullanım alanlarına ek olarak hayvansal yağ (et paketlemesi) ve aroma geçirmeme, şekil kararlığının çok iyi olması (sandık gibi enjeksiyon kalıplamayla üretilmiş ürünler), ısı dayanımının iyi olması (otoklavlarda sterilize edilen süt şişeleri) gibi özelliklerin istendiği uygulamalarda kullanılır.

Yüksek molekül ağırlıklı polietilen (High Molecular PE) ise özellikle küçük ve bükülmez poşet yapımında kullanılır.

3.4.4 Polipropilen

Polipropilen filmler 1960'lı yıllardan beri var olup, polietilen gibi fiyatı düşük olan polimerlerdir. Polipropilenin su buharı bariyer özelliği iyi (AYPE ve YYPE arasında) ancak gaz ve aromayı geçirmeme özelliği vasattır. Polipropilen hayvansal yağlara karşı polietilenden daha iyi bir bariyerdir. Ayrıca 165º C gibi polietilene oranla çok daha yüksek olan ergime sıcaklığı nedeni ile yaklaşık 140°C'a kadar kullanılabilir. Kristalleşmenin ani soğutma ile engellenebilmesi durumunda, ışık geçirgenliği de polietileninkinden oldukça büyüktür.

Tablo 3.1. Ticari Termoplastik Polimerlerin Tipik Özellikleri

Özellik	Yüksek Yoğunluklu Polietilen	Alçak Yoğunluklu Polietilen	Polipropilen
Ozgül ağırlık, gr/cm ^{3}	0.941-0.965	0.91-0.925	0.90-0.91
Kırılma indisi, nD"	1.54	1.51	1.49
Kopma dayanımı, MPa	22-39	7-16	30-40
Uzama, %	15-1 00	90-650	250-700
Elastiklik modülü, MPa	560-1050	120-245	900-1400
Darbe dayanımı, çentikli N-m/cm	0.80-6.4	>8.6	0.32-3.2
Isı ile deformasyon sıc., ºC (ASTM-D 648)	60-82	40-50	100-110
Su soğurması, 24 saatte, %	<0.01	<0.015	<0:01
Yanma hızı	Çok yavaş	Çok yavaş	Yavaş
Güneş ışığının etkisi	Etkilenir	Yüzeyde Çatlama	Etkilenir
Kuvvetli asit/baz etkisi	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
Organik çözgen etkisi	80°C < dayanıklı	80°C < dayanıklı	80oC < dayanıklı
Saydamlık	Opak	Opak	Opak

İstenilen özelliklerini ancak 0°C'a kadar koruyabilmesi nedeniyle standart polipropilen film ambalaj uygulamalarında ender olarak kullanılır. Ambalaj malzemesi olarak en yaygın kullanımı ekmek ambalajlamasıdır. Etilen kopolimerleri

daha düşük sıcaklıklara dayanım, daha iyi ısıl kararlılık ve dayanımı ile iyi kaynak özelliklerine sahip olduklarından tercihen kullanılmaktadır. Etilen kopolimerinin tipik uygulamaları arasında doldurulmuş ürünler için enjeksiyon kalıplamayla üretilmiş kaplar ve sterilize edilebilen ambalaj malzemelerinde "heat sealing" katmanı olarak kullanımı; buharla sterilize edilebilen ve mikrodalga fırında ısıtılabilen fincan ve tepsi yapımı, sayılabilir. En son gelişmeler ise sıcak dolum yapılabilme veya otoklavda sterilize edilebilmeye uygun bir bariyer katmanı içeren çok katmanlı şişe ve kutulardır.

Polipropilenin daha yaygın olan iki yönde gerdirilmiş (iki yönlü oryantasyon) şekli; mekanik dayanımı, geçirgen olmama özelliğini, ışık geçirgenliğini ve düşük sıcaklıklarda (-50ºC'ye kadar) kararlılığı artırır. Tek yönde gerdirme (tek yönlü oryantasyon) özellikle dokuma çuval şeridi gibi şerit uygulamalarında kullanılır. Polipropilenin diğer özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir. (Savaşcı ve ark.,2002)

4.YORULMA

4.1. GİRİŞ

Yapı elemanlarında hareketli yüklerin toplamı, yükün önemli bir oranını teşkil etmesi durumunda, yapılara değişken kuvvetler etki etmekte ve bunun sonucunda yapı elemanlarında değişken gerilmeler oluşmaktadır. Bu durumda yapı elemanının herhangi bir kesitine ait bir noktasının Q_{min} ile Q_{max} arasında devamlı olarak değişken bir gerilme etkisi altında kalmasına yorulma olayı denir. Mühendislik işlerinde yorulma olayı ile sık sık karşımıza çıkan köprüler özellikle çelik köprü elemanları bu çeşit zorlamaların etkisi altındadır. Raylar, her türlü nakil vasıta dingilleri, uçak kanatları, uçak gövdesi ve diğer elemanları yorulmaya maruz kalmaktadır.

Yorulma ASTM E 206-72' de aşağıdaki gibi tariflenmektedir; "Bazı nokta veya noktalardaki tekrarlı gerilme veya uzama şartlarına maruz malzemelerde görülen, yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmaya sebep olan, lokalize sürekli gelişen, kalıcı yapı değişikliği olayıdır. İkinci tanımlamada üzerinde durulan dört önemli özellik; olayın sürekli gelişmesi, lokalize olması, çatlakların büyümesi ve sonuçta kırığın ortaya çıkmasıdır. Uygulamada makinalara ve dolayısıyla makina parçalarına genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak zamanla değişen kuvvetler, gerilmeler, eğilme ve burulma momentleri etki ederler. Bu tür zorlanma etkisi altındaki bir makine elemanı, akma sınırı altındaki bir gerilmede beklenmedik bir tarzda kırılabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması adı verilir. (Samancı,2004)

Yorulma hasarı, yüzeyden başlayan mikro çatlaklar şeklinde oluşmaktadır. Yüzey düzgünlüğü ve direnci yorulma ömrünü etkileyen önemli faktörlerdir. Yorulma hasarı belirli bir süre dinamik yüklemeye maruz kalmanın sonucunda oluşmaktadır. Bu süre malzemenin türüne yüzeyin kalitesine ve dinamik yükün

büyüklüğüne, frekansına bağlı olarak değişmektedir. Kullanım sürecinde yorulma çatlaklarının oluşması kaçınılmaz olmaktadır. Yüzeyinde çatlakları ve oyukları içeren bir yapı, ideal bakım periyotların da, yorulma hasarının mikro boyutta iken tespiti, yapının emniyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Korozyon yüzey kalitesini bozan bir etken olması nedeniyle, yorulma riskini arttırmaktadır. Ayrıca yorulma gerilmeleri gerilme korozyonuna neden olmaktadır

Yorulma tekrarlanan yüklerin sebep olduğundan dolayı metal malzemelerde kompozitlere göre beklenmedik sonuçlar verir. Ve daha tehlikelidir. Kompozit malzemelerdeki fiber kırılması, delaminasyon, matris çatlaması, boşluklar gibi hatalar alışılagelmiş metallerdeki çatlak gibi hatalardan daha fazla olabilir. Ancak, bir metaldeki hasar gelişimi daha beklenmediktir. Bu yüzden alışılagelmiş metaller potansiyel olarak kompozit malzemelerden daha tehlikelidir. Elastik bölgede ki gerilmelerde oluşur ve bölgesel plastik deformasyonlar oluşturur. Yorulma olayı çatlak oluşması, çatlak ilerlemesi ve kırılma olmak üzere üç aşamada gerçekleşir.

4.2. YORULMA DENEYLERİ

Bir numuneyi değişken gerilmelerin etkisine bırakabilmek için, elektro-mekanik, mekanik, elektro-hidrolik, hidrolik v.b. gibi tertibatları bulunan özel yorulma test cihazları kullanılır. Deneyler sırasında malzemeye zamana bağlı olarak değişen, maksimum ve minimum sinüs eğrili periyodik gerilmeler uygulanarak yükleme yapılır. Bu yükler malzemenin içyapısında yıpranmalara ve ayrılmalara neden olur. Bu durum elastik bölge sınırları içerisinde olur. Bu periyodik olarak değişen gerilmelerin malzeme üzerinde oluşturduğu olaya yorulma, hasar ve kırılma meydana gelinceye kadar geçen süreye de yorulma ömrü denir.

Yorulma deneyi sırasında uygulanan yükler üç ana grupta incelenebilir ve aynı zamanda deneyde kullanılan gerilme türü de deneye adını vermektedir.

Bunlar

- Sabit büyüklükte gerilme,
- Sabit büyüklükte şekil değişikliği,
- Rasgele veya sabit büyüklükte yükleme

Yorulma deneyleri uygulanan yorulma hızlarına göre de üç grupta incelenir;

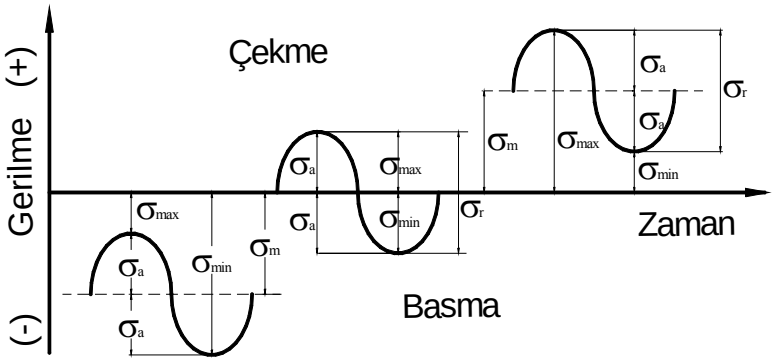
- Yüksek çevrim sayılı
- Düşük çevrim sayılı
- Çok yüksek hızlı yorulma deneyleri.

Genel olarak uygulanan en büyük gerilme değeri malzemenin elastik sınırı altında ve yorulma ömrü yaklaşık 1.000 çevrim sayısından daha büyük ise bu tür yorulmaya yüksek çevrim sayılı yorulma denir. Uygulanan gerilme malzemenin elastik sınırının üzerinde ve 1.000 den daha küçük çevrim sayılarında hasar ortaya çıkıyorsa bu tür yorulmaya düşük çevrim sayılı yorulma denir. Çok yüksek hızlı yorulma deneyleri, deney süresini en aza indirmek, kompresör ve türbin kanatları gibi çok yüksek devirlerde çalışan elemanların denenmesini sağlamak amacıyla ve değişik çalışma hızlarının malzemenin yorulma dayanımları üzerindeki etkisini ortaya çıkarabilmek için uygulanmaktadır. Bir deneyin yüksek hızlı olabilmesi için çevrim sayısının dakikada 10.000 den daha fazla olması gerekir. Dakikada uygulanan çevrim sayısının değeri arttıkça yorulma ömründe % 3-13 arasında artışlar olduğu tespit edilmiştir (Kayalı 1983).

4.3. TEKRARLI YÜKLEMELER VE GERİLME TİPLERİ

Mühendislik yapı elemanları üzerinde ki yükler belirli zaman aralıklarında ve belirli sürelerde uygulanıyorsa bunlara tekrarlı yükler, oluşan gerilmelere de tekrarlı gerilmeler denir. Örneğin motor şaftları, tren rayları, araba aksları, yaylar, dişliler v.b. gibi makine elemanları üzerine gelen yükler tekrarlı yükler ve gerilmelerdir. Dolayısıyla tekrarlı yükleme ve gerilmenin olduğu yerde de yorulma olayı ortaya çıkar.

Tekrarlı tesir altında gerilmenin en büyük ve en küçük değerinin basınç veya çekme olmasına göre Şekil 4. l' de görüldüğü gibi karakter bakımından farklı üç tip çevrim bölgesi düşünülebilir. Bunlardan ilki, kuvvetin negatif değerden başka bir negatif değere değiştiği bölgedir, ki buna negatif tekrar bölgesi veya basma tekrar bölgesi denir. (Dieter 1988).



Şekil 4.1 Tekrarlı gerilme-zaman eğrileri

İkinci bölgede gerilme, çekme ile basma değeri arasında değişir ki buna da alternatif bölge denir. Üçüncü tekrar bölgesinde ise gerilme, pozitif bir değerden yine başka bir pozitif değere değişir ki buna pozitif tekrar bölgesi veya çekme tekrar bölgesi denir. Değişken gerilmelerin etkisiyle malzemenin iç bünyesindeki değişikliklere yorulma, elemanın kopuncaya kadar dayandığı süreye ise yorulma ömrü denir.

Şekil 4.1' de gösterilen parametreler, maksimum ve minimum gerilme kullanılarak, gerilme aralığı σ_r, gerilme genliği σ_a, ortalama gerilme σ_m ve yorulma gerilme oranı R gibi parametreler aşağıda tanımlanmıştır:

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \qquad (4.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \qquad (4.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \qquad (4.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \qquad (4.4)$$

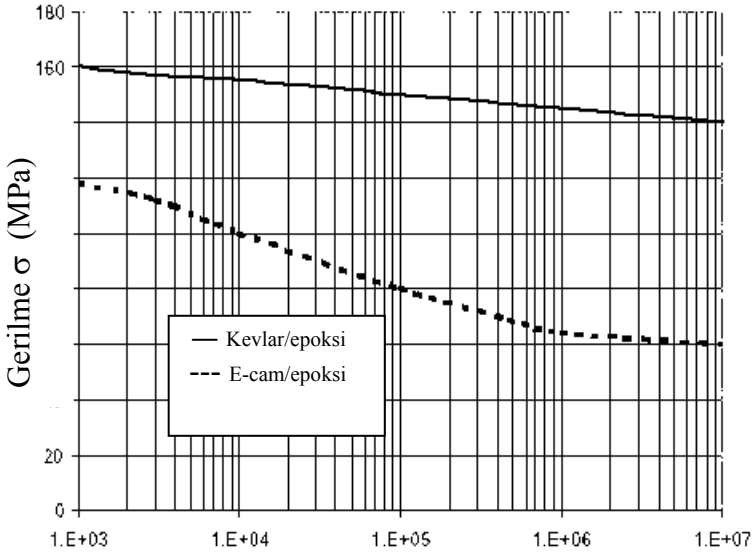
Burada R değeri, yorulma yükleme biçiminin bir göstergesi olup, önemli yükleme biçimleri Tablo 4.1' de özetlenmiştir.

Tablo 4.1 Yorulma yük biçimleri için *R* değerleri

Yorulma Yük Biçimi	Yorulma Yük Oranı
Statik Yük	R=1
Çekme-Yükünü boşaltma	R=0
Çekme-Çekme	0<R<1
Çekme-Basma	R=-1
Çekme-Basma	-1<R<0

4.4. YORULMA (S/N) GRAFİĞİ

Yorulma performansı, verilen maksimum gerilme miktarı (S) ve malzemenin bu yüke karşı gösterdiği çevrim sayısı (N) ile ifade edilir. Bunun yanı sıra yorulma performansının tam anlaşılabilmesi için, yorulma gerilme oranı *R* değerinin de bilinmesi gerekir. Yorulma test sonuçları maksimum gerilme miktarı ile çevrim sayısının 10 tabanına göre logaritmik ölçekli olarak çizilmesi ile grafiksel olarak elde edilir. Bu grafiğe (S/N) veya gerilme-çevrim sayısı grafiği denir.



Şekil 4.2 Farklı iki kompozit malzeme için *S-N* diyagramı

S-N grafiğinin eğimi ya da matematiksel fonksiyonu, malzemenin yorulma direncinin bir ölçüsüdür ve her malzeme türü için farklı bir durum gösterir Bunun yanı sıra yorulma ömrü gerilmenin büyüklüğüne, gerilme oranı *R*' ye, yüklemenin durumuna, yükleme geçmişine ve çevre şartlarına bağlıdır. Şekil 4.2. de tek yönlü E cam/epoksi ve kevlar/epoksi kompozit malzemeler için örnek S/N grafiği görülmektedir. Buradaki E cam/epoksi S/N grafiği birçok metal malzemelerle benzerlik göstermektedir ve düşük gerilme değerlerinde çok yüksek çevrim sayılarına çıkılabilir.(Şahin,2000)

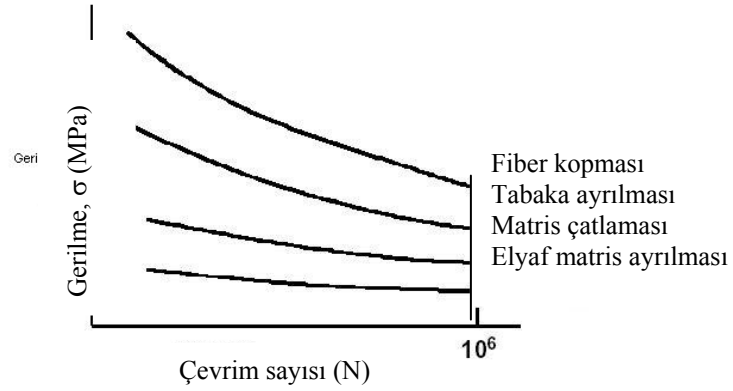
4.5. KOMPOZİT MALZEMELERDE YORULMA

Tek yönlü ve tek tabakalı bir kompozit malzemede yorulma hasarı fiber kopması, matris çatlaması ve matris-fiber ayrılması olarak üç şekilde görülür. Fiber kopması veya kırılması fiberin dayanımına bağlıdır. Matris çatlaması, eğer fiberler matrise aktarılan şekil değişim miktarını veya şekil değiştirme miktarını sınırlayan yüksek katılığa sahipse önlenebilir. Fiber-matris ara yüzeyindeki birbirine bağlılık ise, fiber-matris bağlanma dayanımının zayıflaması ile büyür ve ayrılma olayı meydana gelir.

Çok tabakalı kompozitlerde ise yukarıdaki hasar şekillerine ilaveten yorulma etkisi altında dördüncü bir şekil daha ortaya çıkar. Buna tabaka ayrılması denir. Şekil 4.3.' de kompozit malzemelerde yorulma hasar şekilleri S/N grafiği üzerinde görülebilir.

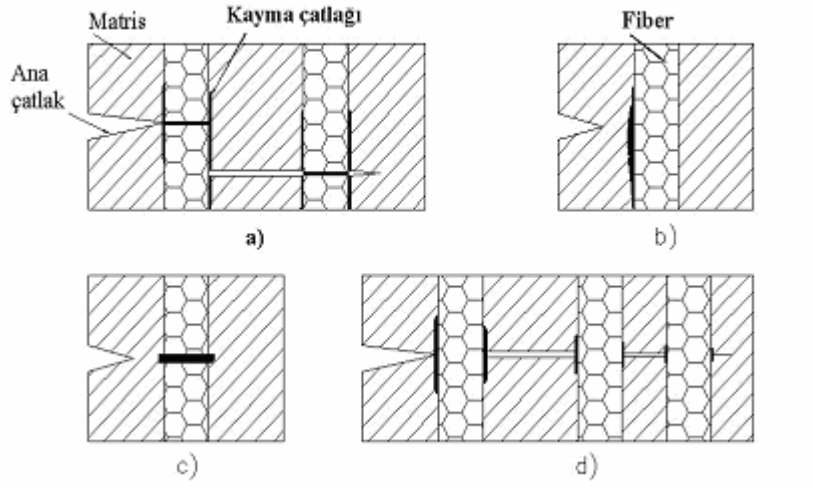
Kompozitlerde yorulma hasarının iki aşamada gerçekleştiği düşünülebilir. Bunlar, çatlak başlaması ve çatlak ilerlemesidir. Genellikle düşük çevrimli yorulmalarda olduğu gibi, yüksek yorulma gerilme seviyelerinde, başlangıç aşaması, çok erken çevrim yüklerinde meydana gelir. Ve yorulma ömrünün büyük bir kısmını çatlak ilerlemesi teşkil eder.(Günaydın,2003)

Yüksek çevrimli yorulma şekillerinde ise yorulma ömrünün büyük kısmını, çatlağın meydana gelmesi oluşturur. Metal malzemelerde yorulma çatlağı yüzeyde büyük gerilme yığılmalarından dolayı meydana gelir. Kompozit malzemelerde ise matriste olabilecek fiber-matris arasındaki boşluklar veya süreksizlikler birer çatlak başlangıcı olabilirler.



Şekil 4.3 Kompozit malzemelerde yorulma hasar biçimleri *S-N* grafiği

Kayma etkisiyle oluşan çatlakların ilerlemesiyle beraber, fiber ve matris çatlaması oluşan bir kompozitte yorulma çatlağının ilerlemesi süresince mümkün olabilecek sayıda olay meydana gelebilir. Örneğin kayma çatlakları, tek başlarına çekme yükü ile beraber yırtılmaya, matris çatlaması olmadan çatlak önü fiber kırılmasına veya fiber kırılması olmadan matris çatlamasına sebep olurlar.



Şekil 4.4 Kompozit malzemelerde yorulma sırasında olabilecek hasar çeşitleri

a) Kayma çatlakları ile meydana gelen fiber kırılması ve matris çatlaması,

b) Çekme ile oluşturulan kayma çatlakları,

c) Çatlak önü fiber kırılması,

d) Fiber kırılması olmaksızın matris çatlaması

Şekil 4.4’ de görüleceği üzere kompozit malzemelerde yorulma sırasında olabilecek hasar çeşitleri, tek yönlü ve tek tabakalı veya çok tabakalı kompozitlerin her ikisinde de görülebilir. Ancak, çok tabakalı kompozitlerde fiber açısı ve tabaka sınırları, yorulma çatlak ilerlemesinde rol oynayan önemli faktörlerdendir.

4.5.1. Kompozit Malzemelerde Yorulmayı Etkileyen Faktörler

Kompozit malzemelerde yorulmayı etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar fiber özellikleri, matris özellikleri, katların veya tabakaların yönü ve fiber hacmi gibi özelliklerdir

Tek tabakalı ve tek yönlü fiber kompozitler yüksek dayanım ve yüksek katılığa sahip oldukları için, yorulma dayanımının da artmasına sebep olurlar. Ayrıca yüksek katılığa sahip fiberler, matris içerisinde oluşabilecek gerinimi sınırlayarak, matris deki çatlakların oluşumunu geciktirirler ve en az miktarda oluşmasına katkıda bulunurlar. Bilindiği üzere yüksek statik dayanıma sahip malzemelerin yorulma dayanımı da yüksektir. Dolayısıyla yüksek katılık ve dayanıma sahip fiberler, kompozit malzemenin yorulma ömrünün artmasına da yardımcı olurlar.

Kompozitler deki yorulma direnci, mukavemetli ve yüksek kırılma şekil değiştirme miktarına sahip matrislerle artırılabilir. Termal direnç yine kompozitler için önemli bir faktördür.. Özellikle cam fiberlerde dayanımın azalmasına sebep olduklarından matris seçiminde ısıl yalıtkanlığın yüksek olmasına dikkat edilir. Yine düşük dayanıma sahip silikon matrisler, kompozit malzemenin yorulma dayanımının da az olmasına sebep olur. Polyester matrisler orta dayanıma sahip polimerler olduklarından yorulma ömrüne olumlu katkı yaparlar. Yüksek dayanıma sahip epoksi matrislerde yorulma direncinin artmasında önemli rol oynar.

Kayma gerilmesi sonucu oluşan çatlaklar, kırılma yüzeyini ve çekilen enerjiyi arttırdıklarından dolayı yorulma ömrü üzerine pozitif bir etkiye sahiptirler. Ayrıca bu çatlaklar çatlağın körleşmesine de sebep olurlar. Kayma çatlakları matris ve fiber arasındaki farklı Poisson oranı sebebiyle yorulma çatlağı boyunca oluşabilir. Eğer fiberlerin hasar şekil değiştirmesi matrisinkinden az ise, fiberler çatlak doğrultusunda hasara uğrayabilir. Sünek fiberler ile gevrek matrisden oluşan kompozit malzemelerde ise matris daha önce hasara uğrayabilir.

Fiber açısının çatlak ilerlemesi üzerine etkisi büyüktür. Çatlak ilerlerken fibere paralel doğrultuda çok az bir engelle karşılaşır. Bu durumda şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı az olacağından dolayı çatlak, fibere paralel ilerler. Sonuçta çapraz katlı tabakalı kompozitlerde 0° ve 90°' lik tabakalar hem statik hem de değişken yüklemelerde ilk hasara uğrayan bölgelerdir. Enine tabakalardaki çatlaklar, tabakalar arası bölgedeki kayma çatlakları ile veya çatlak körleştirmesi sonucu durdurulabilir.

4.5.2.Kompozit Malzemelerde Yorulma Olayının ve Çatlağın Gelişimi

Yorulma olayının gerçekleşmesi için malzeme ya da makine parçasına çekme gerilmesinin uygulanması, bu gerilmede değişimlerin ya da dalgalanmaların olması ve bu esnada plastik şekil değişiminin gözlenmesi gerekir. Bu üç faktörden herhangi biri olmazsa yorulma çatlağı başlamaz ve ilerleyemez.

Çekme gerilmesinde meydana gelen değişmeler ve dalgalanmalar çatlağı başlatır. Çatlağın ilerlemesi ise çekme gerilmesinin etkisiyle olur. Yorulma üzerine yapılan çalışmaların başlangıç dönemlerinde çevrim sayısını belirlemek üzere sabit büyüklükte değişken gerilmelerle malzemeler yükleniyordu. Daha sonraları ise yorulma hasarlarının metalurjik hatalardan ve tasarımlardan kaynaklandığı ve çatlakların süreksizliklerden başlayıp ilerlediğinin tespit edilmesi üzerine yorulmanın bazı kademelerden geçerek meydana geldiği ve ilerlediği fikrine varıldı.

Kırılma mekaniği açısından bir yapı veya makine elemanının ömrü üç adımda incelenir. İmalattan kaynaklanan bir kusurun ya da sürünme, yorulma etkisiyle bir mikro çatlağın oluşumu olan çatlak başlangıcı safhası, kırılma tokluğu ve gerilme şiddet faktörü ile kontrol edilen kararlı çatlak ilerleme safhası ve hızlı çatlak ilerlemesi ile ani kopmanın meydana geldiği kırılma safhasıdır (Güldü 1995).

Yorulma üç kademede meydana gelir.

i) Çatlak başlaması

ii) Çatlak ilerlemesi

iii) Kırılma

Bunun yanı sıra malzemeler üzerine çatlaklar açılarak da yorulma deneyleri yapılabilir. Nitekim bu çalışmada deney malzemesinin ortasına farklı açılarda çatlaklar açılmıştır. Bu durumda yorulma mevcut çatlaktan dolayı çatlak başlamasından değil de, çatlak ilerlemesi kademesinden başlar. Ve kırılma ile son bulur.

4.5.3.Yorulma Çatlak Başlaması

Malzemelerde talaşlı işleme sonucu oluşan izler, malzeme yüzeyindeki çizgiler, malzeme içindeki sert yabancı maddeler, çökelmiş sert tanecikler, ikiz sınırları ve tane sınırları gibi kristal süreksizlikler çatlak başlamasını etkileyen unsurlardır.

Mühendislik malzemelerindeki sert metalik olmayan karbürler, borürler, nitrürler ve sülfürler gibi inklüzyonlar ile döküm boşlukları, çatlaklar, dekarbürizasyon tabakaları ve kalıntı ostenit gibi hatalar çatlağın başlamasına sebep olabilir. Bunların büyüklüğü ve yerleştiği alanlar (tane içi ve tane sınırı) çatlağın oluşum ve ilerleme başlangıç hızını dolayısıyla da yorulma ömrünü etkiler (Çep ve ark. 2002).

Zorlamalar sonucu makine ve yapı elemanlarında oluşan gerilmeler her zaman ideal olmaz. Çekme ve basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılmayabilir, eğilme ve burulma gerilmeleri yüzeyden ortaya doğru bir azalma göstermeyebilir. Uygulamada bu gerilme dağılımlarında az veya çok sapmalar görülebilir. Parçanın şekli, yüzey kalitesi, ortamın korozif etkisi, kuvvet iletiminin türü, ön gerilme. malzeme hatası, mikro yapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenlerle yerel gerilme yığınları oluşur. Bu gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde yorulma çatlağı başlar. Aşırı zorlanan bir bölgede çatlağın başlaması durumunda ise yorulma kırılmasının önlenmesine genellikle imkan yoktur.

Kırılmanın oluşması ise belirli bir çevrim sayısında çatlağın ilerlemesiyle olur. Yorulma sonucu oluşan keskin çatlak ek bir çentik etkisi ortaya çıkararak meydana gelen yüksek gerilme yığınları, çatlağın hızla ilerlemesine ve büyümesine neden olur.

4.5.4 Yorulma Çatlak İlerlemesi

Yorulma çatlak ilerlemesi üç safhada gerçekleşir. l.safha, çatlağın oluşum safhası olup bu bölge, gerilme şiddet faktörü kritik değere ulaşıncaya kadar devam eder. 2.safha çatlağın ilerleme safhasıdır. 3.safha ise kırılmanın meydana geldiği bölgedir.

Kompozit malzemelerde çatlaklar genellikle, fiber-matris, ara yüzey ve reçine dayanımlarının, düşük olması nedeniyle fiber boyunca oluşmakta ve ilerlemektedir. Bu ilerlemeyi takiben ara yüzey ayrılması, enine çatlama, delaminasyon ve fiber kopması takip eder.

Yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu (%85-90) malzeme hatalarından dolayı değil, çentik etkisi yapan şekil ve yüzey etkilerinden, aşırı yüklemeden, montaj hatalarından, yetersiz bakım ve benzeri nedenlerden ortaya çıkmaktadır. (Günaydın,2003)

Çatlak ilerlemesi, çatlak uzunluğuna karşı çatlak büyüme hızı (da/dN) olarak veya gerilme şiddetine karşı çatlak büyüme hızı olarak tanımlanır. Çatlak ilerleme hızının hesaplanabilmesi için Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) yardımıyla hazırlanan çeşitli denklemler mevcuttur. Paris-Erdoğan denklemi de bu denklemlerden biridir (Ewalds, H.L. ve ark., 1985). Bu denklem

$$da/dN=A(\Delta K)^{n} \qquad (4.5)$$

şeklindedir. Bu denklemde da/dN çatlak ilerleme hızı, ΔK gerilme şiddet faktörü (GŞF) değişimi, n ve A ise malzeme sabitleridir. Aynı şekilde enerji boşalma miktarı içinde aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$da/dN=B(\Delta G)^{m} \qquad (4.6)$$

Bu denklemde de da/dN çatlak ilerleme hızı, ΔG enerji boşalma miktarı değişimi (çatlağın ilerlemesi için gerekli olan enerji), m ve B ise malzeme sabitleridir.

ΔK gerilme şiddet faktörü değişimi ve ΔG enerji boşalma miktarı değişimi kırılma mekaniği bölümünde (5. bölüm) detaylı olarak anlatılmıştır.

5. KIRILMA MEKANİĞİ

5.1. GİRİŞ

Kırılma, gerilme altında bir maddenin iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya parçalanmasıdır. Kırılma olayı, bir çatlağın başlaması ve ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir.

Yük taşıyan yapılarda hasar, en genel anlamda akma veya kırılmayla olur. Bir malzemenin yapısındaki hatalar iki tip hasar için de çok önemlidir fakat aralarında önemli farklar vardır.

Akmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar, kristal kafesi düzlemlerinin sürekliliğini bozan ve dislokasyon hareketini engelleyen hatalardır. Bu da metallerdeki mukavemet artışı için gerekli bir olaydır.

Kırılmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar ise makroskobik boyuttadır, çünkü genel bir plastik deformasyon değil, hatalarla bağıntılı olan yerel gerilme-şekil değiştirme alanları söz konusudur. Örneğin malzeme yapısındaki boşluklar, kaynak hataları ve yorulma çatlakları gibi.

Kırılma genel anlamda iki şekilde oluşur; sünek kırılma ve gevrek kırılma. Sünek kırılma, çatlak ilerlemesi öncesinde ve sırasında önemli ölçüde plastik deformasyonla karakterize edilir. Kırılma yüzeylerinde de bu plastik deformasyon gözlenir. Gevrek kırılma, hızlı bir çatlak ilerlemesi ve mikro-deformasyonla karakterize edilir. Gevrek kırılmaya eğilim, azalan sıcaklık hızı, artan deformasyon hızı ve genellikle bir çentiğin yol açtığı üç eksenli gerilme durumlarında artar. Gevrek kırılma önceden uyarmadan oluştuğundan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür.

İdeal kusursuz bir kristalin bağ mukavemeti, teorik olarak onun kırılma mukavemetine eşittir. Kırılma mekaniğinin amacı ise, çatlaklar, çentikler ve delikler

gibi gerilme yoğunluğunu artıran hataları inceleyerek gerçek problemlere çözüm aramaktır.

Kırılma mekaniği hemen hemen tümüyle kırılmayla belirlenen hasarları inceler. Kırılmayla ilgili bir problemin ilk analizi Griffith tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith basit bir enerji dengesi öngörmüştür, gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde bir azalma olur, ki bu enerji de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli olan enerjidir.

Daha sonra Irwin G diye bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için absorblanan toplam enerjidir. G, şekil değiştirme enerji boşalma miktarı olarak adlandırılır. Ayrıca çatlak ucunda şekil değiştirme enerji boşalma miktarı dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Buna da kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı G_c denir.

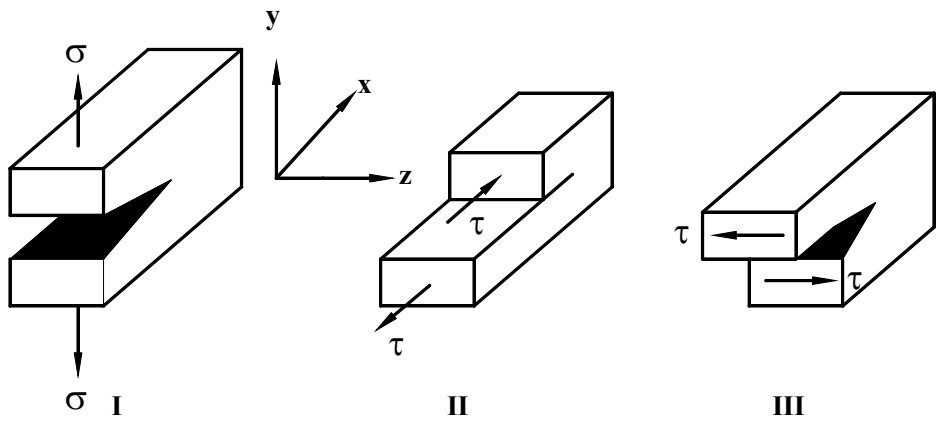
Yine Irwin sonraki çalışmalarında kırılma mekaniğinde çığır açmış, enerji yaklaşımının gerilme yoğunluğu ile eşdeğer olduğunu bulmuştur. Buradan gerilme şiddet faktörü (GŞF) diye tanımlanan K diye yeni bir malzeme özelliği tanımlamıştır. Gerilme şiddet faktörü K, çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna bağlıdır. Buna göre çatlak ucunda gerilme dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme şiddet faktörü veya yoğunluğu, K_c ortaya çıkmıştır.

G ve K' nın eşdeğerliliği Lineer Elastik Kırılma Mekaniğine (LEKM) temel oluşturmuştur. Çünkü tüm malzemeler için, bir çatlak ucunun etrafındaki ve yakınındaki gerilme dağılımı durumu her zaman aynıdır. Dolayısıyla K_c' nin bilinmesiyle gerçek yapılarda ve belirli şartlar altında malzemede hangi hatalara izin verilebileceği saptanabilir. Ayrıca bu yaklaşımla yapılan deneyler sonucunda malzemelerin yorulma çatlak ilerleyişi veya gerilmeli korozyon çatlaması gibi hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir.

LEKM, çatlak ucunda sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak ucunda önemli ölçüde plastik deformasyon söz konusu olduğunda Elastik Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) devreye girer. EPKM de, Wells'in çatlak açılması (COD) üzerine yaptığı çalışmalarla başlar. (Oğuz 1996)

5.2. LİNEER ELASTİK KIRILMA MEKANİĞİ

Elastik cisimlerde çatlağın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağıl hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı üç tipte görülür. Bu üç tipten birini, ikisini veya üçünü de içerebilir. Şekil 5.1'de üç tip davranış görülmektedir.



Şekil 5.1 Çatlak ilerleme modları: (I): Açılma modu, (II): Kayma modu, (III): Yırtılma modu

Tip I, en çok görülen ve diğerlerine göre daha kritik olan açılma modudur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılır. II. tip kayma modunda, çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. III. Tip yırtılma modunda ise çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar

İzotropik malzemelerde çatlak ucu civarında oluşan gerilme deformasyonları Irwin tarafından bulunmuştur (Irwin 1957). Daha önce de anlatıldığı gibi K, elastik gerilme alanının büyüklüğünü gösteren bir sabittir ve GŞF olarak adlandırılır. Boyutsal analizler, K'nın gerilmeyle doğrusal olarak, karakteristik bir uzunluğun da kareköküyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu karakteristik uzunluk, çatlak boyudur ve gerilme yoğunluk faktörü;

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}\, f(a/W) \qquad (5.1)$$

şeklinde verilir. Burada f(a/W), numunenin ve çatlağın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametredir. Çatlak ucundaki GŞF, sonsuz genişlikteki bir numunede, her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

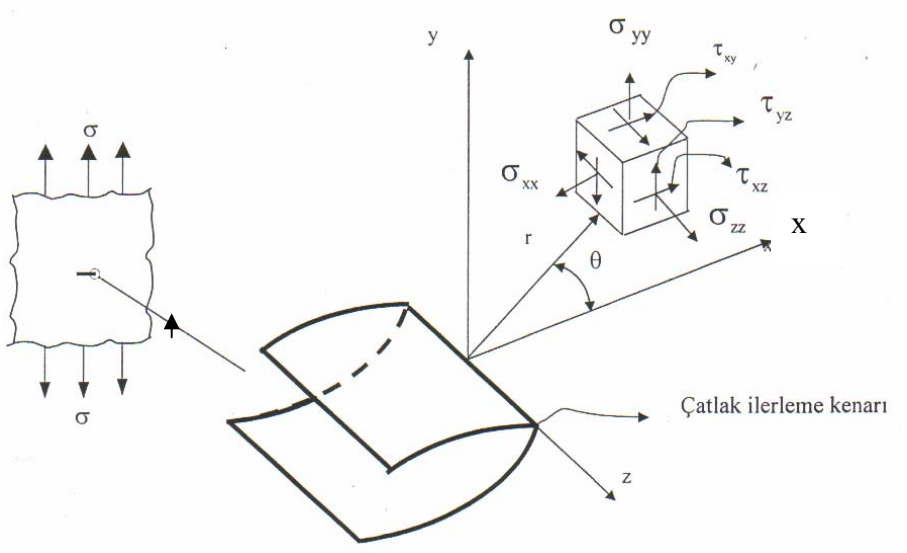
$$K_I = \sigma_I\sqrt{\pi a}\,, \qquad K_{II} = \tau_{II}\sqrt{\pi a}\,, \qquad K_{III} = \tau_{III}\sqrt{\pi a} \qquad (5.2)$$

Burada, K_I, K_{II} ve K_{III} sırasıyla Mod I, Mod II ve Mod III' e göre GŞF dir. Mod I çatlak ucu gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemi gösterimi Şekil 5.2' deki gibidir.

Çatlak ucundaki gerilmeler denklem 5.3' deki gibidir;

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2}\left(1 - Sin\frac{\theta}{2}Sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
\sigma_{yy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2}\left(1 + Sin\frac{\theta}{2}Sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
\tau_{xy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}}\left(Cos\frac{\theta}{2}Cos\frac{3\theta}{2}Sin\frac{\theta}{2}\right) \qquad (5.3)\\
\sigma_{zz} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}}\left(2\nu^* Cos\frac{\theta}{2}\right)\\
\tau_{yz} &= \tau_{zx} = 0
\end{aligned}$$

Şekil 5.2' deki gibi açılan çatlağın, r mesafesindeki noktadaki şekil değiştirmeleri aşağıdaki gibidir. Burada ν : Poisson oranı, σ_{xx}**:** x eksenindeki gerilme değeri, σ_{yy}**:** y eksenindeki gerilme değeri ve σ_{zz}*:* z eksenindeki gerilme değeridir. E: Elastisite modülü ve θ : r' nin x ekseni ile yaptığı açıdır. u, v, w ise sırası ile x, y, z eksenlerindeki deplasmanlarıdır.



Şekil 5.2 Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilme dağılımı

$$u = \frac{K_I}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}(1+\nu)\left[(2\kappa-1)Cos\frac{\theta}{2} - Cos\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$v = \frac{K_I}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}(1+\nu)\left[(2\kappa+1)Sin\frac{\theta}{2} - Sin\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$w = -\nu^* \frac{K_I}{E} \qquad (5.4)$$

$\nu^* = \nu$, $\kappa = \dfrac{(3-\nu)}{(1+\nu)}$ (Düzlem gerilme hali için)

$\nu^* = 0$, $\kappa = 3-4\nu$ (Düzlem şekil değiştirme hali için)

Kayma modu için gerilmeler;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} Sin\frac{\theta}{2}\left(2 + Cos\frac{\theta}{2}Cos\frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} Sin\frac{\theta}{2}Cos\frac{\theta}{2}Cos\frac{3\theta}{2} \qquad (5.5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2}\left[1 - Sin\frac{\theta}{2} Sin\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

Deplasmanlar denklem 5.6' da ki gibi bulunur;

$$u = \frac{K_{II}}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} Sin\frac{\theta}{2}\left[2 - 2\nu Cos^2\frac{\theta}{2}\right]$$

$$\nu = \frac{K_{II}}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} Cos\frac{\theta}{2}\left[-1 + 2\nu + Sin^2\frac{\theta}{2}\right] \qquad (5.6)$$

$$w = 0$$

Yırtılma modu için gerilmeler ve deplasmanlar;

$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} Sin\frac{\theta}{2}$$

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2} \qquad (5.7)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0$$

$$u = \nu = 0$$

$$w = \frac{K_{III}}{E}\left[\frac{2r}{\pi}\right]^{1/2} Sin\frac{\theta}{2}$$ bulunur.

5.2.1 Düzlem Gerilme Ve Düzlem Şekil Değiştirme

Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Ancak çok ince numunede (1evha şeklinde) x ve y yönlerinde gerilmeler mevcutken z, yani kalınlık yönünde gerilme yoktur ($\sigma_z = 0$) çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli (düzlemsel) olduğundan düzlem gerilme hali söz konusudur.

Kalın numunelerde numune yüzeylerinde yine düzlem gerilme hali söz konusudur ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. z yönünde numune içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkar. Ancak bu defa şekil değiştirme iki boyutludur; numune x-y düzleminde şekil değiştirir. Bunun da nedeni, numune içine ilerledikçe malzeme, z ekseni boyunca kendini çevreleyen malzeme tarafından tutulur ve z yönünde deformasyonu engellenir ($\varepsilon_z = 0$). Bu durumda da düzlem şekil değiştirme hali söz konusudur.

5.3. ELASTİK-PLASTİK KIRILMA MEKANİĞİ

Çoğu malzemelerde, LEKM ile kırılma davranışlarını izah etmek hemen hemen imkansız olup, alternatif bir kırılma modeli gereklidir. EPKM, lineer olmayan davranış (plastik deformasyon gibi) gösteren malzemeler için uygulanır. Elastik–plastik davranışı karakterize eden parametrelerden biri çatlak ucu açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD), diğeri ise J-integraldir. CTOD ve J-integralin kritik değeri, boyuttan bağımsız kırılma tokluğu ölçümü ve büyük miktardaki çatlak ucu plastik davranışı verir (Anderson 1991).

5.4.GERİLME ŞİDDET FAKTÖRÜ DEĞİŞİMİ (ΔK)

Bu çalışmada yorulma deneylerindeki GŞF değişimi değerleri ASTM E 647 standardı kullanılarak, ortasında çatlak bulunan numuneler için verilen aşağıdaki formüllerden hesaplanmıştır.

$$\Delta P = P_{max} - P_{min} \qquad R>0$$

$$\alpha = 2a/w \quad 2a/w<0.95$$

olmak şartıyla aşağıda verilmiştir

$$\Delta K = (\Delta P/B)(\sqrt{[(\pi\alpha)/(2w)]}\sec[(\pi\alpha)/2] \qquad (5.8)$$

Burada P: uygulanan yükü, 2a: çatlak boyu, w: malzeme kalınlığını, R: gerilme oranı'nı ifade etmektedir.

Bu çalışmada farklı oryantasyon açılı çatlaklarda mod I ve mod II durumu oluştuğundan GŞF değişimleri ΔK_I ve ΔK_{II} aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır. (Xiangio Yan 2005)

$$\Delta K_I = (\mathrm{Cos}^2\,\theta)(\Delta P/B)(\sqrt{[(\pi\alpha)/(2w)}]\sec[(\pi\alpha)/2] \qquad (5.9)$$

$$\Delta K_{II} = ((\mathrm{Sin}2\theta)/2)(\Delta P/B)(\sqrt{[(\pi\alpha)/(2w)}]\sec[(\pi\alpha)/2] \qquad (5.10)$$

Burada θ çatlak açısını ifade etmektedir.

Deneyler sonucunda bulunan GŞF değişimleri ΔK_I ve ΔK_{II}' nin, Paris-Erdoğan eşitliğinde kullanılarak, malzeme sabitleri olan A ve n sayılarının bulunabilmesi için, eşdeğer bir ΔK bulunması gereklidir. Bunun içinde Walker eşitliği kullanılabilir (Nicholas T. ve ark. 2005).

$$R_I = \Delta K_{\mathrm{Im}in}/\Delta K_{\mathrm{Im}ax}$$

$\Delta K_{I\,eş} = \Delta K_I (1- R_I)^{m-1}$ ve $0<R_I<0.7$ şartı için m=0,56

$\Delta K_{II\,eş} = \Delta K_{II}$ alınmak suretiyle

$$\Delta K_{eş} = \sqrt{(\Delta K_{I\,eş}{}^2 + \Delta K_{II\,eş}{}^2)} \qquad (5.11)$$

Burada $\Delta K_{\mathrm{Im}in}$ ve $\Delta K_{\mathrm{Im}ax}$: mod I e göre en büyük ve en küçük GŞF değişimlerini, $\Delta K_{I\,eş}$: mod I e göre düzeltilmiş eşdeğer GŞF değişimini, $\Delta K_{II\,eş}$: mod II ye göre düzeltilmiş eşdeğer GŞF değişimini, $\Delta K_{eş}$: ise bileşik mod da ki toplam eşdeğer GŞF değişimini ifade etmektedir.

Eşdeğer bir ΔK bulunması için diğer bir yöntem ise, Nalla R.K. ve ark.'nın yaptıkları çalışmada kullandıkları yöntemdir. Bu yöntemde kink olayı dikkate

alınarak GŞF değişim değerleri hesaplanmıştır. **Kink**: çatlak ilerlemesinin çatlak doğrultusunda gelişmeyip, herhangi bir α açısı kadar başka bir doğrultuda çatlağın ilerlemesi olayıdır. Bu yön değiştirme başlangıç çatlağının doğrultusundan $\pm\alpha$ açısı kadar farklı yönlerde oluşabilir.

$$\Delta K_{I\ eş} = c_{11}\ \Delta K_I + c_{12}\Delta K_{II}$$
$$\Delta K_{II\ eş} = c_{21}\Delta K_I + c_{22}\Delta K_{II} \qquad (5.12)$$

Burada c_{ij}: kink açısı olan α'nın sole fonksiyonlarıdır (Nalla R.K. ve ark. 2002). $c_{11} = c_{22} = \cos\alpha$ ve $c_{21} = c_{12} = \sin\alpha$ ise;

$$\Delta K_{I\ eş} = \cos\alpha\ \Delta K_I + \sin\alpha\ \Delta K_{II}$$
$$\Delta K_{II\ eş} = \sin\alpha\ \Delta K_I + \cos\alpha\ \Delta K_{II} \qquad (5.13)$$
$$\Delta K_{eş} = \sqrt{(\Delta K_{I\ eş}{}^2 + \Delta K_{II\ eş}{}^2)}$$

eşitlikleri elde edilir.

Bu çalışmada çatlak ilerlemesi sırasında, farklı oryantasyon açılı çatlaklı numunelerde kink olayı meydana geldiğinden sole fonksiyonları kullanılarak $\Delta K_{I\ eş}$, $\Delta K_{II\ eş}$, ve $\Delta K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır.

5.5.ŞEKİL DEĞİŞTİRME ENERJİSİ BOŞALMA MİKTARI (*G*)

Kırılma mekaniğinde, çatlak ucunda meydana gelen gerilme alanını tarif etmek için kullanılan, gerilme şiddet faktörü *K,* metaller ve seramikler gibi izotrop malzemeler için uygun bir parametredir. Yine kırılma mekaniğindeki yaklaşımlarda çatlak ilerlemesinin ilk başlangıcının tahmini için bir enerji kriteri olan şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı, *G* veya gerilme şiddet faktörü *K'* nın bilinmesi gereklidir. Metaller ve seramikler gibi homojen malzemeler için her iki yaklaşımdan benzer sonuçlar elde edilse bile gerilme şiddet faktörü yaklaşımı yorulmalı çatlak

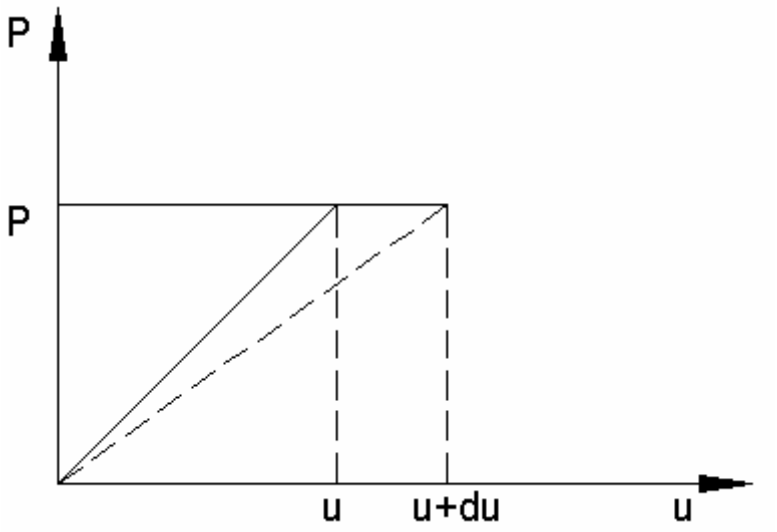
ilerlemesi bulunan kompozitlerde sınırlı uygulamalarda kalmaktadır. (Devranjsinh 1997).

Enerji yaklaşımı ilk önce Griffith (1921) tarafından gevrek malzemeler için, birim çatlak boyu ilerlemesi yada birim çatlak alanı oluşturmak için gerekli olan enerji olarak tarif edilmiştir. Kararsız çatlak ilerlemesi için aşağıdaki şart sağlanmalıdır.

$$\frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} > \frac{dU'}{da} + \gamma \tag{5.14}$$

$$G > G_c \tag{5.15}$$

Eşitlik (5.14)' ün sol tarafı; cisme dışarıdan uygulanan W işi ile elastik şekil değiştirme enerjisi U' nun farkının, eşitliğin sağ tarafındaki, kalıcı şekil değişimi U' ile yeni çatlak yüzeyi oluşturmak için gerekli enerji γ' nın toplamından büyük olmalıdır. Eşitlik 5.16' da ki şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı G, gerilme şartlarına ve çatlak geometrisine bağlıdır. G_c ise G' nin kritik değeri olup bir malzeme özelliğidir. Bu durumda G, kritik G_c değerini aştığı zaman kararsız çatlak ilerlemesi başlayacaktır. G_c değeri lineer olmayan çatlak ilerlemesinde ve hasar bölgesi boyutlarının numune boyutlarına göre çok küçük olduğu durumlarda geçerli ve faydalı bir parametredir.



Şekil 5.3 Sabit yük altında deplasman artışı (P-u) grafiği

Başlangıç çatlak boyu *a* olan lineer elastik bir malzemede, uygulanan yük neticesinde çatlak boyunun *a*+d*a* olduğunu varsayalım. Bu durumda *G* :

$$G = \frac{1}{W}\frac{dU}{da} \tag{5.16}$$

Burada; *U* numune üzerinde depolanan toplam enerji ve *W* ise numune genişliğidir. Sabit yük şartlarında, Şekil 5.3' de görülen üçgenlerin alanları farkına eşittir. Buradan;

$$\delta U = \frac{1}{2}(u+\delta u)P - \frac{1}{2}Pu = \frac{1}{2}P\delta u \tag{5.17}$$

$$= \frac{1}{2}P(u+\delta u) - \frac{1}{2}Pu$$

$$= \frac{1}{2}P\delta u$$

burada *P*, uygulanan yük ve *u* ise bu yük altındaki deplasmandır. Yine grafikte *P-u* eğrisinin eğiminin tersi ya da *u/P*, *kompliyans* olarak tanımlanır ve *C* ile gösterilir.

$$C = \frac{u}{P} \tag{5.18}$$

Buradan, sabit yük yada sabit deplasman şartlarında *G* aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$G = \frac{P^2}{2W}\frac{dC}{da} \tag{5.19}$$

Bunun yanı sıra G değerleri ayrıca ortotropik malzemeler için aşağıdaki formüllerden de hesaplanabilir. (Beaumont P. ve ark. 1990)

Mod I için G nin değeri;

$$G_I = K_I^{\,2}\{((a_{22}a_{11})/2)^{1/2}[(a_{22}/a_{11})^{1/2}+((a_{66}+2a_{21})/2\,a_{22})]^{1/2}\} \tag{5.20}$$

Burada $a_{11}=1/E_1$

$$a_{22} = 1/E_2$$

$$a_{21} = a_{12} = -\nu_{12} / E_1 = -\nu_{21} / E_2$$

$$a_{66} = 1/G_{12}$$

Mod II için ise G nin değeri;

$$G_{II} = K_{II}^{\ 2} \{(a_{11}/\sqrt{2})[(a_{22}/a_{11})^{1/2} + ((a_{66} + 2a_{12})/a_{11}]^{1/2}\} \qquad (5.21)$$

Burada E_1 ve E_2 : x ve y yönlerindeki elastiklik modülü, ν_{12} ve ν_{21} : x ve y yönlerindeki Poisson oranları, G_{12} : x yönündeki kayma modülüdür.

Toplam G değerleri de aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$G = G_I + G_{II} \qquad (5.22)$$

6. DENEYLER

6.1. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Öncelikle iki yönlü krom-nikel tel örgü takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Malzeme üretimi; Şekil 6.1. de resmi görülen el kumandalı hidrolik bir pres ve kalıptan oluşan düzenek hazırlanıp sıcak kalıplama yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

Kompozit malzeme üretiminde, fiber olarak şekil 6.2 de görülen iki yönlü 0º/90º bez ayağı yöntemiyle üretilmiş 0.15 mm çapında ve 0.4 mm elek aralığında 304 L tip krom-nikel tel örgü kullanılmıştır.

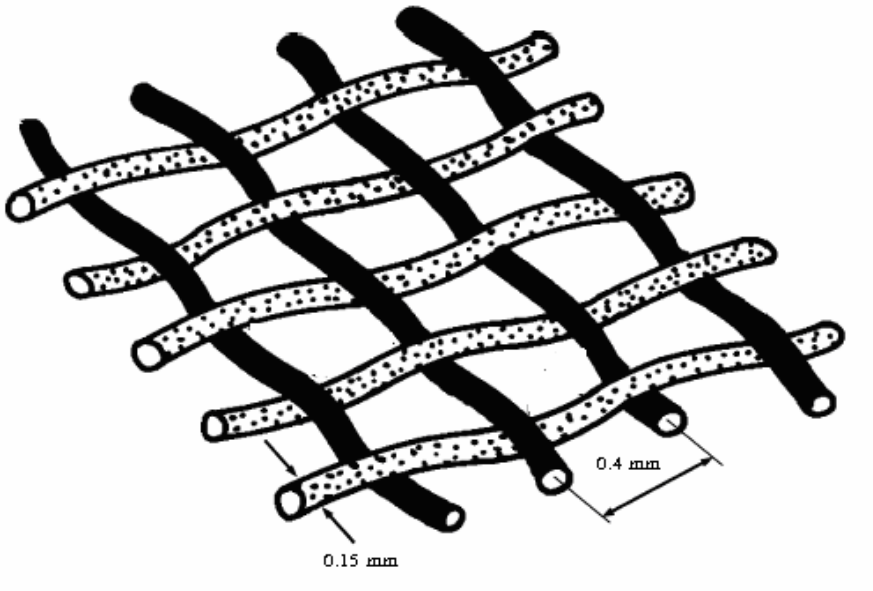
Tablo 6.1.Yüksek yoğunluklu polietilenin özellikleri

Yoğunluk, (gr/cm ^{3})	0.965
Çekme dayanımı, (MPa)	22-39
Uzama, (%)	15-100
Elastiklik modülü, (MPa)	560-1050

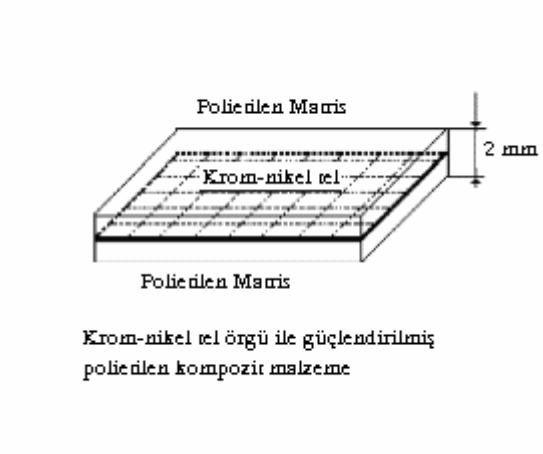
Matris olarak tablo 6.1 de özellikleri verilen yüksek yoğunluklu polietilen termoplastik malzeme kullanılmıştır. Malzeme üretiminin ilk aşamasında granül halde bulunan polietilen, saç metalden yapılmış kalıba konularak pres altında 180ºC sıcaklıkta 2.5 MPa basınç altında 5 dakika tutulmuştur. Daha sonra sıcaklık 30ºC azaltılırken, basınçda 15 MPa'a çıkarılarak, 3 dakika bekletildi. Böylece 200x160x0.9 mm boyutlarında 1 tabaka yüksek yoğunluklu polietilen levha üretildi. İki tabaka yüksek yoğunluklu polietilen levha arasına bir sıra Cr-Ni tel örgü fiberler yerleştirilerek aynı düzenekte ve aynı üretim şartlarında 200x160x2 mm boyutlarında kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemenin şematik görüntüsü şekil 6.3.'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Malzeme üretiminde kullanılan el kumandalı hidrolik pres



Şekil 6.2 İki yönlü 0º/90º bez ayağı yöntemiyle üretilmiş 0.15 mm çapında 304 L tip krom nikel tel

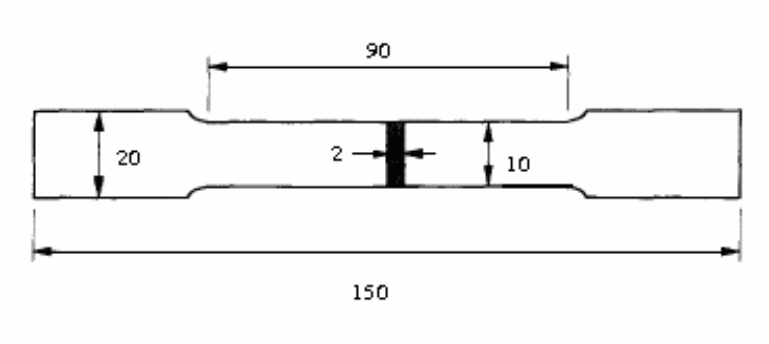


Şekil 6.3 Kompozit malzemenin üretiminin şematik görünüşü

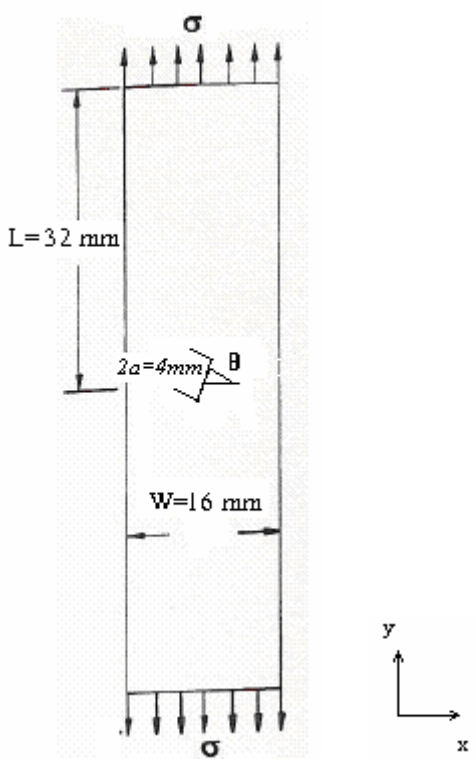
Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin bulunması için ASTM 638 standardına göre Şekil 6.4.'de verilen numuneler hazırlandı.

Yorulma deneyleri için ASTM E 647 standardına göre şekil 6.5. de şematik resmi ve boyutları verilen numuneler hazırlandı. Bu numunelerin merkezine 2a=4mm boyunda merkezi çatlaklar açıldı. Bu çatlaklar numune x ekseniyle 0º, 15º, 30º, 45º, 60º ve 75º açılar yapacak şekilde açılmıştır.

Çatlakları açmadan önce numune üzerine 4 mm boyunda çatlağın yeri özel kalemle işaretlendi. Sonra model bıçağıyla işaretli bu bölge numunenin kalınlığı boyunca kesildi. Hassas kesim için üzerinde açı ve boy skalası bulunan Mitutoyo marka el mikroskobu kullanıldı.



Şekil 6.4 Çekme testi deney çubuğu ve ölçüleri



Şekil 6.5. Yorulma deneylerinde kullanılan deney çubuğu ve ölçüleri

6.2. YAKMA DENEYİ

Matris malzemesi ile takviye malzemesinin hacimsel oranlarını elde etmek için ASTM-D 2584'e uygun olarak yakma deneyleri gerçekleştirildi.

25x70 mm boyutlarında kompozit malzeme numunesi hassas terazide tartıldıktan sonra, 600ºC elektrik ısıtmalı fırında polietilen tamamen buharlaşıncaya kadar yakıldı. Geriye kalan krom-nikel tel örgü yeniden tartılarak polietilen ve tel örgünün ağırlıkları bulundu. Krom-nikel tel örgü fiberin yoğunluğu ρ_f =8.03 g/cm^3 ve kompozit malzemenin yoğunluğu da ρ_c=1.25 g/cm^3 olduğu bilindiğinden, kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı aşağıdaki bağıntıdan bulundu.

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \qquad (6.1)$$

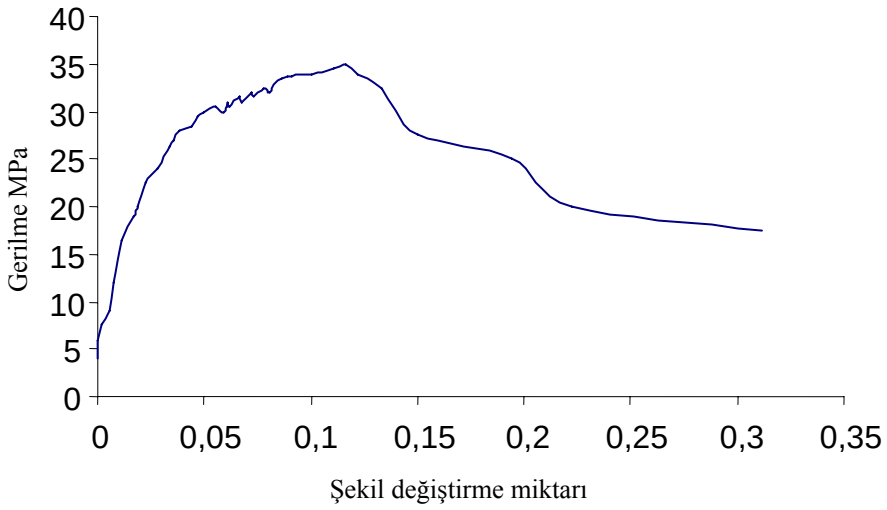
Burada W_f ve W_c, sırasıyla fiber ve kompozitin ağırlıklarıdır. ρ_f ve ρ_c, ise sırasıyla fiber ve kompozitin yoğunluklarıdır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yakma deneyi sonucunda kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı V_f =0.04 olarak bulunmuştur. Ayrıca elyafın ağırlıkça oranı $V_{fağ}=W_f / W_c$ den 0.25 bulunmuştur.

6.3. ÇEKME DENEYİ

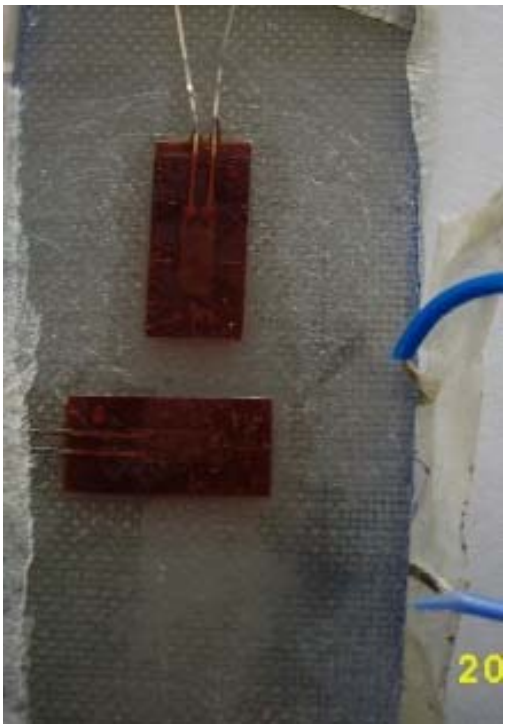
Şekil 6.4. de görüldüğü gibi numuneler hazırlanarak Gaziantep KOSGEB Laboratuarında bulunan Universal Testometric Micro 500 marka Çekme Test Cihazında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler 0.5 mm/dk ilerleme hızında oda sıcaklığında yapılmıştır.

Kompozit malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme miktarı ($\sigma - \varepsilon$) grafiği şekil 6.6 da verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi $\sigma - \varepsilon$ eğrisinin muhtelif yerlerinde dalgalanmalar görülmektedir. Gerilmenin 30 MPa kadar olan bölümlerindeki dalgalanmaların, kompozit malzeme uzarken tel örgülü fiberin kıvrımlarını düzlenmesi sırasındaki ani uzamalardan kaynaklandığı sanılmaktadır. Gerilmenin 30 MPa ile 35 MPa aralığındaki keskin dalgalanmalar beklenildiği gibi fiberin kopmaya başladığı safhadır. Bir tel kopunca yükte ani düşüş olmuş akabinde bir sonraki tel yükü üstlenmiş arkasından o da kırılmış ve böylece maksimum yüklemeye kadar

devam etmiştir. Daha sonra termoplastik matrisin etkisiyle sünek davranış ve kopma gerçekleşmiştir.



Şekil 6.6 Kompozit malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \varepsilon$) grafiği



Şekil 6.7 Deney çubuğunda strain-gage'lerin bağlantı şekli

Daha sonra başka numuneler üzerine şekil 6.7 de görüldüğü gibi yatay ve dikey konumda BLH Electronics SR-4 marka ve FAB-12-35S9 tipinde iki adet strain-gage yapıştırılmıştır. Buradan da malzemenin elastisite modülü E ve Poisson oranı ν bulunmuştur. Elde edilen kompozit malzemeye ait mekanik özellikleri gösteren değerler tablo 6.1. de verilmiştir.

Tablo 6.1. Deney malzemesinin mekanik özellikleri

Çekme deneyi özellikleri	Bulunan değerler
Elastisite Modülü (E)	6300 MPa
% Uzaması	% 15
Akma Dayanımı	34 MPa
Çekme Dayanımı	41 MPa
Poisson Oranı (ν)	0.41

6.4. YORULMA DENEYLERİ

Yorulma deneyleri için Şekil 6.5 de görülen ve ASTM E 647 standardına göre hazırlanan numunelere yatayla 0º, 15º, 30º, 45º, 60º ve 75º'lik açı yapan konumlarda merkezi çatlaklar açıldı. Bu çatlaklı numuneler yorulma deneylerine tabi tutuldu. Yorulma deneyleri için KOSGEB Gaziantep Merkez Laboratuarında bulunan Testometric Micro 500 marka elektro-mekanik ve dijital LCD ekranlı tam otomatik cihaz kullanılmıştır. Cihazın kapasitesi 3000 kg olup TSE tarafından her yıl kalibrasyonu yapılan ve kontrol edilen bir cihazdır. Cihaz üzerinde yorulma deneyleri 0,1 mm/dk hassasiyetli hızlarla ve 1 N hassasiyetli yük uygulamasıyla yapılabilmektedir.

Yorulma deneyleri ASTM E 647 standardı doğrultusunda, f=0.75 Hz' lik bir frekans ve 0.1 gerilme oranında yapılmıştır. Test cihazında frekans, numunenin bağlandığı aparatın ilerleme hızı ile kontrol edilmektedir. f=0.75 Hz' lik bir frekans, 50 mm/dk lık bir hız uygulanarak elde edilmiştir. Ayrıca 500 N ve 50 N' luk çekme yük değerleri kullanılarak R=0.1 gerilme oranı sağlanmış, böylece tekrarlı yükleme

ile yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burada maksimum gerilme için akma dayanımının 0.78'i alınmıştır

ASTM E 647 standartlarına göre seçilen numune boyutları tekdüzen gerilme (uniform stress) türüne göre seçilmiştir. Bu sebeple uygulanan gerilme miktarının numunenin her noktasında eşit olması gerekir. Bu da numune boyutlarına bağlıdır ve numune boyutlarının önemi daha da artırmaktadır. Öyle ki, ortasına çatlak açılmış numuneler hazırlanırken ve yorulma cihazına bağlanırken, eksen ve boyutlar dikkatli bir şekilde kontrol edilmiştir.

Numuneler başlangıç çatlak oluşumu için ön yorulmaya maruz bırakılmıştır. Her bir numunede 0.1 mm boyunda ön yorulma çatlağı oluşuncaya kadar yorulmaya devam edildi. Deneyler sonucunda elde edilen çatlak ilerleme miktarı a ve çevrim sayıları N değerlerinin ortalaması alınarak farklı çatlak açılarına sahip numunelerin a ve N değerleri bulunmuştur.

Normal yorulma deneyi yapılırken çatlağın ilerleme miktarı 0.01 mm hassasiyetli ve 10 kez büyütmeli el mikroskobu ile ölçülmüştür. Kullandığımız kompozit malzeme şeffaf görünümlü olduğundan, arkadan verilen parlak bir ışık yardımıyla çatlak ucu hasar bölgesi rahatça görülebilmektedir. Bundan dolayı çatlak ucunu ölçmek için başka bir metoda ihtiyaç duyulmadı.

Belirlenen çevrim değerlerinde ilerleyen çatlak boyu ölçülürken o andaki çatlak konumunu ve çatlak açılma miktarını bulmak için dijital video kamera ile film çekimi gerçekleştirildi. Bilgisayara aktarılan bu filmlerden çatlak ağzı açılma miktarları ile çatlak ilerleme miktarları yeniden ölçüldü.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1 YORULMA DENEYLERİ

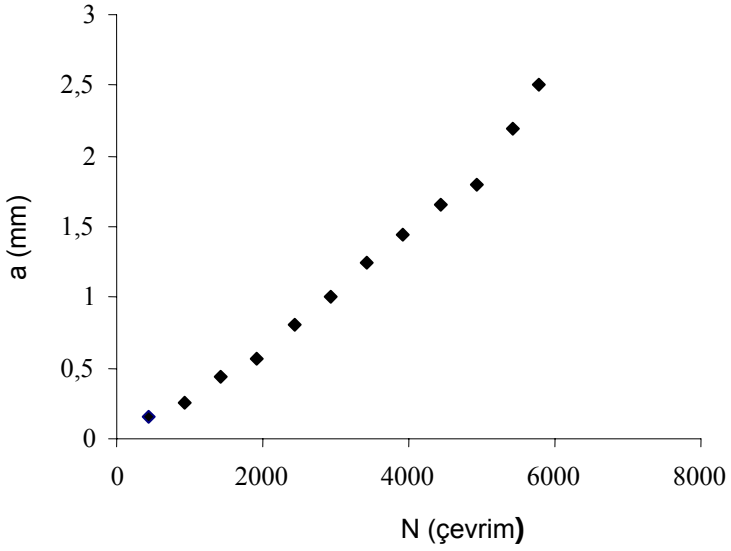
Gerilme şiddet faktörü (GŞF) değişim miktarlarının (ΔK_I ve ΔK_{II}) hesaplanmasında ilk olarak eşitlik (5.9) ve eşitlik (5.10) da verilen formüller kullanılmıştır. Malzeme sabitleri olan A ve n katsayılarının bulunması için, Paris-Erdoğan eşitliği olarak bilinen ve eşitlik (4.6) da verilen ΔK'nın hesaplanması gereklidir. Bunun için 5. bölümde anlatılan Walker eşitlikleri ve Sole fonksiyonları kullanılarak ($\Delta K_{I\ eş}$ ve $\Delta K_{II\ eş}$) değerleri hesaplanmıştır. Sonra da eşitlik (5.11) den ($\Delta K_{eş}$) değerleri hesaplanmıştır. Sole fonksiyonlarından elde edilen $\Delta K_{I\ eş}$, $\Delta K_{II\ eş}$ ve $\Delta K_{eş}$ değerleri tüm çatlak açıları için EK I'de verilmiştir. Çatlak ilerlemesi sırasında kink olayı meydana geldiğinden ve Sole fonksiyonları da kink açısının fonksiyonları olduğundan grafiklerde ve malzeme sabitleri olan A ve n'nin hesaplanmasında bu eşitlikler kullanılmıştır. Ayrıca enerji boşalma miktarı değişimi ΔG değerleri de eşitlik 5.22 den hesaplanmıştır. Tüm çatlak açıları için grafikleri çizilen ΔG değerleri EK I'de verilmiştir.

Kompozit malzemenin dayanımını artıran tel takviyesinin ve esneklik veren matris malzemenin yorulmadaki etkisini görebilmek için kompozit malzemede kullanılan boyut ve yorulma şartlarında örgü telin tek başına yorulma deneyi yapılmıştır. Hazırlanan örgü tel numunesinin ortasına 0º'lik çatlak açılmış ve yorulma deneyi yapılmıştır. Diğer açılardaki çatlaklar için deney yapılmamış 0º açılı çatlak ile yetinilmiştir. Krom nikel telin akma dayanımına (σ_{akma}=240 MPa) göre R=0.1, f=0.75 Hz' lik bir frekans, 90 N ve 9 N' luk çekme yük değerleri kullanılarak ASTM E 647 standartlarına göre deneyler gerçekleştirilmiştir.

0º açılı çatlaklı numunede 5750 çevrimde kopma gerçekleşirken, 0º açılı çatlaklı tel örgü numunede kopma 350 çevrimde oluşmuştur. Bunun sebebi yorulma sırasında örgü halde bulunan dikey ve yatay yöndeki tellerin birbirine sürtündüğü bölgelerde aşınma oluşmaktadır. Aşınma özellikle dikey yönde dizilmiş (numune ekseni yönünde) tellerde oluşmaktadır. Çünkü uzayıp kısalan teller bu yöndedir. Bu yöndeki teller yorulma sırasında uzayıp kısalırken örgü bölgelerindeki kıvrımlarda eğilme yorulması meydana gelmektedir. Eğilme yorulması neticesinde mikro çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakların ve aşınmanın etkisiyle örgü teldeki kopma çok kısa sürede gerçekleşmektedir.

7.2. 0º AÇILI ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI

Ortasında 0º açılı çatlak bulunan kompozit numuneler yukarıda anlatılan şartlarda yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin ön yorulma çatlağı N=425 çevrimde 0.1 mm olarak tesbit edilmiştir.

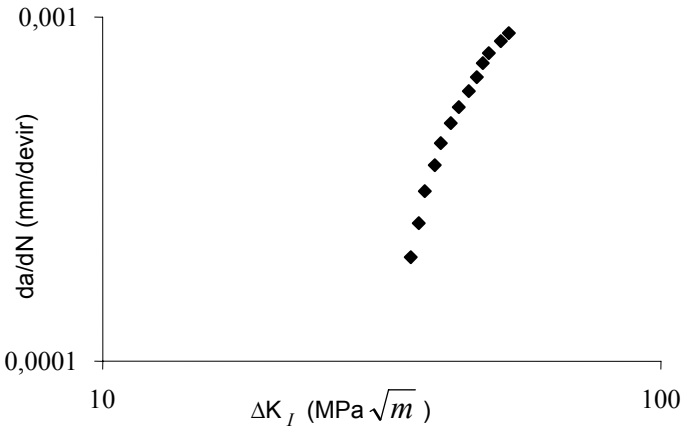


Şekil 7.1. 0º çatlaklı kompozit malzemenin (a-N) grafiği

Yorulma deneyi yapılırken her 500 çevrimde seyyar el mikroskobu yardımıyla çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.1. de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi çatlağın çevrim sayısıyla hemen hemen lineer değiştiği söylenebilir. Bu grafikten çatlağın 5000 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu 5000 çevrimden sonra hızlandığı görülmektedir. Numuneler ortalama 5750 çevrimde ve 2.5 mm çatlak ilerleme miktarında kırılmıştır. Ayrıca çevrim ve çatlak ilerleme miktarları EK I a da verilmiştir.

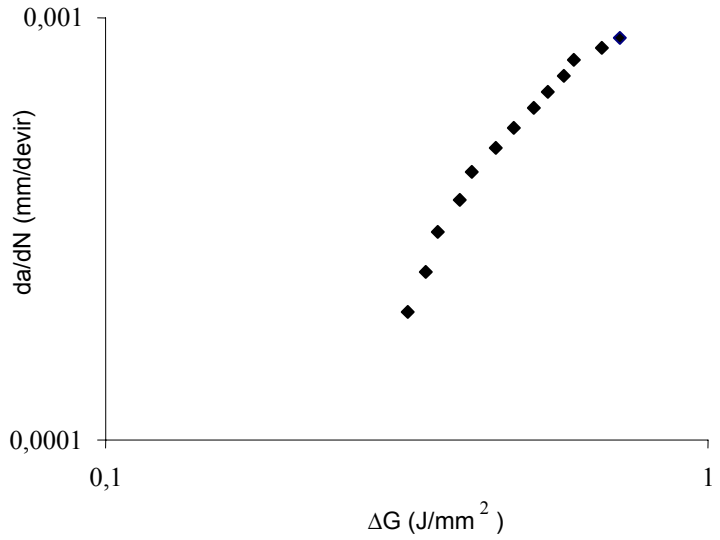
Şekil 7.2 de 0º açılı çatlaklı numunenin yorulma neticesinde çatlak ilerleme hızının (da/dN) ve ΔK_I 'e göre değişiminin grafiği logaritmik eksende gösterilmiştir. Burada ΔK_I değerleri eşitlik 5.9 dan hesaplanmıştır. Başlangıçta a=0.15mm ve N=425 çevrim de ΔK_I=36.88 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında N=5750 çevrim ve a=2,5mm de ΔK_I=53.36 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. 0º açılı çatlaklı numunede ayrılma modunda (mode I) hasar oluştuğundan sadece ΔK_I değerleri bulunmuş ve değerlendirmeler buna göre yapılmıştır.

Şekil 7.2. incelendiğinde ΔK_I artarken çatlak ilerleme hızı da/dN arttığı görülmektedir. Çatlak ilerleme hızı başlangıçta hızla artarken kopmaya doğru bir miktar azalma oluşmaktadır. Buda çatlaklı yorulmada beklenen durumdur.



Şekil 7.2 0º açılı çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_I grafiği

Şekil 7.3 de 0º açılı çatlaklı numunede yorulma neticesinde çatlak ilerleme hızının (da/dN) şekil değiştirme enerji boşalma miktarı değişimi (ΔG) ile değişmesinin grafiği logaritmik eksende gösterilmiştir. ΔG değerleri eşitlik (5.22) den hesaplanarak başlangıçta a=0.15mm ve N=425 çevrim de ΔG değerleri 0,316 J/mm^2 iken, kırılma anında N=5750 ve a=2,5 mm de 0,712 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Bulunan değerler EK I a da verilmiştir.



Şekil 7.3 0º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔG grafiği

ΔG değerleri artarken çatlak ilerleme hızı da artış göstermektedir. Çatlağın ilerlemesi, kopma değerine yaklaştıkça ΔG de ki artış miktarı hızlanmış ve çatlak ilerleme hızında ki artış miktarında da düşüş gözlenmiştir.

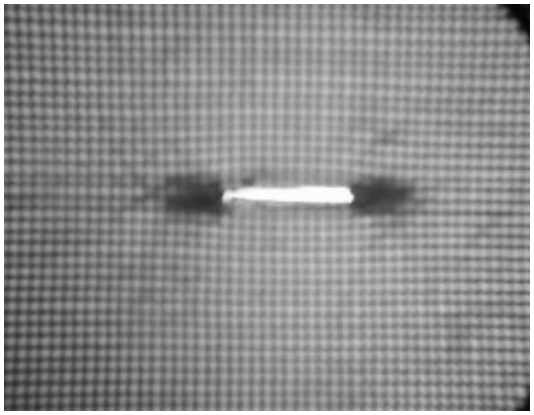
7.2.1. 0º Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

Burada 0º deki çatlağa uygulanan yük dik olduğundan ilerleme hızlı ve hasar düşük yorulma çevrimlerinde gerçekleşmiştir. Hasar mekanizması incelenecek olursa, deneyin başlamasıyla beraber ilk çevrimlerde çatlak ağızlarında beyazlaşma oluşmaya başlamıştır. Bunu matris yırtılması takip etmiştir.

İlerleyen çevrim sayılarında şekil 7.4. de görüldüğü gibi matris yırtılması çatlağın ucundaki fiberi geçerek devam etmiştir. Bu ara fiber-matris ara yüzey ayrılması meydana gelmiş ve yorulma çevrim sayısının artmasıyla birlikte boşta kalan tel kopmuştur.

Boşta kalan tel kırıldıktan sonra iki dikey tel arasındaki boşluk kadar matris yırtılması devam etmiş, bir sonraki tel boşta kalmış ve bu şekilde kopma olayı çatlağın kararlı olmayan büyüklüğe gelinceye kadar çatlak ilerlemesi devam etmiştir.

Çatlak açısının 0º olmasından dolayı sadece Mod I de hasar oluşmuş ve çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca ve kopuncaya kadar devam etmiştir. Herhangi bir yöne doğru çatlak yönlenerek ilerlememiştir.



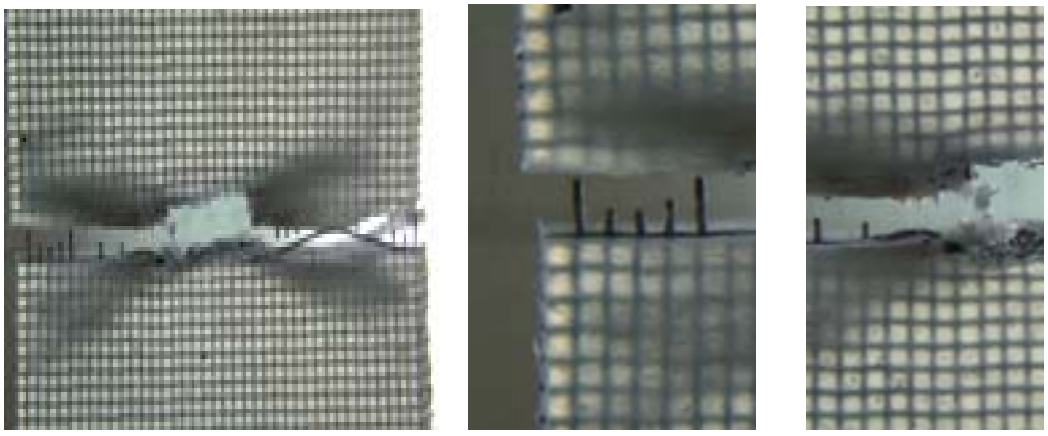
Şekil 7.4. 0º çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi

Fiber kopması şekil 7.5. ve şekil 7.6. da görüldüğü gibi fiber matris ara yüzey ayrılması ve fiber sıyrılması ile meydana gelmiştir. Fiber sıyrılması sadece iki tel arasında 0.4 mm gibi sınırlı bir bölgede oluşmuştur Kullanılan tel, örgü olduğundan buda beklenen bir durumdur. Bu yüzden ayrıca fiber sıyrılma (Pull-Out) testine ihtiyaç görülmemiştir. Yine fiber kırılmadan önce köprülenme (bridging) olayı da görülmüştür.

Polietilen, kompozit malzeme üretimi sırasında eridiğinden tel örgülü fiberlerin bütün yüzeylerini kaplamış hatta iki telin örgü yaptığı bölgelerde bile iki telin arsına girerek bütün telleri sıvamıştır.

Böylece iki tel arsında yorulmadan dolayı oluşacak sürtünmeyi engelleyen bir yağlama oluşturmaktadır. Yorulma sırasında teller uzayıp kısalırken sürtünme hasarı

olmamaktadır. Halbuki tel örgüden yapılmış numune tek başına yorulmaya maruz bırakıldığında hasarın büyük kısmı sürtünmeden oluşmaktaydı. Kompozit malzemenin yorulmasında ise tel örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin kıvrım bölgesi açılıp kapanırken eğilmeye maruz kaldığından fiber üzerinde mikro çatlaklar oluşmuş, yorulma çevrim sayısının ilerlemesiyle bu çatlaklar büyüyerek teli kırmıştır. Şekil 7.7. de bu durum şematik olarak gösterilmiştir.



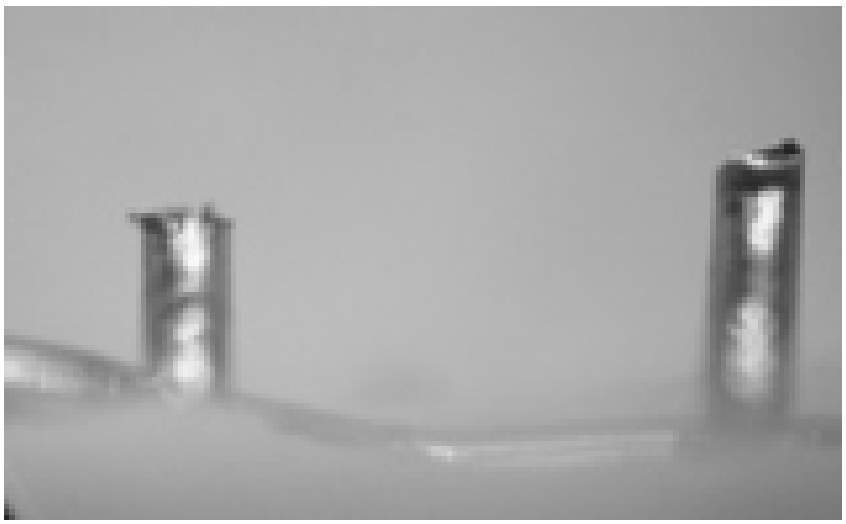
(a) (b) (c)

Şekil 7.5. 0º çatlak geometrisine sahip numunenin kırılma sonrası resimleri

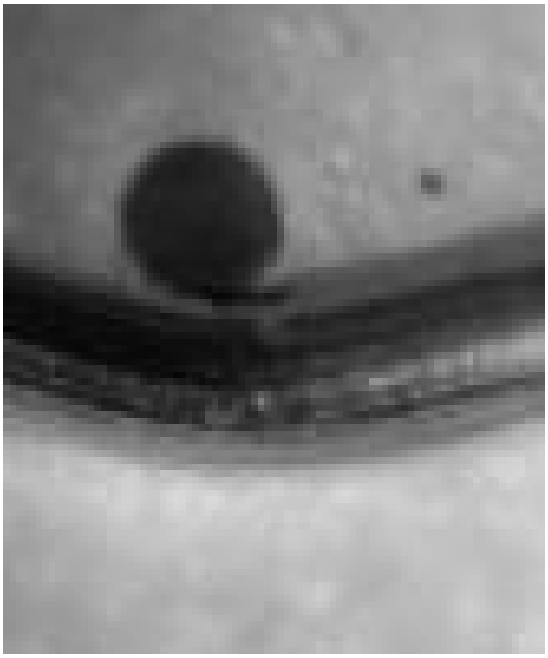
a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar



(a)

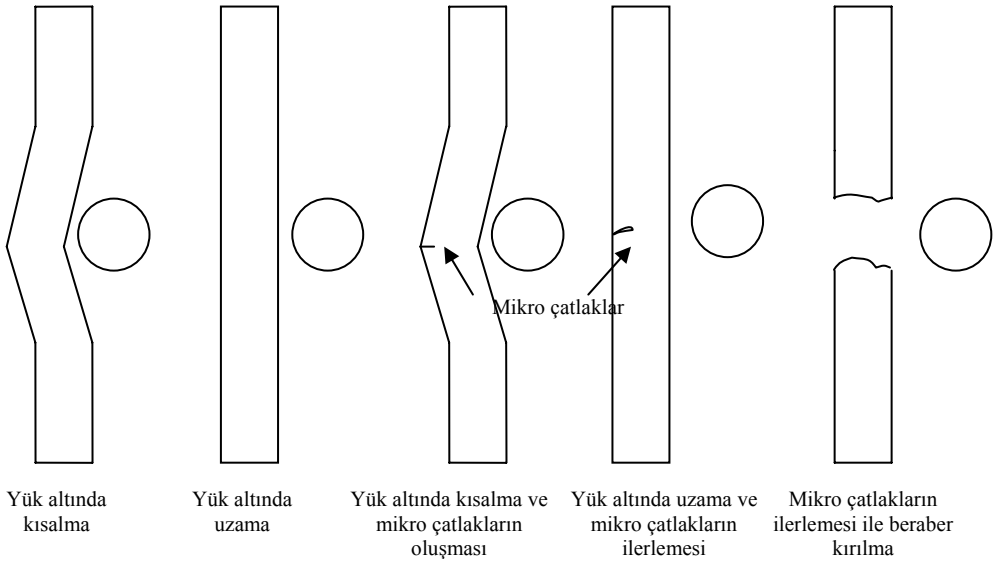


(b)

Şekil 7.6. Kırılma sonrası 0º çatlaklı numunenin 150 kez büyütülmüş fotoğrafı

a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması



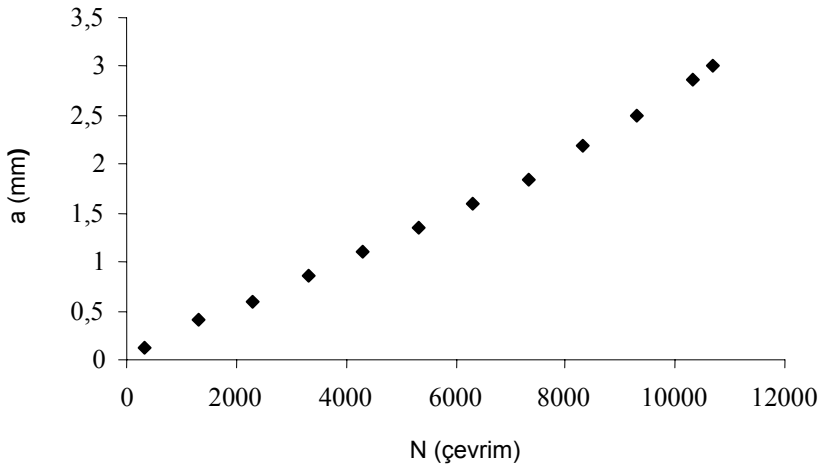
Şekil 7.7. Fiber telin yorulma yükü altında kırılmasının şematik olarak gösterilmesi

Çatlak ilerlemesi yorulma çevrim sayısının artışıyla birlikte a=2.5 mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve aniden numune kopmuştur.

7.3. 15º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI

Ortasında yatayla 15º lik açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneler R= 0.1 gerilme oranında ve f= 0.75 frekansta yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Öncelikle bu numune de yorulma deneyi yapabilmek için yorulma ön çatlağı açılmıştır. Çatlak 685 yorulma çevrim sayısında 0.1 mm ye ulaştığında yorulma durdurulmuştur. Daha sonra normal yorulma deneyine geçilmiştir.

Çatlak ilerleme miktarı her 500 çevrimde seyyar el mikroskobuyla ölçülmüştür. Ayrıca her 500 çevrim sırasında çatlağın durumu dijital kamerayla fotoğraf ve videoları çekilerek kayıt edilmiştir. Daha sonra bu video ve fotoğraflar kullanılarak bilgisayar ekranı üzerinde çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. Böylece çatlak ilerleme miktarı, hem el mikroskobu hem de bilgisayarda ki görüntüler kullanılarak iki yöntemle de bulunmuş ve kıyaslanmıştır. Sonuç olarak ölçüm hata payı minimize edilmiştir.



Şekil 7.8. 15º açılı çatlaklı kompozit malzemenin (a-N) grafiği

Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.8. de verilmiştir. Bu grafikten çatlağın 8000 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlağın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.

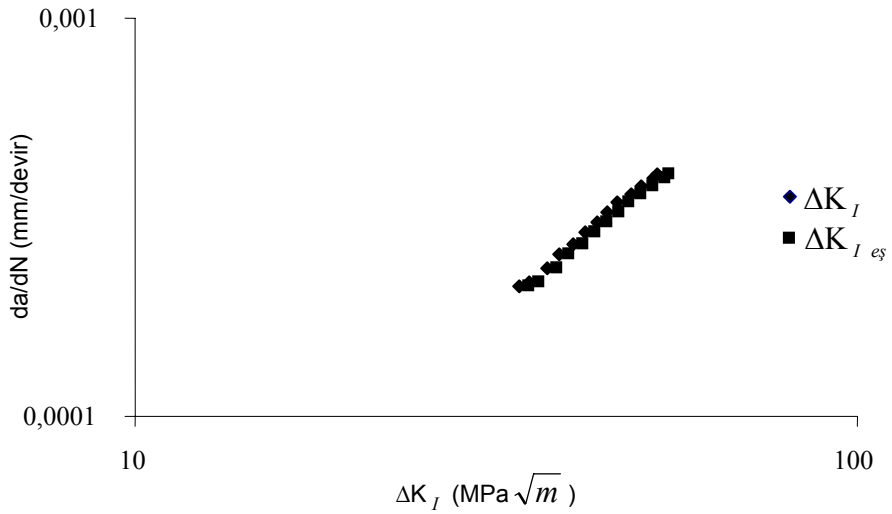
15º açılı çatlaklı numunede ortalama 11370 çevrim sayısında çatlak 3.1mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.

15º açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -15º açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir. Bundan dolayı çatlağın bir ucundaki ilerleme düzlemi ile diğer ucu arasındaki düzlemler farklı olduğundan açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana gelmiştir. Dolayısıyla çatlak ucunda gerilme şiddet faktörü değişimleri ΔK_I ve ΔK_{II} oluşmaktadır. Eşitlik 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 ve 5.13 kullanılarak ΔK_I, $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_{II}, $\Delta K_{II\ eş}$ ve $\Delta K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I b de verilmiştir.

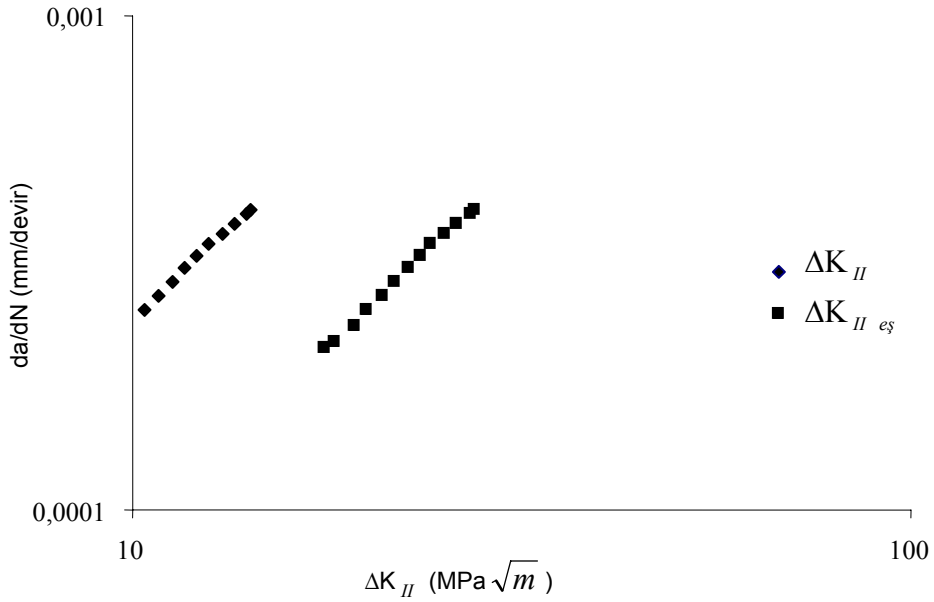
Çatlak miktarı ilerledikçe her bir gerilme şiddet faktörü değişim miktarı da artmıştır. Şekil 7.9. da da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$ göre değişimi değişiminin grafiği logaritmik eksende gösterilmiştir. Burada ΔK_I değerleri eşitlik 5.9 dan hesaplanmıştır. Başlangıçta a=0.1mm ve N=685 çevrim de ΔK_I=34.01 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=35.19 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında N=11372 ve a=3,1mm de ΔK_I=53.00 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=54.84 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_I den daha büyük çıkmıştır. Çünkü $\Delta K_{I\ eş}$ kink açısına bağlı olarak düzeltilmiş bir değerdir, daha büyük çıkması beklenen bir durumdur. Burada gerek ΔK_I ve gerekse $\Delta K_{I\ eş}$'in artmasıyla çatlak ilerleme hızı da artmıştır.

Şekil 7.10. da ise da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_{II} ve $\Delta K_{II\ eş}$ göre değişimi gösterilmiştir. Başlangıçta a=0.1mm ve N=685 çevrim de ΔK_{II}=9.11 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=17.63 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında N=11372 ve a=3,1mm de ΔK_{II}=14.20 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=27.48 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani $\Delta K_{II\ eş}$, ΔK_{II} den daha büyük çıkmıştır. Bu da $\Delta K_{I\ eş}$ de olduğu gibi, $\Delta K_{II\ eş}$ in de kink açısına bağlı olarak düzeltilmiş bir değer olmasındandır. Ayrıca $\Delta K_{II\ eş}$ ile ΔK_{II} arasındaki büyüklük oranı, $\Delta K_{I\ eş}$ in, ΔK_{I} e oranından daha fazladır ve bu oran kink açısının büyümesiyle oransal biçimde değişmektedir. Yine bu da beklenen bir durumdur.

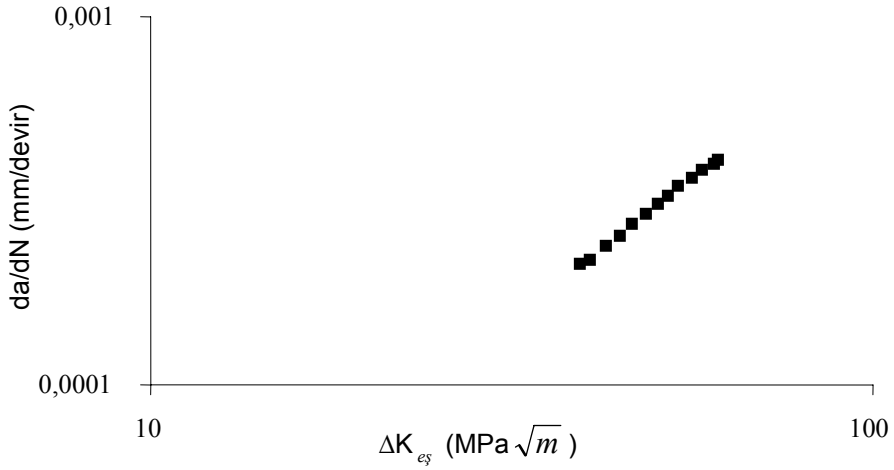
Şekil 7.10. incelendiğinde gerek ΔK_{II} ve gerekse $\Delta K_{II\ eş}$ değerlerinin artmasıyla çatlak ilerleme miktarı da/dN de artmıştır. Ayrıca da/dN nin artış oranının her iki gerilme şiddet faktörü değişim miktarları için de aynı olduğu görülmektedir. Çünkü şekilde değişim grafiğinin eğimi aynıdır.



Şekil 7.9. 15º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_{I} grafiği



Şekil 7.10. 15º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_{II} grafiği



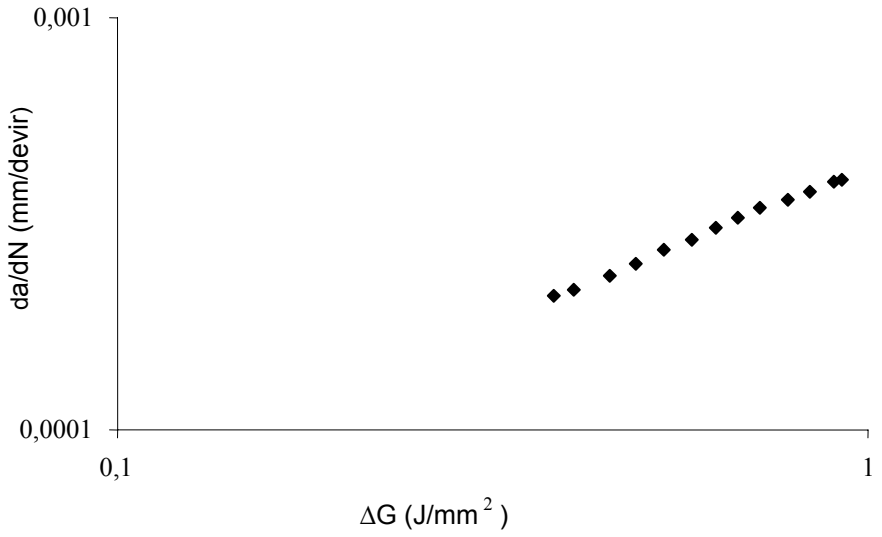
Şekil 7.11. 15º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-$\Delta K_{eş}$ grafiği

Bileşik mod da $\Delta K_{eş}$ değişimi eşitlik 5.12 den hesaplandığında çatlak ilerleme miktarı 0.1 mm iken $\Delta K_{eş}$=39.36 MPa$\sqrt{m}$ değerinden, çatlak ilerleme miktarı 3.1 mm ulaştığında $\Delta K_{eş}$=61.34 MPa$\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Şekil

7.11. de 15º açılı çatlaklı numunenin da/dN çatlak ilerleme hızının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarları $\Delta K_{eş}$ e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi $\Delta K_{eş}$ arttıkça çatlak ilerleme hızı da artış göstermiştir.

Malzemelerde çatlaklı yorulma olayında çatlak açılma miktarı ve çatlak ilerleme hızının gerilme şiddet faktörü ΔK ile ilgili olduğu kadar, şekil değiştirme enerji boşalma miktarı ΔG ile de ilgilidir. Çünkü G, çatlağın oluşabilmesi için harcanan elastik enerji boşalma miktarını ifade eder. Özellikle bileşik mod çatlak ilerlemesinde, elasto-plastik kırılma mekaniği şartlarında G daha etkilidir.

Eşitlik 5.22 den hesaplanarak elde edilen ΔG değerleri EK I b de verilmiştir. 15º açılı çatlaklı numunede başlangıçta a=0.1mm ve N=685 çevrim de ΔG değerleri 0,381 J/mm^2 iken, kırılma anında N=11372 ve a=3,1 mm de 0,925 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.12. de 15º açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir. Burada ΔG nin artışıyla da/dN nin de arttığı görülmektedir.

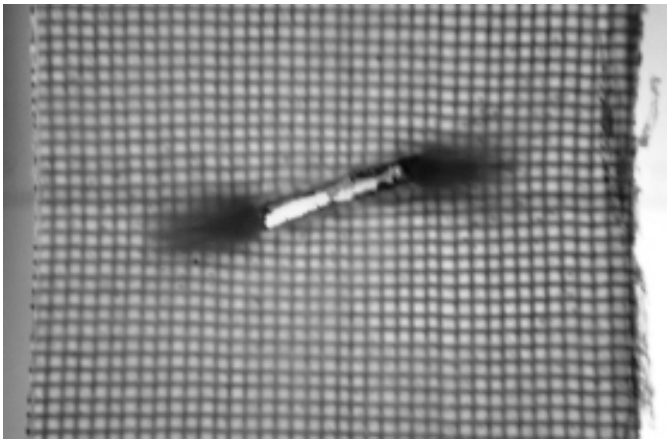


Şekil 7.12. 15º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔG grafiği

7.3.1. 15º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

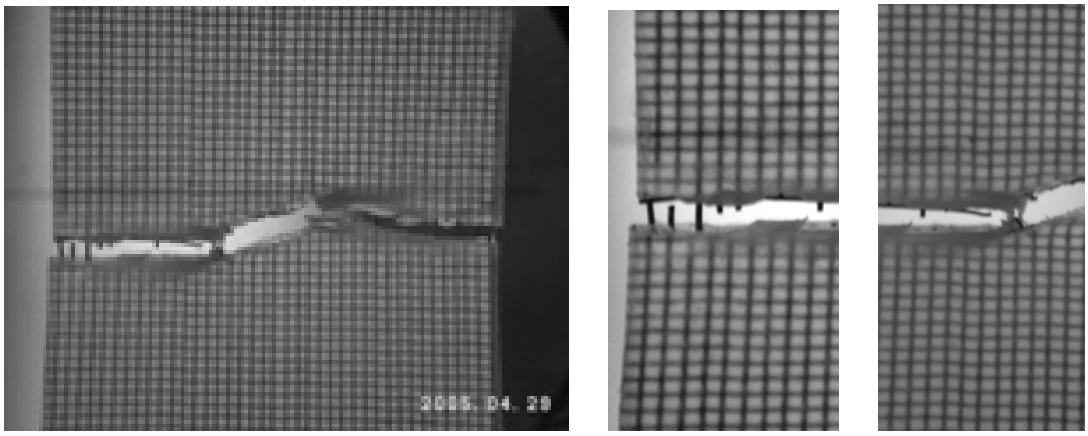
Burada15º açılı çatlaklı numunede açılma ve kayma modlarında (mod I ve mod II) hasar oluşmuştur. Hasar mekanizması incelenecek olursa, 15º açılı çatlaklı numune yorulmaya tabi tutulduğunda öncelikle çatlak uçlarına yakın bölgelerde beyazlaşma meydana geldi. Daha sonra matris malzeme de yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

Yorulma çevrim sayısı arttıkça matris içerisindeki çatlak yırtılması yatayla -15º açıyla yönlenerek ve kink yaparak yatayda devam etti. (**Kink**: çatlak ilerlemesinin çatlak doğrultusunda gelişmeyip, herhangi bir α açısı kadar başka bir doğrultuda çatlağın ilerlemesi olayıdır. Bu yön değiştirme çatlak doğrultusuna $\pm\alpha$ açısı kadar farklı yönlerde oluşabilir.) Bu sırada fiberde bridging yani köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü. Şekil 7.13. ve şekil 7.14. de yönlenme, kink ve köprülenme olayı görülmektedir.



Şekil 7.13. 15º çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi

Yorulma çevrim sayısının artması ile birlikte tel örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin kıvrım bölgesi açılıp kapanırken yani uzayıp kısalırken eğilmeye maruz kaldığından fiber üzerinde mikro çatlaklar oluşmuş, ve daha sonra yorulma çevrim sayısının ilerlemesiyle birlikte bu çatlaklar büyüyerek teli kırmıştır.



(a) (b) (c)

Şekil 7.14. 15º çatlak geometrisine sahip numunenin kırılma sonrası resimleri

a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

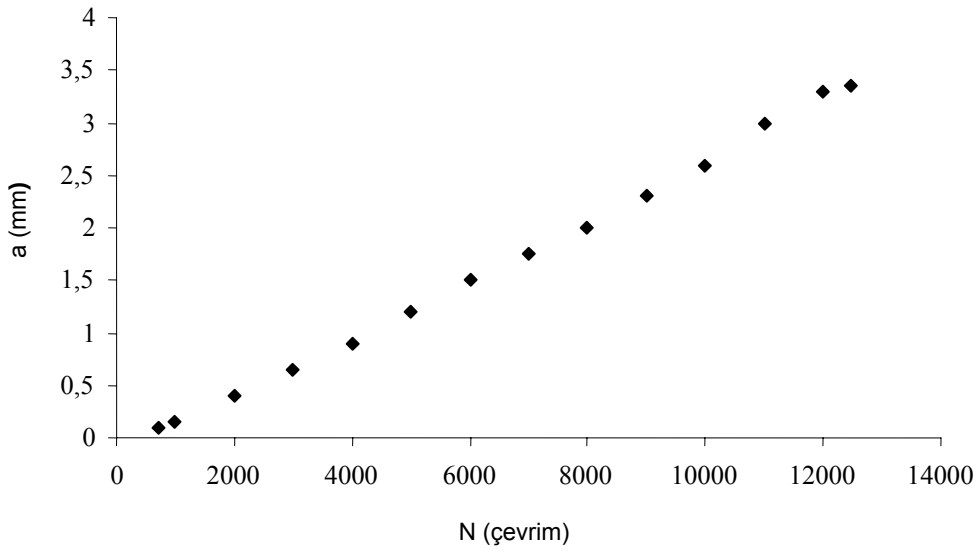
Çatlak ilerlemesi yorulma çevrim sayısının artışıyla birlikte a=3.0 mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve aniden büyük bir gürültüyle numune kopmuştur.

7.4. 30º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI

Ortasında yatayla 30º lik açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneler 15º de ki numuneler de olduğu gibi R= 0.1 gerilme oranında ve f= 0.75 frekansta yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Numune de yorulma ön çatlağı açılmış ve 15º de ki numuneye göre artış göstererek 730 yorulma çevrim sayısında ve 0.1 mm de gerçekleştiği bulunmuştur. Daha sonra normal yorulma deneyine geçilmiştir.

0º ve 15º de ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve yorulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.15. de verilmiştir. Bu grafikten çatlağın 10000 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlağın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.

30º açılı çatlaklı numunede ortalama 12460 çevrim sayısında çatlak 3.36 mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.



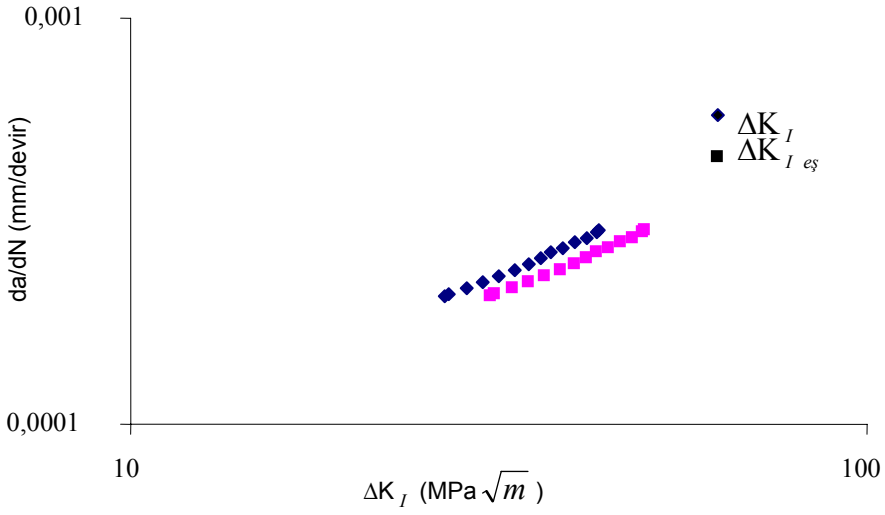
Şekil 7.15. 30º açılı çatlaklı kompozit malzemenin (a-N) grafiği

15º de olduğu gibi 30º açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -30º açı yapacak şekilde kink yaparak ve bileşik mod oluşturarak ilerlemiştir. Yine 15º de kullanılan eşitlikler kullanılarak ΔK_I, $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_{II}, $\Delta K_{II\ eş}$ ve $\Delta K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I c de verilmiştir.

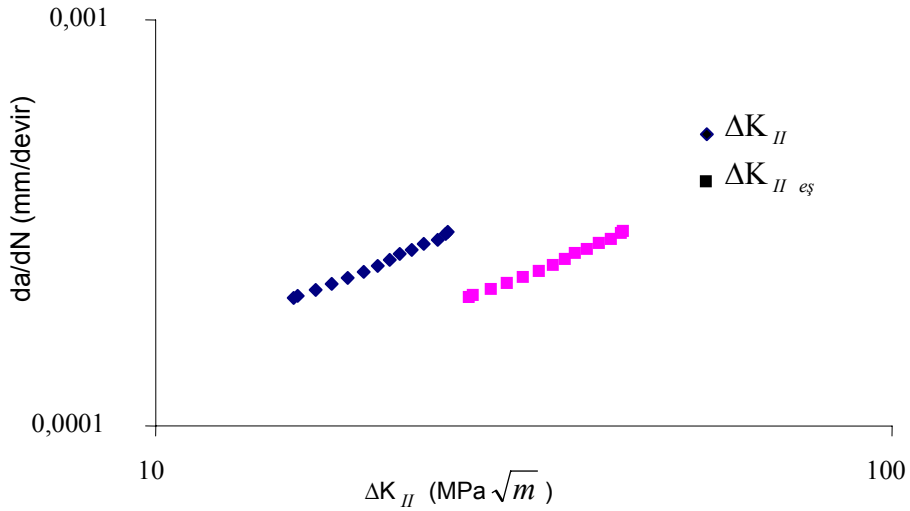
Şekil 7.16. da 30º açılı çatlaklı numunelerde da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$ göre değişiminin grafiği logaritmik eksende gösterilmiştir. Başlangıçta ΔK_I=26.68 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=30.80 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ΔK_I=43.27 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=49.96 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Kink açısına bağlı olarak $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_I e göre büyük çıkmış ve 15º çatlaklı numune ye ait ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$'e göre değerler azalma göstermiştir. Bu da açının artmasıyla açılma modunun etkisinin azaldığını göstermektedir ve beklenen bir durumdur. Burada ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$'in artmasıyla çatlak ilerleme hızı da artmıştır.

Şekil 7.17. de ise 30º açılı çatlaklı numunelerde da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_{II} ve $\Delta K_{II\ eş}$ göre değişimi gösterilmiştir. Başlangıçta ΔK_{II}=15.40 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=26.68 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ΔK_{II}=24.98 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=43.27 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yine kink açısının değişmesiyle $\Delta K_{II\ eş}$, ΔK_{II} den daha büyük çıkmış ve 15º çatlaklı numune ye ait $\Delta K_{II\ eş}$ ve ΔK_{II} 'e göre değerler artış göstermiştir. Bu da kayma modunun etkisinin arttığını gösteren ve beklenen bir durumdur. Ayrıca da/dN nin artış oranının her iki gerilme şiddet faktörü değişim miktarları için de aynı olduğu görülmektedir.

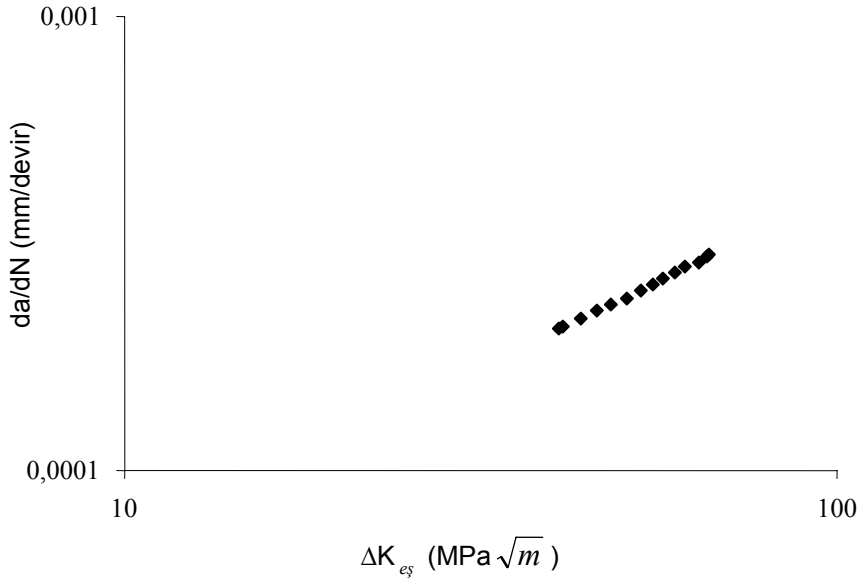
30º açılı çatlaklı numunelerde bileşik mod da $\Delta K_{eş}$ değişimi başlangıçta $\Delta K_{eş}$=40.75 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ise $\Delta K_{eş}$=66.10 MPa$\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.18. de 30º açılı çatlaklı numunenin da/dN çatlak ilerleme hızının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarları $\Delta K_{eş}$ e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi $\Delta K_{eş}$ arttıkça çatlak ilerleme hızı da artış göstermiştir.



Şekil 7.16. 30º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_I grafiği



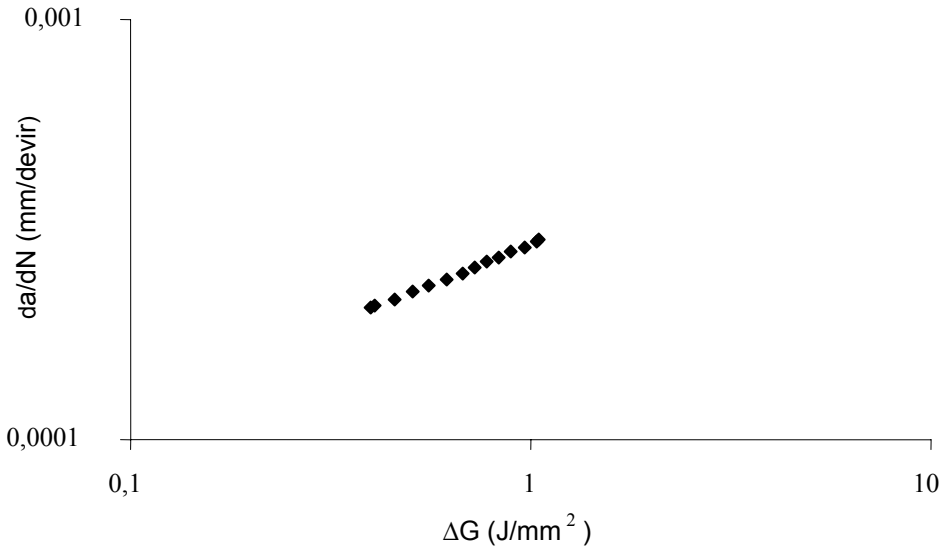
Şekil 7.17. 30º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_{II} grafiği



Şekil 7.18. 30º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-$\Delta K_{eş}$ grafiği

30º açılı çatlaklı numune için elde edilen ΔG değerleri EK I c de verilmiştir. Başlangıçta ΔG değerleri 0,401 J/mm^2 iken, kırılma anında 1,054 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.19. da 30º açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı

da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir. Burada ΔG nin artışıyla da/dN nin de arttığı görülmektedir.



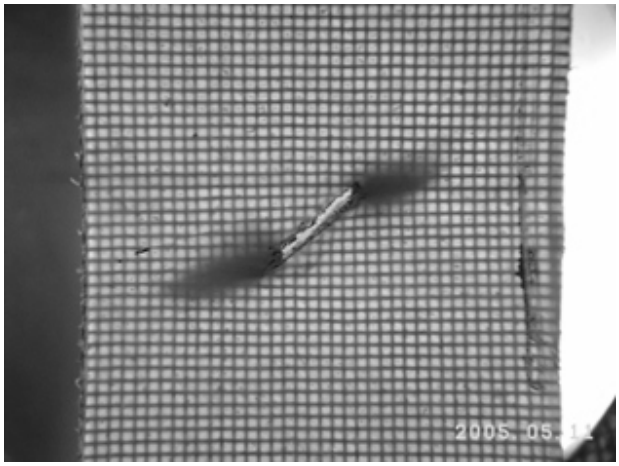
Şekil 7.19. 30º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔG grafiği

7.4.1. 30º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

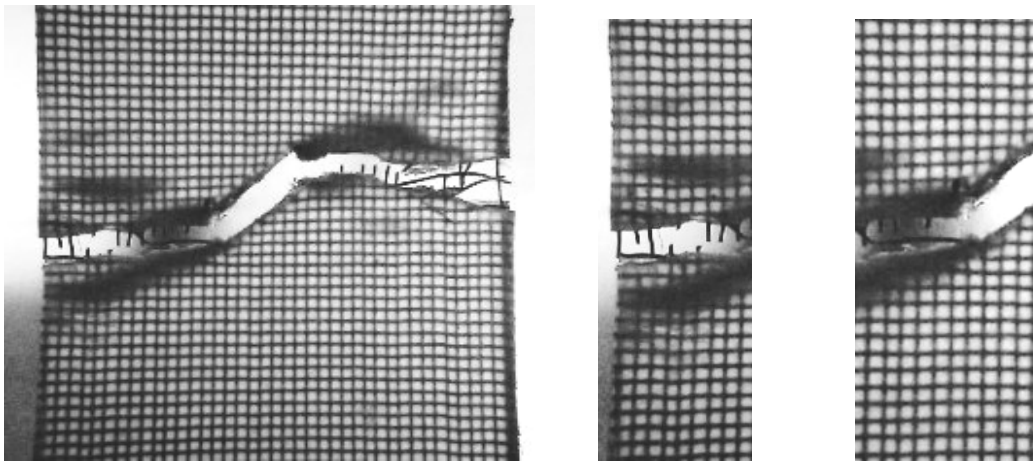
30º açılı çatlaklı numunede, 15º açılı çatlaklı numunede olduğu gibi açılma ve kayma modlarında (mod I ve mod II) hasar oluşmuştur. 30º açılı çatlaklı numunenin yorulma deneyi sırasında hasar mekanizması sırasıyla şu şekilde gelişmiştir. Öncelikle çatlak uçlarına yakın bölgelerde beyazlaşma meydana geldi. Daha sonra matris malzeme de yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

Şekil 7.20. ve şekil 7.21. de görüldüğü gibi yorulma çevrim sayısı arttıkça matris içerisindeki çatlak yırtılması yatayla (-30º açıyla) yönlenerek ve kink yaparak yatayda devam etti. Bu sırada fiberde bridging yani köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü.

Sonra tel örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin üzerinde ki kıvrım bölgesi uzayıp kısalırken eğilmeye maruz kaldığından, mikro çatlaklar oluşmuş ve daha sonra yorulma çevrim sayısının artmasıyla birlikte bu çatlaklar büyüyerek teli kırmıştır. Ayrıca 0º ve 15º çatlaklı numunelere göre çatlak ilerlemesi daha yavaş oluşmuştur.



Şekil 7.20. 30º çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi



(a) (b) (c)

Şekil 7.21. Kırılma sonrası 30º çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

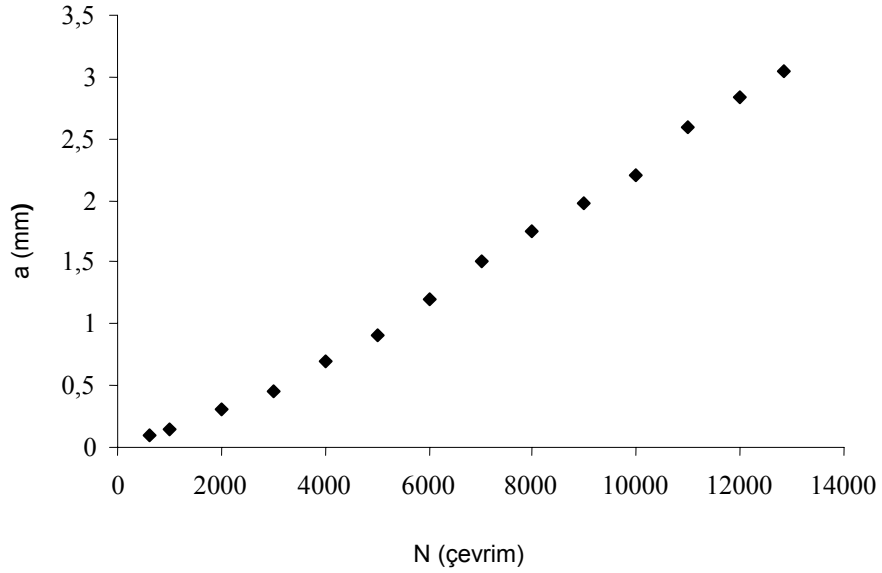
Yorulma çevrim sayısının artışıyla birlikte, a=3.36 mm seviyesine gelinceye kadar çatlak ilerlemesi kararlı bir yapıda devam etmiş, ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve aniden gürültü çıkararak numune kopmuştur.

7.5. 45º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI

45º açılı çatlaklı numuneler de R= 0.1 gerilme oranında ve f= 0.75 frekansta yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Yorulma ön çatlağı 630 yorulma çevrim sayısında oluşmuş ve 0.1 mm ye ulaştığında yorulma durdurulmuştur. Daha sonra normal yorulma deneyine geçilmiştir.

Deneyler sırasında 0º 15º ve 30º de ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve yorulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Tespit edilen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.22. de verilmiştir. Bu grafikten çatlağın 11500 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlağın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.

45º açılı çatlaklı numunede ortalama 12850 çevrim sayısında çatlak 3.04 mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.



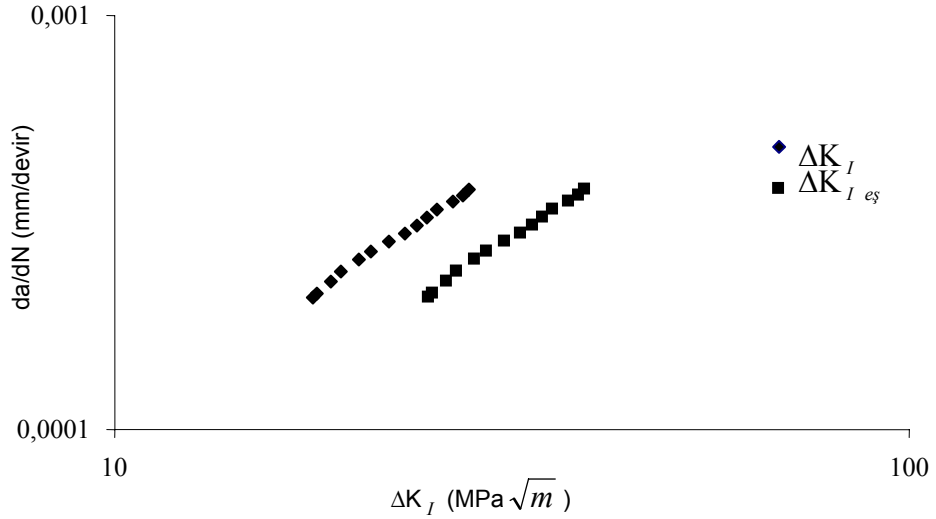
Şekil 7.22. 45º açılı çatlaklı kompozit malzemenin (a-N) grafiği

45º açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi 15º ve 30º olduğu gibi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde, -45º açı yapacak şekilde, bileşik mod oluşturarak kink yapmış ve çatlak ilerlemesi gerçekleşmiştir. Yine 15º ve 30º çatlaklı numuneler için kullanılan eşitliklerden ΔK_I, $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_{II}, $\Delta K_{II\ eş}$ ve $\Delta K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I d de verilmiştir.

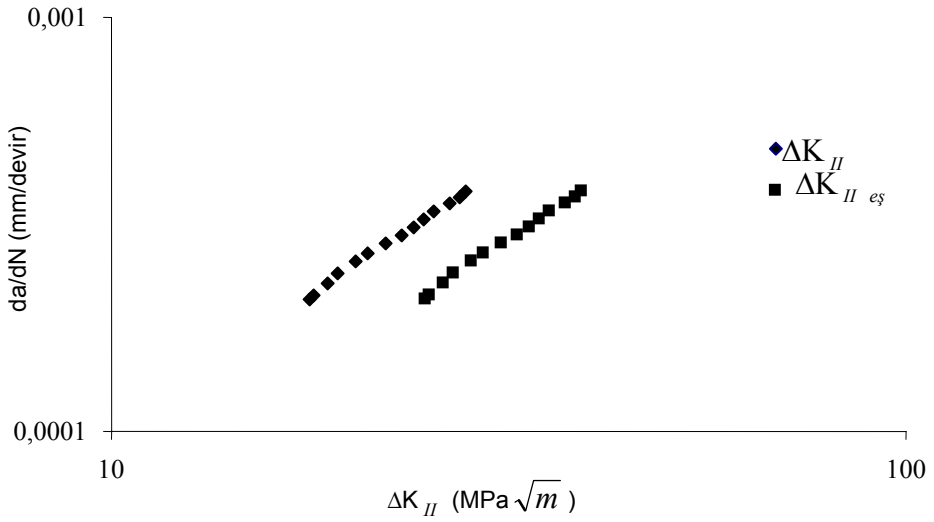
Şekil 7.23. de 45º açılı çatlaklı numunelerde da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$ göre değişiminin grafiği logaritmik eksende gösterilmiştir. Başlangıçta ΔK_I=17.78 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=24.90 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ΔK_I=27.95 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=39.14 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Kink açısına bağlı olarak $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_I den büyük çıkmış, 15º ve 30º çatlaklı numunelere ait ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$'e göre değerler azalma göstermiştir. Bu da açının artmasıyla açılma modunun etkisinin azaldığını ve kayma modunun etkisinin attığını göstermektedir ve beklenen bir durumdur.

Şekil 7.24. de ise 45º açılı çatlaklı numunelerde da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları .ΔK_{II} ve $\Delta K_{II\ eş}$ göre değişiminin grafiği logaritmik eksende gösterilmiştir. Başlangıçta ΔK_{II}=17.78 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=24.90 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ΔK_{II}=27.95 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=39.14 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. 15º ve 30º çatlaklı numunelerde ki ΔK_{II}'ye göre değerler artış göstermiştir. Fakat $\Delta K_{II\ eş}$ değerleri Sole fonksiyonlarının etkisiyle 30º çatlaklı numunelere göre azalma göstermiştir. Ayrıca da/dN nin artış oranının her iki gerilme şiddet faktörü değişim miktarları için de aynı olduğu görülmektedir.

45º açıda cos ve sin değerleri birbirine eşit olduğundan ve gerilme şiddet faktörleri de bunlara bağlı fonksiyonlar olduğundan ΔK_I ΔK_{II}'ye, $\Delta K_{I\ eş}$ ise $\Delta K_{II\ eş}$'e eşit çıkmıştır. Bu ise beklenen bir durum olup deney sonuçlarından elde edilen değerlerin tutarlılığını göstermektedir.

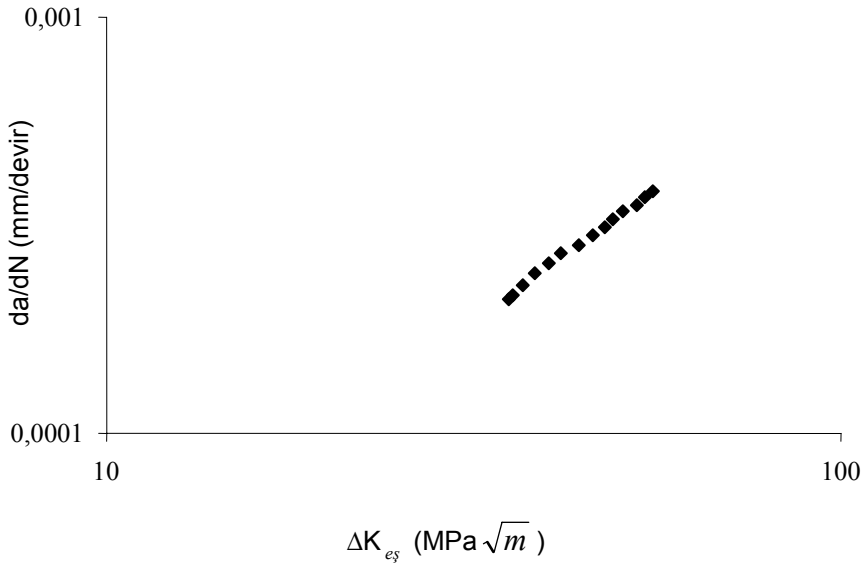


Şekil 7.23. 45º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_I grafiği



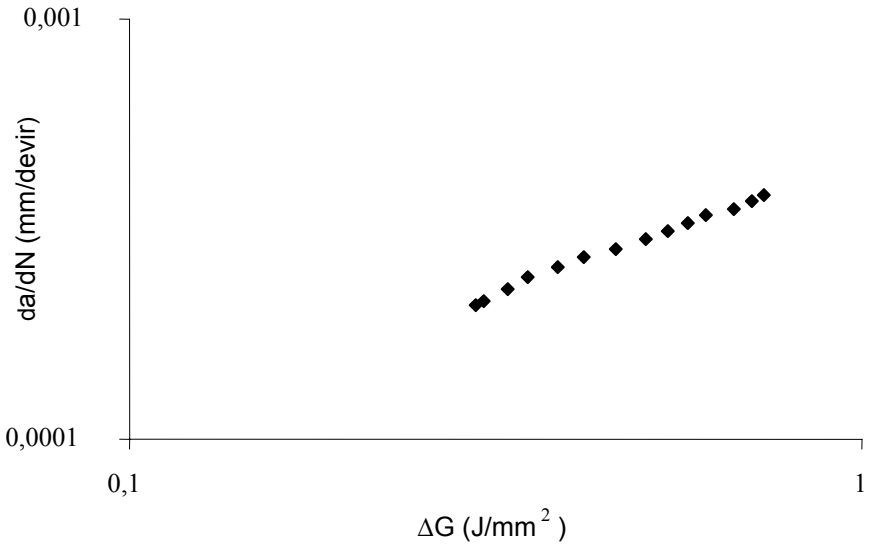
Şekil 7.24. 45º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_{II} grafiği

45º açılı çatlaklı numunelerde bileşik mod da $\Delta K_{eş}$ değişimi başlangıçta $\Delta K_{eş}$=35.21 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında $\Delta K_{eş}$=55.35 MPa$\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.25. de 45º açılı çatlaklı numunenin da/dN çatlak ilerleme hızının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarları $\Delta K_{eş}$ e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi $\Delta K_{eş}$ arttıkça çatlak ilerleme hızı da artış göstermiştir.



Şekil 7.25. 45º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-$\Delta K_{eş}$ grafiği

45º açılı çatlaklı numune için elde edilen ΔG değerleri EK I d de verilmiştir. Başlangıçta ΔG değerleri 0,297 J/mm^2 iken, kırılma anında 0.735 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.26. da 45º açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir. Burada ΔG nin artışıyla da/dN nin de arttığı görülmektedir.



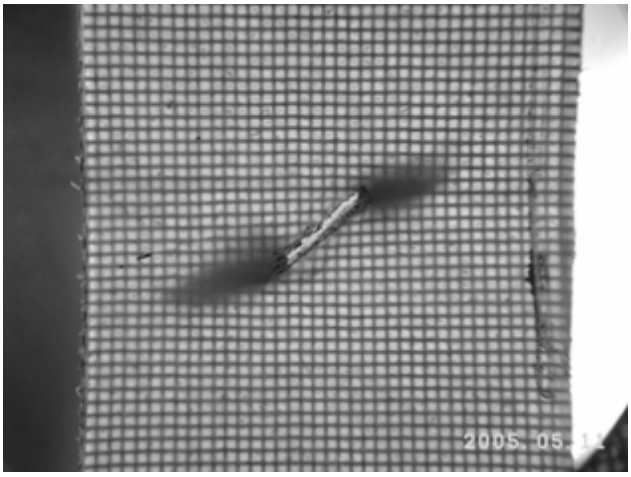
Şekil 7.26. 45º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔG grafiği

7.5.1. 45º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

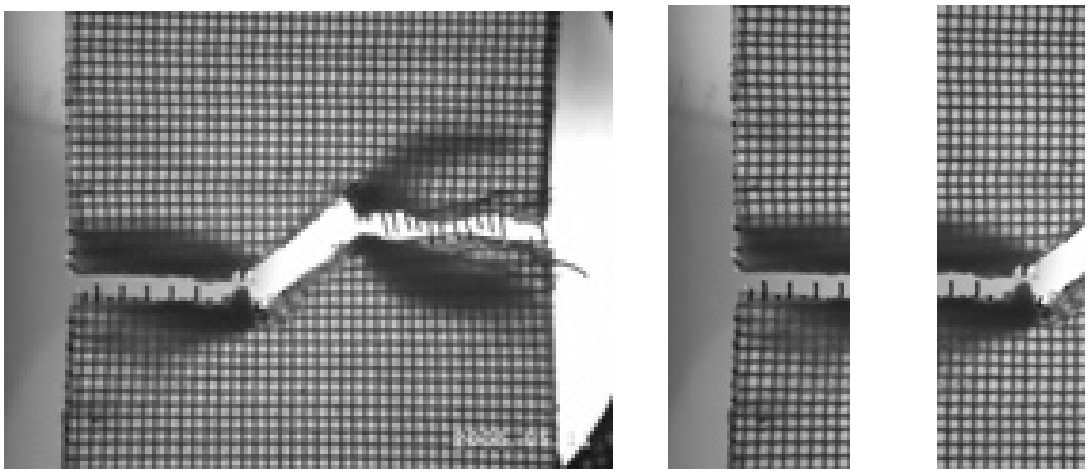
15º ve 30º açılı çatlaklı numunede olduğu gibi 45º açılı çatlaklı numunede de hasar mekanizması çatlak uçlarına yakın bölgelerde beyazlaşma ile başladı. Daha sonra matris malzeme de yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

Yorulma çevrim sayısı arttıkça matris içerisindeki çatlak yırtılması yatayla (-45º açıyla) yönlenerek ve kink yaparak yatayda devam etti. Bu sırada fiberde köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü. Şekil 7.27. ve şekil 7.28. de yönlenme, kink ve köprülenme olayı görülmektedir.

Sonra tel örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin kıvrım bölgesi uzayıp kısalırken eğilmeye maruz kaldığından, mikro çatlaklar oluşmuş ve daha sonra, yorulma çevrim sayısının artmasıyla birlikte bu çatlaklar büyüyerek teli kırmıştır. Ayrıca 0º, 15º ve 30º çatlaklı numunelere göre çatlak ilerlemesi daha yavaş oluşmuştur.



Şekil 7.27. 45º çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi



(a) (b) (c)

Şekil 7.28. Kırılma sonrası 45º çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

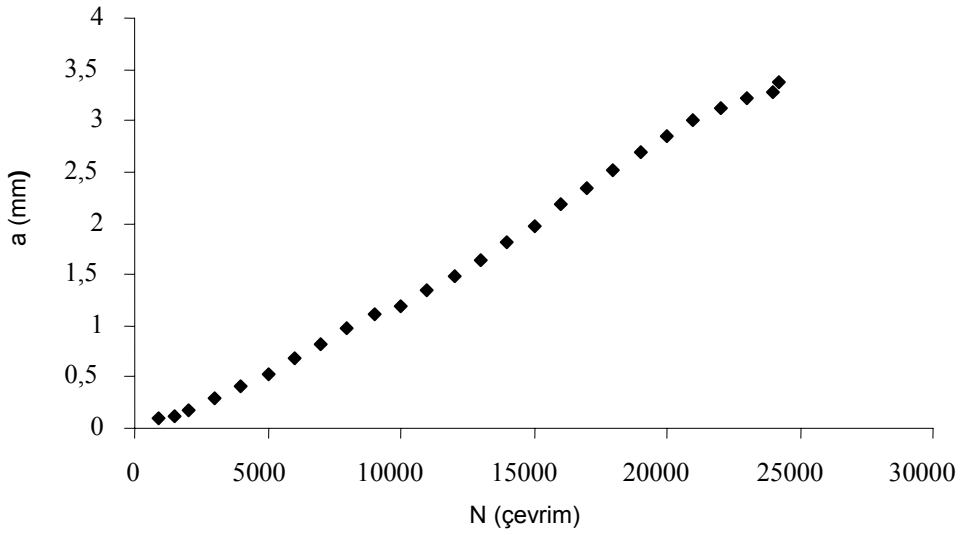
c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

Çatlak ilerlemesi yorulma çevrim sayısının artışıyla birlikte a=3.04 mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve aniden gürültüyle numune kopmuştur.

7.6. 60º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI

60º açılı çatlaklı numuneler R= 0.1 gerilme oranında ve f= 0.75 frekansta yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Öncelikle numune de 915 yorulma çevrim sayısında ve çatlak 0.1 mm ye ulaştığında yorulma ön çatlağı oluşmuş ve yorulma durdurulmuştur. Daha sonra normal yorulma deneyine geçilmiştir.

Diğer numunelerde de ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve yorulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.29. da verilmiştir. Bu grafikten çatlağın 22500 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlağın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.



Şekil 7.29. 60º açılı çatlaklı kompozit malzemenin (a-N) grafiği

60º açılı çatlaklı numunede ortalama 24170 çevrim sayısında çatlak 3.38 mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.

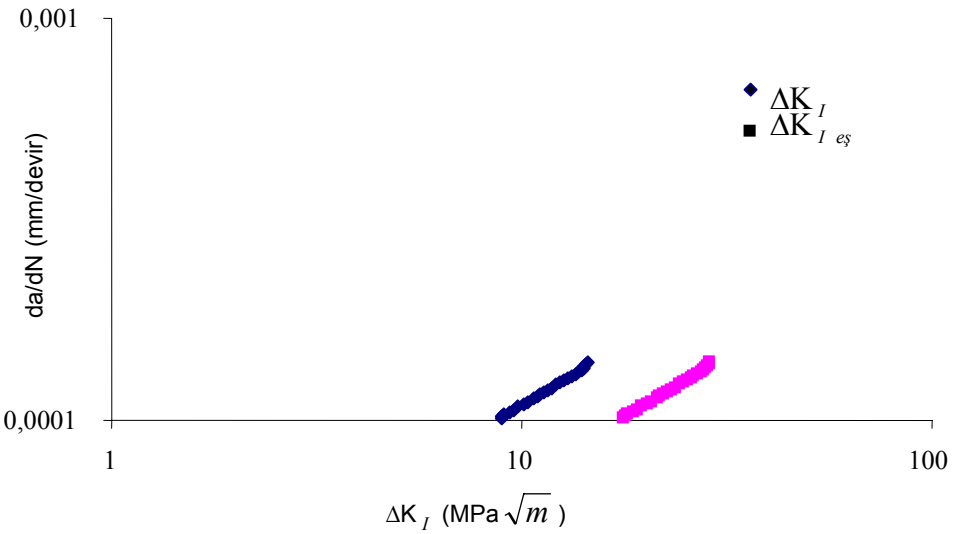
60º açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi 15º, 30º ve 45º olduğu gibi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde, -60º açı yapacak şekilde, kink yaparak ve bileşik mod oluşturarak ilerlemiştir. Diğer numuneler için

kullanılan eşitliklerden ΔK_I, $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_{II}, $\Delta K_{II\ eş}$ ve $\Delta K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I e de verilmiştir.

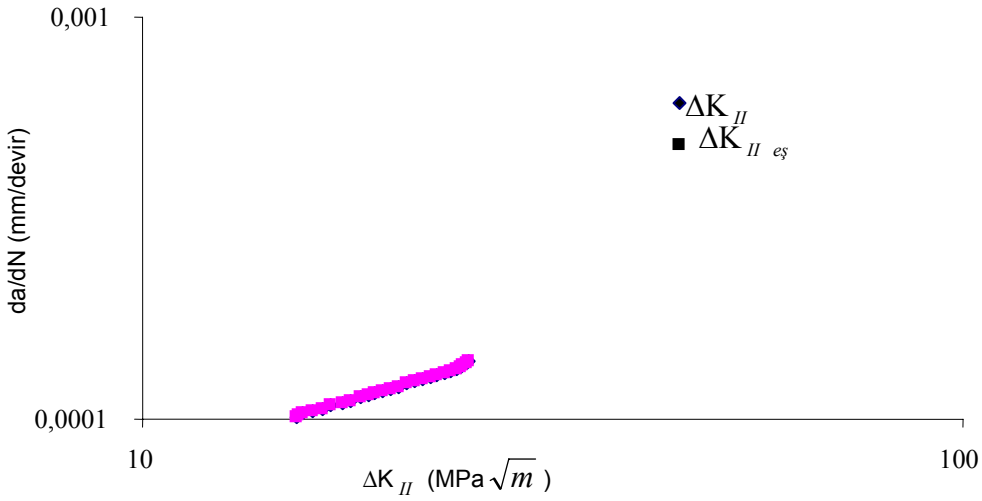
Şekil 7.30. da da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$ göre değişiminin grafiği logaritmik eksende gösterilmiştir. Başlangıçta ΔK_I=8.89 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=17.78 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ΔK_I=14.45 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=28.90 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Kink açısına bağlı olarak $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_I den büyük çıkmış, 15º, 30º ve 45º çatlaklı numunelere ait ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$'e göre değerler azalma göstermiştir. Bu da açının artmasıyla açılma modunun etkisinin azaldığını göstermektedir ve beklenen bir durumdur.

Şekil 7.31. de ise da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_{II} ve $\Delta K_{II\ eş}$ göre değişimi gösterilmiştir. Başlangıçta ΔK_{II}=15.40 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=15.40 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ΔK_{II}=25.03 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=25.03 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani $\Delta K_{II\ eş}$, ΔK_{II}'ye eşit çıkmıştır. 45º çatlaklı numunelerde ki ΔK_{II} ve $\Delta K_{II\ eş}$'e göre değerler azalma göstermiştir. Yani açılma ve kayma modlarının etkisi giderek azalmış ve çatlağın numune üzerinde ki yorulmaya etkisi de buna paralel olarak azalmıştır. Bu ise beklenen bir durum olup deney sonuçlarından elde edilen değerlerin tutarlılığını göstermektedir.

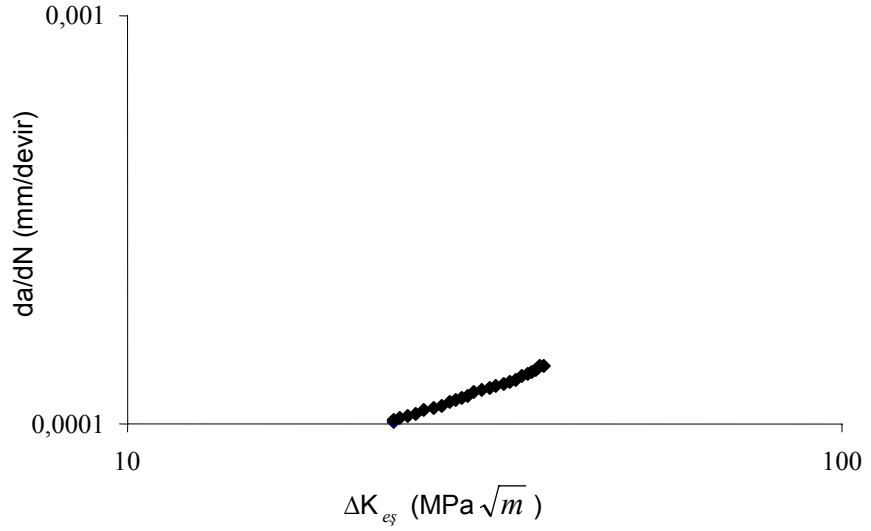
Bileşik mod da $\Delta K_{eş}$ değişimi çatlak ilerleme miktarı 0.1 mm iken $\Delta K_{eş}$=23.53 MPa$\sqrt{m}$ değerinden, çatlak ilerleme miktarı 3.38 mm ye ulaştığında $\Delta K_{eş}$=38.23 MPa$\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Ayrıca 45º açılı çatlaklı numune ye göre $\Delta K_{eş}$ değerleri azalma göstermiştir. Şekil 7.32. de 60º açılı çatlaklı numunenin da/dN çatlak ilerleme hızının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarları $\Delta K_{eş}$ e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi $\Delta K_{eş}$ arttıkça çatlak ilerleme hızı da artış göstermiştir.



Şekil 7.30. 60º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_I grafiği

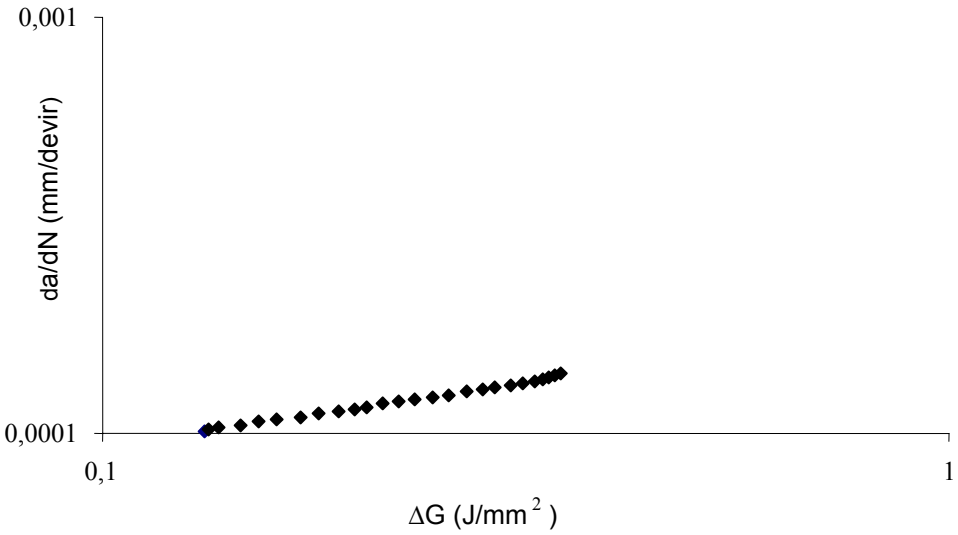


Şekil 7.31. 60º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_{II} grafiği



Şekil 7.32. 60º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-$\Delta K_{eş}$ grafiği

60º açılı çatlaklı numune için elde edilen ΔG değerleri EK I e de verilmiştir. Başlangıçta ΔG değerleri 0,132 J/mm^2 iken, kırılma anında 0.348 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Yine 45º açılı çatlaklı numunede ki değerlere göre, 60º açılı çatlaklı numuneninΔG değerlerinde beklenildiği gibi azalma görülmüştür. Şekil 7.33. de 60º açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir. Burada ΔG' nin artışıyla da/dN nin de arttığı görülmektedir.



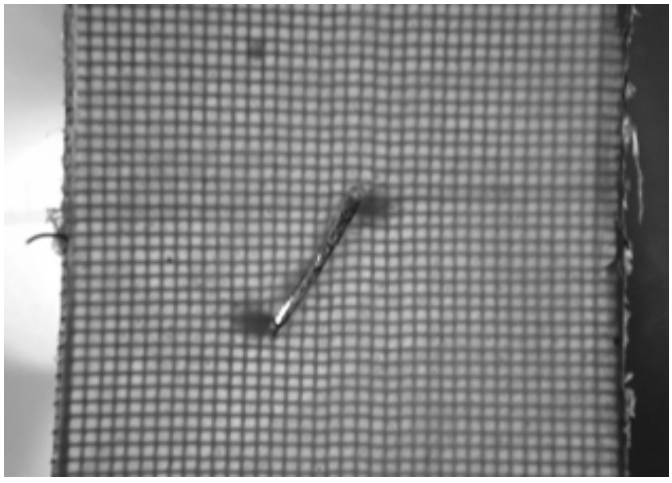
Şekil 7.33. 60º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔG grafiği

7.6.1. 60º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

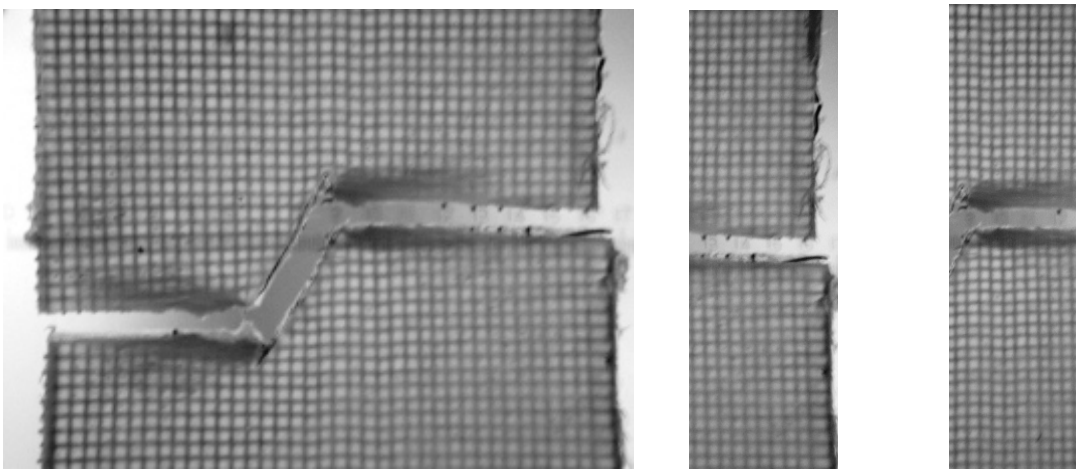
60º açılı çatlaklı numunede bileşik mod da (mod I ve mod II) hasar oluşmuştur. Hasar mekanizması incelenecek olursa, 60º açılı çatlaklı numune yorulmaya tabi tutulduğunda öncelikle çatlak uçlarına yakın bölgelerde beyazlaşma meydana geldi. Daha sonra matris malzeme de yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

Yorulma çevrim sayısı arttıkça matris içerisindeki çatlak yırtılması yatayla -60º açıyla yönlenerek ve kink yaparak yatayda devam etti. Bu sırada fiberde köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü. Şekil 7.34. ve şekil 7.35. de -60º açıyla yönlenme, kink ve köprülenme olayı görülmektedir.

Sonra tel örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin üzerinde ki kıvrım bölgesi uzayıp kısalırken eğilmeye maruz kaldığından, mikro çatlaklar oluşmuş ve daha sonra yorulma çevrim sayısının artmasıyla birlikte bu çatlaklar büyüyerek teli kırmıştır. Ayrıca 0º, 15º, 30º ve 45º çatlaklı numunelere göre çatlak ilerlemesi daha yavaş oluşmuştur.



Şekil 7.34. 60º çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi



(a) (b) (c)

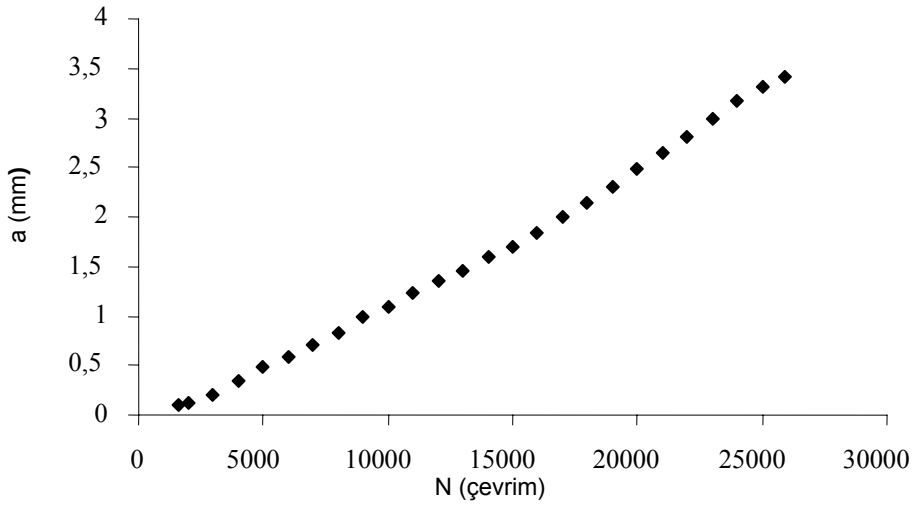
Şekil 7.35. Kırılma sonrası 60º çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri
a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi
b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması
c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

7.7. 75º ÇATLAKLI NUMUNELERDE YORULMA DENEY SONUÇLARI

75º açılı numuneler R= 0.1 gerilme oranında ve f= 0.75 frekansta yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Öncelikle bu numune de yorulma deneyi yapabilmek için yorulma ön çatlağı açılmış ve çatlak 1570 yorulma çevrim sayısında 0.1 mm ye ulaştığında yorulma durdurulmuştur. Daha sonra normal yorulma deneyine geçilmiştir.

Diğer açılı numunelerde ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve yorulma deneyi gerçekleştirilmiştir Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.36. da verilmiştir. Bu grafikten çatlağın 24500 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlağın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.

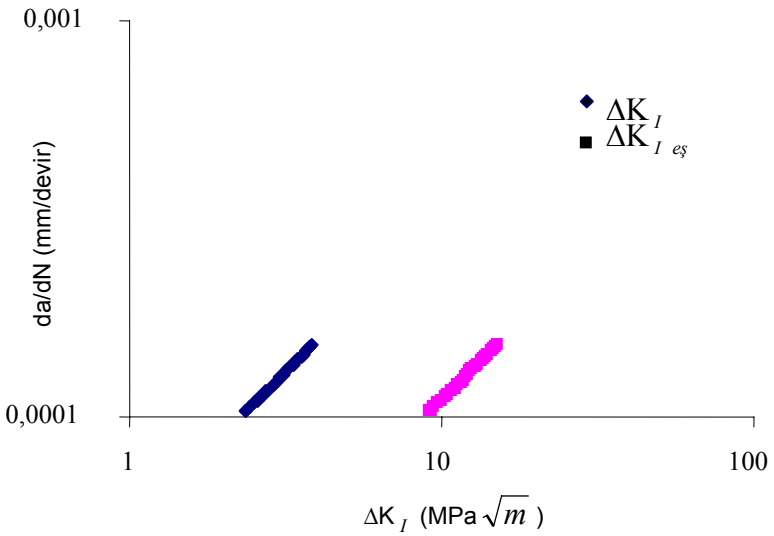
75º açılı çatlaklı numunede ortalama 25890 çevrim sayısında çatlak 3.42 mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.



Şekil 7.36. 75º açılı çatlaklı kompozit malzemenin (a-N) grafiği

75º açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi, diğer açılı çatlaklı numunelerde olduğu gibi çatlak düzlemi boyunca olmayıp, numune eksenine dik yönde ve -75º açıyla kink yapacak şekilde, bileşik mod da çatlak ilerlemesi gerçekleşmiştir. Yine diğer açılı çatlaklı numuneler için kullanılan eşitliklerden ΔK_I, $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_{II}, $\Delta K_{II\ eş}$ ve $\Delta K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I f de verilmiştir.

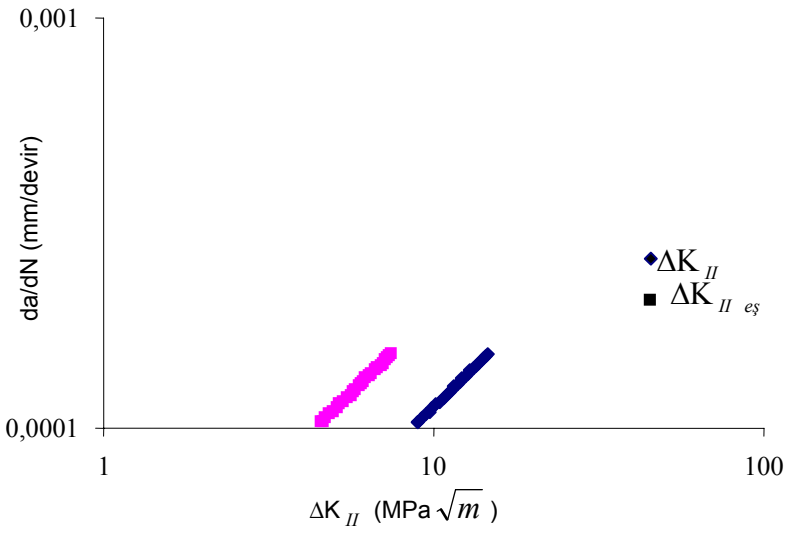
Çatlak miktarı ilerledikçe her bir gerilme şiddet faktörü değişim miktarı da artmıştır. Şekil 7.37. de da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$ göre değişimi değişiminin grafiği logaritmik eksende gösterilmiştir. Başlangıçta ΔK_I=2.34 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=9.20 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ΔK_I=3.82 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ eş}$=15.00 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani $\Delta K_{I\ eş}$, ΔK_I den büyük çıkmıştır. Burada gerek ΔK_I ve gerekse $\Delta K_{I\ eş}$'in artmasıyla çatlak ilerleme hızı da artmıştır. Yine burada beklenildiği gibi ΔK_I ve $\Delta K_{I\ eş}$, 60º açılı çatlaklı numunelerde ki değerlere göre azalmıştır. Böylece açılma modunun etkisinin gittikçe azaldığı anlaşılmaktadır.



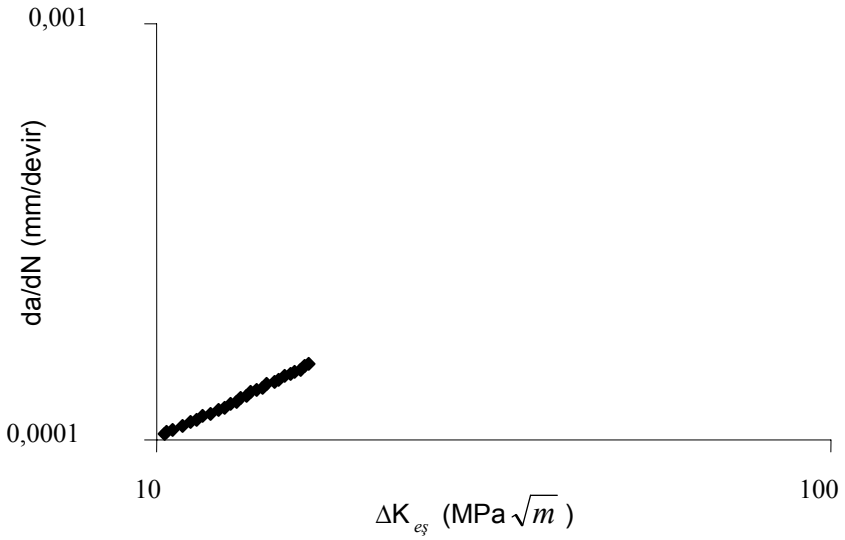
Şekil 7.37. 75º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_I grafiği

Şekil 7.38. de ise da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_{II} ve $\Delta K_{II\ eş}$ göre değişimi gösterilmiştir. Başlangıçta ΔK_{II}=8.89 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=4.58 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ΔK_{II}=14.50 MPa$\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ eş}$=7.47 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani ΔK_{II}, $\Delta K_{II\ eş}$ den daha büyük çıkmıştır. Ama her iki değerde 60º açılı çatlaklı numunelerde ki değerlere göre azalmıştır. Bu da açılma modunun etkisinin azalmasıyla beraber, kayma modunun etkisinin de iyice azaldığını göstermektedir. Şekil 7.38. incelendiğinde, gerek ΔK_{II} ve gerekse $\Delta K_{II\ eş}$ değerlerinin artmasıyla çatlak ilerleme miktarı da/dN de artmıştır. Ve numune diğerlerine göre daha yüksek çevrim sayılarında kırılmıştır.

75º açılı çatlaklı numunede bileşik mod da $\Delta K_{eş}$ değişimi başlangıçta $\Delta K_{eş}$=10.27 MPa$\sqrt{m}$ iken, kırılma anında ise $\Delta K_{eş}$=16.76 MPa$\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.39. da 75º açılı çatlaklı numunenin da/dN çatlak ilerleme hızının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarları $\Delta K_{eş}$ e göre değişimi gösterilmiştir. Yine $\Delta K_{eş}$ değerleri, 60º açılı çatlaklı numune de ki $\Delta K_{eş}$ değerlerine göre azalmıştır.



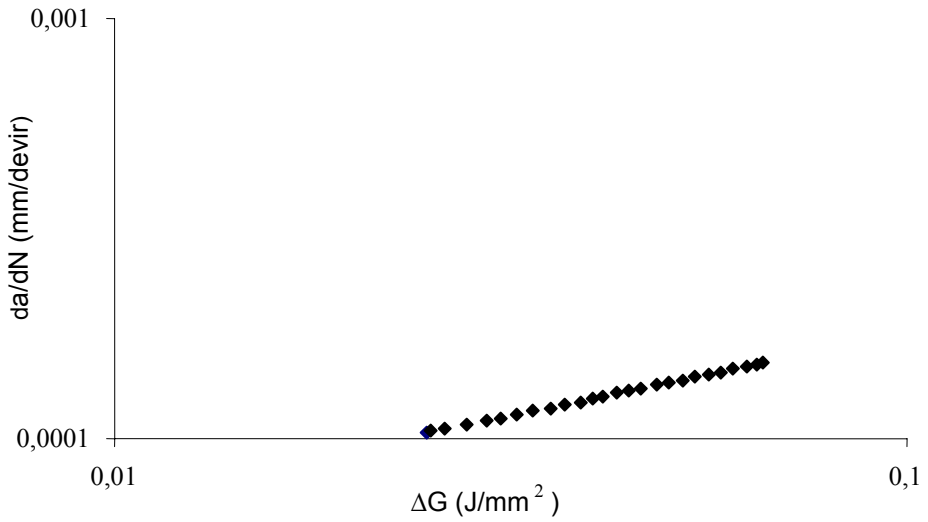
Şekil 7.38. 75º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔK_{II} grafiği



Şekil 7.39. 75º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-$\Delta K_{eş}$ grafiği

75º açılı çatlaklı numune için elde edilen ΔG değerleri EK I f de verilmiştir. Başlangıçta ΔG değerleri 0,025 J/mm^2 iken, kırılma anında 0.069 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.40. da 75º açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir. Burada ΔG nin artışıyla da/dN nin de arttığı görülmektedir. Yine ΔG değerleri 60º açılı çatlaklı numune için elde edilen ΔG

değerlerine göre azalmıştır. Grafiğin eğimi de azalma göstermiş, böylece kırılma daha yüksek çevrim sayılarında gerçekleşmiştir.



Şekil 7.40. 75º çatlaklı kompozit malzemenin da/dN-ΔG grafiği

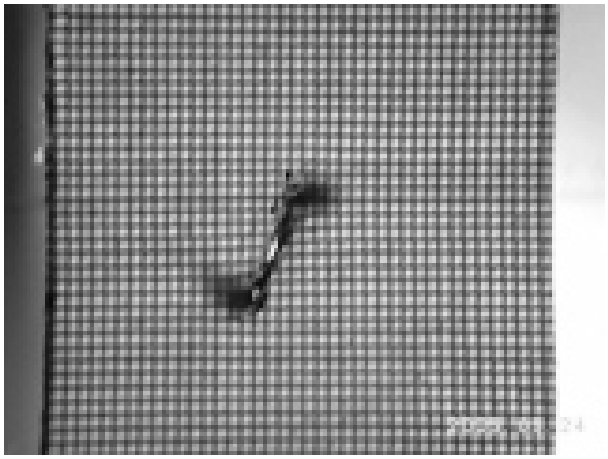
7.7.1. 75º Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

75º açılı çatlaklı numunede bileşik modda hasar oluşmuştur. Hasar mekanizması incelenecek olursa, 75º açılı çatlaklı numune yorulmaya tabi tutulduğunda öncelikle çatlak uçlarına yakın bölgelerde beyazlaşma meydana geldi. Daha sonra matris malzeme de yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

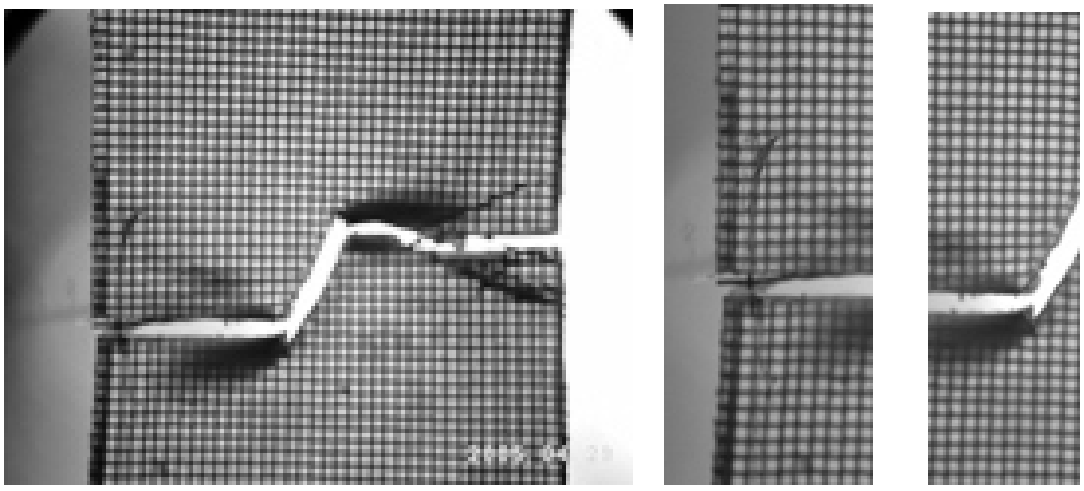
Şekil 7.41. ve şekil 7.42. de görüldüğü gibi yorulma çevrim sayısı arttıkça matris içerisindeki çatlak yırtılması da yatayla (-75º açıyla) yönlenerek ve kink yaparak yatayda devam etti. Bu sırada fiberde köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü.

Sonra tel örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin üzerinde ki kıvrım bölgesi uzayıp kısalırken eğilmeye maruz kaldığından, mikro çatlaklar oluşmuş ve daha sonra yorulma çevrim sayısının artmasıyla birlikte bu çatlaklar büyüyerek teli kırmıştır. Çatlak ilerlemesi yorulma çevrim sayısının artışıyla birlikte a=3.42 mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu

değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve aniden gürültüyle numune kopmuştur. Ayrıca 0º, 15º, 30º, 45 º ve 60º çatlaklı numunelere göre çatlak ilerlemesi daha yavaş oluşmuştur.



Şekil 7.41. 75º çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi



(a) (b) (c)

Şekil 7.42. Kırılma sonrası 75º çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

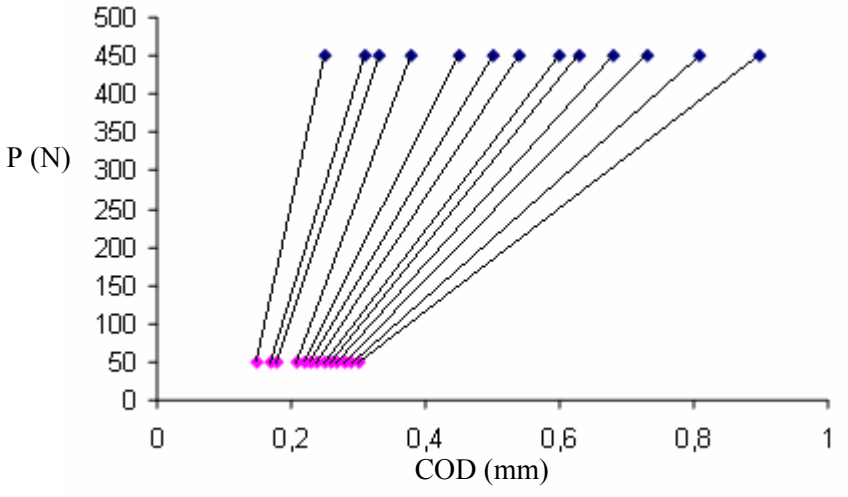
c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

7.8. 0º VE 60º ÇATLAKLI NUMUNELERDE KOMPLİYANS YÖNTEMİYLE ΔG' NİN İNCELENMESİ

Burada yukarıda LEKM ile hesaplanan ΔG değerleri, kıyaslanmak amacıyla 0º ve 60º ler için kompliyans yöntemiyle de hesaplanmış ve P-COD, C-a ve da/dN-ΔG grafikleri çizilmiştir. Hesaplar için eşitlik (5.20) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Ek I.a ve Ek I.e de verilmiştir.

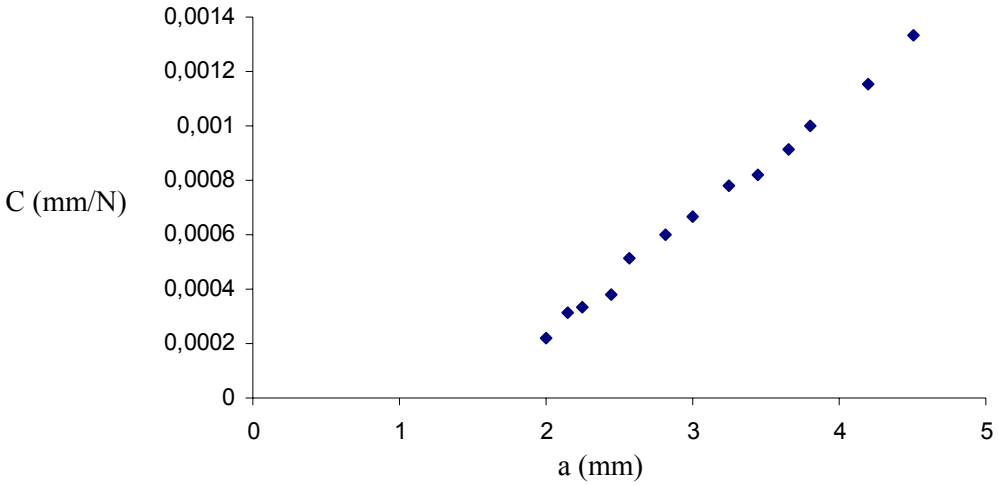
7.8.1 0º Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG'nin İncelenmesi

Burada 0º çatlaklı numune için kompliyans yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde öncelikle belli çevrim sayılarında 450 N luk (500 N - 50 N) P yorulma yüküne karşılık gelen çatlak ağzı açılma (COD) miktarları her 100 çevrimde bir el mikroskobuyla ölçülmüş ve dijital kamera ile de kayıt yapılmıştır. Sonra yapılan bu kayıtlarla ölçülen değerler kontrol edilmiştir. Eğer ölçülen değerlerle kameradan elde edilen değerler arasında fark varsa düzeltmeler yapılarak şekil 7.43 de görüldüğü gibi P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikte 0º çatlaklı numune için COD değerlerinin ilerlemesi gösterilmiştir, çatlak ilerlemeye başladığında COD=0,1 mm iken kırılma esnasında COD=0,62 mm olmuştur. Burada uygulanan yük 0º çatlak eksenine dik olduğundan COD değerleri de 0º çatlaklı numuneye göre büyük çıkmıştır.



Şekil 7.43. 0º çatlaklı numunenin P-COD grafiği

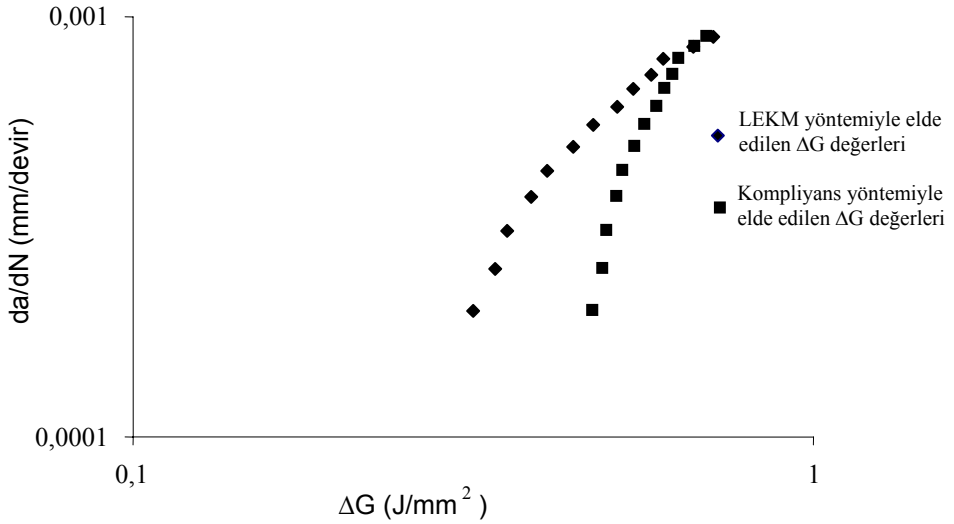
Elde edilen bu COD değerlerinden eşitlik (5.18) den, P-COD eğrisinin eğiminin tersi ya da COD/P olan ve kompliyans olarak tanımlanan, *C* değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen C değerlerinden, şekil 7.44.de görüldüğü üzere kompliyans ve çatlak ilerleme miktarı (C-a) grafiği oluşturulmuştur. Bu grafikten eşitlik (5.19) da kullanılmak üzere, kompliyans ve çatlak ilerleme değişim miktarı (dC/da) elde edilmiştir.



Şekil 7.44. 0º çatlaklı numunelerde C-a grafiği

Şekil 7.45 de 0º çatlaklı numune için kompliyans yöntemiyle ve LEKM kullanılarak elde edilmiş da/dN-ΔG grafikleri görülmektedir. Kompliyans yöntemiyle elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.19) dan hesaplanmıştır. Başlangıçta $\Delta G = 0{,}476$ J/mm^2 iken kırılma anında ise $\Delta G = 0{,}699$ J/mm^2 olarak bulunmuştur. Yine da/dN değeri başlangıçtan itibaren kopmaya gelinceye kadar sürekli artış göstermiştir. Böylece da/dN artarken, ΔG de artış göstermektedir. Buda kırılma olayının düşük yorulma çevrim sayılarında gerçekleşmesi ve hasarın çatlak ilerlemesinden kaynaklanacağı anlamına gelir.

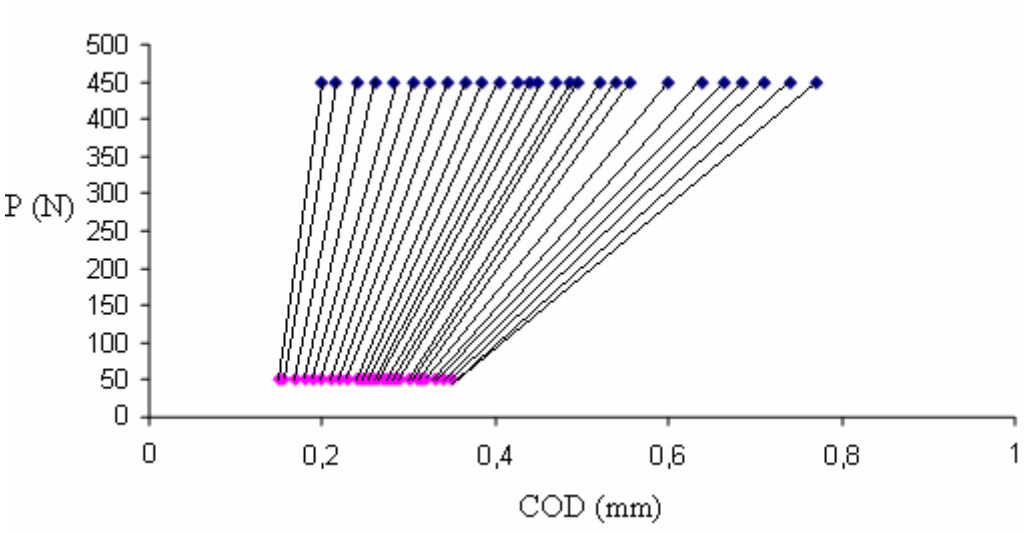
LEKM kullanılarak elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Yine LEKM kullanılarak oluşturulmuş ve şekil 7.44 de verilen 0º çatlaklı numune için da/dN-ΔG grafiği incelenecek olursa, başlangıçta $\Delta G = 0{,}316$ J/mm^2 iken kırılma anında ise $\Delta G = 0{,}712$ J/mm^2 olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi elde edilen değerler birbirine oldukça benzer ve yakındır.



Şekil 7.45. 0º çatlaklı numunelerde da/dN-ΔG grafiği

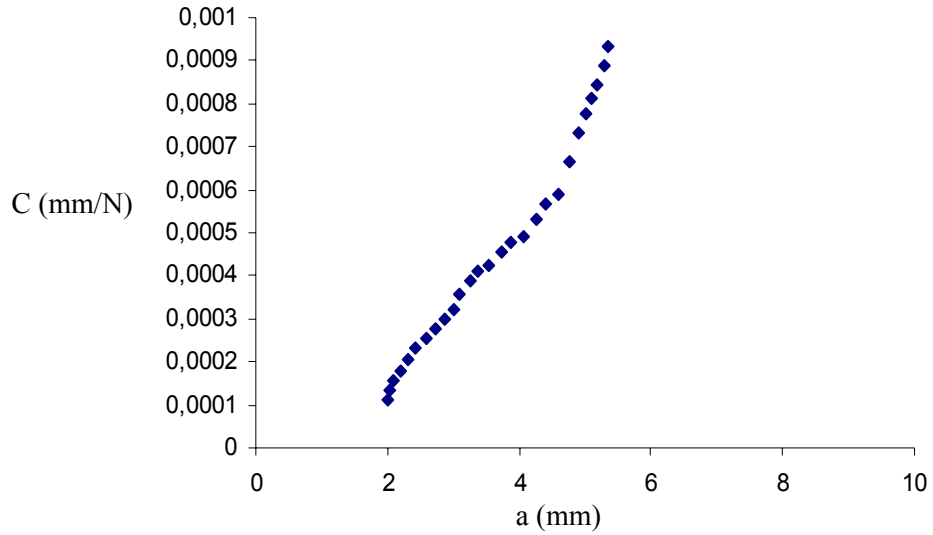
7.8.2 60º Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG'nin İncelenmesi

Burada 60º çatlak için kompliyans yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde 0º için uygulanan ölçme ve kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Şekil 7.46 da görüldüğü gibi P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikte 60º çatlak için COD değerlerinin ilerlemesi gösterilmiştir, çatlak ilerlemeye başladığında COD=0,05 mm iken kırılma esnasında COD=0,42 mm olmuştur. COD değerleri 0º ye göre azalmıştır. Bu da beklenen bir durum olup çatlak açısı ile ilgilidir.



Şekil 7.46. 60º çatlaklı numunenin P-COD grafiği

Elde edilen bu COD değerlerinden 0º için kullanılan eşitlikler kullanılarak kompliyans (*C)* değerleri hesaplanmıştır. Yine 0º olduğu gibi bulunan bu C değerlerinden, şekil 7.47.de görülen kompliyans ve çatlak ilerleme miktarı (C-a) grafiği çizilmiştir. Bu grafikten de, kompliyans ve çatlak ilerleme değişim miktarı (dC/da) elde edilmiştir.

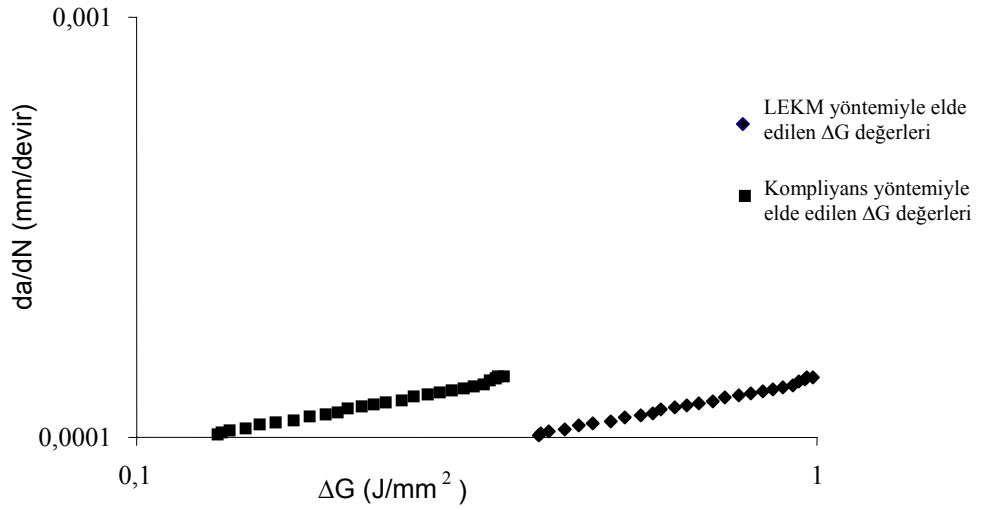


Şekil 7.47. 0º çatlaklı numunelerde C-a grafiği

Şekil 7.48 de 60º çatlaklı numune için kompliyans yöntemiyle ve LEKM kullanılarak elde edilmiş da/dN-ΔG grafikleri görülmektedir. Başlangıçta ΔG =0,390 J/mm^2 iken kırılma anında ise ΔG=0,989 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Yine da/dN değeri başlangıçtan itibaren kopmaya gelinceye kadar sürekli artış göstermiştir. Böylece da/dN artarken, ΔG de artış göstermektedir. Buda kırılma olayının düşük yorulma çevrim sayılarında gerçekleşmesi ve hasarın çatlak ilerlemesinden kaynaklanacağı anlamına gelir.

LEKM kullanılarak elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Yine LEKM kullanılarak oluşturulmuş ve şekil 7.46 da verilen 60º çatlaklı numune için da/dN-ΔG grafiği incelenecek olursa, başlangıçta ΔG=0,132 J/mm^2 iken kırılma anında ise ΔG=0,348 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi elde edilen değerler beklenildiği gibi birbirine yakın olmasına rağmen 0º çatlaklı

numunede ki değerlere göre sapma göstermiştir. Bu da numunenin çatlak açısı büyüdükçe COD değerlerinin küçük çıkmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.48. 60º çatlaklı numunelerde da/dN-ΔG grafiği

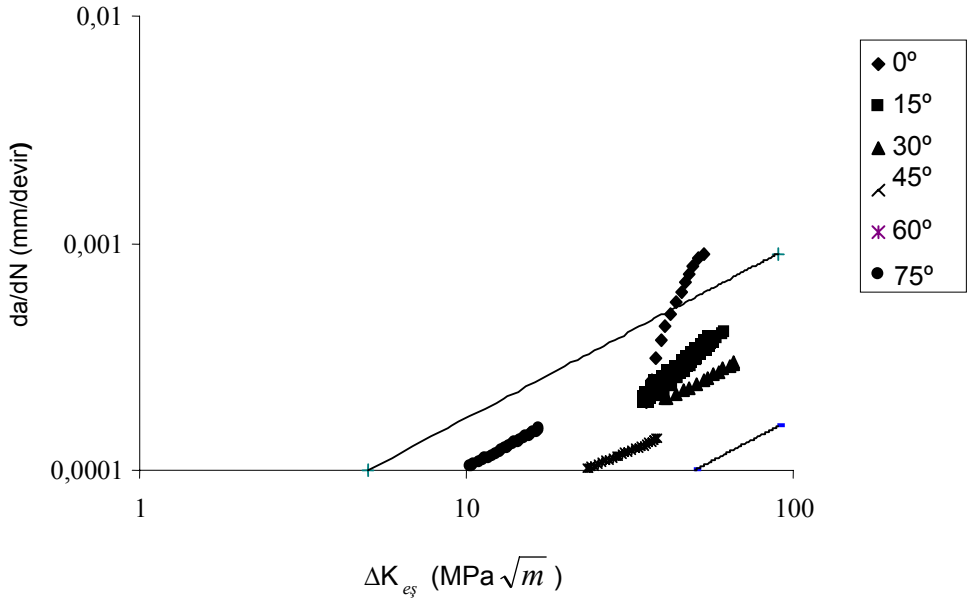
7.9 TÜM ÇATLAK AÇILARINDA GRAFİKLERİN KIYASLANMASI

Burada 0º, 15º, 30º, 45º, 60º ve 75º çatlaklı numunelere ait da/dN~ΔK ve da/dN~ΔG grafiklerinin kıyaslanması ve Paris-Erdoğan eşitliği kullanılarak malzeme sabitlerinin bulunması amacıyla da/dN-$\Delta K_{eş}$, ve da/dN-ΔG grafikleri gösterilmiştir.

7.9.1 Tüm Çatlak Açılarında (da/dN~$\Delta K_{eş}$) Grafikleri'nin Kıyaslanması

Burada 0º, 15º, 30º, 45º, 60º ve 75º çatlaklı numunelere ait da/dN~$\Delta K_{eş}$ grafikleri şekil 7.47 de gösterilmiştir. Şekiller incelenecek olursa 0º de $\Delta K_{eş}$ değerlerinin en büyük eğime sahip olduğu, çatlak açılarının artmasıyla, eğimlerin de sırasıyla azaldığı açıkça görülmektedir. Sonuç olarak çatlak oryantasyon açılarının değişimi ile çatlak ilerleme hızı azalırken yorulma ömrü artmakta ve buna paralel olarak da $\Delta K_{eş}$ değerleri de azalmaktadır. Yine $\Delta K_{eş}$ değerleri 30º'ye kadar artmış daha sonra çatlak oryantasyon açılarının artmasıyla azalmıştır.

Ayrıca da/dN~$\Delta K_{eş}$ grafikleri, eşit yönlü iki doğru çizilerek bant içerisine alınmıştır. Bu doğruların denklemi y=4E-05$X^{0,7602}$ olarak bulunmuştur ve eşitlik (4.5) de verilen (da/dN=A$(\Delta K)^n$) Paris-Erdoğan eşitliğine denktir. Buradan; malzeme sabitleri olan A=4E-05 ve n=0,7602 olarak elde edilmiştir.

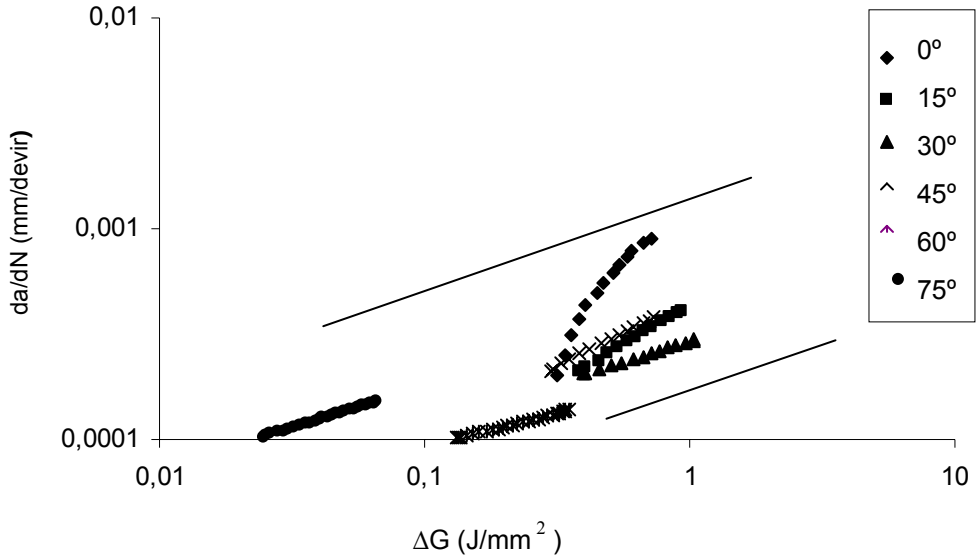


Şekil 7.47. 0º, 15º, 30º, 45º, 60º ve 75º çatlaklı numunelerde da/dN-$\Delta K_{eş}$ grafiği

7.9.2 Tüm Çatlak Açılarında (da/dN~ΔG) Grafikleri'nin Kıyaslanması

Burada tüm geometrilere ait da/dN~ΔG grafikleri şekil 7.48 de gösterilmiştir. Şekiller incelenecek olursa 0º de ΔG değerlerinin en büyük eğime sahip olduğu, çatlak açılarını artmasıyla, eğimlerin de sırasıyla azaldığı açıkça görülmektedir. Sonuç olarak çatlak açılarının değişimi ile çatlak ilerleme hızı azalırken yorulma ömrü artmaktadır. ΔG değerleri de 30º çatlak açılarına kadar artmakta, 45º, 60º ve 75º ler de azalmaktadır.

Ayrıca da/dN~ΔG grafikleri, eşit yönlü iki doğru çizilerek bant içerisine alınmıştır. Bu doğruların denklemi y=4E-04$X^{0.3914}$ olarak bulunmuştur ve eşitlik (4.6) da verilen (da/dN=B$(\Delta G)^m$) Paris-Erdoğan eşitliğine denktir. Buradan; malzeme sabitleri olan B=4E-05 ve m=0,3914 olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.48. 0º, 15º, 30º, 45º, 60º ve 75º çatlaklı numunelerde da/dN-ΔG grafiği

8.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, krom-nikel örgü tel takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen kompozit malzemenin yorulma yükü altında kırılma davranışları incelenmiştir. Önce malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiş daha sonra 0º, 15º, 30º, 45º, 60º ve 75º açılarda merkez çatlakları açılmıştır. Tüm açılardaki çatlaklı numuneler için yorulma deneyleri yapılmış ve kırılma davranışları incelenmiştir. Tüm yorulma deneyleri ASTM E 647 standartlarına uyularak, f=0.75 Hz' lik bir frekans ve gerilme oranı R=0.1 şatlarında yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır.

1- Kırılma anındaki yorulma çevrim sayısı 0º, 15º, 30º, 45º, 60º ve 75º lik numunelerde, aynı sırayla giderek artmıştır. Beklenildiği gibi en düşük çevrim sayısı 0º de ki numunede olurken, en yüksek çevrim sayısı da 75º de ki numunede gerçekleşmiştir.
2- Kompozit malzemenin kırılma anındaki yorulma çevrim sayısı, fiber olarak kullanılan krom nikel tel örgüden, yaklaşık 16 kat fazla gerçekleşmiştir.
3- Yorulma çevrim sayıları arttıkça x-eksenine dikey konumda olan teller çatlak ilerleme miktarına ve matris ayrılmasına bağlı olarak kopmuştur. Kırılma anında stabil olmayan çatlak ilerlemesi oluştuğu için malzemede ki kalan fiber teller topluca kopmuş, bu esnada matris de ayrılarak, kırılma olayı gerçekleşmiştir.
4- Genel olarak çatlak ilerleme miktarı arttıkça, çatlak ilerleme hızı da (da/dN) artmaktadır. Ancak hız değişimindeki artış çatlak oryantasyon açısının artmasıyla azalmaktadır.
5- 0º de ki çatlaklı numunelerde uygulanan yük çatlağa dik olduğundan sadece açılma modundan dolayı hasar oluşmuş, diğer açılarda ise bileşik mod da; yani açılma ve kayma modlarında gerçekleşmiştir. Ayrıca 0º açılı

çatlaklı numune hariç diğer çatlak oryantasyon açılarında, çatlak ilerlemesi, yatay da devam ederek kink olayı meydana gelmiştir.

6- Sole fonksiyonları yardımıyla tüm çatlak açılarındaki numuneler için $\Delta K_{eş}$ değerleri hesaplanmış ve tüm çatlak açılarındaki numuneler için da/dN-$\Delta K_{eş}$ grafiklerinden Paris-Erdoğan denklemiyle malzeme sabitleri olan A=4E-05 ve n=0,7602 olarak elde edilmiştir

7- Şekil değiştirme enerji boşalma hız değişimi ΔG nin değerleri, 0º den sonra dalgalı bir seyir göstermesine rağmen giderek artış göstermiştir. Yine aynı şekilde da/dN-ΔG grafiklerindeki en yüksek eğim 0º de oluşmuş ve diğer açılarda giderek azalma göstermiştir.

8- Kompliyans yöntemi ve ΔK'nın kullanılmasıyla yapılan hesaplamalardan oluşturulan da/dN-ΔG grafiklerindeki eğimlerde birbirlerine yakın denecek şekilde çıkmıştır.

9- Tüm çatlak açılarındaki numuneler için da/dN-ΔG grafiklerinden Paris-Erdoğan denklemiyle malzeme sabitleri olan B=4E-05 ve m=0,3914 olarak elde edilmiştir.

10- Kompozit malzemenin kendisini oluşturan malzemelere göre mekanik özellikleri geliştirilmiştir. Bu sebeple üretilen kompozit malzeme özellikle otomotiv gövde panelleri, mutfak eşyaları, ambalaj malzemeleri, boru ve tank üretimi gibi birçok alanda, daha güvenli bir şekilde kullanılabilir hale gelmiştir.

Mevcut çalışmaya ilave olarak, farklı yük ve R oranlarında deneyler yapılarak da bunların etkileri açısından araştırma yapılabilir. Ayrıca deneyler, farklı kompozit malzemeler için tekrarlanabileceği gibi, tüm çatlak geometrileri içinde bu deneysel çalışma tekrarlanabilir. Yine sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak, deney sonuçları teorik sonuçlarla da kıyaslanabilir.

9. KAYNAKLAR

Akdemir, A., Tarakçıoğlu, N., Avcı, A., 2001, Stress Corrosion Crack Growth in Glass/Polyester Composites with Surface Crack, Composites Part B Vol. 32, p. 123–129.

Anderson, T. L., 1991, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, CRC Press, Boston.

Arıkan, H., 2002, Çelik Tel Takviyeli Polimer Kompozitlerin Kırılma Davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bil.Ens., Konya.

ASTM E 647, 2000, The Middle Tension Specimens, p. 616-619.

Beaumont, W. R., Schults, M., Friedrich, K., 1990, Failure Analysis of Composite Materials, Technomic Publishing Co.

Czigany T, Karger-Kocsis J. 1993, Determination of The Damage Zone size in Textile Fabric Reinforced Polypropylene Composites by Locating The Acoustic Emission, Polym and Polym Compos., Vol. 1(5), p. 329.

Çep, H.; Zeytin, S., Alper, S., 2002, Fatigue at Elevated Temperature, Metal Dünyası, Vol.109, p. 72.

Devranjsih, R., 1997, Development of a New Fatigue Damage Growth Model for Polymer Matrix Composites, Ph.D. Thesis, University of Wayne State.

Dieter, G.E:, 1988, Mechanical Metallurgy, 4th. Ed. Mc Graw Hill Book Co., p. 394-430, Tokyo.

Ewalds, H.L., Wanhill R.J.H., 1985, Fracture Mechanics, Edward Arnold Ltd., London.

Ferreira, J., Costa, J., Richardson, M., 1997, Effect of Notch Conditions on The Fatigue of a Glass-Fibre-Reinforced polypropylene Composite , Composites Science And Technology, Vol. 57, p. 1243-1248.

Ferreira, J., Costa, J., Reis, P., Richardson, M., 1999, Analysis of Fatigue and Damage in Glass-Fibre-Reinforced Polypropylene Composite Materials, Composites Science and Technology, Vol. 59, p. 1461-1467,

Favier, V., Giroud, T., Sell, G.C.,Goldberg, A., 2001, Slow Crack Propagation in Polyethylene Under Fatigue at Controlled Stress Intensity, Polymer Vol. 43, p. 1375-1382.

Günaydın, B., 2003, Yüzey Çatlaklı Cam Polyester Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak İlerlemesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bil.Ens.

Irwin, G.R., 1957, Analysis of Stress and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate, Journal of Applied Mechanics. Vol. 24, p. 651-654.

Jones, M.R., 1998, Mechanics of Composite Materials, Virginia Polytechnic Institute, Virginia.

Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, F., 1983, Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İTÜ Matbaası, s. 91-94. İstanbul.

Krujjer M.P., Warnet L.L., Akkerman R., 2005, Modelling of the Viscoelastic Behaviour of Steel Reinforced Thermoplastic Pipes, Composites, Part A, p 356-367.

Lacroix F.V., Loos J., Schulte K., 1998, Morphological Investigations of Polyethylene Fibre Reinforced Polyethylene, Polymer, Vol 40, p 843-847.

Lin, X. B., Smith, R.A., 1999, Finite Element Modelling of Fatigue Crack Growth of Surface Cracked Plates Part III, Engineering Fracture Mechanics, Vol.63, p. 541-556.

Lhymn, C., Schultz, M., 1983, Fracture Behaviour of Collimated Thermo Plastic Polyethylene Terephthalate Reinforced with Short E-glass Fibre, Journal of Materials Science, Vol 18, p. 2029-2046.

Nalla, R.K., Campell, J.P., Rtchie, R.O., 2002, Mixed-Mode High Cycle Fatigue Crack Growth Thresholds in Ti-6Al-4V Role of Small Cracks, International Journal of Fatigue, Vol. 24, p. 1047-1062.

Nesar, M., Saghir, F., Khan, Z., Bazuone, A., 2004, A Study of Frequency and Temperature Effects on Fatigue Crack Growth Resistance of CPVC, Engineering Fracture Mechanics Vol. 72, p. 1691-1701.

Newman, J.C., Raju, I.S., 1979, Analysis of Surface Cracks in Finite Plates Under Tension or Bending Loads, NASA TP 1578.

Oğuz, A.,1996, Kırılma Mekaniğine Giriş, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Nicholas T., Hutson A., John R., Olson S., 2003, A Fracture Mechanics Methodology Assesment for Fretting Fatigue, International Journal of Fatigue Vol. 25, p. 1069-1077.

Paris, P.C., Sih, G.C.M., 1965, Stress Analysis of Cracks, Symposium on Fracture Toughness and its Applications, ASTM STP 381, p. 30-83.

Peled, A., Bentur, A., 2002, Fabric Structure and Its Reinforcing Efficiency In Textile Reinforced Cement Composites, Composites Part A Vol 34, p. 107-118.

Pook, L.P.,1971, The Effect of Crack Angle on Fracture Toughness, Engineering Fracture Mechanics, Vol 3, p. 205-218.

Pradhan, S.C., Lam, K.Y. Tay, T.E., 2000, Determination of Fracture Parameters of Laminated Thermoplastic Composite Materials: A Finite Element Approach, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 20, p. 395-401.

Samancı, A., 2004, Yüzey Çatlaklı Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bil.Ens., Konya.

Shan, Y., Kin, L., 2002, Environmental Fatigue Behavior and Life Prediction of Unidirectional Glass–Carbon/Epoxy Hybrid Composites, International Journal of Fatigue, Vol 24, p. 847–859.

Stevanovic, D., Jar, B., Lowe, A, Kalyanasandaram, S., 2000, On Crack Initiations Conditions for Mode I and Mode II Delemination Testing of Composite Materials, Composites Science and Technology. Vol. 60, p. 1879-1887.

Sun, W., 1997, Effect of an Interlaminar Adhesive on the Yielding Behaviour of Al/fiber Reinforced Thermoplastic Composite Laminates, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 10.

Şahin, Y., 2000, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara.

Savaşcı, Ö.T., Uyanık, N., Akovalı, G., 2002, Plastikler ve Plastik Teknolojisi, Pagev Yayınları.

Thomason, J.L., 2002, Micromechanical Parameters from Macromechanical Measurements on Glass Reinforced Polypropylene, Composites Science and Technology Vol. 62, p.1455–1468.

Tong, J., 2002, Characteristics of Fatigue Crack Growth in GFRP Laminates, International Journal of Fatigue, Vol. 24, p. 291–297.

Tüfekçioğlu E., Yamalı A., Markoviç E., Koltuksuz H., Özerdoğan S., Yüksek Yoğunluklu Polietilen ve Plastiklerin Özellikleri ile İşletme Teknolojileri, ALPET Yayın No 8, İzmir.

Yan Xiangiao, 2005, Stress Intensives and Propagation of Mixed Mode Cracks, Engineering Failure Analysis. Vol.XX, p. XX.

10. EKLER

EK I a 0º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm^2)	COD (mm)	C (mm/N)	dc/da (1/N)	Komliyans yöntemiyle bulunanΔG (J/mm^2)
0	0	0,0002	35,57606	0,316414	0,1	0,000222	0,000064	0,47616
425	0,15	0,000251	36,88611	0,340146	0,14	0,000311	6,58E-05	0,489552
925	0,25	0,000311	37,73423	0,355968	0,15	0,000333	0,000067	0,49848
1425	0,44	0,000371	39,29527	0,38603	0,17	0,000378	6,93E-05	0,515443
1925	0,57	0,000431	40,32857	0,406598	0,23	0,000511	7,08E-05	0,52705
2425	0,81	0,000491	42,16976	0,444572	0,27	0,0006	7,37E-05	0,548477
2925	1	0,000551	43,57226	0,474635	0,3	0,000667	0,000076	0,56544
3425	1,25	0,000611	45,35166	0,514193	0,35	0,000778	0,000079	0,58776
3925	1,44	0,000671	46,65867	0,544258	0,37	0,000822	8,13E-05	0,604723
4425	1,65	0,000731	48,06197	0,577488	0,41	0,000911	8,38E-05	0,623472
4925	1,8	0,000791	49,03977	0,601225	0,45	0,001	8,56E-05	0,636864
5425	2,2	0,000851	51,55675	0,664525	0,52	0,001156	9,04E-05	0,672576
5775	2,5	0,000893	53,36673	0,712002	0,6	0,001333	0,000094	0,69936

EK I b 15º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ eş}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{II\ eş}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{eş}$ (MPa $\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm^2)
685	0,1	0,00021233	34,01219	9,113664	35,19132	17,63786	39,36398	0,381159
1000	0,23	0,000218	35,04921	9,391534	36,26428	18,17562	40,56416	0,404756
2000	0,5	0,000236	37,11055	9,943878	38,39709	19,24459	42,94986	0,453766
3000	0,7	0,000254	38,56654	10,33401	39,90356	19,99962	44,63495	0,49007
4000	0,95	0,000272	40,31268	10,8019	41,71023	20,90513	46,65584	0,535451
5000	1,2	0,00029	41,98631	11,25035	43,44188	21,77303	48,59282	0,580834
6000	1,45	0,000308	43,59578	11,68161	45,10715	22,60766	50,45554	0,626218
7000	1,7	0,000326	45,14796	12,09752	46,71314	23,41258	52,25195	0,671604
8000	1,95	0,000344	46,64857	12,49962	48,26577	24,19076	53,98868	0,716991
9000	2,3	0,000362	48,67185	13,04176	50,35919	25,23998	56,33032	0,780535
10000	2,6	0,00038	50,34149	13,48915	52,08672	26,10581	58,26268	0,835005
11000	2,97	0,000398	52,32751	14,0213	54,14158	27,13571	60,56119	0,902188
11372	3,1	0,0004047	53,00766	14,20355	54,84532	27,48842	61,34837	0,925793

EK I c 30º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa$\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa$\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ eş}$ (MPa$\sqrt{m}$)	$\Delta K_{II\ eş}$ (MPa$\sqrt{m}$)	$\Delta K_{eş}$ (MPa$\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm^2)
730	0,1	0,00020584	26,68204	15,40443	30,80887	26,68126	40,7563	0,401031
1000	0,15	0,000208	27,01353	15,59581	31,19162	27,01273	41,26263	0,411057
2000	0,4	0,000216	28,61342	16,51948	33,03896	28,61258	43,70643	0,461189
3000	0,65	0,000224	30,1285	17,39419	34,78837	30,12761	46,02069	0,511323
4000	0,9	0,000232	31,57099	18,22698	36,45397	31,57006	48,22407	0,561457
5000	1,2	0,00024	33,21944	19,17869	38,35738	33,21847	50,74205	0,62162
6000	1,5	0,000248	34,78993	20,08539	40,17077	34,78891	53,14094	0,681784
7000	1,75	0,000256	36,04648	20,81083	41,62167	36,04542	55,06029	0,731923
8000	2	0,000264	37,26072	21,51185	43,02371	37,25962	56,91502	0,782064
9000	2,3	0,000272	38,66756	22,32407	44,64814	38,66643	59,06394	0,842235
10000	2,6	0,00028	40,02505	23,10779	46,21559	40,02387	61,13747	0,902409
11000	3	0,000288	41,76655	24,11322	48,22644	41,76532	63,79759	0,982646
12000	3,3	0,000296	43,02652	24,84064	49,68129	43,02526	65,72217	1,042827
12462	3,36	0,0002997	43,27412	24,98359	49,96719	43,27285	66,10037	1,054864

EK I d 45º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa$\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa$\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ eş}$ (MPa$\sqrt{m}$)	$\Delta K_{II\ eş}$ (MPa$\sqrt{m}$)	$\Delta K_{eş}$ (MPa$\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm^2)
630	0,1	0,00020882	17,78803	17,78803	24,90324	24,90324	35,2185	0,297682
1000	0,15	0,000214	18,00902	18,00902	25,21262	25,21262	35,65604	0,305125
2000	0,3	0,000228	18,65629	18,65629	26,11881	26,11881	36,93757	0,327452
3000	0,45	0,000242	19,28185	19,28185	26,99459	26,99459	38,17612	0,34978
4000	0,69	0,000256	20,2426	20,2426	28,33964	28,33964	40,0783	0,385505
5000	0,9	0,00027	21,04733	21,04733	29,46626	29,46626	41,67158	0,416765
6000	1,2	0,000284	22,1463	22,1463	31,00481	31,00481	43,84743	0,461423
7000	1,5	0,000298	23,19329	23,19329	32,4706	32,4706	45,92036	0,506083
8000	1,75	0,000312	24,03099	24,03099	33,64338	33,64338	47,57892	0,543301
9000	1,98	0,000326	24,77669	24,77669	34,68737	34,68737	49,05535	0,577542
10000	2,2	0,00034	25,46957	25,46957	35,6574	35,6574	50,42719	0,610296
11000	2,6	0,000354	26,68336	26,68336	37,35671	37,35671	52,83036	0,669851
12000	2,84	0,000368	27,38586	27,38586	38,34021	38,34021	54,22124	0,705586
12850	3,04	0,0003799	27,95782	27,95782	39,14095	39,14095	55,35366	0,735367

EK I e 60º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevri)	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ eş}$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K_{II\ eş}$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K_{eş}$ MPa $\sqrt{m}$
915	0,1	0,000101	8,89401429	15,404433	17,78725	15,40443	23,53046
1500	0,12	0,000102	8,938375928	15,481267	17,87597	15,48127	23,64783
2000	0,18	0,000103	9,070159502	15,709516	18,13952	15,70952	23,99648
3000	0,3	0,000105	9,328144753	16,156347	18,65547	16,15635	24,67902
4000	0,41	0,000106	9,558518447	16,555354	19,1162	16,55535	25,28851
5000	0,53	0,000108	9,803665438	16,979949	19,60647	16,97995	25,93708
6000	0,69	0,00011	10,12129982	17,530091	20,24171	17,53009	26,77743
7000	0,82	0,000111	10,37222127	17,964687	20,74353	17,96469	27,44128
8000	0,98	0,000113	10,67295677	18,485561	21,34497	18,48556	28,23692
9000	1,11	0,000114	10,9112063	18,898209	21,82145	18,89821	28,86725
10000	1,2	0,000116	11,07314773	19,178692	22,14532	19,17869	29,29569
11000	1,35	0,000118	11,33791476	19,637268	22,67483	19,63727	29,99617
12000	1,48	0,000119	11,56248008	20,026215	23,12394	20,02622	30,59029
13000	1,64	0,000121	11,83302394	20,494797	23,66501	20,4948	31,30606
14000	1,82	0,000122	12,13018183	21,009475	24,2593	21,00947	32,09223
15000	1,98	0,000124	12,38834561	21,456615	24,7756	21,45661	32,77525
16000	2,18	0,000126	12,7036827	22,002778	25,40625	22,00278	33,60952
17000	2,35	0,000127	12,96569779	22,456589	25,93025	22,45659	34,30272
18000	2,51	0,000129	13,20755895	22,875492	26,41396	22,87549	34,9426
19000	2,69	0,00013	13,47447177	23,337785	26,94776	23,33779	35,64876
20000	2,85	0,000132	13,70737166	23,741168	27,41354	23,74117	36,26493
21000	3,01	0,000134	13,93638625	24,137821	27,87155	24,13782	36,87082
22000	3,12	0,000135	14,09167869	24,406787	28,18212	24,40679	37,28167
23000	3,21	0,000137	14,21747685	24,62467	28,4337	24,62467	37,61449
24000	3,27	0,000138	14,30072869	24,768862	28,6002	24,76886	37,83474
24178	3,38	0,000139	14,45211398	25,031061	28,90296	25,03106	38,23526

EK I e 60º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

ΔG (J/mm^2)	COD (mm)	C (mm/N)	dc/da (1/N)	Komliyans yöntemiyle bulunanΔG (J/mm^2)
0,132093	0,05	0,00011111	0,000128	0,39
0,133414	0,06	0,00013333	0,000129	0,39365625
0,137377	0,07	0,00015556	0,000133	0,404625
0,145303	0,081	0,00018	0,00014	0,4265625
0,152569	0,092	0,00020444	0,000147	0,446671875
0,160495	0,105	0,00023333	0,000154	0,468609375
0,171063	0,115	0,00025556	0,000163	0,497859375
0,17965	0,124	0,00027556	0,000171	0,521625
0,190219	0,135	0,0003	0,000181	0,550875
0,198806	0,145	0,00032222	0,000189	0,574640625
0,204751	0,16	0,00035556	0,000194	0,59109375
0,21466	0,175	0,00038889	0,000203	0,618515625
0,223247	0,185	0,00041111	0,000211	0,64228125
0,233817	0,19	0,00042222	0,00022	0,67153125
0,245708	0,205	0,00045556	0,000231	0,7044375
0,256278	0,215	0,00047778	0,000241	0,7336875
0,26949	0,22	0,00048889	0,000253	0,77025
0,280722	0,24	0,00053333	0,000263	0,801328125
0,291292	0,255	0,00056667	0,000273	0,830578125
0,303185	0,265	0,00058889	0,000283	0,863484375
0,313756	0,3	0,00066667	0,000293	0,892734375
0,324328	0,33	0,00073333	0,000303	0,921984375
0,331596	0,35	0,00077778	0,000309	0,94209375
0,337543	0,365	0,00081111	0,000315	0,958546875
0,341508	0,38	0,00084444	0,000318	0,969515625
0,348776	0,4	0,00088889	0,000325	0,989625

EK I f 75º ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa$\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa$\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ eş}$ (MPa$\sqrt{m}$)	$\Delta K_{II\ eş}$ (MPa$\sqrt{m}$)	$\Delta K_{eş}$ (MPa$\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm^2)
1570	0,1	0,000103	2,34802	8,894014	9,202103	4,580631	10,27915	0,025996
2000	0,13	0,000104	2,365565	8,960474	9,270865	4,614859	10,35596	0,026386
3000	0,21	0,000106	2,411729	9,135339	9,451787	4,704919	10,55806	0,027425
4000	0,35	0,000108	2,490459	9,433557	9,760336	4,858508	10,90272	0,029245
5000	0,48	0,00011	2,5614	9,702273	10,03836	4,996904	11,21328	0,030935
6000	0,59	0,000112	2,619928	9,923969	10,26774	5,111082	11,46951	0,032365
7000	0,7	0,000114	2,677177	10,14082	10,4921	5,222767	11,72013	0,033795
8000	0,83	0,000116	2,743296	10,39127	10,75123	5,351755	12,00958	0,035485
9000	0,98	0,000118	2,817661	10,67296	11,04267	5,496829	12,33514	0,037435
10000	1,1	0,00012	2,875769	10,89306	11,2704	5,61019	12,58953	0,038995
11000	1,23	0,000122	2,937424	11,1266	11,51203	5,730469	12,85944	0,040685
12000	1,35	0,000124	2,993209	11,33791	11,73066	5,839298	13,10366	0,042244
13000	1,45	0,000126	3,038916	11,51105	11,90979	5,928465	13,30375	0,043545
14000	1,59	0,000128	3,101775	11,74915	12,15614	6,051093	13,57893	0,045365
15000	1,7	0,00013	3,150285	11,9329	12,34625	6,145729	13,7913	0,046795
16000	1,83	0,000132	3,20667	12,14648	12,56723	6,255728	14,03814	0,048485
17000	2	0,000134	3,278943	12,42024	12,85048	6,396721	14,35454	0,050695
18000	2,14	0,000136	3,337288	12,64124	13,07914	6,510544	14,60996	0,052515
19000	2,31	0,000138	3,406795	12,90453	13,35154	6,64614	14,91425	0,054725
20000	2,48	0,00014	3,474913	13,16255	13,6185	6,779028	15,21245	0,056936
21000	2,65	0,000142	3,541723	13,41562	13,88033	6,909364	15,50493	0,059146
22000	2,8	0,000144	3,599645	13,63502	14,10733	7,022361	15,7585	0,061096
23000	2,99	0,000146	3,671703	13,90797	14,38974	7,162936	16,07396	0,063567
24000	3,18	0,000148	3,742376	14,17567	14,66671	7,300809	16,38335	0,066038
25000	3,32	0,00015	3,793611	14,36974	14,86751	7,40076	16,60765	0,067858
25892	3,42	0,000152	3,829788	14,50677	15,00929	7,471336	16,76602	0,069158