CAM KUMAŞ TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE KIRILMA DAVRANIŞLARI

Mürsel EKREM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ A.B.D.

Konya - 2006

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CAM KUMAŞ TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE KIRILMA DAVRANIŞLARI

Mürsel EKREM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ A.B.D.

Konya, 2006

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

CAM KUMAŞ TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE KIRILMA DAVRANIŞLARI

Mürsel EKREM

Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI
2006, 109 Sayfa

Jüri: Prof. Dr. Ahmet AVCI
Yrd. Doç. Dr. Behçet DAĞHAN
Yrd. Doç. Dr. Arif ANKARALI

Bu çalışmada, merkezine farklı açılarda boydan boya çatlak açılmış cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemenin, sabit yük altında kırılma ve hasar davranışı incelenmiştir.

Bu çalışmada, numunelerin merkezine farklı açılarda ve boydan boya çatlak açılmış cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemenin, sabit yük altında kırılma ve hasar davranışı incelenmiştir. Deneyler sırasında çatlak ilerlemesi, çatlak ağzı açılma miktarı, çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörleri ve kırılma tokluğu incelenmiştir. Çatlak ilerlemesi ve ağzı açılma miktarları, çatlak geometrisi ile ilgili bir hasar parametresi olarak kullanılmıştır. Sonuçlar da, gerilim şiddet faktörü ve J integral metodu ile kontrol edilmiştir. Yük-uzama, yük-çatlak açılma miktarı, enerji boşalma miktarı-çatlak açılma miktarı, gerilme şiddet faktörü-çatlak ilerlemesi grafikleri , bir malzeme özeliği gibi düşünülerek çizilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer-matris kompozitler, merkez çatlağı, J integrali, gerilme şiddet faktörü, kırılma mekaniği.

ABSTRACT

Masters Thesis

MECHANIC FEATURES AND FRACTURE BEHAVIOUR OF FIBER-GLASS REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITES.

Mürsel EKREM

Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI
2006, 109 Pages

Jury: Prof. Dr. Ahmet AVCI
Assoc. Prof. Dr. Behçet DAĞHAN
Assoc. Prof. Dr. Arif ANKARALI

In this study, the fracture and damage behaviour of glass-fiber reinforced thermoplastic composite under stable load with central fractures at different angles and from one to another is investigated.

The central fractures at different angels are emphasized. During the experiments, the enlargement of fracture,the amount of the opening at the mouth of the fracture, the stres-intensity factors at the end of fracture and fracture toughness have been investigated. Fracture enlargement and the amounts of opening at the mouth of the fractures are used as damage parameter related to fracture geometry. The results are checked by using stress-intensity factor and J integral method. Load –extension, load- the amount of fracture opening, energy discharge amount-the amount of fracture opening, stress-intensity factor- fracture enlargement graphs are drawn as the features of metarial.

Key words: Polymer-matrix composites, the stress-intensity factor, central fracture, J-Integral, the mechanics of fracture.

İÇİNDEKİLER **Sayfa No:**

1. GİRİŞ…….....1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI…….....3
3. KOMPOZİT MALZEMELER..…….....6
3.1. Giriş ….. ……6
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması……....7
3.2.1. Fiber takviyeli kompozitler ……....7
3.2.2. Tabakalı kompozitler ……. ……8
3.2.3. Parçacıklı kompozitler ……..……..8
3.2.4. Çok bileşenli kompozitler ……..9
3.3. Plastikler ve Plastik Teknolojisi ……..9
3.3.1. Giriş ……..9
3.3.2. Plastiklerin sınıflandırılması ……10
3.3.2.1. Termosetler ……12
3.3.2.2. Termoplastikler ……13
3.3.2.2.1. Polietilen ……14
3.3.2.2.2. Polipropilen ……14
4. KIRILMA MEKANİĞİ……...16
4.1. Giriş …… .16
4.2. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği ……18
4.2.1. Düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme ……21
4.2.2. Numune geometrisine göre gerilme şiddet faktörleri……22
4.2.2.1. Bir levha kalınlık boyunca çatlak……...22
4.2.2.2. Çift kenar atlağı…….23
4.2.2.3. Tek kenar çatlağı……24
4.2.3. Eliptik yüzey çatlağı analizi……..25
4.3. Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği ……26
4.3.1. Çatlak ucu açılma miktarı …todu..……..26
4.3.2. J-İntegral metodu..……28
4.4. Gerilme Şiddet Faktör Değişimi …….32

5. DENEYLER……..37

5.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması ……...37

5.2. Çekme Deneyi ……40

5.3. Yakma Deneyi ……..……..42

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR..…..…….44

6.1. Çekme Deneyleri……..…… .44

6.2. 0^o Açılı Çatlaklı Numuneler……..……..…….……45

6.2.1. 0^o Açılı çatlaklı numunelerde çekme deney sonuçları .....…45

6.2.2. 0^o Açılı çatlaklı numunelerde hasar mekanizması.…….50

6.3. 15^o Açılı Çatlaklı Numuneler ……..……..…52

6.3.1. 15^o Açılı çatlaklı numunelerde çekme deney sonuçları 52

6.3.2. 15^o Açılı çatlaklı numunelerde hasar mekanizması.……...59

6.4. 30^o Açılı Çatlaklı Numuneler…….……..……61

6.4.1. 30^o Açılı çatlaklı numunelerde çekme deney sonuçları .....…61

6.4.2. 30^o Açılı çatlaklı numunelerde hasar mekanizması……..…68

6.5. 45^o Açılı Çatlaklı Numuneler ……..……..…70

6.5.1. 45^o Açılı çatlaklı numunelerde çekme deney sonuçları 70

6.5.2. 45^o Açılı çatlaklı numunelerde hasar mekanizması.……..78

6.6. 60^o Açılı Çatlaklı Numuneler…….……..……79

6.6.1. 60^o Açılı çatlaklı numunelerde çekme deney sonuçları .....…79

6.6.2. 60^o Açılı çatlaklı numunelerde hasar mekanizması……..…87

6.7. 75^o Açılı Çatlaklı Numuneler ……..……..…88

6.7.1. 75^o Açılı çatlaklı numunelerde çekme deney sonuçları 88

6.7.2. 75^o Açılı çatlaklı numunelerde hasar mekanizması.……..…..95

6.8. Tüm Çatlak Açılarında Grafiklerin Kıyaslanması……..……...97

6.8.1. Tüm çatlak açılarında Kıc-θ ve Kııc-θ grafiklerinin kıyasl....97

6.8.2. Tüm çatlak açılarında Jıc-θ ve Jııc-θ grafiklerinin kıyasl…..99

7. SONUÇ VE ÖNERİLER…….101

8. KAYNAKLAR ……103

9. EKLER ……106

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 değişimi
$\Delta K_{eş}$	Eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişimi
K_I	Mod I gerilme şiddet faktörü
ΔK_I	Mod I gerilme şiddet faktörü değişimi
$\Delta K_{I\ eş}$	Mod I eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişimi
K_{II}	Mod II gerilme şiddet faktörü
ΔK_{II}	Mod II gerilme şiddet faktörü değişimi
$\Delta K_{II\ eş}$	Mod II eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişimi
K_{III}	Mod III gerilme şiddet faktörü
Δa	ÇatIak ilerleme miktarı
a	ÇatIak boyu
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

TEŞEKKÜR

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

Cam elyaf takviyeli termoplastik malzemelerin üretilmesinde yardımcı olan 9 Eylül Üniversitesi Mak. Müh. Prof. Dr. Onur SAYMAN hocama ve araştırma görevlilerine, deneyleri gerçekleştirmem sırasında her türlü yardımı sağlayan Uludağ Üniversitesi Müh.- Mim. Fakültesi Dekan Yardımcısı İrfan KARAGÖZ ve Doç. Dr. Reşat ÖZCAN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

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

1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılın yarınsında tekniğin hızla gelişmesi, beraberinde sanayin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. Fakat bu gelişme, yeryüzünde sınırlı sayıda bulunan ana malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri nedeniyle teknolojinin gelişmesine ayak uyduramayıp, yeterli olamamışlardır.

Uzay araçlarının yapımına geçildiği asrımızda, çağın yenilikleri ve bilimin gelişmesi paralelinde günün ihtiyaçlarını karşılayabilecek, mevcut malzemelere göre gerek ekonomik, gerekse teknik yönden daha uygun malzemeler üretme yoluna gidilmiştir. Dolayısıyla hem ekonomik, hem daha mukavemetli ve hem de çok hafif malzemelerin üretilmesi için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Böylece değişik özelliklere sahip birden fazla malzemenin özel yöntemlerle fiziksel olarak birleştirilmeleri suretiyle elde edilen kompozit malzemeler büyük önem kazanmıştır (Jones 1975).

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.

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan termosetler yerine termoplastiklerde 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.

Özellikle matris olarak kullanılan 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. sektörlerde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

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

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.

Bu çalışmada fiber olarak bez ayağı yöntemiyle üretilmiş (plane wave) cam kumaş örgü ve matris olarak da alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) kullanılarak tabakalı kompozit malzeme üretilmiştir. Bu malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiş, kendisini oluşturan malzemelere göre olan üstünlükleri araştırılmıştır. Bunun yanı sıra kırılma mekaniği ile ilgili özelliklerden olan ve ortasında boyuna çatlak bulunan malzemenin çeşitli açılarda yük altında kırılma davranışları incelenmiştir. Kırılma tokluğu, Kıc, Kııc, Jıc ve Jııc karşılık çatlak ilerleme miktarına göre incelenmiş olup, K-δ ve J-δ grafikleri çizilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Makine mühendisliğinde çatlak ve yorulma iki önemli 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 hasar ve can kayıplarına sebep olabilir. Dolayısıyla yorulma ve çatlağa bağlı olarak oluşan kırılma mekanizmasının bilinmesi mühendislik açısından çözülmesi gereken problemlerdir.

İki veya daha fazla sayıdaki malzemelerin makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerin, kırılma ve hasar davranışlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Dinamik gerilme durumu mevcut olan makine elamanlarında yorulma olayı malzemelerde çatlaklar ve hasarların sürekli olarak gelişmesi, ilerlemesi ve malzemenin hasar görmesiyle sonuçlanır. Dolayısıyla çatlak boyutları ve ilerleme şekli bilinirse makine elemanı tasarım aşamasında iken hasarı 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 gözlemlemiş ve uygulanan tekrarlı değişken yüklerin etkisiyle malzemenin dayanım gücünün azaldığı ve yorulduğu sonucuna varılmıştır (Rankine 1840).

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.

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)

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)

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).

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)

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)

P.Yayla ve ark. Tek eksenli karbon elyaf kompozit malzemelerde tabakalar arası çatlak ilerleme direnci Mod I, Mod II ve Mod III kırılma türleri için farklı deneyler kullanılarak tespit edildi. Mod III için toplam çatlak ilerleme direnci Gc değeri, Gıc ve Gııc olarak ikiye ayrılıp ayrı ayrı hesaplandı.(P.Yayla ve ark.,1991)

E.Keleşoğlu, termoset plastiklerden polyester reçine matrisli E-camı elyaflarla destekli kompozit plakalarda kırılma tokluğu (Kıc) fiber türü ve geometrisinin etkisi üzerine bir araştırma sunmuştur. Kompakt deney parçaları hazırlanarak 0^0, 15^0, 30^0, 45^0, 60^0, 75^0 ve 90^0 olarak alınmış ve bu şekilde her yön için ayrı ayrı kırılma toklukları hesaplanmıştır.(E.Keleşoğlu, 1995)

Merkezi dairesel delik içeren cam elyafla takviyelendirilmiş plastik kompozit malzemelerin gerilme kuvveti ve kırılma davranışları X.F. Yao ve ark. Tarafından çalışılmıştır. Farklı delik çaplarındaki çentikli numunelerin bütün hasar ve kırılma süreçlerindeki gerinim değişimleri kaydedilmiştir. Çentikli numunelerdeki delik çaplarının kuvvet ve kırılma üzerindeki etkileri incelendi.(X.F. Yao ve ark., 2005)

H.L. Yeh geliştirilmiş quadric yüzeylerin hata ölçütlerinin gerilme yükü altında ve gerilme konsantrasyonlarının içeren tabakalı kompozitlere uygulanmasıdır. Bu ölçütü araştırmak için malzemenin an izotropik özelliklerin ve uzak alan yüklemesinin, merkez çatlaklı grafit epoksi [90^0 / 0^0 / 45^0] tabakalar üzerindeki etkisi çalışıldı.(H.L. Yeh, 2005)

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. GİRİŞ

İki veya daha fazla malzemenin, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve faydalı bir malzeme oluşturmak için makro yapı da birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzemelerdir. Makro yapıdan kasıt, malzemenin çıplak gözle veya büyüteçle görülebilecek boyutta olmasıdır. Alaşım, mikro yapıda bileşenlerden meydana geldiğinden bir kompozit malzeme kabul edilmemektedir (Şahin 2000).

Genel olarak bir kompozit malzeme kendini meydana getiren malzemelerin her birinin özelliklerinden (mekanik, ısıl), kalitesinden daha yüksek ve daha iyi özellikler elde etmek amacıyla makro boyutta birleştirilerek elde edilmiş bir yapıdır. Bu yapılar arasında her iki temel yapıda daha iyi özelliklere sahip ara yüzey ve ara fazlar elde edilebileceği gibi bazı özel durumlarda her iki malzemeden daha zayıf özellikler gösterebilen yapılarda oluşabilmektedir.

Kompozit malzemeler oluşturulurken yüksek dayanım, rijitlik, yorulma dayanımı, mükemmel aşınma direnci, korozyon direnci, ısı iletkenliği, düşük ağırlık, elektrik iletkenliği gibi özelliklerden bazılarının geliştirilmesi amaçlanır. Bütün bu özelliklerin birlikte geliştirilmesi beklenemez, özellikleri bilinen bileşenlerden yararlanılarak bir kompozit malzemenin bazı özellikleri hesaplanabilir.

Kompozit malzemenin tarihi çok eskilere dayanır. Eski Mısır, Çin ve Anadolu medeniyetlerine kadar iner. Anadolu'da Türkler, saman ile çamuru karıştırarak kerpiç denilen bir kompozit malzemeyi yapı malzemesi olarak kullanmışlardır. Çinliler, kili samanla karıştırarak tuğla elde etmişlerdir. Çinlilerin yapılarda kullandıkları balmumu çok mükemmel bir elyaf takviyeli kompozit malzemesidir. Balmumunun sahip olduğu elyaf tabiatın yapay fiberglası olarak kabul edilmiştir (Avcı 2002).

Günümüzde ise başta uzay ve havacılık sanayi olmak üzere birçok 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

Genel olarak kompozit malzemeler türleri ve yapısal açıdan dört grupta sınıflandırılabilirler. Bunlar:

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

3.2.1. Fiber (Elyaf) Takviyeli Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitler yumuşak ve sünek matriks içine sert, dayanıklı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özellikleri iyileştirir. Matriks malzemesi kuvveti elyaflara transfer ederek yumuşaklık, mukavemet ve tokluk özelliği sağlarken, elyaf uygulanan yükün büyük bir bölümünü taşımaktadır.

Elyaf takviyeli kompozitlerde oldukça değişik takviye elemanları kullanılmaktadır. Bunlar cam, grafit, bor, kevlar, organik,seramik elyaf gibi çeşitleri mevcuttur. Bunlardan en çok ve yaygın olarak kullanılan cam, grafit ve organik elyaflardır.

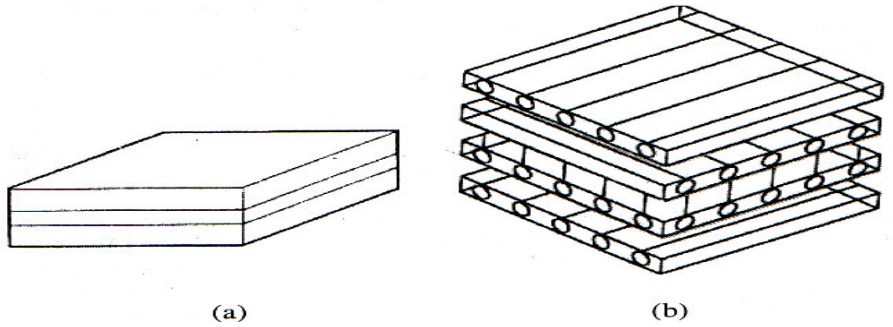
Elyaflar, örme veya şerit şeklinde olabilmekle beraber tabakalar halinde yönlü elyaflarda kullanılır. Fiber takviyeli kompozitler kendi içerisinde fiber geometrisine bağlı olarak beş sınıfa ayrılırlar. Tek yönlü sürekli elyaflı, kırpılmış elyaflı, ortagonal elyaflı, çapraz dizilmiş sürekli elyaflı ve rasgele dizilmiş sürekli elyaflı kompozit malzemelerdir. Sürekli elyaflar yönlendirilme özelliklerinden dolayı diğer takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptir. Kompozitin kullanıldığı yer ve üzerine gelen kuvvetler sonucu çekme, basma ve eğilme gerilmeleri için istenilen mukavemete ulaşılabilir. Tek yönde çekme kuvvetine maruz kalan bölgelerde yönlendirilmiş uzun elyaflar, elyaf doğrultusunda maksimum performans gösterirler. Ancak elyaf eksenine dik doğrultusunda minimum özellik gösterir. Çünkü matriks dayanımı esas almaktadır. Bu durumu gidermek için değişik açılarda takviyelendirme (rastgele düzlemsel yönlendirilmiş) yapılmak suretiyle istenen

doğrultularda daha yüksek özelliklerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir (Şahin,2000).

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 şekil 3.2'de gösterildiği gibi, temel malzeme eksenleri doğrultusunda değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konularak bir araya getirilmesi ile tabakalı (laminate) kompozitlerin elde edilmesiyle oluşmaktadır. Laminetler, matriks içerisine rastgele yönlenmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakalardan oluşabilir. Bu kompozitler de tabakaların dayanımı, rijitlik, korozyon direnci, yalıtkanlık gibi özellikleri geliştirilebilir.



Şekil 3.2 Tabakalı bir kompozit yapısı (a) İzotropik, (b) Ortotropik yapı

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 çeşitli 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)

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 metal/eri 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/cm3'den yüksektir. Polimerler elektrik ve ısıyı iyi iletmezler, genellikle saydam veya donuk görünümlüdürler. Yoğunlukları küçüktür (yoğunlukları 1 g/cm^3 civarındadır); hafiftirler(Avcı 2002).

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 tanımlan-maktadır. 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.

Polimerlerin ticari ve teknik bakımından önemli olmasının sebepleri şöyle sıralanır.

a) Metal ve seramiklere göre düşük yoğunluğa sahip olması ve dayanım/yoğunluk oranın iyi olması,
b) Yüksek korozyon direnci ve düşük ısıl ve elektrik iletkenliğine sahip olması,
c) Polimerleri üretmek için daha az enerjiye gerek duyulması,
d) Polimerlerin yaygın şekilde kompozit malzemelerde kullanılmasıdır.

Polimerlerin bu avantajlarına rağmen dezavantajları da bulunmaktadır. Bunları da şöyle özetleyebiliriz.

a) Metaller ve seramiklerden daha düşük dayanıma sahip olmaları,
b) Düşük elastik modüle sahip olmaları,
c) Sınırlı yükleme şartlarına sahip olmalarıdır.

Kompozit malzemelerde plastik matriks olarak kullanılan iki tip plastikler mevcuttur. Bunlar; termosetler ve temoplastiklerdir(Şahin,2000).

3.4.2.1 Termosetler

Termosetler, küçük monomer moleküllerin kimyasal reaksiyonlarla birbirine bağlı uzun polimer moleküller haline gelmesi ile ortaya çıkarlar. Bu reaksiyonların gerçekleşebilmesi için katalizörlere, iyileştirme malzemelerine, ısıya ve mikrodalga gibi dış etkenlere ihtiyaç vardır.

Kovalent bağların üç boyutlu olarak örgü şeklinde ortaya çıkması ile termoset malzemeler oldukça katıdırlar. Verilen şekil kalıcıdır. Bu nedenle kimyasal reaksiyon işlemi geri dönüşsüzdür. Bundan dolayı yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmaları bile yumuşamayı sağlayamaz.

Termoset reçineler kırılgandırlar. Takviye malzemesi olarak nadiren kullanılırlar. İyi sünme direncine sahiptirler. Sıcaklık artıkça mukavemet ve modülü azalır. Kimyasal dirençleri oldukça iyi malzemelerdir.

Kompozit malzemelerde en çok kullanılan reçineler; epoksiler, polyesterler ve fenoliklerdir. Epoksi-matriks kompozitler en iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Tablo 3.1'de bu reçinelerin özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 3.1 Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri

Malzeme özellikleri	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluğu (gr/cm^3)	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Elastik modülü (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	42	1,5-2,0
Isıl iletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl genleşme (1/^{0}C)	45-65	55-100	68

Bu reçineler uzun ömürlüdürler ve oldukça pahalıdırlar. Polyester kompozitler, epoksilere yakın elastik özellikler gösterirler.buna karşılık mukavemetleri daha düşüktür.

3.4.2.2 Termoplastikler

Termoplastik reçineler, oda sıcaklığında katı haldedirler. Bunlarda çizgisel molekül zincirleri birbirine zayıf metaller arasında Vander Waals bağları ile bağlanırlar. Rijit bir yapıya sahip değildirler. Isıtılırsa yumuşar ve erirler. (Tablo 3.2) Soğutulunca yeniden sertleşirler. Sıcaklık arttıkça viskoziteleri düşer. Sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda viskozite hali yüksektir. Bu nedenle ara yüzey bağı termoset'e göre daha zordur. Birçok cinsleri olmasına rağmen en yaygın olarak kullanılanları şunlardır.

1) Polietiten (PE)
2) Polipropilen
3) Selilozitler
4) Naylonlar (Poliamitler) (PA)
5) Polikarbonatlar
6) Polivinilklorürler (PVC)
7) Akrolinitrin-butadin-strin (ABS)
8) Politetra Fluorethylene (PTFE)
9) Termoplastik Polyesterler

Tablo 3.2 Termoplastiklerin bazı tipik özellikleri

Malzeme özellikleri	Akrilik	ABS	PTFE	PA
Elastik modülü (MPa)	2800	2100	425	700
Çekme dayanımı (MPa)	55	50	20	70
Kopma uzaması (%)	5	10-30	100-300 300	
Özgül ağırlığı (g/cm^3)	1,2	1,6	2,2	1,14
Ergime derecesi (^0C)	200	--	327	260

Termoplastik reçineler, termoset reçinelere göre daha ucuzdurlar. Bu nedenle daha caziptirler. Sünme dirençleri (rezistansları) termosetlere göre oldukça düşüktür. Yapısal uygulamalarda bundan dolayı ciddi bir endişe taşırlar.

Termoplastikler, neme karşı da oldukça iyi direnç gösterirler. Düşük yoğunluk, düşük iletkenlik, ışık geçirmezlik, düşük ısı iletim özellikleri termoplastiklerin çekiciliklerini arttıran önemli nedenlerdendir.

3.4.2.2.1 Polietilen

1990'Iı yılların verilerine göre Polietilen, ambalaj sanayinde kullanılan plastiklerin yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır. Polietilenin yoğunluğuna bağlı olarak değişik türleri mevcuttur. Alternatif olarak etilen polar komonomerlerle de kopolimerize edilebilir. Bu kopolimerler, başlıca EVA (etilen vinil asetat), EAA (etilen akrilik asit), EMA (etilen metakrilik asit) dır. Buten, hekzen, okten ve metilpenten ise lineer alçak yoğunluklu polietilen için çok düşük derişimlerde bulunabilen (apolar) komonomerlerdir. Özellikle PE homopolimerlerin karıştırılmaları ile çok sayıda ürün çeşidi elde edilebilmesi mümkündür.

Polietilen çok ucuz, kimyasal olarak kararlı, kaynak yapılması nispeten 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.

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 gerilim çatlamaları (stress cracking) değerlerini olumsuz yönde etkiler. Polietilen malzemelerin diğer özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir

3.4.2.2.2 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 3.3. Ticari Termoplastik Polimerlerin Tipik Özellikleri(Petkim)

Özellikler	Yüksek Yoğunluklu Polietilen	Alçak Yoğunluklu Polietilen	Polipropilen
Özgül ağırlık (g/cm^3)	0,94-0,96	0,91-0,92	0,90-0,91
Kırılma indisi	1,54	1,51	1,49
Kopma dayanımı (MPa)	22-39	7-16	30-40
Uzama (%)	15-100	90-650	250-700
Elastiklik Modülü (MPa)	560-1050	120-245	900-1400
Çentikli darbe dayanımı (Nm/cm)	0,80-6,4	>8,6	0,32-3,2
Yanma hızı	Çok yavaş	Çok yavaş	Yavaş
Güneş ışığının etkisi	Etkilenir	Yüzeyde çatlama	Etklilenir
Kuvvetli asit-baz etkisi	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanık
Saydamlık	Opak	Opak	Opak

İstenilen özelliklerini ancak 0°C'a kadar koruyabilmesi nedeniyle standart polipropilen film (PP homopolimer) 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 (BOPP, biaksiyel oryentasyon) şekli; mekanik dayanımı, geçirgen olmama özelliğini, ışık geçirgenliğini ve düşük sıcaklıklarda (-50ºC'ye kadar) kararlılığı arttırdığı gibi, polipropileni "shrink" edilebilmeye de uygun hale getirir. Tek yönde gerdirme (MOPP, monoaksiyel oryentasyon) özellikle dokuma çuval şeridi gibi şerit uygulamalarında kullanılır. Polipropilenin diğer özellikleri Tablo 3.3 de verilmiştir. (Savaşcı ve ark.,2002)

4. KIRILMA MEKANİĞİ

4.1. 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 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.

Genel olarak, malzemenin genişliği ve çatlak civarındaki düzlem ölçüleri plastik bölgeye göre yeterince büyükse, büyüme başladığındaki K değeri sabittir ve bu onun minimum değeridir. Bu tanım düzlem şekil değiştirme tokluk faktörü olarak adlandırılır ve malzemenin K_{IC} değeridir. K_{IC} özellikle malzeme seçiminde önemli bir faktördür çünkü tokluğun diğer ölçülerinden farklı olarak malzemenin şeklinden bağımsızdır.

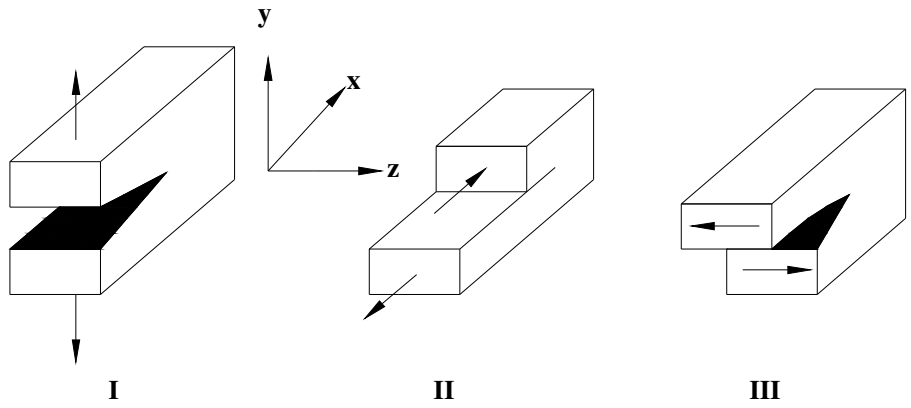
Yine Irwin sonraki çalışmalarında kırılma mekaniğinde çığır açmış, enerji yaklaşımının gerilme yoğunluğu ile eşdeğer olduğunu bulmuştur. Buradan gerilme şiddet faktörü (GŞF) diye tanımlanan K diye yeni bir malzeme özelliği tanımlamıştır. Gerilme şiddet faktörü K, çatlak civarında gerilme alanını belirleyen 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 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)

4.2. 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 4.1'de üç tip davranış görülmektedir.



Şekil 4.1 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;

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}\, f(a/W) \tag{4.1}$$

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.

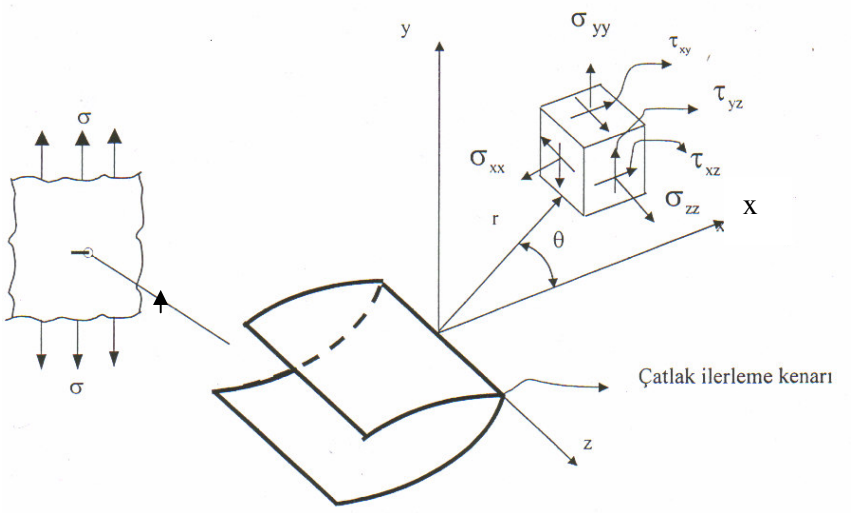
$$K_I = \sigma_I\sqrt{\pi a}\,, \qquad K_{II} = \tau_{II}\sqrt{\pi a}\,, \qquad K_{III} = \tau_{III}\sqrt{\pi a} \tag{4.2}$$

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 4.2' deki gibidir.

Çatlak ucundaki gerilmeler denklem 4.3' deki gibidir;

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2}\left(1 - Sin\frac{\theta}{2}Sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
\sigma_{yy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2}\left(1 + Sin\frac{\theta}{2}Sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
\tau_{xy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}}\left(Cos\frac{\theta}{2}Cos\frac{3\theta}{2}Sin\frac{\theta}{2}\right)\\
\sigma_{zz} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}}\left(2\nu^{*}Cos\frac{\theta}{2}\right)\\
\tau_{yz} &= \tau_{zx} = 0
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Şekil 4.2' 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. K_I: Mod I için gerilme şiddet faktörü, E: Elastisite modülü ve θ: r' nin x ekseni ile yaptığı açıdır. u, v, w ise sırası ile x, y, z eksenlerindeki deplasmanlarıdır.



Şekil 4.2 Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilme dağılımı

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

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

$$w = -\nu^* \frac{K_I}{E} \qquad (4.4)$$

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

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

Mod II durumu için gerilmeler;

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

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} Sin\frac{\theta}{2}Cos\frac{\theta}{2}Cos\frac{3\theta}{2} \qquad (4.5)$$

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

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

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

Deplasmanlar denklem 4.6' da ki gibi bulunur;

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

$$\nu = \frac{K_{II}}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} Cos\frac{\theta}{2}\left[-1 + 2\nu + Sin^2\frac{\theta}{2}\right] \qquad (4.6)$$

$$w = 0$$

Mod III durumu için gerilmeler ve deplasmanlar;

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

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2} \qquad (4.7)$$

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

$$u = v = 0$$

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

4.2.1 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 germe hali söz konusudur.

4.2.2 Numune Geometrisine Göre Gerilme Şiddet Faktörünün Değerleri

Numune geometrisine göre gerilme şiddet faktörleri değişiklik gösterir. Bazı numune geometrileri için GŞF değerini veren ifadeler araştırmacılar tarafından çıkarılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

4.2.2.1. Bir levhada kalınlık boyunca çatlak

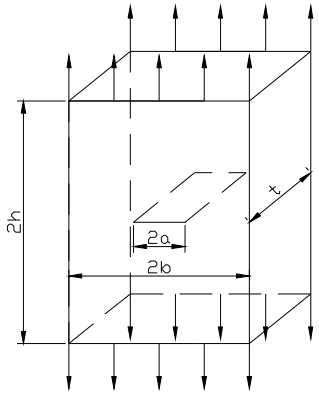
Şekil 4.3' te görüldüğü gibi $2a$ uzunluğunda bir çatlak içeren sonsuz genişlikteki bir levha, σ gibi düzgün bir gerilmeye maruz kalmış ise GŞF ifadesi;

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a} \tag{4.8}$$

bağıntısıyla verilir. Genişliği w olan bir levha ise şekil faktörü kullanıldığında ifade

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a \left[\frac{w}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{w} \right) \right]} \tag{4.9}$$

halini alır(Paris 1965).



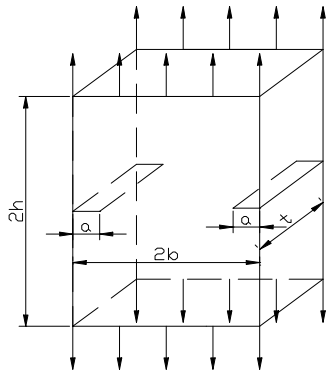
Şekil 4.3 Bir levhada kalınlık boyunca çatlak

4.2.2.2. Çift kenar çatlağı

Düzgün çekmeye maruz çift kenar çatlaklı bir numunede gerilme şiddet faktörü aşağıdaki gibidir(Gross 1964).

$$K_I = 1.12\sigma\sqrt{\pi a} \tag{4.10}$$

Burada 1.12 katsayısı kenar çatlakları için serbest yüzey düzeltme katsayısıdır. Şekil 4.4' te çift kenar çatlağı verilmiştir.



Şekil 4.4 Çift kenar çatlağı

Kalınlık boyunca çatlakta verilen tanjant düzeltme faktörü çift kenar çatlağına da uygulanırsa gerilme şiddet faktörü daha hassas elde edilebilir.

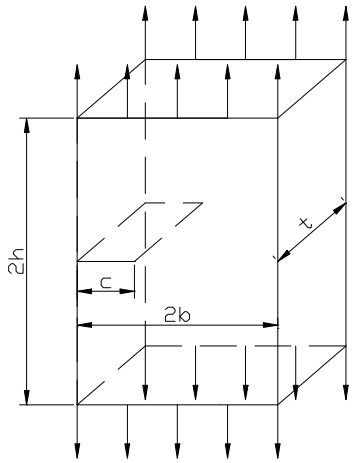
4.2.2.3. Tek kenar çatlağı

Tek kenar çatlağı için gerilme şiddet faktörü, çift kenar çatlağı ifadesinden çıkarılmıştır. Burada ayrıca çatlağın tek taraflı olması sebebiyle eğilme etkisi de göz önünde bulundurulur(Şekil 4.5).

Tek kenar çatlaklı levhalar için düzeltme faktörü de eklenerek GŞF aşağıdaki şekli alır.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}.f\left(\frac{a}{w}\right) \tag{4.11}$$

$f(a/w)$ faktörü a/w değerine bağlı olarak 1.15-2.86 arasında değişmektedir.



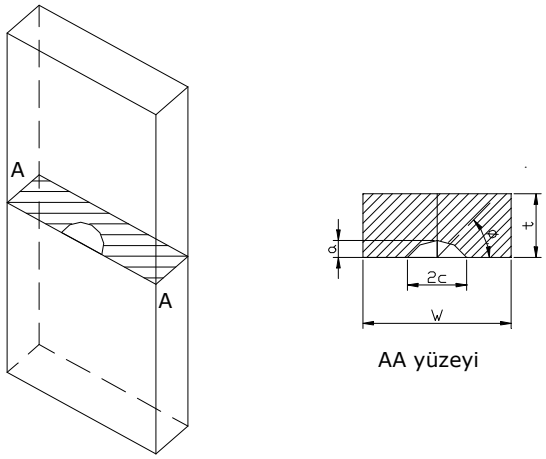
Şekil 4.5 Tek kenar çatlağı

4.2.3 Eliptik Yüzey Çatlağı Analizi

Bir levhada yüzey çatlağından dolayı oluşan gerilme şiddet faktörü levhanın kalınlığına, levhanın genişliğine, çatlağın derinliğine ve çatlağın uzunluğuna bağlı olduğu gibi, çatlağın kenarını süpüren merkez açısına da bağlıdır. Çatlak ilerlemesi, hem çatlak boyunca, hem de çatlak derinliği boyunca olmaktadır. Çekme yükü altında izotropik malzemelerde yarı eliptik bir çatlağın, ilerlemesi de yarı eliptik olarak kabul edilmektedir.(Şekil 4.6)

Irwin çekme gerilmesi etkisi altında yüzey çatlağında oluşan GŞF değerlerini aşağıdaki gibi ifade etmiştir.

$$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{E_K} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{a^2}{c^2}\right) Cos^2\phi\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (5.12)$$



Şekil 4.6 Yüzey çatlağı geometrisi(Lin 1999)

Burada;

$$E_K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{a^2}{c^2} \right) Sin^2\phi \right]^{\frac{1}{4}} d\theta \qquad (4.13)$$

olup ikinci tür komple eliptik integraldir. σ normal gerilme, *a* ve *c* çatlak boyutlarıdır.

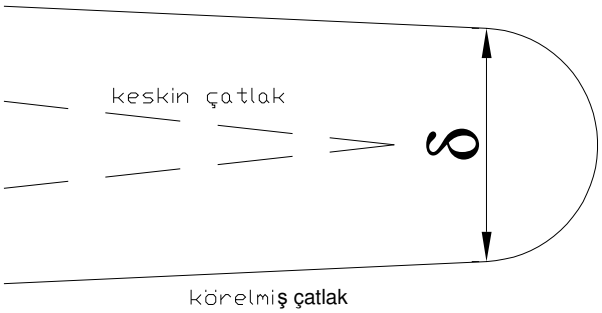
4.3. ELASTİK-PLASTİK KIRILMA MEKANİĞİ

Lineer elastik kırılma mekaniği (LRKM) sadece çatlak ucu etrafında küçük bir bölge ile sınırlandırılan lineer olmayan bir malzeme şekil değişiminde geçerlidir. Pek çok malzemede kırılma davranışı LEKM ile modellemek imkânsızdır ve alternatif kırılma metotları gerekmektedir.

Elastik-Plastik kırılma mekaniği zamana bağlı lineer olmayan davranış (plastik deformasyon) gösteren malzemelerde uygulanır. Elastik–plastik davranışı karakterize eden parametrelerden biri çatlak ucu açılma miktarı (crack opening displacement, COD), diğeri ise J-integraldir. COD ve J-integralin kritik değeri, boyuttan bağımsız kırılma tokluğu ölçümü ve büyük miktardaki çatlak ucu plastik davranışı verir (Anderson, 1991).

4.3.1.Çatlak Ucu Açılma Miktarı (COD) Metodu

Yapısal çaliklerin Kıc değerlerini ölçmeye çalışan Wells bu malzemelerin LEKM ile karakterize edilemeyecek kadar tok olduğunu görür. Yüksek tokluk tasarımcılar tarafından istenmemektedir. Fakat deneysel sonuçlarla elde edilen kırılma mekaniği teorisi bu malzeme grubuna uygulanmamaktadır. Kırılan test numunelerine bakıldığında, çatlak yüzeyinin kırılma öncesinde hareket ettiğini plastik deformasyonun keskin çatlağı körelttiğini Şekil 4.7'de görebiliriz. Bu gözlem sonucunda Wells çatlak ucu açılma miktarını kırılma tokluğunun ölçüsünü yapmıştır. Bu parametre COD olarak bilinmektedir.



Şekil 4.7 Çatlak ucu açılma miktarı

Bu çalışmada Wells COD'u gerilme şiddet faktörü ile düşük ölçekli akmanın limitinde ilişkilendirmiştir. Küçük plastik bölgesi olan Şekil 4.8'deki gibi bir çatlak düşünelim. Irwin çatlağın ucundaki plastikliğin sanki çatlak daha uzunmuş gibi davranmasına sebep olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla COD'u yerdeğiştirmeyi fiziksel çatlak ucunda çözerek tahmin edebiliriz. Burada a + r_y çatlak uzunluğu kabulü yapılır.

$$\text{COD}/2 = \frac{K+1}{2\mu} K_1 \sqrt{\frac{r_y}{2\Omega}}$$

(4.14)

Ve Irwin plastik bölge düzlem gerilme içi;

$$r_y = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K\imath}{\sigma_{ys}}\right)^2 \qquad (4.15)$$

denklem 4.15 denklem 4.14 de yerine konulursa

$$\text{COD} = \frac{4}{\pi}\frac{K\imath^2}{\sigma_{ys}.E} \qquad (4.16)$$

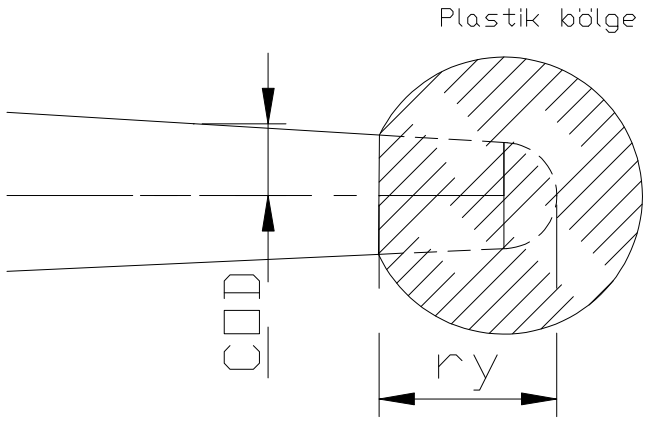
bulunur Irwin'in dairesel plastik zon analizi yardımıyla elde edilen bu çatlak ucu açılması ifadesi Dugdale tarafından;

$$\text{COD}= \frac{K_{\iota}^{\,2}}{E\sigma_{ys}} \tag{4.17}$$

Şeklinde verilmiştir. Burdekin ve Stone'un Dugdale analizi yardımıyla elde ettikleri ifade ise;

$$\text{COD}= \frac{8a\sigma_{ys}}{\pi E}\ln\sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{ys}}\right) \tag{4.18}$$

şeklindedir. Birimi uzunluktur. Sonuçta Wells LEKM'nin uygulanamadığı yerlerde çatlak ucunu karakterize edebilmek için COD'un uygun bir yol olduğunu söylemiştir. Bu kabul COD ve J integrali arasındaki ilişki gösterildikten sonra doğrulanmıştır.



Şekil 4.8 Irwin plastik bölge düzeltilmesindeki geçerli çatlak yer değiştirmesi

4.3.2. J-İntegral Metodu

J integrali lineer olmayan malzemeler için kırılmayı karakteri eden parametre olarak kullanılır. Elastik-plastik deformasyon, lineer olmayan elastik olarak idealize edilir. Rice LEKM limitlerinin doğrulandığı sınırlarda bu konunun temellenmesini sağlamıştır.

J integrali elastik-plastik malzemede, çatlak ucundaki gerilme- gerinim alanının şiddetini belirleyen bir parametredir. K'nın oynadığı role benzer şekilde kırılma olayını kontrol eden bir parametre olmaktadır. J integral kavramı da enerji dengesinin kurulması esasına dayanmaktadır. Enerji dengesi şöyle yazılmaktadır.

$$U=U_0 + U_a + U\gamma - F \qquad (4.19)$$

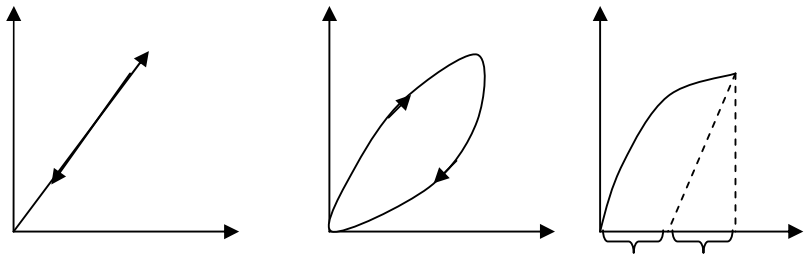
şeklinde verilir. Burada Uo, yüklenmiş fakat çatlak içermeyen levhanın elastik enerjisi, Ua, çatlağın oluşmasıyla elastik şekil değiştirme enerjisindeki değişim, $U\gamma$, elastik yüzey enerjisindeki değişim, F ise dış kuvvettir.

J integrali;

1) Lineer elastik davranışı için gerinim yük boşalmasına eşittir. J=G olur. (Şekil 4.9 a)

2) Lineer olması şart değil, elastik davranış göstermesi yeterli kabul edilir. Bu durumda da J=G olur. (Şekil 4.9 b)

3) Hatta elastik davranış göstermesi de şart değildir. Yeter ki elde edilen kuvvt-yer değiştirme eğrisi elastik davranış halinde edilen eğriye benzesin. (Elasto-plastik davranış)(Şekil 4.9 c) Her üç durumda da denklem 4.19 bağıntısı geçerlidir.



pl el

a b c

Şekil 4.9 Elastik davranış diyagramları

Potansiyel enerji;

$$Up= U_0 + U_a - F \qquad (4.20)$$

şeklinde ifade edilir. Yani;

$$U = Up + U\gamma \tag{4.21}$$

olur. Burada Uo sabittir.

$$\frac{dU_p}{da} = \frac{d}{da}(Ua - F) = -\frac{d}{da}(F - Ua) \tag{4.22}$$

olur ve tanım olarak;

$$J = -\frac{dU_p}{da} \tag{4.23}$$

verilmiştir. Burada Up, çatlağın ilerlemesi için mevcut enerji, J ise potansiyel enerjideki değişmedir. Açığa çıkan bu enerji yeni yüzey oluşturmada kullanılır. J diğer bir ifade ile elastik-plastik enerjisinin boşalma hızı olarak kabul edilir. Bunu kritik değere ulaşması halinde çatlak yayılır. Bu durumda Jc, lineer elastik durumundaki Gc'nin bir benzeri yada eşdeğeri olmaktadır.

J integral metodu ile hem elastik hem de plastik davranış gösteren malzemelerin kırılma tokluğu ifade edilir. J'nin birimi N/m dir.
Elastik-plastik davranışta J-integral aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$J_{IC} = \frac{1}{B}\frac{dU}{d(2a)} \tag{4.24}$$

Burada, U enerji değişimidir. J-integrali belli bir kritik değere ulaşınca (J_{IC} ve J_{IIC}) kararlı olmayan çatlak büyümesi başlar. Çatlak ilerlemeye başladığında potansiyel değişme olur.

Ortasında çatlak bulunan çatlaksız numunelerinde Şekil 4.10 da çentikli ve çentiksiz malzemenin yük-yer değiştirme grafiği verilmiştir. J-integralin tespitinde şu yol izlenir (Ziegeldorf 1983, Velazco ve ark. 1980); çentikli malzemenin yük –yer

değiştirme eğrisi (P-δ) altında kalan alan (A_t), aynı yükle yüklenmiş çentiksiz malzemenin P-δ grafiği altındaki alan (A_u) çıkarılır. Buradan elde edilen değer aşağıdaki formüle konularak kritik J-integral (J_{IC}) değeri Mod I'e bulunur.(Beaumont P. ve ark. 1990)

$$J_{IC} = K_{II}^{\,2}\left[\left(\frac{a_{22}.a_{11}}{2}\right)^{\frac{1}{2}}.\left[\left(\frac{a_{11}}{a_{22}}\right)^{\frac{1}{2}}+\left(\frac{a_{66}+2a_{21}}{2a_{22}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right]+\frac{2(A_t - A_u)}{B(W-2a)} \qquad (4.25)$$

Mod II için J nin değeri

$$J_{III} = K_{III}^{\,2}\left[\left(\frac{a_{11}}{\sqrt{2}}\right).\left[\left(\frac{a_{22}}{a_{11}}\right)^{\frac{1}{2}}+\left(\frac{a_{66}+2a_{12}}{2a_{12}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right]+\frac{2(At-Au)}{B(w-2a)} \qquad (4.26)$$

plastik malzemeler için hesaplanır. Denklem 5.25 ve 5.26 da hesaplanan K_{Ic} ve K_{IIc} yerlerine konularak çözüme ulaşılır. Burada, toplam J değerleri de aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

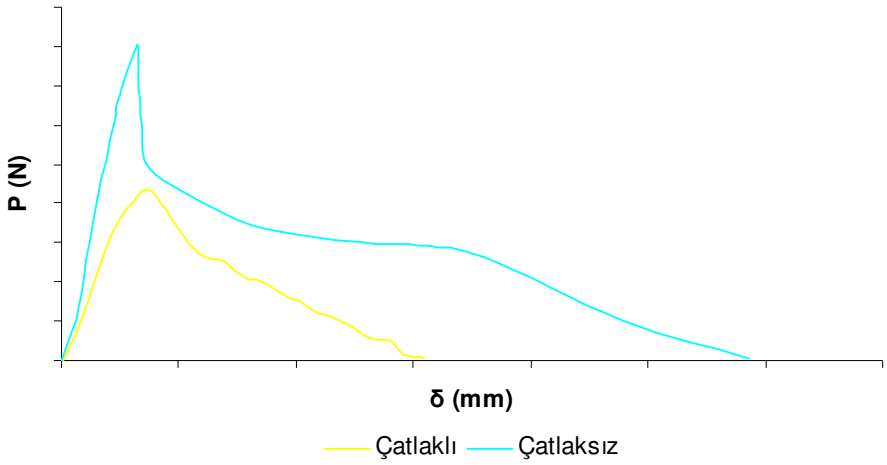
$$J_c = J_I + J_{II} \qquad (4.27)$$

burada

$a_{11}=1/E_1$ $\qquad$ $a_{22}=1/E_2$

$a_{21}= a_{12} = -\frac{\upsilon_{12}}{E_1}$ $\qquad$ $a_{66}=1/G_{12}$

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



Şekil 4.10 Çentikli ve çentiksiz numunenin kuvvet-deplasman grafiği

4.4.GERİLME ŞİDDET FAKTÖRÜ DEĞİŞİMİ (K)

Bu çalışmada, deneylerindeki GŞF değişimi değerleri ASTM 647 standardı kullanılarak aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

α=2a/w $\qquad\qquad$ $2a/w < 0{,}95$

olmak şartıyla 0^o için K değeri aşağıda verilmiştir.

$$K = \left(\frac{P}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\alpha}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)}\right) \qquad (4.28)$$

Burada P: uygulanan yükü, $2a$: çatlak boyu, w: malzeme genişliği, B: malzeme kalınlığını ifade etmektedir.

Açılı çatlaklarda mod I ve mod II durumu oluştuğundan GŞF değişimleri K_I ve K_{II} aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır (Xiangio 2005).

$$K_I = \left(Cos^2\theta\right)\left(\frac{P}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\alpha}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)}\right) \tag{4.29}$$

$$K_{II} = \left(\frac{Sin\,2\theta}{2}\right)\left(\frac{P}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\alpha}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)}\right) \tag{4.30}$$

Burada θ çatlağın yatay eksenle yaptığı açıyı ifade etmektedir.

Bunun yanı sıra başlangıç çatlak derinliği metodu kullanılarak K_I ve K_{II} aşağıdaki formüllerle de hesaplanabilir.

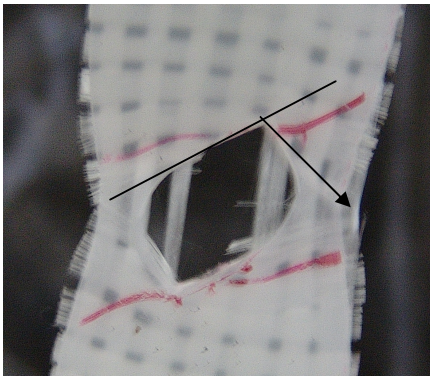
$$K_I = \left(Cos^2\theta\right)\sigma\sqrt{\pi\, a\, F_1} \tag{4.31}$$

$$K_{II} = \left(\frac{Sin\,2\theta}{2}\right)\sigma\sqrt{\pi\, a\, F_1} \tag{4.32}$$

Burada σ: numunede meydana gelen çekme gerilmesidir. F_1 ise aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir.

$$F_1 = \sqrt{Sec\left(\frac{\pi\, a}{W}\right)}\cdot\left[1 - 0{,}025\left(\frac{2a}{W}\right)^2 + 0{,}06\left(\frac{2a}{W}\right)^4\right] \tag{4.33}$$

Deneyler sonucunda bulunan GŞF değişimleri K_I ve K_{II}' nin bir malzeme sabiti olarak kullanılabilmesi için eşdeğer bir K bulunması gereklidir. Bunun için Nalla R.K. ve ark.' nın(2002) yaptıkları çalışmada kullandıkları yöntem kullanılabilir. 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(Şekil 4.11). Bu yön değiştirme çatlak doğrultusuna $\pm\alpha$ açısı kadar farklı yönlerde oluşabilir.



Şekil 4.11 45^{o} açılı çatlaklı numunede kink olayı

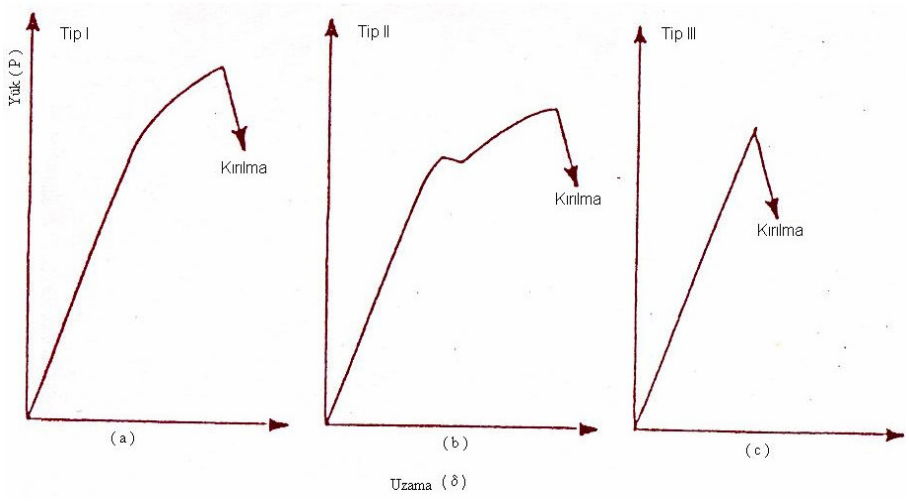
$$K_{I\,eş} = c_{11}K_I + c_{12}K_{II}$$
$$K_{II\,eş} = c_{21}K_I + c_{22}K_{II} \qquad (4.34)$$

Burada c_{ij}: kink açısı olan α'nın sole fonksiyonlarıdır. $c_{11} = c_{22} = Cos\,\alpha$ ve $c_{12} = c_{21} = Sin\,\alpha$ olarak varsayılırsa;

$$K_{I\,eş} = Cos\,\alpha\,K_I + Sin\,\alpha\,K_{II}$$
$$K_{II\,eş} = Sin\alpha\,K_I + Cos\,\alpha\,K_{II} \qquad (4.35)$$
$$K_{eş} = \sqrt{K_{I\,eş}^2 + K_{II\,eş}^2}$$

eşitlikleri elde edilebilir. Burada $K_{I\,eş}$: mod I' e göre düzeltilmiş eşdeğer GŞF değişimini, $K_{II\,eş}$: mod II' ye göre düzeltilmiş eşdeğer GŞF değişimini, $K_{eş}$: bileşik mod' da ki toplam eşdeğer GŞF değişimini ifade etmektedir.

Yük-Uzama diyagramları malzemenin cinsine göre çeşitli şekillerde olabilir. Görülebilecek üç ana tip Şekil 4.12' de verilmiştir.



Şekil 4.12 Çekme deneyinden elde edilebilecek üç ana tip diyagram

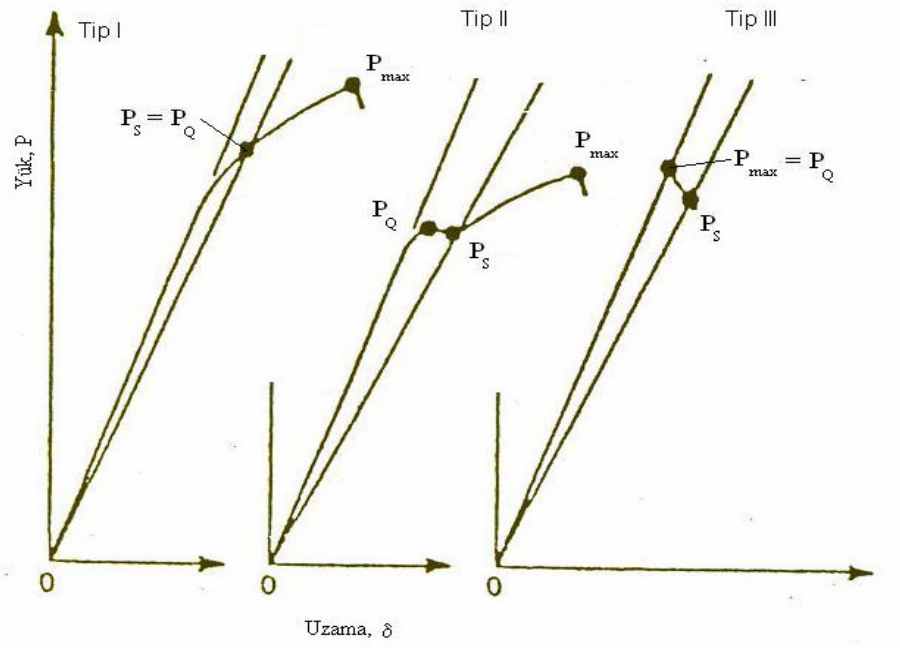
a) Plastik deformasyon sonucu kararlı çatlak ilerleyişini tanımlayan I. Tip
b) Kısa bir ani çatlak ilerleyişini ve sonrasında kararlı çatlak ilerleyişini tanımlayan II. Tip
c) Tümüyle elastik olarak davranan bir malzemenin kararsız çatlak ilerleyişini tanımlayan III. Tip

Yük-Uzama diyagramlarından görüldüğü gibi, başlangıçta uzama (δ), yük (P) ile lineer olarak artar. Birçok durumda gittikçe artan bir lineerlikten sapma bunu izler veya ani bir çatlak ilerlemesi ve durmasını yine lineer olmayan davranış izler (Tip I ve Tip II). Bu lineer olmayan davranışın nedeni, ani kırılmadan önceki plastik deformasyon ve kararlı çatlak ilerlemesidir. Eğer malzeme hemen hemen ideal elastik gibi davranırsa (buna çok nadir rastlanır) Şekil 4.12c' deki gibi bir diyagram elde edilir.

K_{IC}' ye karşılık gelen yükü saptamak için Şekil 4.13' de görüldüğü gibi lineer bölgenin eğiminden %5 daha az eğimli bir doğru, O orijininden başlayarak çizilir. Bu doğrunun deney eğrisini kestiği yere karşılık gelen yük P_S olarak kaydedilir. P_Q ise K_{IC} hesabında kullanılacak yüktür. P_Q' nun saptanması aşağıdaki gibi gerçekleştirilir;

i) Yük-uzama diyagramında P_S' den önce gelen ve P_S' den daha büyük bir yük yoksa $P_S = P_Q$ olarak alınır (Tip I).

ii) Eğer diyagramda P_S'den önce gelen ve P_S' den büyük bir yük değeri varsa, o yük değeri doğrudan P_Q olarak alınır (Tip II ve Tip III).



Şekil 4.13 P_S ve P_Q değerlerinin yük-uzama diyagramları üzerinden saptanması

Buradaki hesaplamalarda $P_{\max} / P_Q < 1{,}1$ olduğunda deney geçerli sayılır. Denklem 4.29 ve 4.30' da P_Q değeri yerine yazılarak K_{IC} ve K_{IIC} aşağıdaki gibi elde edilir.

$$K_{IC} = \left(Cos^2\theta\right)\left(\frac{P_Q}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\alpha}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)}\right) \tag{4.36}$$

$$K_{IIC} = \left(\frac{Sin\,2\theta}{2}\right)\left(\frac{P_Q}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\alpha}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)}\right) \tag{4.37}$$

5. DENEYLER

5.1. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Öncelikle iki yönlü cam kumaş takviyeli alçak yoğunluklu polietilen kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Malzeme üretimi Şekil 5.1. de resmi görülen el kumandalı hidrolik bir pres ve kalıptan oluşan düzenek hazırlanıp sıcak kalıplama yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

Kompozit malzeme üretiminde, fiber olarak şekil 5.2 de görülen iki yönlü 0º/90º profil çekme yöntemiyle üretilmiş 0.15 mm kalınlığında ve 0.2 mm elek aralığında cam kumaşı kullanılmıştır

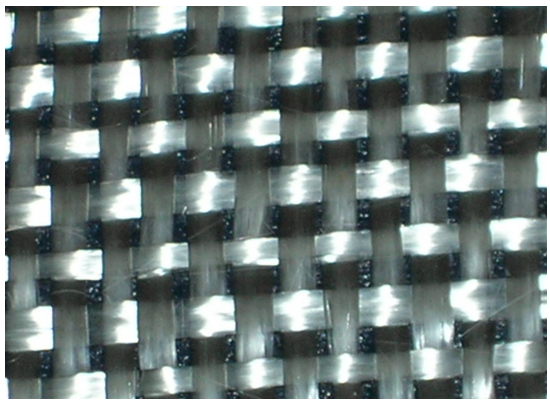
Tablo 5.1.Alçak yoğunluklu polietilen ve E camın özellikleri

Malzeme özellikleri	Alçak yoğunluklu polietilen	E Camı
Yoğunluğu (gr/cm^3)	0,92	2,56
Elastik modülü (GPa)	0,120-0,245	76
Kopma dayanımı (MPa)	85	2,5
Uzama (%)	90-650	2,75

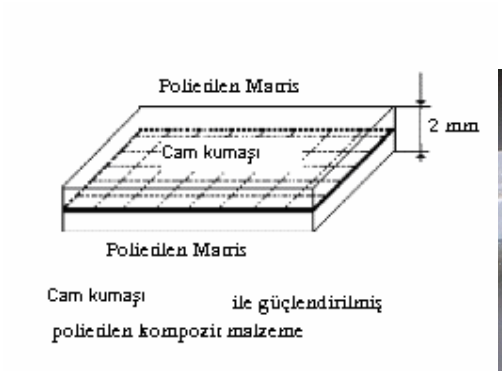
Matris olarak tablo 5.1 de özellikleri verilen alçak yoğunluklu polietilen termoplastik malzeme kullanılmıştır. Malzeme üretiminin ilk aşamasında granül halde bulunan polietilen, saç metalden yapılmış kalıba konularak pres altında 180ºC sıcaklıkta 2.5 MPa basınç altında 6 dakika tutulmuştur. Daha sonra sıcaklık 30ºC azaltılırken, basınçda 15 MPa'a çıkarılarak, 5 dakika bekletildi. Böylece 200x160x1 mm boyutlarında 1 tabaka alçak yoğunluklu polietilen levha üretildi. İki tabaka alçak yoğunluklu polietilen levha arasına bir sıra cam kumaş fiberler yerleştirilerek aynı düzenekte ve aynı üretim şartlarında 200x160x2 mm boyutlarında kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemenin şematik ve kompozit kesit görüntüsü şekil 5.3.'de verilmiştir.

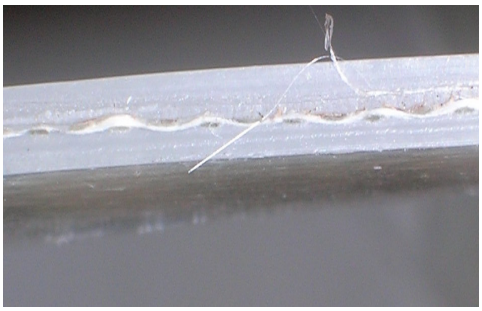


Şekil 5.1 Malzeme üretiminde kullanılan el kumandalı hidrolik pres



Şekil 5.2 İki yönlü 0º/90º ve 0.15 mm kalınlığında cam kumaşı





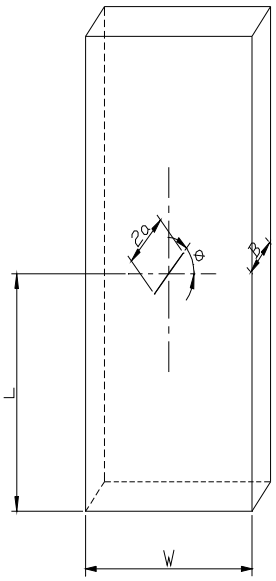
(a) (b)

Şekil 5.3 Kompozit malzemenin üretiminin,

a) şematik
b) kompozit kesiti

Çekme deneyleri için ASTM E 647 standardına göre W=23 mm, L= 96mm ve $B = 2$ mm olan levhalar kullanılmıştır.(Şekil 5.4) Bu numunelerin merkezine 2a=6 mm boyunda merkezi çatlaklar açıldı. Bu çatlaklar numune en ekseniyle 0º, 15º, 30º, 45º, 60º ve 75º açılar yapacak şekilde açılmıştır.

Çatlakları açmadan önce numune üzerine 6 mm boyunda çatlağın yeri özel kalemle işaretlendi. Sonra model bıçağıyla işaretli bu işaretli bölge numunenin kalınlığı boyunca kesildi. Hassas kesim için üzerinde açı ve boy skalası bulunan Mitutoyo marka el mikroskobu kullanıldı.



Şekil 5.4. Çekme testi deneylerinde kullanılan deney çubuğu

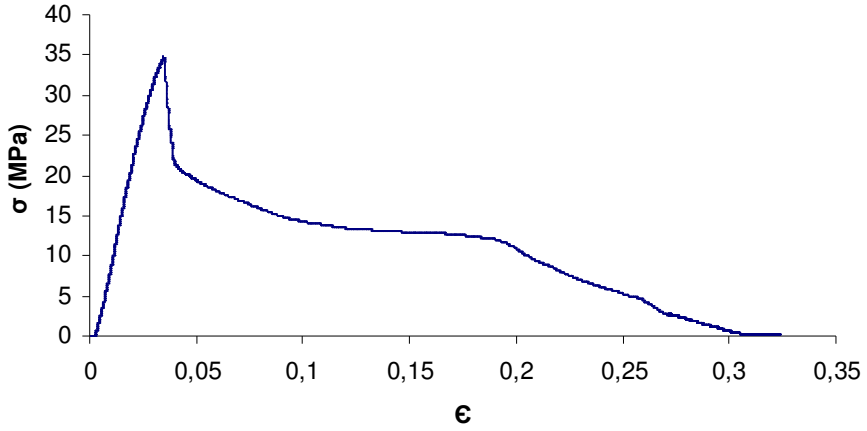
5.2. ÇEKME DENEYİ

Şekil 5.4. de görüldüğü gibi numuneler hazırlanarak Uludağ Üniversitesi Laboratuarında Şekil 5.5. de bulunan Instron 4301 marka Çekme Test Cihazında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler 2,54 mm/dk ilerleme hızında oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 5.5. Çekme deneylerinde kullanılan test cihazı

Kompozit malzemeye ait kuvvet-şekil değiştirme (σ-Є) grafiği şekil 5.6 da verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi σ-Є eğrisinin muhtelif yerlerinde dalgalanmalar görülmektedir. Gerilmenin 10 MPa kadar olan bölümlerinde ki dalgalanmaların, kompozit malzeme uzarken cam elyafın örgülü fiberin kıvrımlarını düzlenmesi sırasındaki ani uzamalardan kaynaklandığı sanılmaktadır. Gerilmenin 10 MPa – 35 MPa aralığındaki keskin dalgalanmalar beklenildiği gibi fiberin kopmaya başladığı safhadır. Bir cam kumaşı kopunca yükte ani düşüş olmuş akabinde bir sonraki cam elyaf yükü üstlenmiş arkasından o da kopmuş ve böylece maksimum yüklemeye kadar devam etmiştir. Daha sonra termoplastik matrisin etkisiyle sünek davranış ve kopma gerçekleşmiştir.



Şekil 5.6 Kompozit malzemeye ait kuvvet-uzama (σ-Є) grafiği

Numuneler çekme işlemine tabi tutulurken Sony Dsc F828 marka 8.2 mega piksel 14x dijital fotoğraf makinesi ile film çekimi yapıldı. Film çekimi esnasında yük değerleri ve uzama miktarları tespit edildi. Instron cihazına kaydedilen veriler bir diskete alınarak bilgisayar ortamında grafikleri çizildi. Bilgisayar ortamına aktarılan resimlerde çatlak ağzı açılma miktarları ve çatlak ilerleme miktarları autocad ortamında ölçümleri yapıldı.

5.3. YAKMA DENEYİ

Matris malzemesi ile takviye malzemesinin hacimsel oranlarını elde etmek için ASTM-D2584'e uygun olarak yakma deneyleri gerçekleştirildi.

25x50 mm boyutlarında kompozit malzeme numunesi O haus Adventurer marka hassas terazide tartıldıktan sonra, 600 ^{o}C elektrik ısıtmalı fırında polietilen tamamen buharlaşıncaya kadar yakıldı. Geriye kalan cam elyaf örgü yeniden tartılarak polietilen ve cam kumaş örgünün ağırlıkları bulundu. Cam kumaş örgü fiberin yoğunluğu ρ_f = 2.56 gr/cm^3 ve matris malzemenin yoğunluğu da ρ_c = 0.92 gr/cm^3 olduğu bilindiğinden, kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı aşağıdaki bağlantıdan bulundu.

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \quad (5.1)$$

Buradan W_f ve $W_{c,}$ sırasıyla fiber ve kompozitin ağırlıklarıdır. ρ_f ve $\rho_{c,}$ ise sırasıyla fiber ve kompozitin yoğunluklarıdır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yakma deneyi sonucunda kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı $V_f = 0.29$ olarak bulunmuştur. Ayrıca elyafın ağırlıkça oranı $V_{fağ} = W_f / W_c$ den 0.15 bulunmuştur.

Yakma deney sonucunda kompozit malzemenin Poisson oranı ve kayma modülü aşağıdaki formüllerden bulunmuştur.

$$\upsilon_{12} = (V_f * \upsilon_f) + (V_m * \upsilon_m) \quad (5.2)$$

formülden poisson oranı,

$$1/G_{12} = (V_f / G_f) + (V_m / G_m) \quad (5.3)$$

Kayma modülü bulunur. Cam kumaş örgü fiberin poisson oranı $\upsilon_f = 0.20$ ve matris malzemenin poisson oranı ise $\upsilon_m = 0.48$ ve cam kumaş örgü fiberin kayma modülü $G_f = 3200$ MPa ve matris malzemenin kayma modülü ise $G_m = 85$ MPa olduğu bilinmektedir. Kompozit malzemenin özellikleri tablo 5.2. de gösterilmektedir.

Tablo 5.2.Deney malzemesinin mekanik özellikleri

Çekme deneyi özellikleri	Bulunan değerler
Elastisite Modülü (E)	1300 MPa
Çekme Dayanımı	35 MPa
Uzama (%)	%30
Kayma Modülü (G_{12})	100 MPa
Poisson Oranı (ν_{12})	0,41

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

6.1. ÇEKME DENEYLERİ

Gerilme şiddet faktörü (GŞF) değişim miktarlarının (Kı ve Kıı) hesaplanmasında ilk olarak eşitlik (4.29)ve eşitlik (4.30) da verilen formüller kullanılmıştır. Daha sonra Walker eşitlikleri ve Sole fonksiyonları kullanılarak ($K_{ı\,eş}$ ve $K_{ıı\,eş}$) değerleri hesaplanmıştır. Sole fonksiyonlarında elde edilen $K_{ı\,eş}$, $K_{ıı\,eş}$ ve $K_{eş}$ 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 bu eşitlikler kullanılmıştır. Ayrıca enerji boşalma miktarı olan J integralinin (Jıc ve Jııc) miktarlarının eşitlik (4.25) ve eşitlik (4.26) dan hesaplanmıştır. Fakat Jc hesaplamalarda eşitlik (4.27) kullanılmıştır.

İnstron çekme cihazından veriler alınarak her bir çatlak için yük-uzama grafikleri çizilerek Pmax kuvvetleri belirlenmiştir. P yüklerine karşılık gelen çatlak ilerlemesi (a) ve COD değerleri autocad ortamında ölçülerek (Ek I.a) gösterilmiştir. Tüm çatlaklar için Δa, Pmax, Kıc, Kııc, Jıc, ve Jııc değerleri Eklerde verilmiştir.

Çekme deneyi sonucunda yük-uzama diyagramlarından 0^o, 15^o, 30^o, 45^o, 60^o ve 75^o açılı çatlaklar için şekil 5.8. de ki diyagramlardan plastik deformasyon sonucu kararlı çatlak ilerleyişini tanımlayan tip I'e göre uygun çıkmıştır. Bu sebepten dolayı Kıc ve Kııc 'ye karşılık gelen yükü saptamak için şekil 5.9.'da görüldüğü gibi lineer bölgenin eğiminden %5 daha eğimli bir doğru, O orijininden başlayarak çizilir. Bu yeni çizilen eğri doğrunun deney eğrisini kestiği yere karşılık gelen yük P_Q olarak alındı. Formüllerde yerlerine konularak Kıc ve Kııc'ler hesaplanmıştır.

Kompozit malzemenin merkezine değişik açılarda açılan çatlağın çekmedeki etkisini görebilmek için çatlaksız numune hazırlanmıştır. Bu numuneyi çekme testine tabi tutarak çatlağın etkisi incelenmiştir.

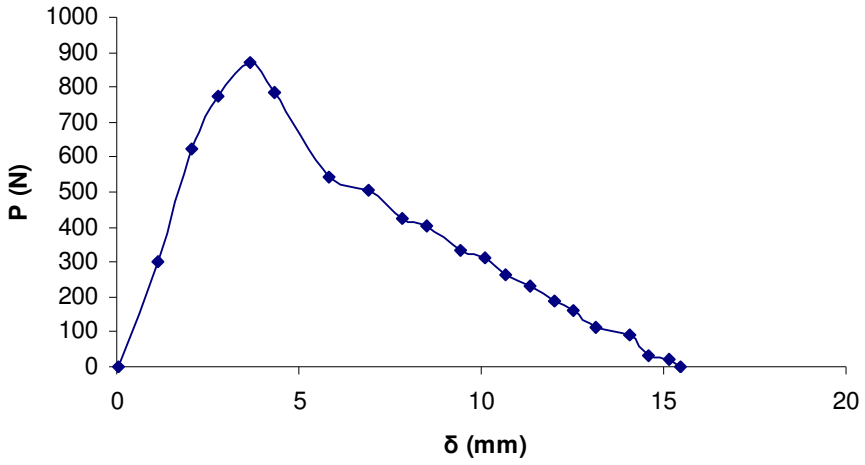
Çatlaksız numunede Pmax 1601,28 N iken uzama 3,20 mm de olmaktadır. Cam kumaş takviyeli kompozit malzemenin tamamen kopması için 29,61 mm de gerçekleşmektedir. Kompozit malzeme 1601 N'dan 1000 N'a 3,65 mm uzama ile gerçekleşmektedir. Bunun sebebi çekme sırasında tabakalı halde bulunan dikey ve yatay yöndeki cam elyafların birbirine sürtündüğü bölgelerde aşınma oluşmaktadır.

6.2. 0^o AÇILI ÇATLAKLI NUMUNELER

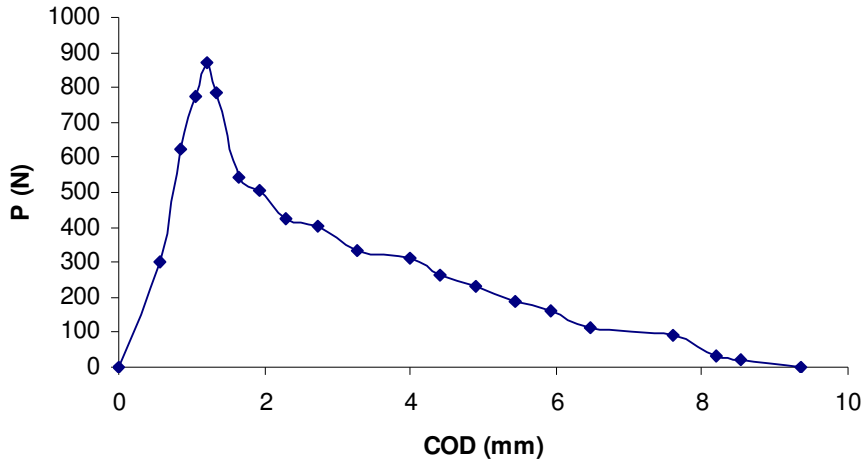
6.2.1. 0^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deney Sonuçları

Merkezine 0^o açılı çatlak bulunan kompozit numuneler yukarıda anlatılan şartlarda çekme deneyine maruz bırakılmıştır.

Şekil 6.1 de yüklemeye karşılık uzama miktarının grafiği gösterilmiştir. 0^o açılı çatlaklı numunede maksimum yükleme 871.81 N iken uzama 3.66 mm olarak bulunmuştur. Numuneler ortalama 15 N da ve 15 mm uzamada kopmuşturlar. Ayrıca kuvvet ve uzama miktarları EK I a da verilmiştir.



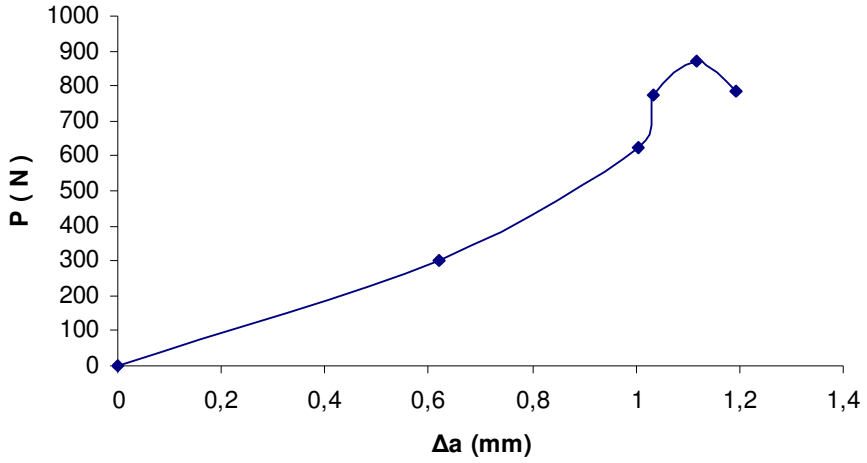
Şekil 6.1 0^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin (P-δ) grafiği



Şekil 6.2 0^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin (P-COD) grafiği

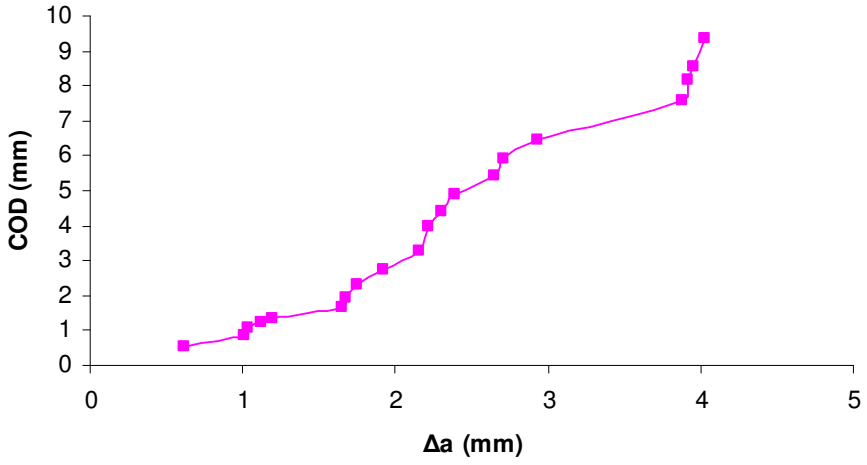
Çekme deneyi yapılırken yaklaşık olarak her 0,5 mm de çatlak ucu açılma miktarı ölçülmüştür. Belirlenen çekme yüküne karşılık, çatlak ucu açılma grafiği şekil 6.2 de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi çatlağın çekme kuvvetiyle hemen hemen max yüklemeye kadar lineer değiştiği söylenebilir. Bu grafikten çatlağın Pmax= 822 N kuvvetine kadar kararlı olduğu Pmax kuvvetinden sonra hızlandığı görülmektedir. Numuneler ortalama 15 N yüklemede ve 9.10 mm çatlak ucu açılma miktarında kopmuştur. Ayrıca kuvvet ve çatlak ucu açılma miktarları EK I a da verilmiştir.

Çatlak ilerleme miktarının yüklemeye karşı değişimi grafiği şekil 6.3 de gösterilmiştir. Burada çatlak ilerleme miktarı maksimum yüklemeye kadar lineer değiştiği görülmektedir. Pmax = 871,81 N da, a = 1.12 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 6.3 0^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin (P-Δa) grafiği

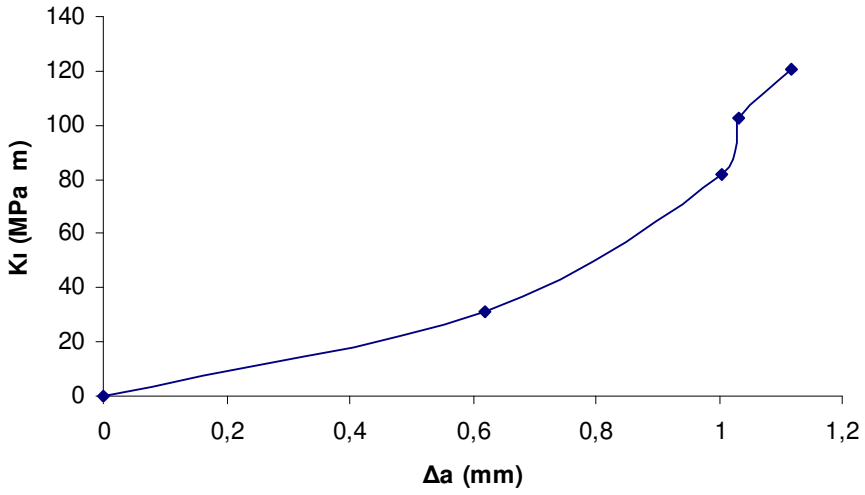
0^o açılı çatlak numunelerin çatlak ucu açılma miktarlarının çatlak ilerleme miktarlarına göre değişim grafiği şekil 6.4 de gösterilmiştir. Maksimum yüklemeye kadar çatlak ucu ile çatlak ilerlemesi orantılı olarak artmıştır. Maksimum yüklemeden sonra çatlak ucu açılma miktarları çatlak ilerlemesinin yaklaşık 2 kat daha hızlı ilerlemiştir. Başlangıçta COD= 0.56 mm de Δa= 0.62 mm iken, kopma anında COD = 9.37 mm de ise Δa= 4.03 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 6.4 0^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin (COD-Δa) grafiği

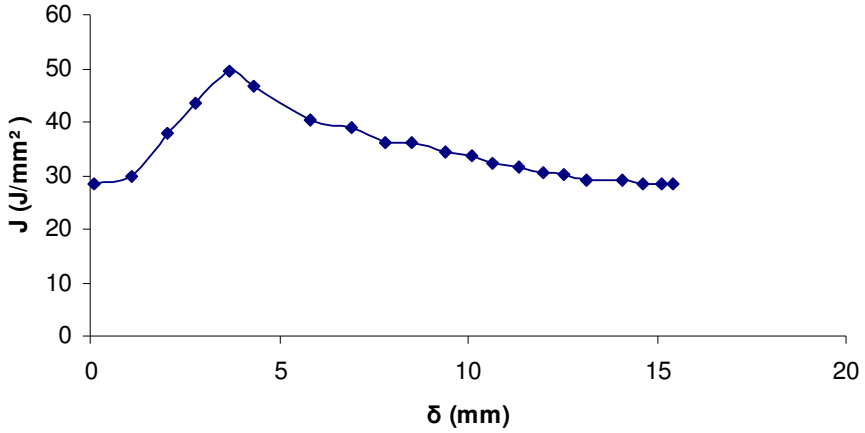
Şekil 6.5 de 0^o açılı çatlaklı numunenin çekme neticesinde çatlak ilerlemesi ve K_I'e göre değişimin grafiği gösterilmiştir. Burada K_I değerleri eşitlik 4.29 dan hesaplanmıştır. Başlangıçta a= 0.62 mm, P = 299.75 N ve COD = 0.56 mm de K_I = 30.85 MPa$\sqrt{m}$ iken, Pmax = 871.81 N, a = 1.12 mm ve COD= 1.21 mm de K_I =120.44 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. 0^o açılı çatlaklı numunede ayrılma modunda (Mod I) hasar olduğundan sadece K_I değerleri bulunmuş ve değerlendirmeler buna göre yapılmıştır.

Şekil 6.5 incelendiğinde K_I artarken çatlak ilerleme miktarı da arttığı görülmektedir. Çatlak ilerleme miktarı başlangıçta hızla artarken kopmaya doğru bir miktar azalma oluşmaktadır. Bu da çatlaklı çekme testinde beklenen durumdur.



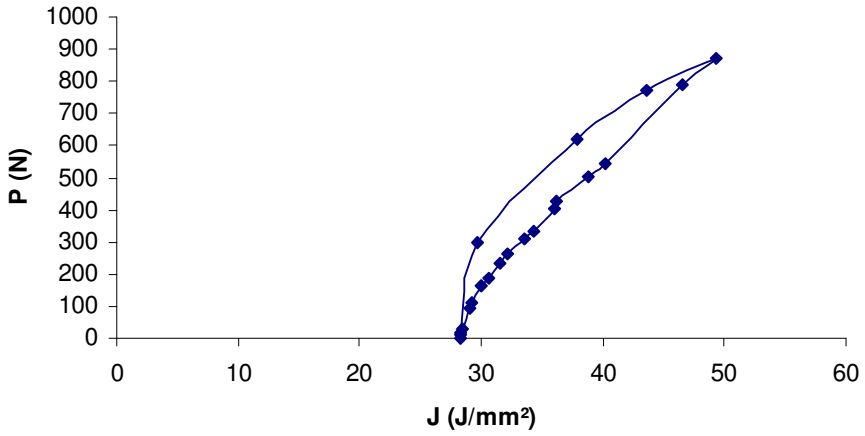
Şekil 6.5 0^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin K_I-Δa grafiği

Şekil 6.6 da 0^o açılı çatlaklı numunede çekme neticesinde uzamanın şekil değiştirme enerji boşalma miktarı (J) ile değişmesinin grafiği gösterilmiştir. 0^o açılı çatlaklı numuneyi çekme için başlangıçta J= 28.30 J/mm^2 lik bir enerji gerekmektedir. Uzama ilerledikçe çatlaklı numuneyi koparmak için gereken bu enerji miktarı artmıştır. Kopma anında ise başlangıçtaki enerjiyi miktarı ile eşitlenmiştir ve bu beklenen bir durumdur. J değerleri eşitlik (4.25) den hesaplanarak bulunmuştur. 0^o açılı çatlaklı numunede ayrılma modunda (Mod I) hasar olduğundan sadece J_I değerleri bulunmuş ve değerlendirmeler buna göre yapılmıştır.



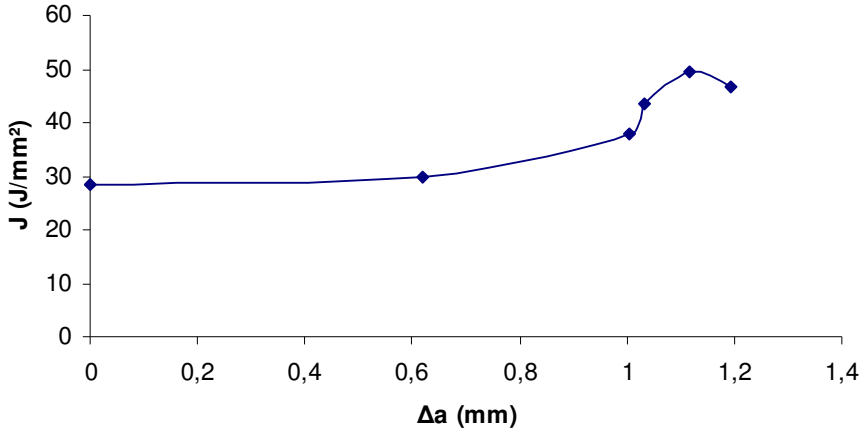
Şekil 6.6 0^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin $J_ı$-δ grafiği

Yüklemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarına göre grafiği şekil 6.7 de gösterilmiştir. Başlangıçta numunenin şeklini değiştirebilmek için gerekli enerji boşalma miktarı 28.30 J/mm^2 iken, yüklemenin maksimum olduğu 871.81 N da şekil değiştirme enerji boşalma miktarı 49.31 J/mm^2 de maksimum değere ulaşmıştır. Bu değerden sonra numuneye uygulanan yük azaldıkça enerjide azalmıştır.



Şekil 6.7 0^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Jı grafiği

Şekil 6.8 de şekil değiştirme enerji boşalma miktarı ve çatlak ilerlemesine göre grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta çatlağı açmak için gereken enerji 28.30 J/mm2 iken, Pmax = 871.81 N ve a = 1.12 mm de $J_ı$ =49.31 J/mm^2 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.8 0^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin Jı-Δa grafiği

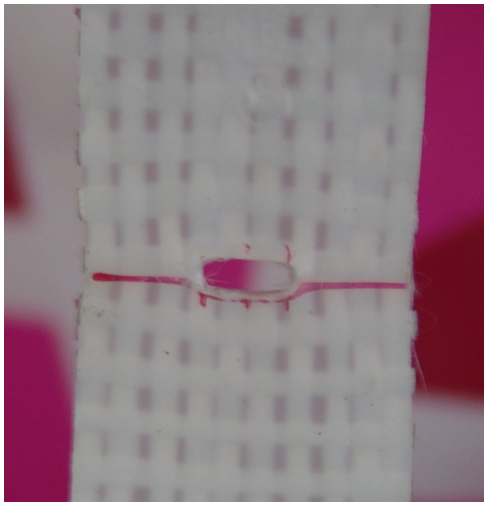
6.2.2. 0^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

Hasar mekanizması incelenecek olursa, deneyin başlamasıyla beraber ilk yüklemede çatlak ağızlarında beyazlaşma oluşmaya başlamıştır. Bunu çatlak ilerlemesi takip etmiştir.

İlerleyen yüklemelerde şekil 6.9 da görüldüğü gibi matris yırtılması çatlağın ucundaki fiberi geçerek devam etmiştir. Bu ara fiber-matris ara yüzey ayrılması meydana gelmiş ve yüklemenin artmasıyla birlikte boşta kalan cam elyaf kopmuştur.

Boşta kalan cam elyaf koptuktan sonra iki dikey cam kumaş arasında boşluk kadar matris yırtılması devam etmiş, bir sonraki cam kumaşı boşta kalmış ve bu şekilde kopma olayı çatlağın kararlı olmayan büyüklüğe gelinceye kadar çatlak ilerlemesi devam etmiştir.

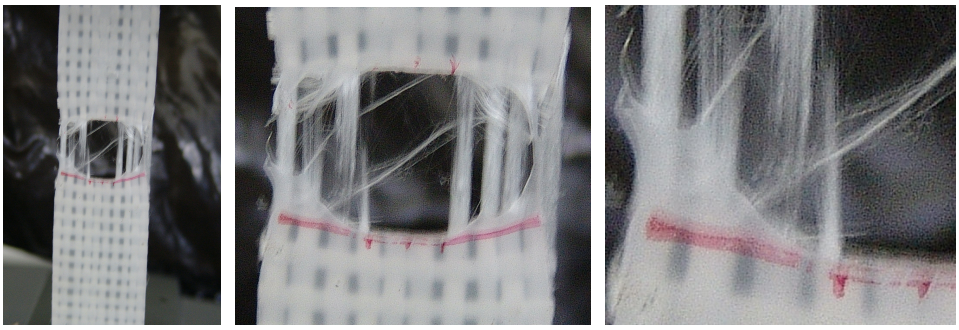
Çatlak açısının 0^o olmasından dolayı sadece Mod I de hasar oluşmuş ve çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca ve kopuncaya kadar devam etmiştir. Çatlak ilerleme düzlemi doğrultusunda bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 6.9 0^o çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi

Fiber kopması şekil 6.10 da görüldüğü gibi fiber matris ara yüzey ayrılması ve fiber sıyrılması ile meydana gelmiştir. Fiber sıyrılması sadece 0.2 mm gibi sınırlı bir bölgede olmuştur. Kullanılan cam kumaş, örgü olduğundan buda beklenen bir durumdur.

Polietilen, kompozit malzeme üretimi sırasında eridiğinden cam kumaş, örgülü fiberlerin bütün yüzeylerini kaplamış hatta iki cam kumaşın örgü yaptığı bölgelerde bile iki cam kumaşın arasına girerek bütün cam kumaşları sıvamıştır.



(a) (b) (c)

Şekil 6.10 0^o çatlak geometrisine sahip numunenin kopma sonrası resimleri

a-) Kopma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

Çatlak ilerlemesi yüklemenin artışıyla birlikte a= 1.12 mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve aniden kopmuştur.

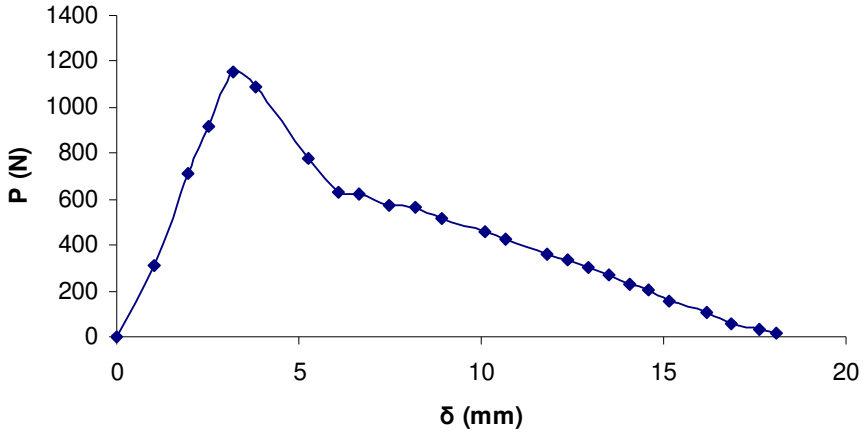
6.3. 15^o AÇILI ÇATLAKLI NUMUNELER

6.3.1. 15^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deney Sonuçları

Merkezine yatayla 15^o lik açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneleri de çekme deneyine tabi tutulmuştur.

Çatlak ilerleme miktarı el mikroskobuyla ölçülmüştür. Ayrıca deney sırasında çatlağın durumu dijital kamerayla fotoğraf ve videoları çekilerek kayıt edilmiştir. Daha sonra bu video ve fotoğraflar kullanılarak bilgisayar ortamından autocad yardımıyla çatlak ilerleme ve COD miktarları ölçülmüştür.

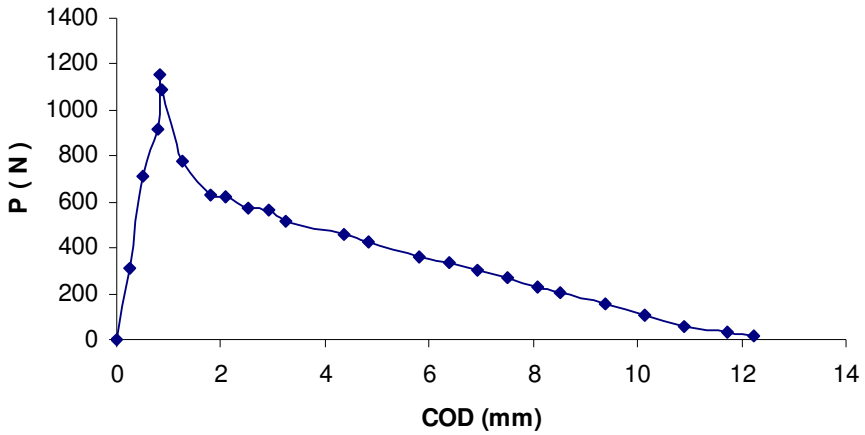
Şekil 6.11 de 15^o açılı çatlaklı numunenin yüklemeye karşı ilerleme miktarının grafiği gösterilmiştir. Yükleme 1154 N da maksimum ve uzama miktarı ise 3.175 mm iken, koptuğu anda P = 20.12 N ve δ= 18.09 mm olarak bulunmuştur. Numuneler ortalama 25 N da ve 17.50 mm uzamada kopmuştur.



Şekil 6.11 15^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-δ grafiği

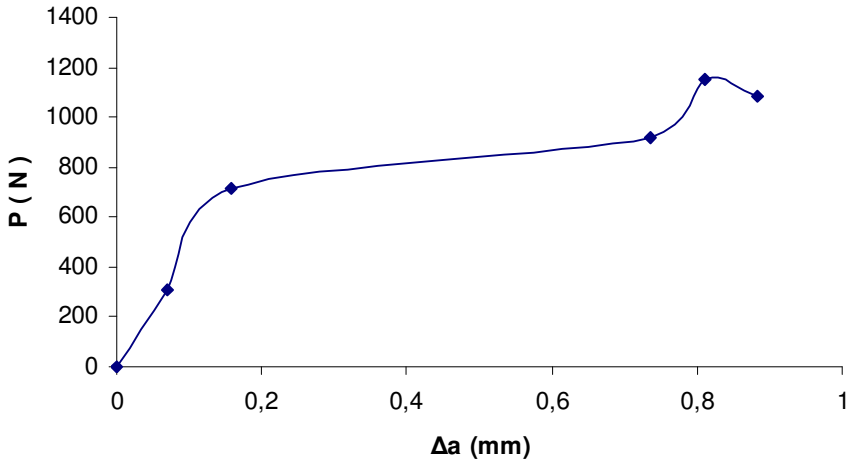
Belirlenen çekme yüküne karşılık, çatlak ucu açılma grafiği şekil 6.12 de verilmiştir. Bu grafikten çatlak ucu açılma miktarı 9.38 mm kadar kararlı olduğu bu

değerden sonra hızlandığı görülmektedir. Numuneler ortalama 25 N yüklemede ve 12.10 mm çatlak ucu açılma miktarında kopmuştur. Ayrıca kuvvet ve çatlak ucu açılma miktarları EK I b da verilmiştir.



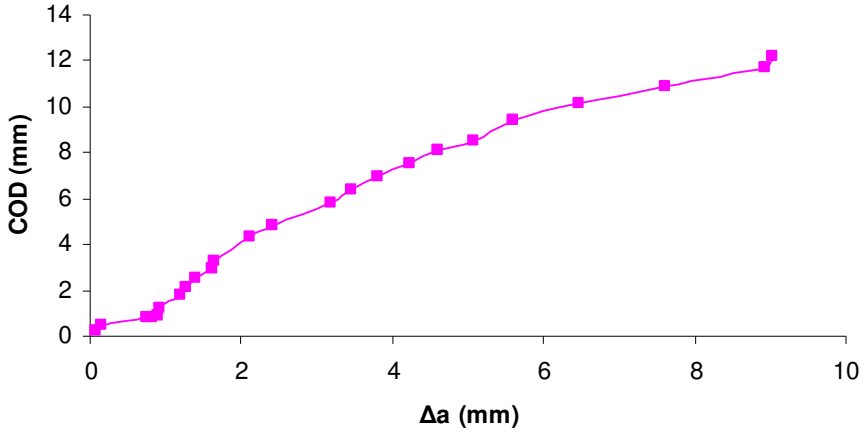
Şekil 6.12 15^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-COD grafiği

Belirlenen yüklemeye karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 6.13 de verilmiştir. Bu grafikten çatlağın P=1154 N yüküne kadar kararlı olduğu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlağın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir. 15^{o} açılı çatlaklı numunede ortalama 25 N yüklemede ve çatlak ilerlemesi 5.60 mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.



Şekil 6.13 15^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Δa grafiği

Şekil 6.14 de 15^o açılı çatlak numunenin çatlak ucu açılma miktarlarının, çatlak ilerleme miktarlarına göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta Δa = 0.07 mm ve COD = 0.2564 mm iken, kopma anında ise Δa =9.02 mm ve 12.24 mm olarak bulunmuştur. 0^o açılı numunede olduğu gibi çatlak ucu açılma miktarının çatlak ilerlemesine göre daha fazla hızlı ilerlemiştir. Grafikten görüldüğü gibi Δa = 5.60 mm ve COD = 9.38 mm kadar kararlı olarak ilerlemiş, bu değerlerden sonra kararlı olmayan bölgeye girerek numune kopmuştur.

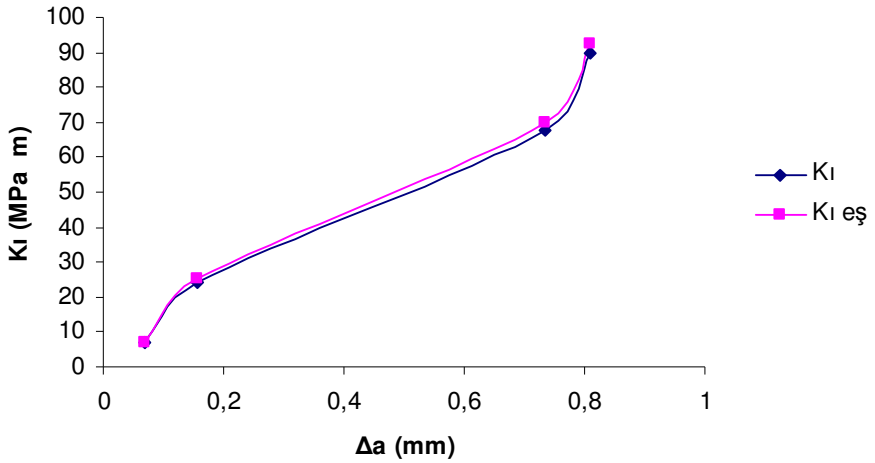


Şekil 6.14 15^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin COD-Δa grafiği

15^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -15^o 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 birleşik mod meydana gelmiştir. Dolayısıyla çatlak ucunda gerilme şiddet faktörü Kı ve Kıı oluşmaktadır. Eşitlik 4.29, 4.30 ve 4.35 kullanılarak Kı, Kı $_{eş}$, Kıı, Kıı $_{eş}$, ve K$_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler Ek I b de verilmiştir.

Çatlak ilerleme miktarı a= 0.81 mm ve Pmax= 1154.18 N iken gerilme şiddet faktörü miktarı da maksimum olmuştur. Şekil 6.15 de çatlak ilerleme miktarı, gerilme şiddet faktör miktarları Kı ve Kı$_{eş}$ göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta a=0.07 mm ve P =307.36 N da Kı =7.01 MPa$\sqrt{m}$, Kı$_{eş}$ =7.26 MPa$\sqrt{m}$ iken, kopma anında ise a=0.81 mm ve P= 1154.18 N da Kı =89.56 MPa$\sqrt{m}$, Kıeş =92.71 MPa$\sqrt{m}$ maksimum gerilme şiddet faktörleri (Kı ve Kı$_{eş}$) olarak

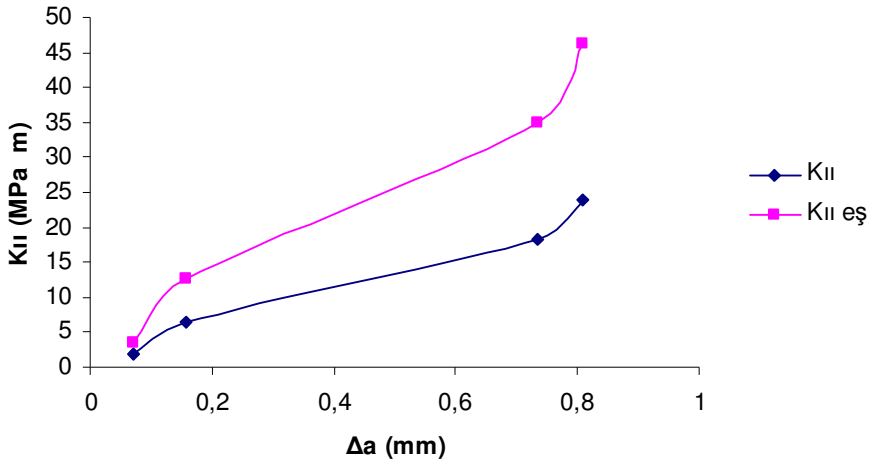
bulunmuştur. Yani $K_{I_{eş}}$, KI den daha büyük çıkmıştır. Çünkü $K_{I_{eş}}$ kink açışına bağlı olarak düzeltilmiş bir değerdir, daha büyük çıkması beklenen bir durumdur.



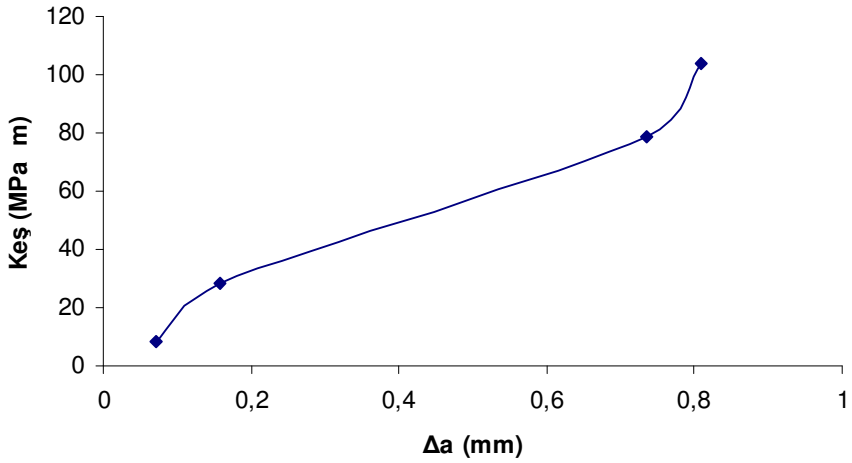
Şekil 6.15 15^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin KI-Δa grafiği

Şekil 6.16 da ise çatlak ilerleme miktarının, gerilme şiddet faktörü miktarları KII ve $K_{II_{eş}}$ göre değişimi gösterilmiştir. Başlangıçta a=0.07 mm ve P =307.36 N da KII =1.88 MPa$\sqrt{m}$, $K_{II_{eş}}$ =3.63 MPa$\sqrt{m}$ iken, a=0.81 mm ve Pmax= 1154.18 N da KII =23.99 MPa$\sqrt{m}$, $K_{II_{eş}}$ =46.35 MPa$\sqrt{m}$ maksimum gerilme şiddet faktörleri (KII ve $K_{II_{eş}}$) olarak bulunmuştur. Yani $K_{II_{eş}}$, KII den daha büyük çıkmıştır. Bu da $K_{I_{eş}}$ de olduğu gibi, $K_{II_{eş}}$ in de kink açısına bağlı olarak düzeltilmiş bir değer olmasındandır. Ayrıca $K_{II_{eş}}$ ile KII arasındaki büyüklük oranı, $K_{I_{eş}}$'in, KI ' oranından daha fazladır ve bu oran kink açısının büyümesiyle oransal biçimde değişmektedir. Yine bu da beklenen bir durumdur.

Birleşik mod da Keş eşitlik 4.35 den hesaplandığından çatlak ilerleme miktarı 0.07 mm de $K_{eş}$ =8.11 MPa$\sqrt{m}$ değerinden çatlak ilerleme miktarı 0.81 mm ulaştığında $K_{eş}$ =103.65 MPa$\sqrt{m}$ maksimum gerilme şiddeti olarak bulunmuştur. Şekil 6.17 de 15^o açılı çatlaklı numunenin çatlak ilerleme miktarının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü miktarları $K_{eş}$'e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi çatlak ilerleme miktarı kopmaya yaklaştığı zaman $K_{eş}$ düşüş göstermiştir.



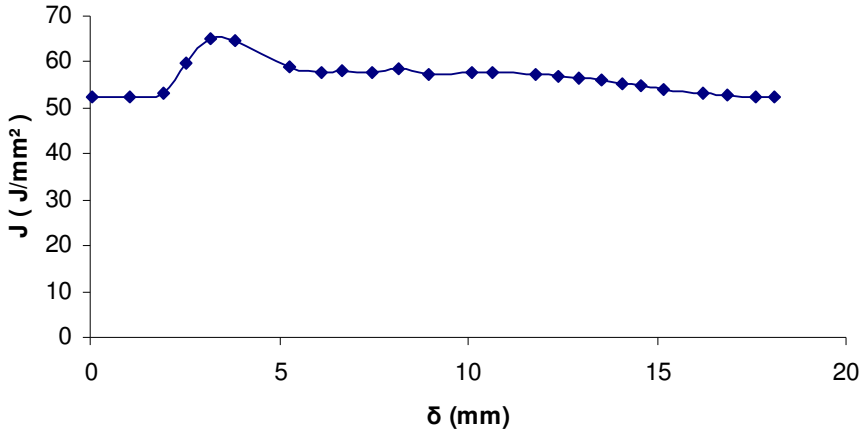
Şekil 6.16 15^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin Kıı-Δa grafiği



Şekil 6.17 15^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin $K_{eş}$-Δa grafiği

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

Şekil 6.18 de 15^{o} açılı çatlaklı numunede çekme neticesinde uzamanın şekil değiştirme enerji boşalma miktarı ile değişmesinin grafiği gösterilmiştir. 15^{o} açılı çatlaklı numuneyi çekme için başlangıçta J= 52.40 J/mm^{2} lik bir enerji gerekmektedir. Uzama ilerledikçe çatlaklı numuneyi koparmak için gereken bu enerji miktarı artmıştır. Kırılma anında ise başlangıçtaki enerjiyi miktarı ile eşitlenmiştir ve bu beklenen bir durumdur.

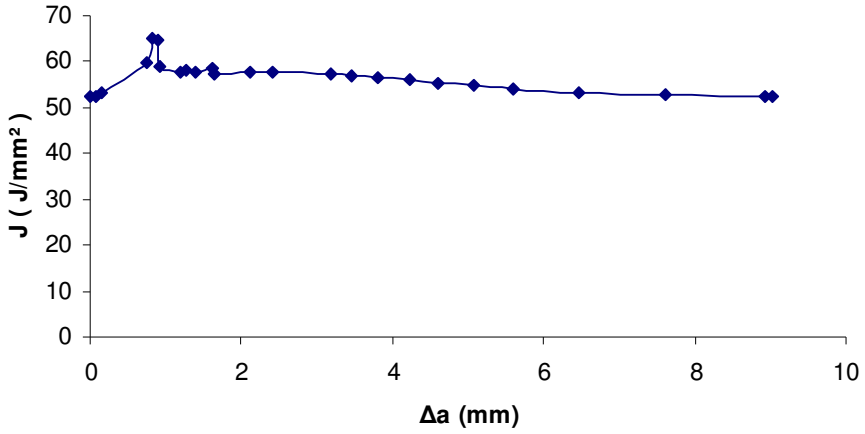


Şekil 6.18 15^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-δ grafiği

Şekil değiştirme enerji boşalma miktarında da çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -15^{o} 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 birleşik mod meydana gelmiştir. Dolayısıyla çatlak ucunda şekil değiştirme enerji boşalma faktörü Jı ve Jıı oluşmaktadır. Eşitlik 4.25, 4.26 ve 4.27 kullanılarak Jı, Jıı, ve J değerleri hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler Ek I b de verilmiştir.

Şekil 6.19 da çatlak ilerleme miktarı, şekil değiştirme enerji boşalma miktarı J göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta şekil değiştirebilmek için gereken enerji J =52.40 J/mm^{2} iken, maksimum yüklemede ise a=0.81 mm ve P= 1154.18 N da J =69.10 J/mm^{2} olarak bulunmuştur. Maksimum yüklemeden sonra yüklemenin azalmasıyla şekil değiştirme enerjisi de azalmıştır. Şekil değiştirme enerji boşalma

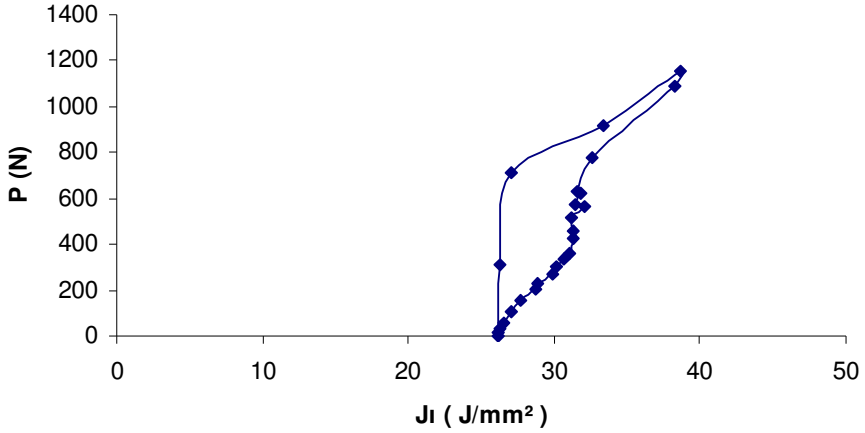
miktarı 54.48 J/mm^2 den sonra çatlak ilerleme hızı kararlı olmayan bölgeye girerek numune aniden kopmuştur.



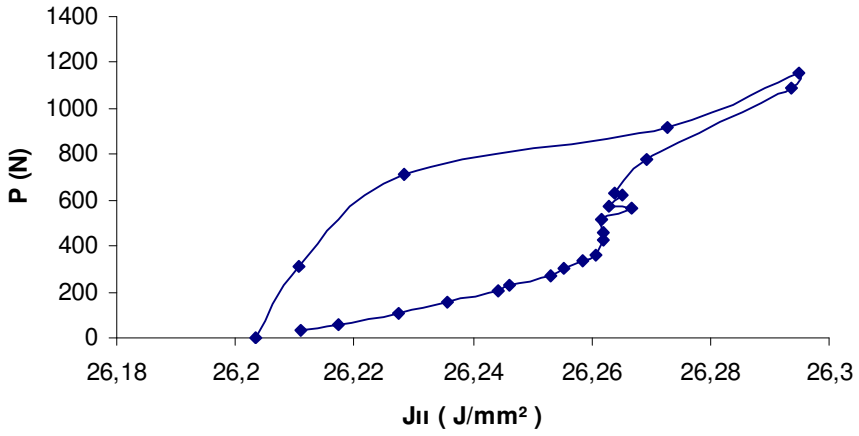
Şekil 6.19 15^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-Δa grafiği

Yüklemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı Jı göre grafiği şekil 6.20 de gösterilmiştir. Burada 15^o açılı çatlaklı numunenin şeklinin değişmesi için gerekli enerji 26.20 J/mm^2 dir. Numuneye uygulanan yükleme maksimum yüklemeye kadar arttıkça enerjide artmıştır. Jı= 38.65 J/mm^2 den sonra elyaflar kırılmaya başladığından enerji miktarı da azalmıştır.

Şekil 6.21 de şekil değiştirme enerji boşalma miktarı Jıı nin yüklemeye göre grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta Jıı = 26.20 J/mm^2 de P = 1.74 N iken, Pmax =1154.18 N da Jıı =30.45 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Yani Jı, Jıı den daha büyük çıkmıştır. Çünkü Jı'in hesaplamasında kullanılan Kı, kink açışına bağlı olarak düzeltilmiş bir değerdir, daha büyük çıkması beklenen bir durumdur.



Şekil 6.20 15^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Jı grafiği



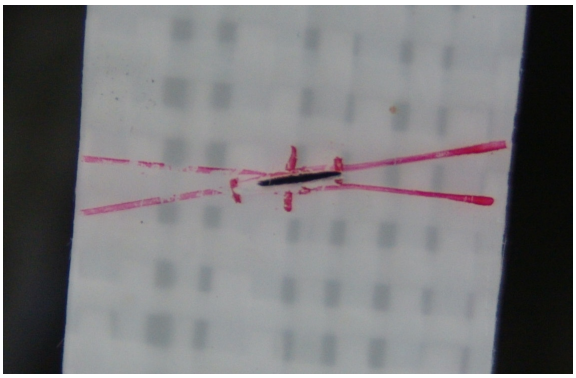
Şekil 6.21 15^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Jıı grafiği

6.3.2. 15^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

Burada 15^{o} açılı çatlaklı numunelerde açılma ve kayma modlarında (Mod I ve Mod II) hasar olmuştur. Hasar mekanizması incelenecek olursa, 15^{o} açılı çatlaklı numune çekmeye tabi tutulduğundan öncelikle çatlak uçlarına yakın bölgelerde

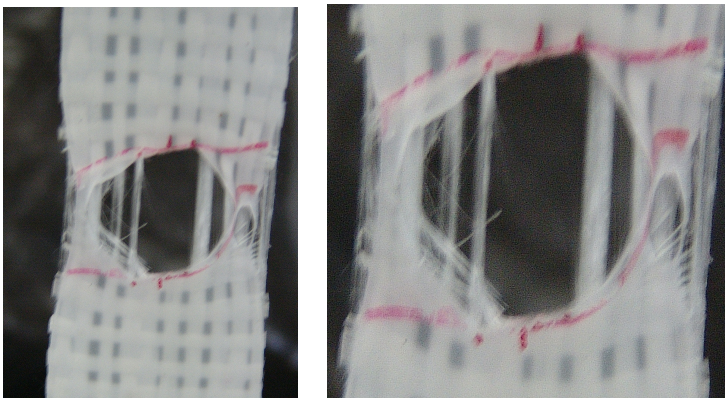
beyazlaşma meydana geldi. Daha sonra matris malzeme de yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

Çekme ilerledikçe matris içerisindeki çatlak yırtılması yatayla -15^{o} açıyla yönelerek 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 $_{+}^{-}$ α açısı kadar farklı yönlerde oluşabilir.) Bu sırada fiberde bridging yani köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü. Şekil.6.22. ve şekil 6.23. de yönlenme, kink ve köprülenme olayı görülmektedir.



Şekil 6.22 15^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi

Çekme yükünün artması ile birlikte cam kumaş 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 çekme yükünün uzamasıyla birlikte bu çatlaklar büyüyerek cam kumaşı koparmıştır.



(a) (b)

Şekil 6.23 15^{o} açılı çatlak geometrisine sahip numunenin kırılma sonrası resimleri

a-) Kırılma sonra malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

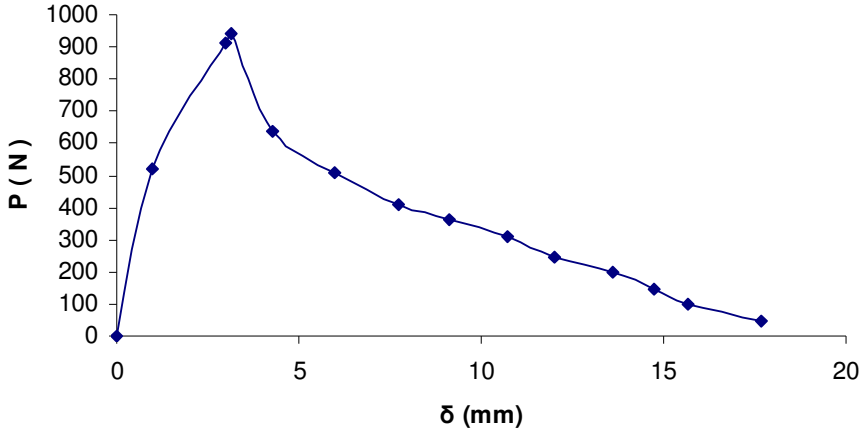
Çatlak ilerlemesi yüklemenin artışıyla birlikte a= 5.60 mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve a=8.94 mm de kopmuştur.

6.4. 30^{o} AÇILI ÇATLAKLI NUMUNELER

6.4.1. 30^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deney Sonuçları

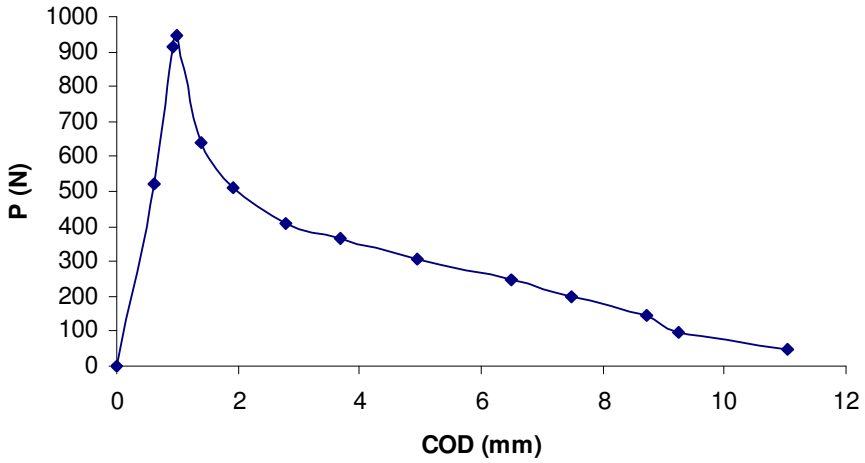
Ortasına yatayla 30^{o} lik açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneleri de çekme deneyine tabi tutulmuştur.

0^{o} ve 15^{o} de ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. 30^{o} açılı çatlaklı numunenin yüklemeye karşı ilerleme miktarının grafiği şekil 6.24. da gösterilmiştir. Yükleme 944.31 N da maksimum ve uzama miktarı ise 3.1242 mm iken, kopma anında P = 48.05 N ve δ= 17.67 mm olarak bulunmuştur. Numuneler ortalama 50 N da ve 17.75 mm uzamada kopmuştur.



Şekil 6.24 30^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-δ grafiği

Belirlenen çekme yüküne karşılık, çatlak ucu açılma miktarının değişim grafiği şekil 6.25 de verilmiştir. Bu grafikten çatlak ucu açılma miktarı 9.26 mm kadar kararlı olduğu bu değerden sonra hızlandığı görülmektedir. Numuneler ortalama 50 N yüklemede ve 12.25 mm çatlak ucu açılma miktarında kopmuştur. Ayrıca kuvvet ve çatlak ucu açılma miktarları EK I c da verilmiştir.



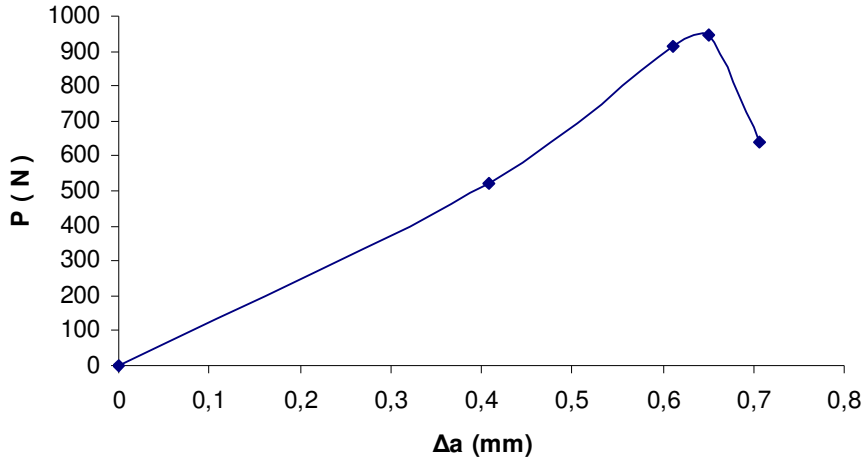
Şekil 6.25 30^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-δ grafiği

Tespit edilen yüklemelere karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 6.26 da verilmiştir. Bu grafikten çatlağın, 4.33 mm ye kadar kararlı olduğunu,

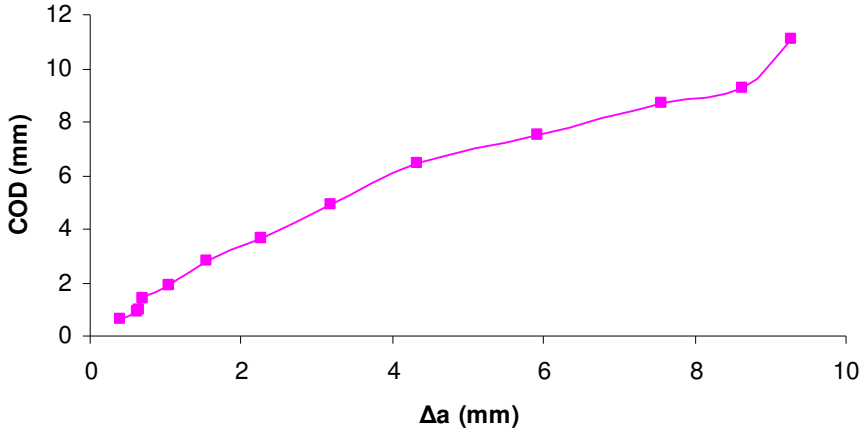
bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlağın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.

30^o açılı çatlaklı numunede ortalama yükleme 50 N da ve çatlak ilerlemesi 9.50 mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.

Şekil 6.27 de çatlak ucu açılma miktarlarının, çatlak ilerleme miktarlarına göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta Δa = 0.41 mm ve COD = 0.62 mm iken, kopma anında ise Δa =9.28 mm ve 11.06 mm olarak bulunmuştur. 0^o ve 15^o açılı çatlaklı numunelerde olduğu gibi çatlak ucu açılma miktarının çatlak ilerlemesine göre daha fazla hızlı ilerlemiştir. Grafikten görüldüğü gibi Δa = 4.33 mm ve COD = 6.49 mm kadar kararlı olarak ilerlemiş, bu değerlerden sonra kararlı olmayan bölgeye girerek numune aniden kopmuştur.



Şekil 6.26 30^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Δa grafiği



Şekil 6.27 30^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin COD-Δa grafiği

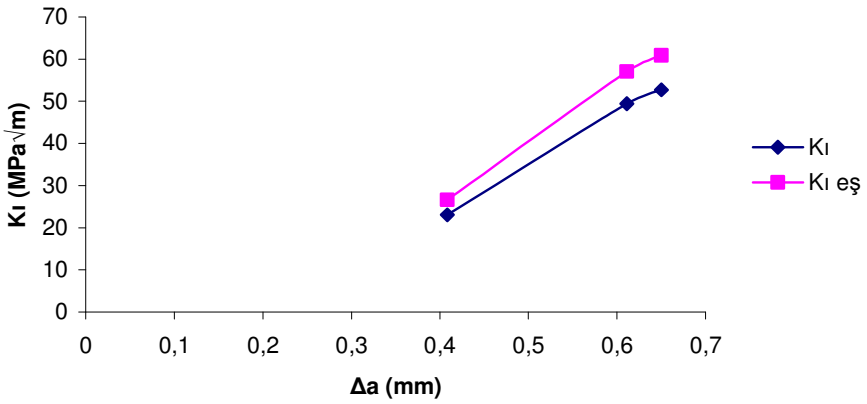
15^o açılı çatlaklı numunelerde olduğu gibi 30^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde, -30^o açı yapacak şekilde kink yaparak ve bileşik mod oluşturarak çatlak ilerlemesi gerçekleşmiştir. Yine 15^o de kullanılan eşitlikler kullanılarak K_I, $K_{Ieş}$, K_{II}, $K_{IIeş}$ ve $K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler Ek I c de verilmiştir.

Şekil 6.28 de 30^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerleme miktarı, gerilme şiddet faktör miktarları K_I ve $K_{Ieş}$ göre değişim grafiği logaritmik eksende gösterilmiştir. Başlangıçta K_I =23.04 MPa$\sqrt{m}$, $K_{Ieş}$ =26.61 MPa$\sqrt{m}$ iken, maksimum yüklemede K_I =52.76 MPa$\sqrt{m}$, $K_{Ieş}$ =60.93 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Kink açısına bağlı olarak $K_{Ieş}$, K_I den büyük çıkmıştır ve 15^o açılı çatlaklı numuneye ait K_I ve $K_{II\ eş}$'e göre değerler azalma göstermiştir. Bu da açının artmasıyla açılma modunun etkisinin azaldığını göstermektedir ve beklenen bir durumdur. Burada K_I ve $K_{Ieş}$'in azalmasıyla çatlak ilerleme miktarı da artmıştır.

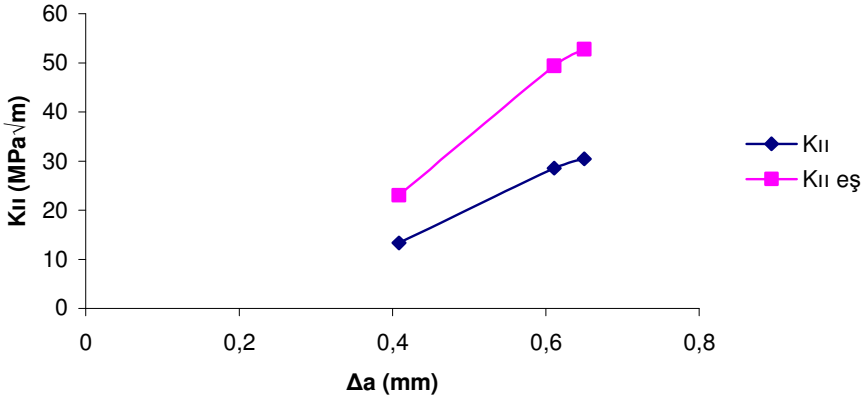
Şekil 6.29 da ise 30^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerleme miktarı, gerilme şiddet faktör miktarları K_{II} ve $K_{IIeş}$ göre değişim gösterilmiştir. Başlangıçta K_{II} =13.30 MPa$\sqrt{m}$, $K_{IIeş}$ =23.04 MPa$\sqrt{m}$ iken, maksimum yüklemede K_{II} =30.46 MPa$\sqrt{m}$, $K_{IIeş}$ =52.76 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani kink açısının değişmesiyle $K_{IIeş}$, K_{II} den daha büyük çıkmış ve 15^o açılı çatlaklı numuneye ait $K_{IIeş}$ ve K_{II}'e göre değerler artış göstermiştir. Bu da kayma modunun etkisinin

arttığını gösteren ve beklenen bir durumdur. Ayrıca çatlak ilerleme miktarının artış oranı her iki gerilme şiddet faktörü miktarları için de aynı olduğu görülmektedir.

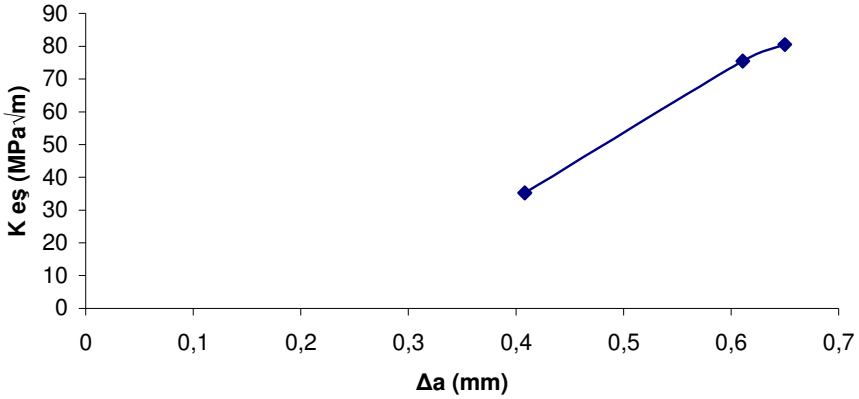
30^o açılı çatlaklı numunelerde bileşik mod da $K_{eş}$ değişimi başlangıçta $K_{eş}$ = 35.20 MPa$\sqrt{m}$, yüklemenin maksimum olduğu anda $K_{eş}$ =80.60 MPa$\sqrt{m}$ kadar artış göstermiştir. Şekil 6.30 da 30^o açılı çatlaklı numunenin çatlak ilerleme miktarının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü miktarları $K_{eş}$'e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi çatlak ilerleme miktarı arttıkça maksimum yüklemeden sonra $K_{eş}$ 'de düşüş göstermiştir.



Şekil 6.30 28^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin KI-a grafiği

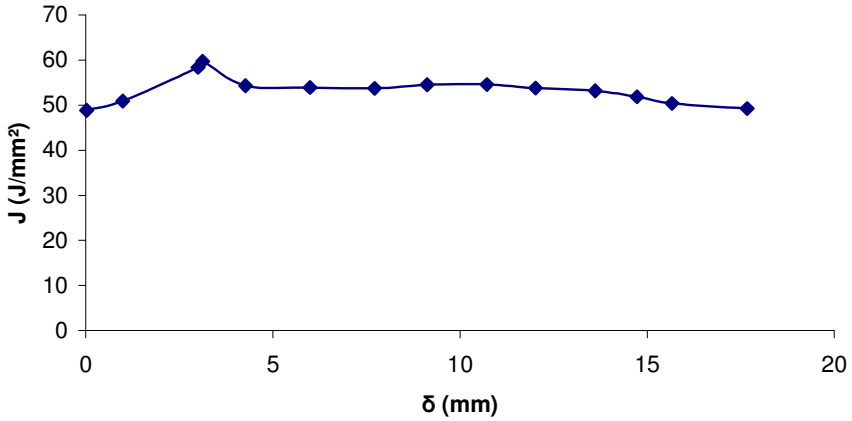


Şekil 6.29 30^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin KII-a grafiği



Şekil 6.30 30^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin $K_{eş}$-a grafiği

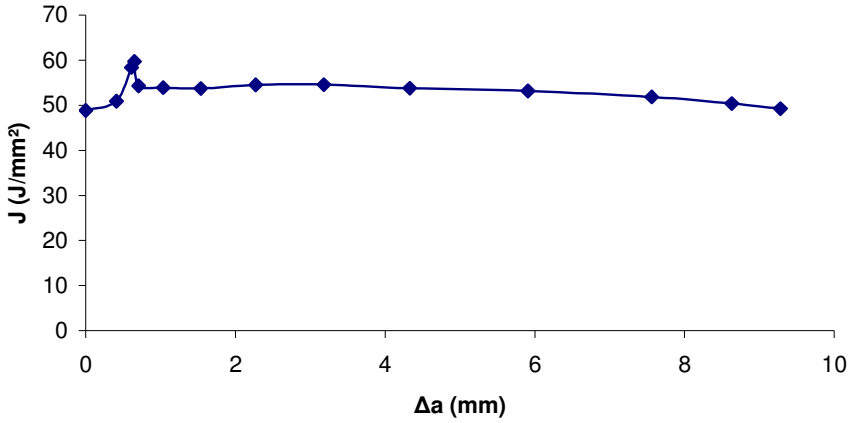
30^{o} açılı çatlaklı numune için elde edilen J değerleri EK I c de verilmiştir. Şekil 6.31 de 30^{o} açılı çatlaklı numunede çekme neticesinde uzamanın şekil değiştirme enerji boşalma miktarı ile değişmesinin grafiği gösterilmiştir. 30^{o} açılı çatlaklı numuneyi çekme için başlangıçta J= 48.89 J/mm^2 lik bir enerji gerekmektedir. Yüklemenin maksimum olduğu ana kadar çatlaklı numuneyi koparmak için gereken bu enerji miktarı artmıştır. Numunenin koptuğu andaki enerji 49,29 J/mm^2 dır. Bu da beklenen bir durumdur.



Şekil 6.31 30^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-δ grafiği

15^{o} açılı çatlaklı numunelerde olduğu gibi 30^{o} açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde, -30^{o} açı yapacak şekilde kink yaparak ve bileşik mod oluşturarak çatlak ilerlemesi gerçekleşmiştir. Yine 15^{o} de kullanılan eşitlikler kullanılarak Jı, Jıı, ve J değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 6.32 de çatlak ilerleme miktarı, şekil değiştirme enerji boşalma miktarı J göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta şekil değiştirebilmek için gereken enerji J =48.89 J/mm^2 iken, maksimum yüklemede ise Δa=0.65 mm ve P= 944.31 N da J =59.76 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Maksimum yüklemeden sonra yüklemenin azalmasıyla şekil değiştirme enerjisi de azalmıştır. Şekil değiştirme enerji boşalma miktarı 53.81 J/mm^2 den sonra çatlak ilerleme hızı kararlı olmayan bölgeye girerek numune aniden kopmuştur.

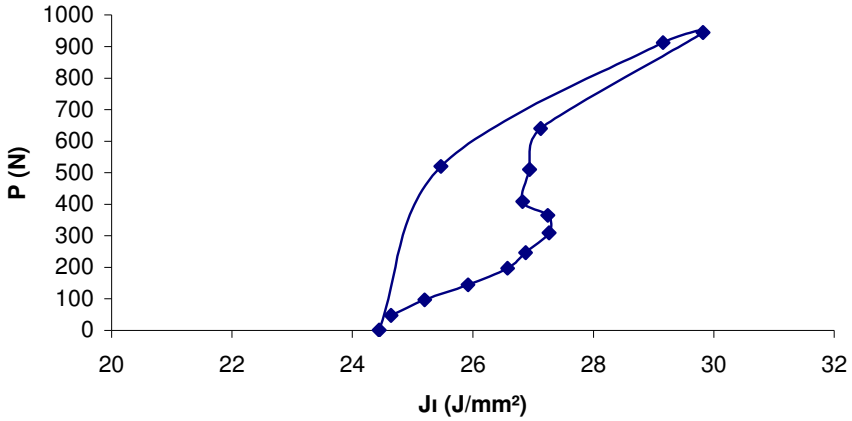


Şekil 6.32 30^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-Δa grafiği

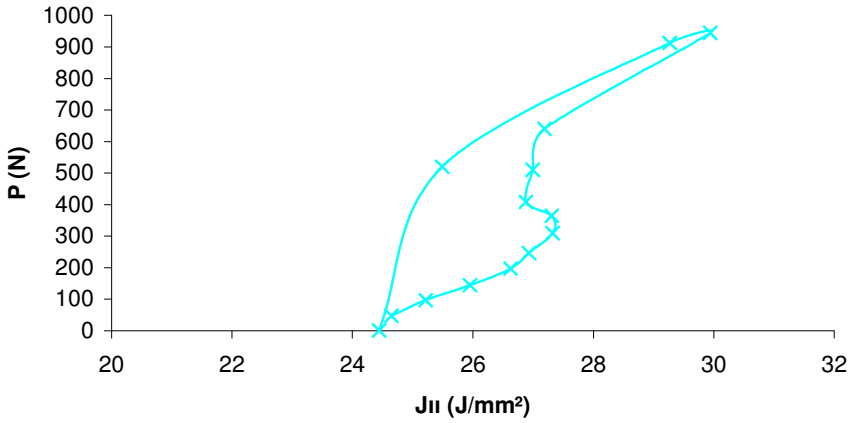
Yüklemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı Jı göre grafiği şekil 6.33 de gösterilmiştir. Burada 30^{o} açılı çatlaklı numunenin şeklinin değişmesi için gerekli enerji 24.44 J/mm^2 dir. Numuneye uygulanan yükleme maksimum yüklemeye kadar arttıkça enerjide artmıştır. Jı= 29.82 J/mm^2 den sonra elyaflar kırılmaya başladığından enerji miktarı da azalmıştır.

Şekil 6.34 de şekil değiştirme enerji boşalma miktarı Jıı in yüklemeye göre grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta Jıı = 24.44 J/mm^2 de P = 1.34 N iken, Pmax =944.31 N da Jıı =29.94 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Yani Jıı, Jı den büyük çıkmıştır.

Çünkü Jıı'in hesaplamasında kullanılan kayma modülüne bağlı olarak düzeltilmiş bir değerdir, büyük çıkması beklenen bir durumdur.



Şekil 6.33 30^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Jı grafiği



Şekil 6.34 30^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Jıı grafiği

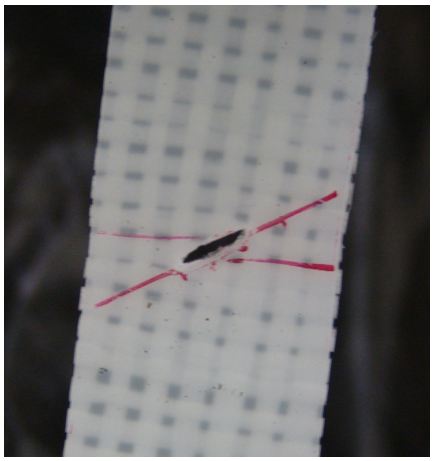
6.4.2. 30^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

30^{o} açılı çatlaklı numunelerde, 15^{o} açılı çatlaklı numunede olduğu gibi açılma ve kayma modlarında (Mod I ve Mod II) hasar olmuştur. 30^{o} açılı çatlaklı numunenin çekme deneyi sırasında hasar mekanizması sırasıyla şu şekilde gelişmiştir. Öncelikle

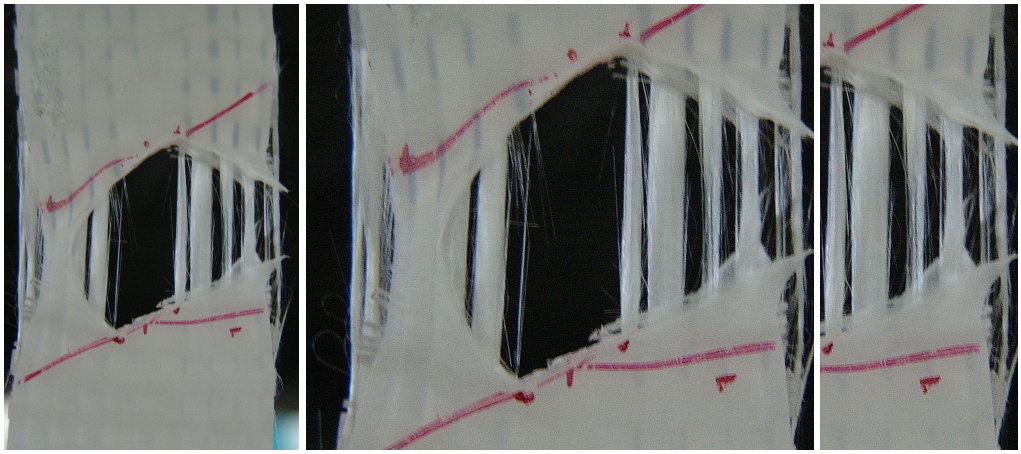
çatlak uçlarına yakın bölgelerde hasar meydana geldi. Daha sonra matris malzeme de yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

Şekil 6.35 ve şekil 6.36 da görüldüğü gibi yükleme devam ettikçe matris içerisindeki çatlak yırtılması yataya (-30^o açıyla) yönelerek ve kink yaparak yatayda devam etti. Bu sırada fiberde bridging yani köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü.

Sonra cam kumaş örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin kıvrım bölgesi uzayıp kısalırken eğilmeye maruz kaldığından, fiber üzerinde mikro çatlaklar oluşmuş ve daha sonra çekme yükünün devam etmesiyle birlikte bu çatlaklar büyüyerek cam kumaşı koparmıştır. Ayrıca 0^o ve 15^o açılı çatlaklı numunelere göre çatlak ilerlemesi daha yavaş olmuştur.



Şekil 6.35 30^o açılı çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi



(a) (b) (c)

Şekil 6.36 Kırılma sonrası 30^o çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

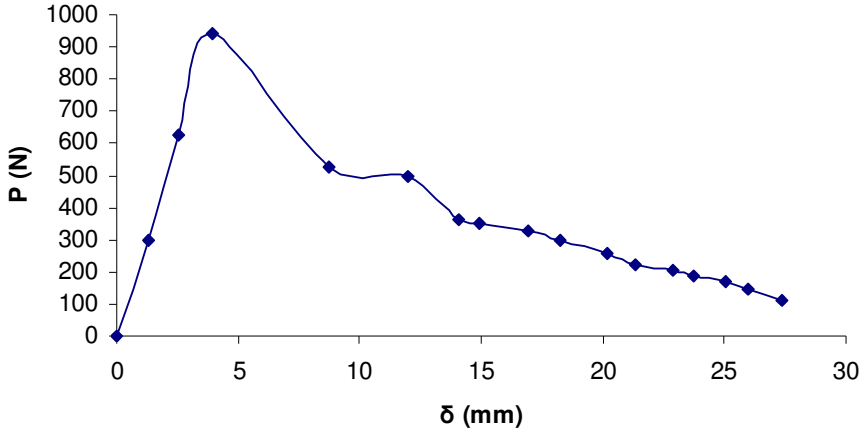
Çatlak ilerlemesi yüklemenin artışıyla birlikte a= 4.33 mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve a=9.28 mm de gürültü çıkararak numune kopmuştur.

6.5. 45^o AÇILI ÇATLAKLI NUMUNELER

6.5.1. 45^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deney Sonuçları

Merkezine yatayla 45^o lik açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneleri de çekme deneyine tabi tutulmuştur.

Deneyler sırasında 0^o, 15^o ve 30^o de ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. 45^o açılı çatlaklı numunenin yüklemeye karşı ilerleme miktarının grafiği şekil 6.37 de gösterilmiştir. Yükleme 942.97 N da maksimum ve uzama miktarı ise 3.937 mm iken, kopma anında P = 113.33 N ve δ= 27.38 mm olarak bulunmuştur. Numuneler ortalama 100 N da ve 26.25 mm uzamada kopmuştur.

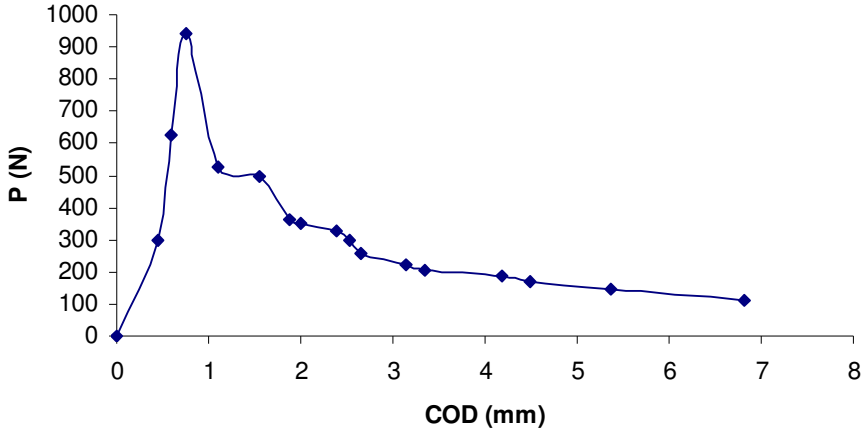


Şekil 6.37 45^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-δ grafiği

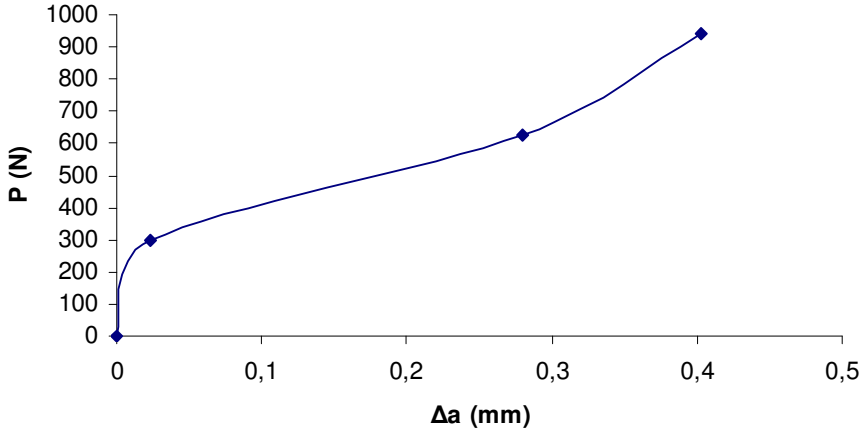
Şekil 6.38 de çekme yüküne karşılık, çatlak ucu açılma miktarının değişim grafiği gösterilmiştir. Bu grafikten çatlak ucu açılma miktarı 4.49 mm kadar kararlı olduğu bu değerden sonra hızlandığı görülmektedir. Maksimum yüklemenin olduğu 942.97 N da çatlak ucu açılma miktarı 0.746 mm olduğu görülmektedir. Numuneler ortalama 100 N yüklemede ve 6.75 mm çatlak ucu açılma miktarında kopmuştur. Ayrıca kuvvet ve çatlak ucu açılma miktarları EK I d da verilmiştir.

Tespit edilen yüklemelere karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 6.39 da verilmiştir. Bu grafikten çatlağın, 3.20mm ye kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlağın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.

45^{o} açılı çatlaklı numunede ortalama yükleme 100 N da ve çatlak ilerlemesi 6.80 mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.



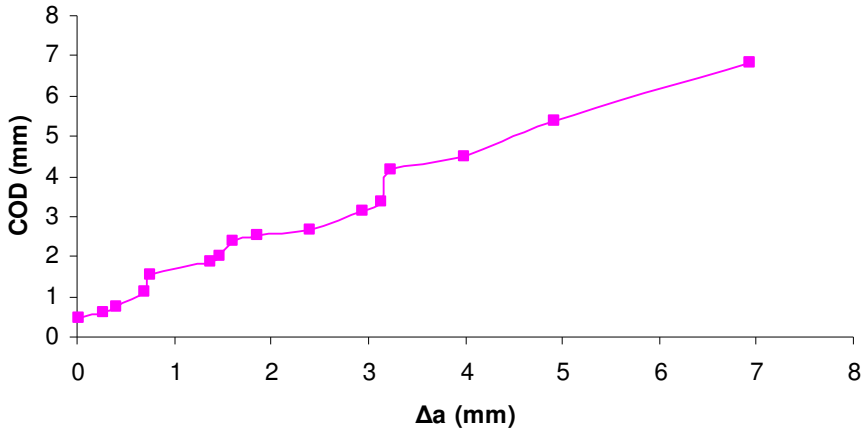
Şekil 6.38 45^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-COD grafiği



Şekil 6.39 45^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Δa grafiği

Çatlak ucu açılma miktarlarının, çatlak ilerleme miktarlarına göre değişim grafiği şekil 6.40 da gösterilmiştir. Başlangıçta Δa = 0.023 mm ve COD = 0.453 mm iken, kopma anında ise Δa =6.932 mm ve COD =6.821 mm olarak bulunmuştur. 0^{o} , 15^{o} ve 30^{o} açılı çatlaklı numunelerde olduğu gibi çatlak ucu açılma miktarının çatlak ilerlemesine göre daha etkisinin olmadığı izlenmiştir. Grafikten görüldüğü gibi Δa = 3.985 mm ve COD = 4.494 mm kadar kararlı olarak ilerlemiş, bu değerlerden sonra kararlı olmayan bölgeye girerek numune aniden kopmuştur. Bu da açının artmasıyla

çatlak ucu miktarının etkisinin azaldığını ve çatlak ilerlemesinin etkisinin arttığını göstermektedir ve beklenen bir durumdur.



Şekil 6.40 45^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin COD-Δa grafiği

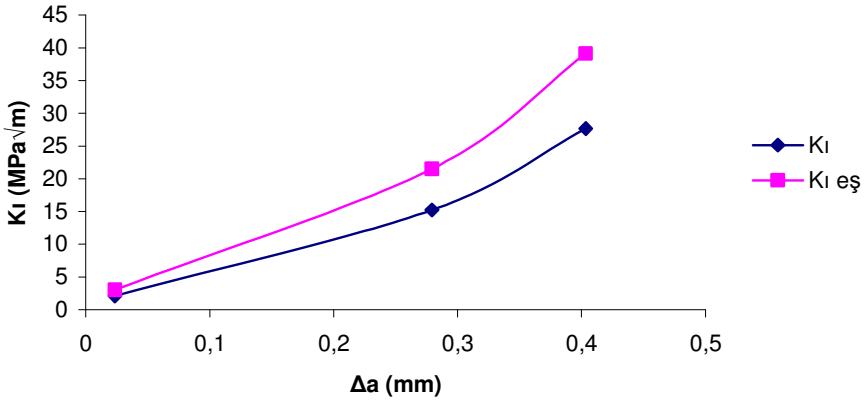
45^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi 15^o ve 30^o olduğu gibi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde, -45^o açı yapacak şekilde, bileşik mod oluşturarak kink yapmış ve çatlak ilerlemesi gerçekleşmiştir. Yine 15^o ve 30^o açılı çatlaklı numuneler için kullanılan eşitliklerden Kı, $K_{ıeş}$, Kıı, $K_{ıı eş}$ ve $K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler Ek I d de verilmiştir.

Şekil 6.41 de 45^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerleme miktarı, gerilme şiddet faktör miktarları Kı ve $K_{ıeş}$ göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta a=0.02 mm ve P =301.13 N da Kı =2.13 MPa$\sqrt{m}$, $K_{ıeş}$ =3.01 MPa$\sqrt{m}$ iken, a=0.40 mm ve Pmax= 942.97 N da Kı =27.67 MPa$\sqrt{m}$, Kıeş =39.13 MPa$\sqrt{m}$ maksimum gerilme şiddet faktörleri (Kı ve $K_{ıeş}$) olarak bulunmuştur. Kink açısına bağlı olarak $K_{ıeş}$, Kı den büyük çıkmıştır, 15^o ve 30^o açılı çatlaklı numunelere ait Kı ve $K_{ıı eş}$'e göre değerler azalma göstermiştir. Bu da açının artmasıyla açılma modunun etkisinin azaldığını ve kayma modunun etkisinin arttığını göstermektedir ve beklenen bir durumdur.

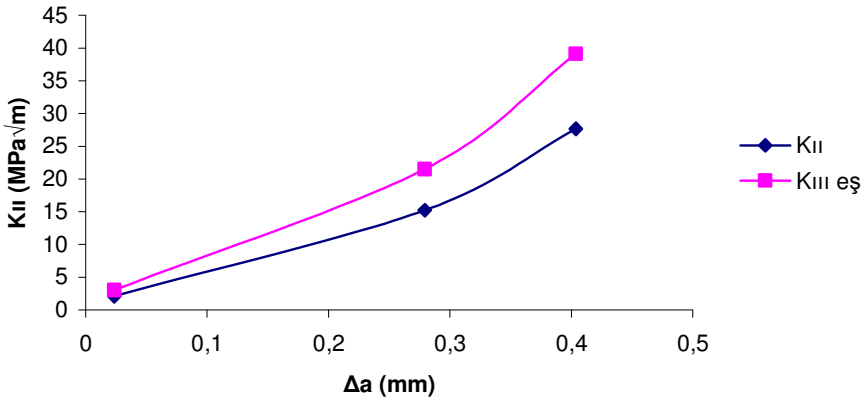
Şekil 6.42 de ise 45^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerleme miktarı, gerilme şiddet faktör miktarları Kıı ve $K_{ıı eş}$ göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta a=0.02 mm ve P =301.13 N da Kıı =2.13 MPa$\sqrt{m}$, $K_{ıı eş}$ =3.01 MPa$\sqrt{m}$

iken, a=0.40 mm ve Pmax= 942.97 N da Kıı =27.67 MPa $\sqrt{m}$, $K_{II_{eş}}$ =39.13 MPa $\sqrt{m}$ maksimum gerilme şiddet faktörleri (Kıı ve $K_{II_{eş}}$) olarak bulunmuştur. 15^o ve 30^o açılı çatlaklı numuneler de ki Kıı'ye göre değerler artış göstermiştir. Fakat $K_{II_{eş}}$ değerleri Sole fonksiyonlarının etkisiyle 30^o açılı çatlaklı numunelere göre azalma göstermiştir. Ayrıca çatlak ilerleme miktarlarının artış oranının her iki gerilme şiddet faktör miktarları için de aynı olduğu görülmektedir.

45^o açıda cos ve sin değerleri birbirne eşit olduğundan ve gerilme şiddet faktörleri de bunlara bağlı fonksiyonlar olduğundan Kı Kıı'ye, $K_{I_{eş}}$ ise $K_{II_{eş}}$'e eşit çıkmıştır. Bu ise beklenen bir durum olup, deney sonuçlarından elde edilen değerlerin tutarlılığını göstermektedir.

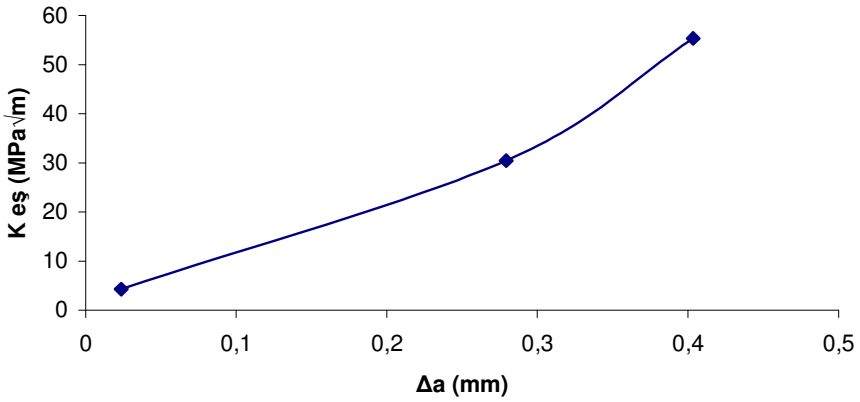


Şekil 6.41 45^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin Kı-a grafiği



Şekil 6.42 45^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin Kıı-a grafiği

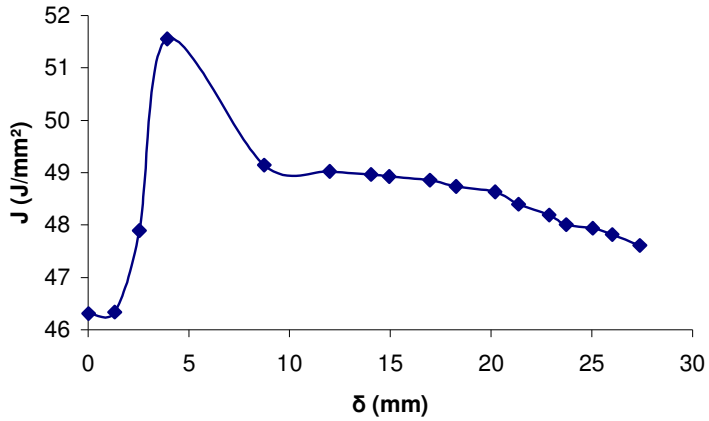
45^o açılı çatlaklı numunelerde bileşik mod da $K_{eş}$ değişimi başlangıçta $K_{eş}$ = 4.26 MPa$\sqrt{m}$, yüklemenin maksimum olduğu anda $K_{eş}$ =55.34 MPa$\sqrt{m}$ artış göstermiştir. Şekil 6.43 de 45^o açılı çatlaklı numunenin çatlak ilerleme miktarının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü miktarları $K_{eş}$'e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi çatlak ilerleme miktarı arttıkça $K_{eş}$ 'de artış göstermiştir.



Şekil 6.43 45^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin $K_{eş}$-a grafiği

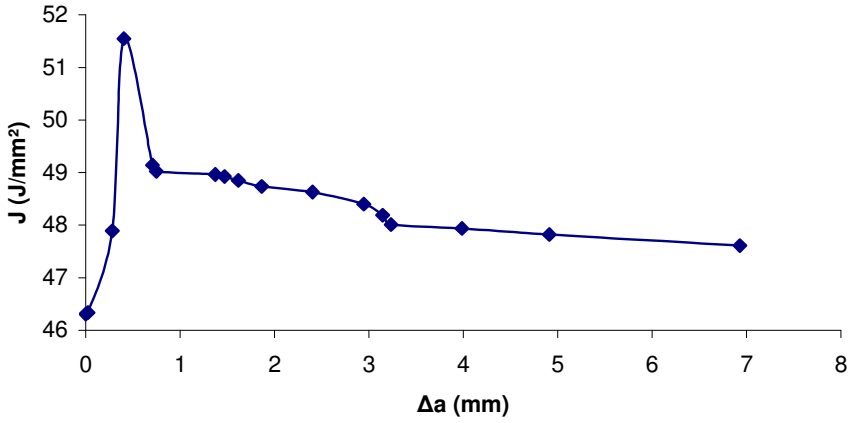
45^o açılı çatlaklı numune için elde edilen J değerleri EK I d de verilmiştir. Yine 15^o ve 30^o de kullanılan eşitlikler kullanılarak Jı, Jıı, ve J değerleri hesaplanmıştır.

45^o açılı çatlaklı numunede çekme neticesinde uzamanın şekil değiştirme enerji boşalma miktarı ile değişmesinin grafiği Şekil 6.31 de gösterilmiştir. 45^o açılı çatlaklı numuneyi çekme için başlangıçta J= 46.31 J/mm^2 lik bir enerji gerekmektedir. Yüklemenin maksimum olduğu ana kadar çatlaklı numuneyi koparmak için gereken bu enerji miktarı artmıştır. Numunenin koptuğu andaki enerji 47,61 J/mm^2 dır. 0^o, 15^o ve 30^o açılı çatlaklı numuneler için gerekli enerji boşalma miktarından daha az çıkmıştır. Bu da beklenen bir durumdur.



Şekil 6.44 45^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-δ grafiği

Şekil 6.45 de çatlak ilerleme miktarı, şekil değiştirme enerji boşalma miktarı J göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta şekil değiştirebilmek için gereken enerji J =46.31 J/mm^2 iken, maksimum yüklemede ise Δa=0.40 mm ve P= 942.97 N da J =51.55 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Maksimum yüklemeden sonra yüklemenin azalmasıyla şekil değiştirme enerjisi de azalmıştır. Şekil değiştirme enerji boşalma miktarı şekilde görüldüğü gibi 47.94 J/mm^2 den sonra çatlak ilerleme hızı kararlı olmayan bölgeye girerek numune aniden kopmuştur.

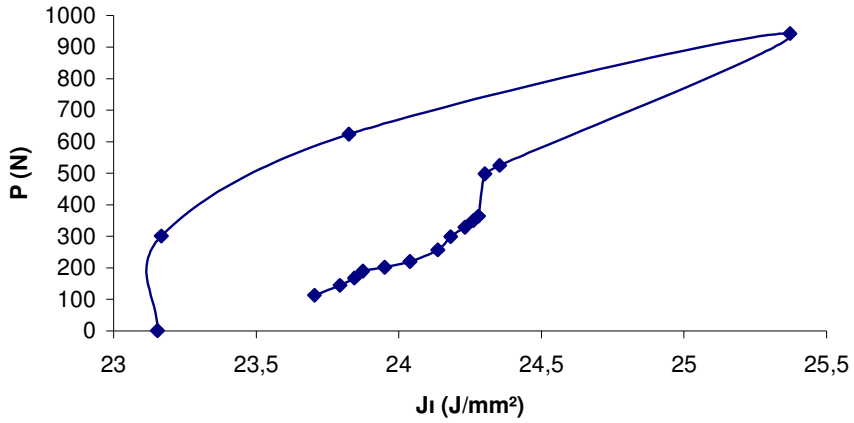


Şekil 6.45 45^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-Δa grafiği

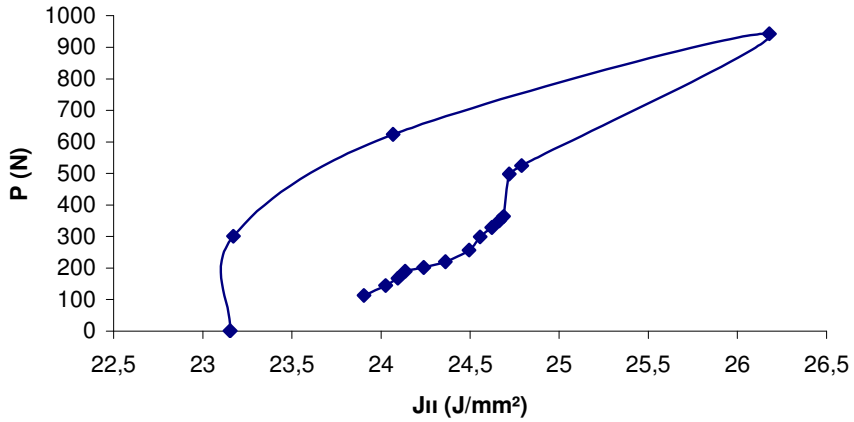
Yüklemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı Jı göre grafiği şekil 6.46 da gösterilmiştir. Burada 45^{o} açılı çatlaklı numunenin şeklinin değişmesi için gerekli

enerji 23.15 J/mm^2 dir. Numuneye uygulanan yükleme maksimum yüklemeye kadar arttıkça enerjide artmıştır. Jı= 25.37 J/mm^2 den sonra elyaflar kopmaya başladığından enerji miktarı da azalmıştır.

Şekil 6.47 de şekil değiştirme enerji boşalma miktarı Jıı in yüklemeye göre grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta Jıı = 23.15 J/mm^2 de P = 1.07 N iken, Pmax =942.97 N da Jıı =26.18 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Yani Jıı, Jı den büyük çıkmıştır. Çünkü Jıı'in hesaplamasında kullanılan kayma modülüne bağlı olarak düzeltilmiş bir değerdir, büyük çıkması beklenen bir durumdur. Açılma modunun etkisinin azaldığı kayma modunun etkisinin arttığı gözlenmişdir.



Şekil 6.46 45^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Jı grafiği



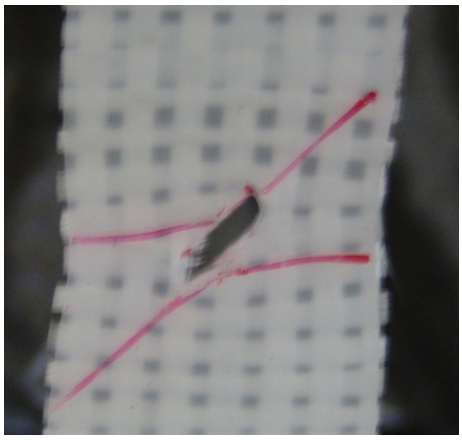
Şekil 6.47 45^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Jıı grafiği

6.5.2. 45^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

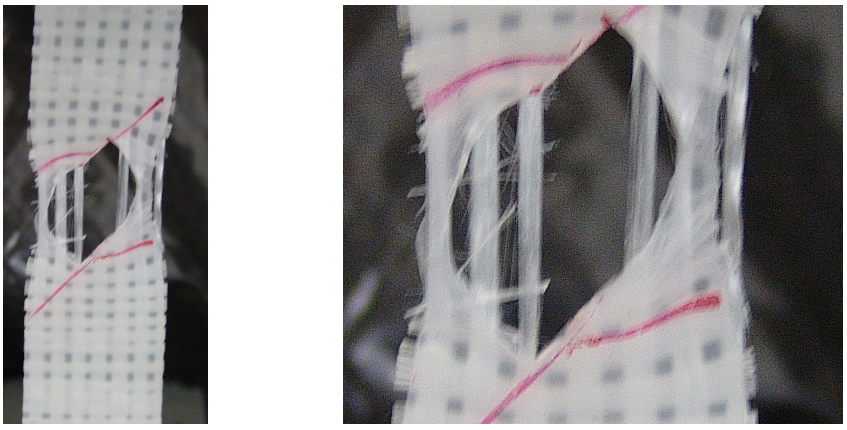
15^o ve 30^o açılı çatlaklı numunelerde olduğu gibi 45^o açılı çatlaklı numunede de hasar mekanizması çatlak uçlarına yakın bölgelerde başladı. Daha sonra matris malzemede yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

Çekme ilerledikçe matris içerisindeki çatlak yırtılması yatayla -45^o açıyla yönelerek ve kink yaparak yatayda devam etti. Bu sırada fiberde köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü. Şekil.6.48 ve şekil 6.49 da yönlenme, kink ve köprülenme olayı görülmektedir.

Çekme yükünün artması ile birlikte cam kumaş örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin kıvrım bölgesi uzayıp kısalırken eğilmeye maruz kaldığından, fiber üzerinde mikro çatlaklar oluşmuş ve daha sonra çekme yükünün devam etmesiyle birlikte bu çatlaklar büyüyerek cam kumaşı koparmıştır. Ayrıca 0^o, 15^o ve 30^o açılı çatlaklı numunelere göre çatlak ilerlemesi daha yavaş olmuştur.



Şekil 6.47 45^o açılı çatlaklı kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesi



(a) **(b)**

Şekil 6.48 Kırılma sonra 45^{o} çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

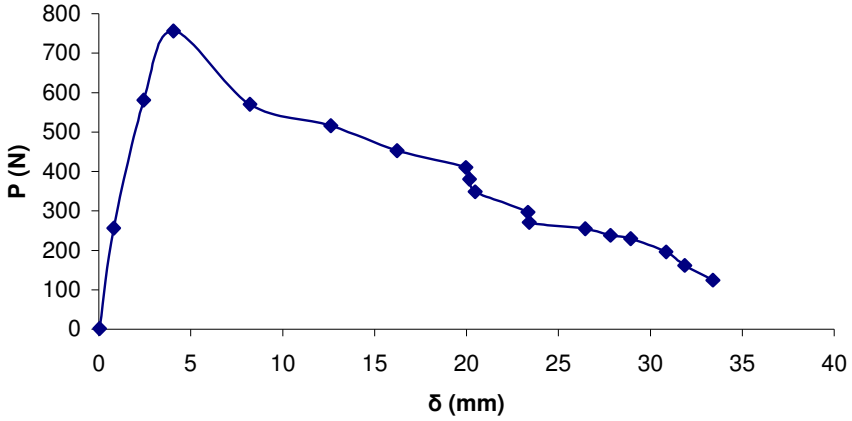
Çatlak ilerlemesi yüklemenin artışıyla birlikte Δa= 3.24 mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve Δa=6.94 mm de aniden gürültüyle numune kopmuştur.

6.6. 60^{o} AÇILI ÇATLAKLI NUMUNELER

6.6.1. 60^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deney Sonuçları

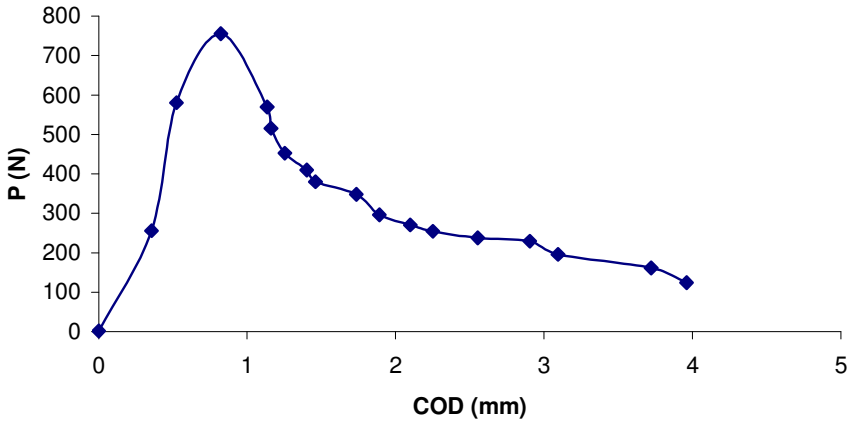
Merkezine yatayla 60^{o} lik açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneleri de çekme deneyine tabi tutulmuştur.

Deneyler sırasında 0^{o}, 15^{o}, 30^{o} ve 45^{o} de ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. 60^{o} açılı çatlaklı numunenin yüklemeye karşı ilerleme miktarının grafiği şekil 6.49 da gösterilmiştir. Yükleme 756.16 N da maksimum ve uzama miktarı ise 4.064 mm iken, kopma anında P = 124.57 N ve δ= 33.41 mm olarak bulunmuştur. Numuneler ortalama 125 N da ve 30.25 mm uzamada kopmuştur.



Şekil 6.49 60^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-δ grafiği

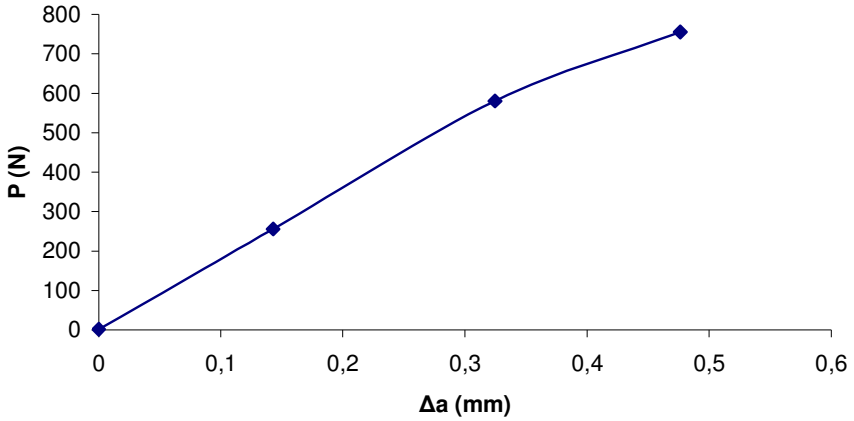
Şekil 6.50 de çekme yüküne karşılık, çatlak ucu açılma miktarının değişim grafiği gösterilmiştir. Bu grafikten çatlak ucu açılma miktarı 3.09 mm kadar kararlı olduğu bu değerden sonra hızlandığı görülmektedir. Maksimum yüklemenin olduğu 756.16 N da çatlak ucu açılma miktarı 0.82 mm olduğu görülmektedir. Ayrıca kuvvet ve çatlak ucu açılma miktarları EK I d da verilmiştir.



Şekil 6.50 60^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-COD grafiği

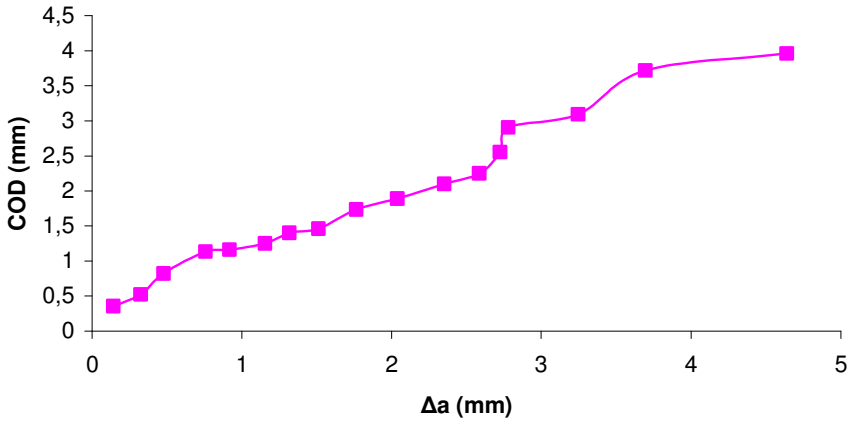
Tespit edilen yüklemelere karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 6.51 de verilmiştir. Çatlak ilerleme miktarı maksimum yüklemeye kadar lineer arttığı görülmektedir. 45^{o} açılı çatlaklı numunede ortalama yükleme 125 N da ve çatlak

ilerlemesi 5.65 mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.



Şekil 6.51 60^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Δa grafiği

Şekil 6.52 de çatlak ucu açılma miktarlarının, çatlak ilerleme miktarlarına göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta Δa = 0.14 mm ve COD = 0.36 mm iken, kopma anında ise Δa =4.64 mm ve COD =3.96 mm olarak bulunmuştur. 0^o , 15^o ve 30^o açılı çatlaklı numunelerde olduğu gibi çatlak ucu açılma miktarının çatlak ilerlemesine göre etkisinin olmadığı görülmüştür. Grafikten görüldüğü gibi Δa = 2.78 mm ve COD = 2.68 mm kadar kararlı olarak ilerlemiş, bu değerlerden sonra kararlı olmayan bölgeye girerek çatlak ilerleme miktarı 4.64 mm numune aniden kopmuştur. Bu da açının artmasıyla çatlak ucu miktarının etkisi azalmıştır.



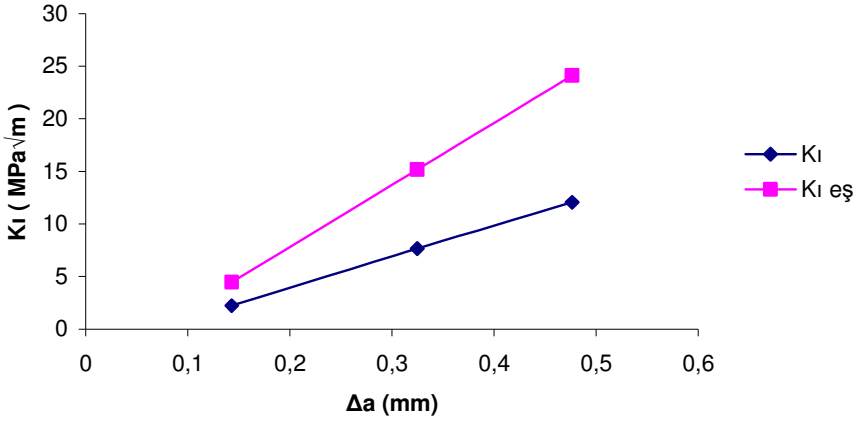
Şekil 6.52 60^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin COD-Δa grafiği

60^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi 15^o, 30^o ve 45^o olduğu gibi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde, -60^o açı yapacak şekilde, kink yaparak ve bileşik mod oluşturarak ilerlemiştir. Diğer numuneler için kullanılan eşitliklerden K_I, $K_{I_{eş}}$, K_{II}, $K_{II_{eş}}$ ve $K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler Ek I e de verilmiştir.

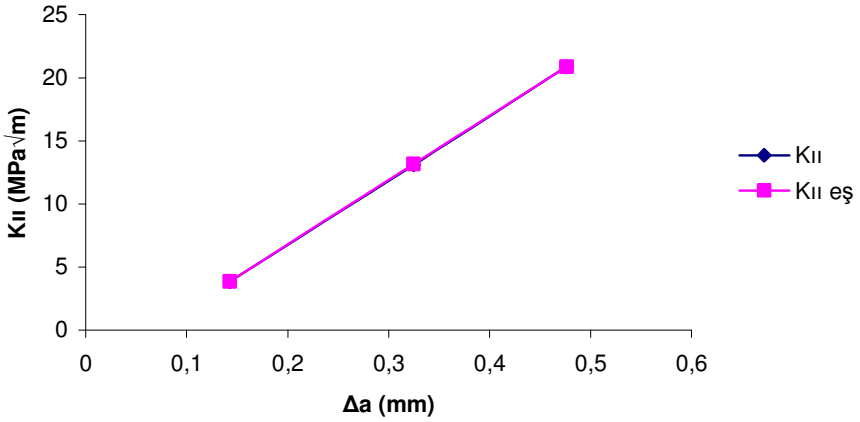
Şekil 6.53 de 60^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerleme miktarı, gerilme şiddet faktör miktarları K_I ve $K_{I_{eş}}$ göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta K_I =2.24 MPa$\sqrt{m}$, $K_{I_{eş}}$ =4.47 MPa$\sqrt{m}$ iken, maksimum yüklemede K_I =12.06 MPa$\sqrt{m}$, $K_{Ieş}$ =24.11 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Kink açısına bağlı olarak $K_{I_{eş}}$, K_I den büyük çıkmış, 15^o, 30^o ve 45^o açılı çatlaklı numunelere ait K_I ve $K_{II\ eş}$'e göre değerler azalma göstermiştir. Bu da açının artmasıyla açılma modunun etkisinin azaldığını göstermektedir ve beklenen bir durumdur.

Şekil 6.54 de ise 60^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerleme miktarı, gerilme şiddet faktör miktarları K_{II} ve $K_{II_{eş}}$ göre değişim gösterilmiştir. Başlangıçta K_{II} =3.87 MPa$\sqrt{m}$, $K_{II_{eş}}$ =3.87 MPa$\sqrt{m}$ iken, maksimum yüklemede K_{II} =20.88 MPa$\sqrt{m}$, $K_{II_{eş}}$ =20.88 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani $K_{II_{eş}}$, K_{II}'ye eşit çıkmıştır. 45^o açılı çatlaklı numunelerde ki K_{II} ve $K_{II_{eş}}$'e göre değerler azalma göstermiştir. Yani açılma ve kayma modlarının etkisi giderek azalmış ve çatlağın numune üzerinde ki yüklemeye olan etkisi de buna paralel olarak azalmıştır. Bu ise beklenen bir durum olup, deney sonuçlarından elde edilen değerlerin tutarlığını göstermektedir.

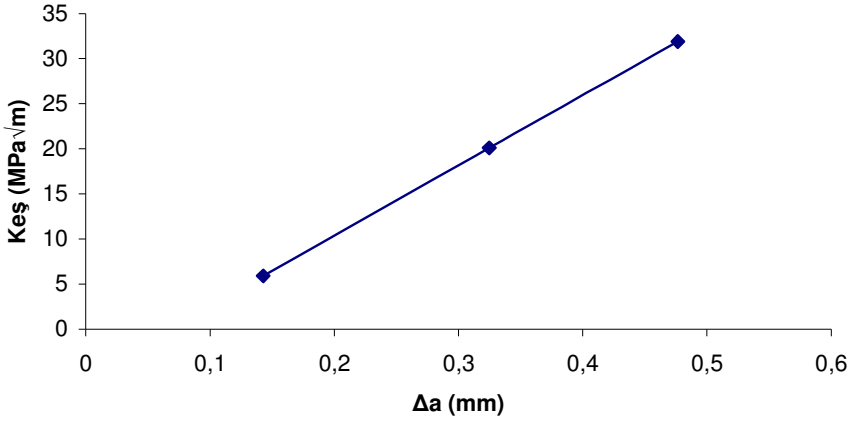
Bileşik mod $K_{eş}$ değişimi çatlak ilerleme miktarı 0.14 mm iken $K_{eş}$ = 5.91 MPa $\sqrt{m}$ değerinden, yüklemenin maksimum olduğu ana kadar çatlak ilerleme miktarı 0.48 mm ye ulaştığında $K_{eş}$ =31.90 MPa $\sqrt{m}$ artış gösterirken, kırılma anında ise çatlak ilerleme miktarı 4.64 mm de ise $K_{eş}$ = 16.40 MPa $\sqrt{m}$ düşüş göstermiştir. Şekil 6.55. de 60^o açılı çatlaklı numunenin çatlak ilerleme miktarının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü miktarları $K_{eş}$'e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi çatlak ilerleme miktarı arttıkça maksimum yüklemeden sonra $K_{eş}$ 'de düşüş göstermiştir.



Şekil 6.53 60^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin Kı-a grafiği



Şekil 6.54 60^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin Kıı-a grafiği

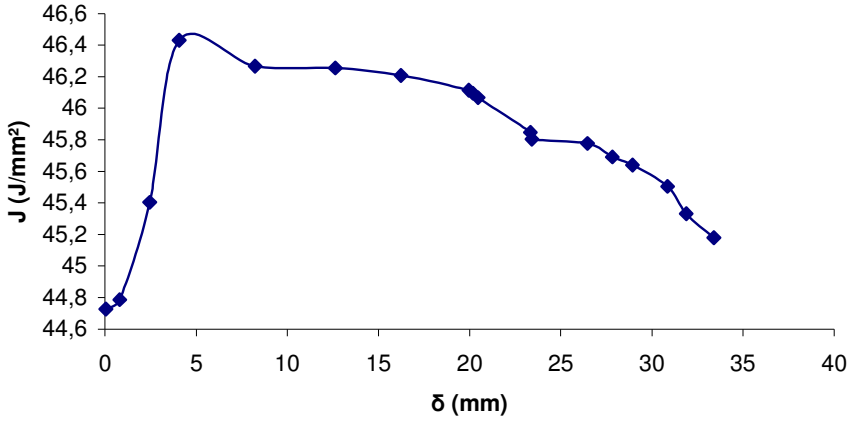


Şekil 6.55 60^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin $K_{eş}$-a grafiği

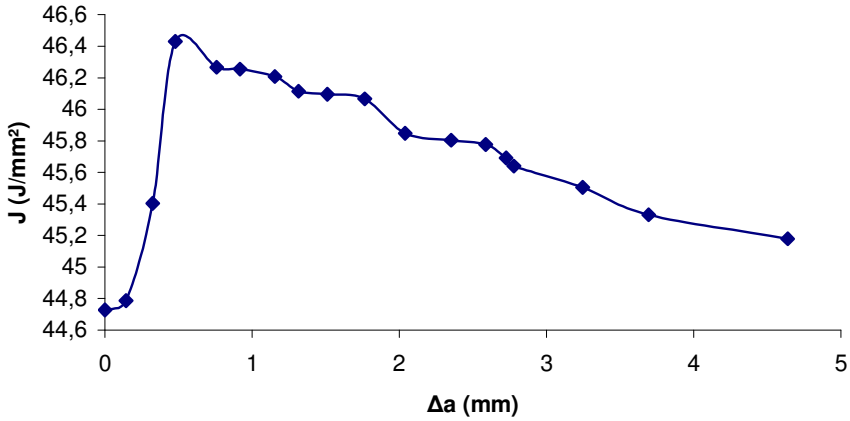
60^o açılı çatlaklı numune için elde edilen J değerleri EK I e de verilmiştir. Yine 15^o, 30^o ve 45^o de kullanılan eşitlikler kullanılarak Jı, Jıı, ve J değerleri hesaplanmıştır.

60^o açılı çatlaklı numunede çekme neticesinde uzamanın şekil değiştirme enerji boşalma miktarı ile değişmesinin grafiği Şekil 6.56 de gösterilmiştir. 60^o açılı çatlaklı numuneyi çekme için başlangıçta J= 44.73 J/mm^2 lik bir enerji gerekmektedir. Yüklemenin maksimum olduğu ana kadar çatlaklı numuneyi koparmak için gereken bu enerji miktarı 46,43 J/mm^2 ye artmıştır. Numunenin koptuğu andaki enerji miktarı 45,18 J/mm^2 dır. 0^o, 15^o, 30^o ve 45^o açılı çatlaklı numuneler için gerekli enerji boşalma miktarından daha az çıkmıştır. Bu da beklenen bir durumdur.

Şekil 6.57 de çatlak ilerleme miktarı, şekil değiştirme enerji boşalma miktarına göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta J =44.73 J/mm^2 iken, maksimum yüklemede ise Δa=0.40 mm ve P= 756.16 N da J =46,43 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Maksimum yüklemeden sonra yüklemenin azalmasıyla şekil değiştirme enerjisi de azalmıştır. Çatlak ilerlemem miktarı 2.78 mm den sonra hızlandığı, Δa = 4.64 mm ve J =45,18 J/mm^2 de çatlak ilerleme hızı kararlı olmayan bölgeye girerek numune aniden kopmuştur.

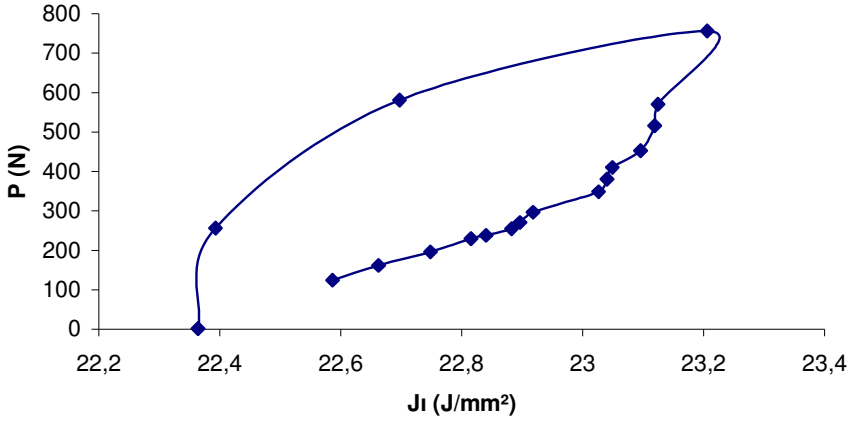


Şekil 6.56 60^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-δ grafiği



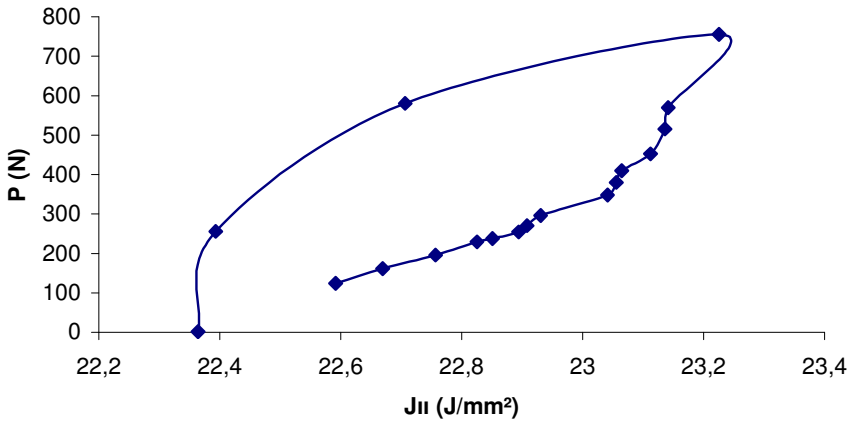
Şekil 6.57 60^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-Δa grafiği

Yüklemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı Jı göre grafiği şekil 6.58 de gösterilmiştir. Enerji boşalma miktarı maksimum yüklemeye kadar lineer olarak artmıştır. J_I= 23.21 J/mm^2 den sonra enerji miktarı da azalmıştır. P=124,57 N da numune aniden koptuğu için enerji boşalma miktarı 22.57 J/mm^2 den ilk enerji seviyesine gelmemiştir. Kalan bu enerji numune üzerinde kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 6.58 60^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-JI grafiği

Şekil 6.59 da şekil değiştirme enerji boşalma miktarı JII in yüklemeye göre grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta JII = 22.36 J/mm^2 de P = 1.20 N iken, Pmax =756.16 N da JII =23.23 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Yani JII, JI den büyük çıkmıştır. Çünkü JII'in hesaplamasında kullanılan kayma modülüne bağlı olarak düzeltilmiş bir değerdir, büyük çıkması beklenen bir durumdur. Açılma modunun etkisinin azaldığı kayma modunun etkisinin arttığı gözlenmiştir.



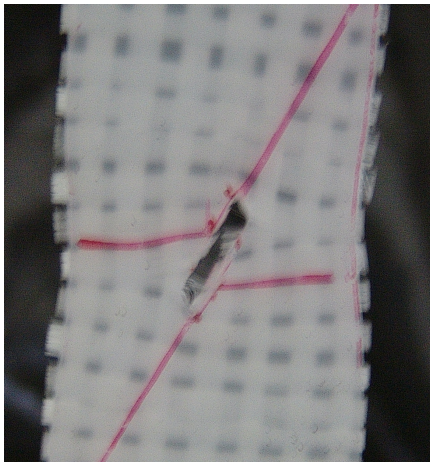
Şekil 6.59 60^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-JII grafiği

6.6.2. 60^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

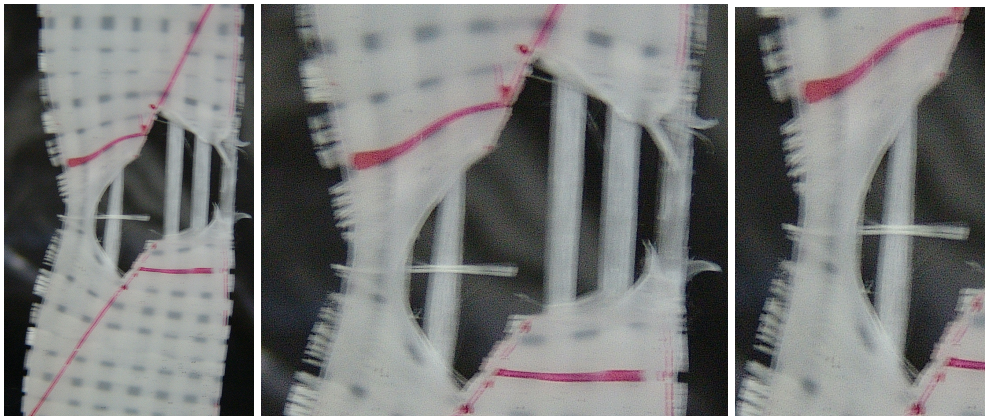
60^o açılı çatlaklı numunede bileşik mod da (Mod I ve Mod II) hasar olmuştur. Hasar mekanizmasını incelenecek olursa, 60^o açılı çatlaklı numune yüklemeye tabi tutulduğunda öncelikle çatlak uçlarına yakın bölgelerde başladı. Daha sonra matris malzemede yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

Yükleme ilerledikçe matris içerisindeki çatlak yırtılması yatayla -60^o açıyla yönelerek ve kink yaparak yatayda devam etti. Bu sırada fiberde köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü. Şekil.6.60 ve şekil 6.61 de -60^o açıyla yönlenme, kink ve köprülenme olayı görülmektedir.

Çekme yükünün artması ile birlikte cam kumaş örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin kıvrım bölgesi uzayıp kısalırken eğilmeye maruz kaldığından, fiber üzerinde mikro çatlaklar oluşmuş ve daha sonra çekme yükünün devam etmesiyle birlikte bu çatlaklar büyüyerek cam kumaşı koparmıştır. Ayrıca 0^o, 15^o, 30^o ve 45^o açılı çatlaklı numunelere göre çatlak ilerlemesi daha yavaş olmuştur.



Şekil 6.60 60^o açılı çatlaklı kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesi



(a) (b) (c)

Şekil 6.61 Kırılma sonrası 60^{o} çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

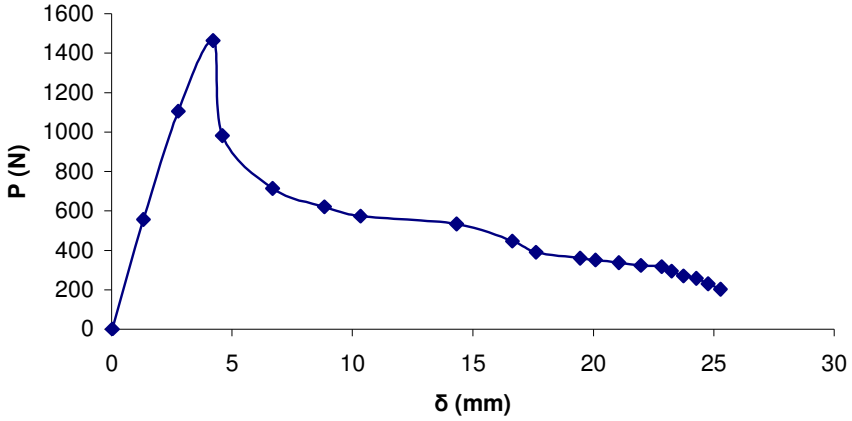
c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

6.7. 75^{o} AÇILI ÇATLAKLI NUMUNELER

6.7.1. 75^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deney Sonuçları

Merkezine yatayla 75^{o} lik açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneleri de çekme deneyine tabi tutulmuştur.

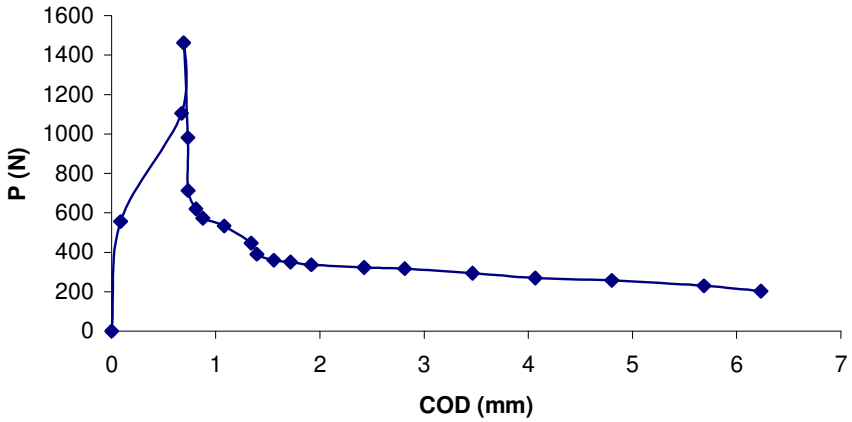
Diğer açılı çatlaklı numunelerde ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yüklemelere karşılık, uzama miktarının grafiği şekil 6.62 de verilmiştir. Yükleme 1463.39 N da maksimum olduğu ve uzama miktarının ise 4.22 mm iken, kopma anında P = 201.94 N ve δ= 25.27 mm olarak bulunmuştur. Numuneler ortalama 185 N da ve 30.25 mm uzamada kopmuştur.



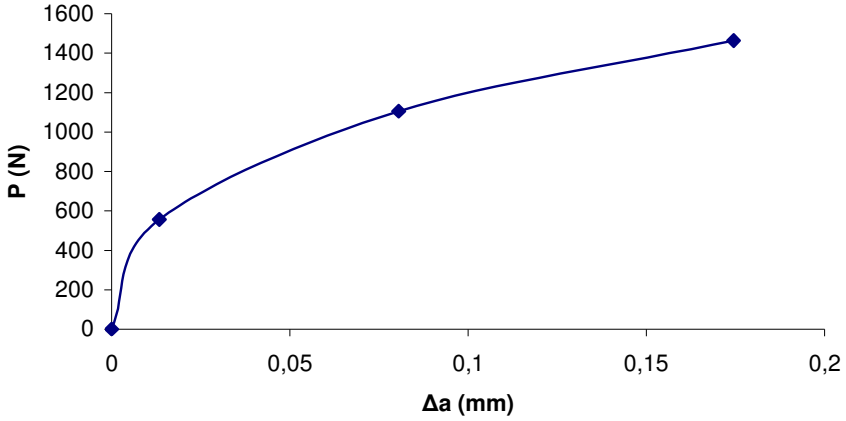
Şekil 6.62 75^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-δ grafiği

Şekil 6.63 de çekme yüküne karşılık, çatlak ucu açılma miktarının değişim grafiği gösterilmiştir. Bu grafikten çatlak ucu açılma miktarı 2.81 mm kadar kararlı olduğu bu değerden sonra hızlandığı görülmektedir. Maksimum yüklemenin olduğu 1463.39 N da çatlak ucu açılma miktarı 0.69 mm olduğu görülmektedir. Ayrıca kuvvet ve çatlak ucu açılma miktarları EK I f de verilmiştir.

Şekil 6.64 de tespit edilen yüklemelere karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği verilmiştir. Çatlak ilerleme miktarı maksimum yüklemeye kadar lineer arttığı görülmektedir. 75^{o} açılı çatlaklı numunede ortalama yükleme 185 N da ve çatlak ilerlemesi 11.65 mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur.

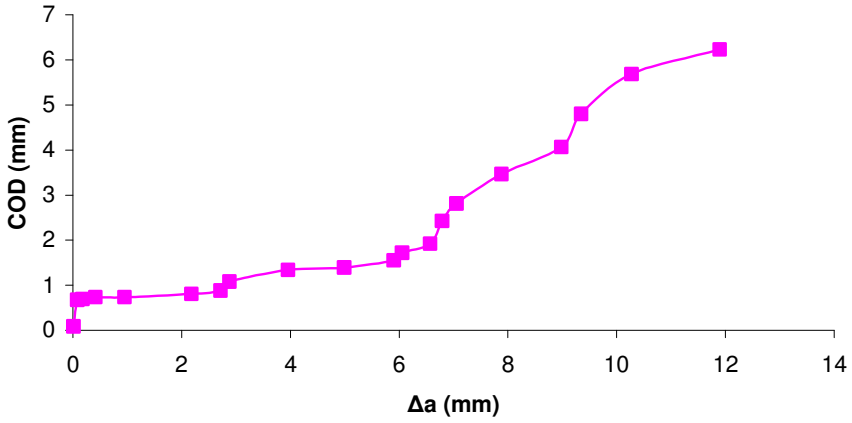


Şekil 6.63 75^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-COD grafiği



Şekil 6.64 75^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Δa grafiği

Şekil 6.65 de çatlak ucu açılma miktarlarının, çatlak ilerleme miktarlarına göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta Δa = 0.0134 mm ve COD = 0.872 mm iken, kopma anında ise Δa =11.90 mm ve COD =6.23 mm olarak bulunmuştur. Grafikten görüldüğü gibi Δa = 6.06 mm ve COD = 1.72 mm kadar çatlak ucu açılma miktarı yavaş olarak ilerlemiş, bu değerlerden sonra çatlak ağzı açılma miktarı hızlı artmıştır. Çatlak ağzı açılma miktarı 4.80 mm den sonra kararlı olmayan bölgeye girerek numune aniden kopmuştur.

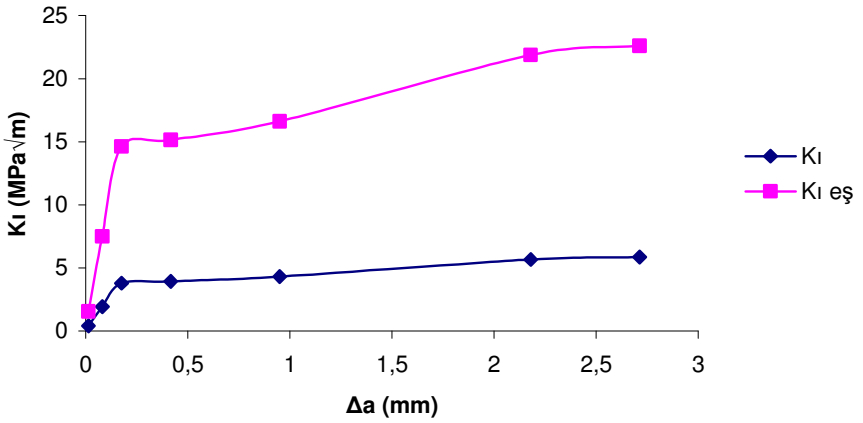


Şekil 6.65 75^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin COD-Δa grafiği

75^{o} açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi, diğer açılı çatlaklı numunelerde olduğu gibi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik

yönde, -75^o açıyla kink yapacak şekilde, bileşik mod da çatlak ilerlemesi gerçekleşmiştir. Yine diğer açılı çatlaklı numuneler için kullanılan eşitliklerden Kı, $K_{ıeş}$, Kıı, $K_{ıieş}$ ve $K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler Ek I f de verilmiştir.

Çatlak miktarı ilerledikçe maksimum yüklemeden sonra her bir gerilme için gerilme şiddet faktörü miktarı da düşmüştür. Şekil 6.66 da çatlak ilerleme miktarının, gerilme şiddet faktör miktarları Kı ve $K_{ıeş}$ göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta Kı =0.40 MPa$\sqrt{m}$, $K_{ıeş}$ =1.54 MPa$\sqrt{m}$ iken, gerilme şiddet faktörü miktarının maksimum olduğu anda Kı =5.85 MPa$\sqrt{m}$, Kıeş =22.60 MPa$\sqrt{m}$, kopma anında ise Kı=4.31 MPa$\sqrt{m}$, $K_{ıeş}$ =16.66 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani $K_{ıeş}$, Kı den büyük çıkmıştır. Burada gerek Kı ve gerekse $K_{ıeş}$'in düşmesiyle çatlak ilerleme miktarı artmıştır. Yine burada beklenildiği gibi Kı ve $K_{ıeş}$, 60^o açılı çatlaklı numunelerde ki değerlere göre azalmıştır. Böylece açılma modunun etkisinin gittikçe azaldığını anlaşılmaktadır.

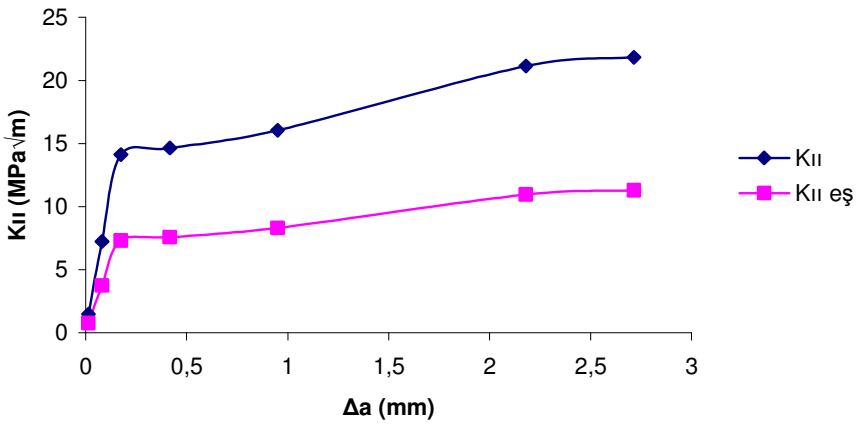


Şekil 6.66 75^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin Kı-a grafiği

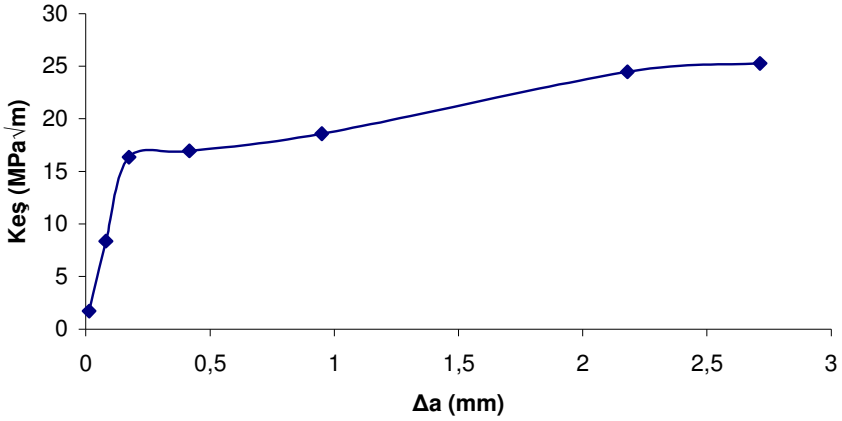
Şekil 6.67 de ise çatlak ilerleme miktarı, gerilme şiddet faktör miktarları Kıı ve $K_{ıieş}$ göre değişim gösterilmiştir. Başlangıçta Kıı =1.49 MPa$\sqrt{m}$, $K_{ıieş}$ =0.77 MPa$\sqrt{m}$ iken, gerilme şiddet faktörü miktarının maksimum olduğu anda Kıı =21.83 MPa$\sqrt{m}$, $K_{ıieş}$ =11.30 MPa$\sqrt{m}$, kırılma anında ise Kıı=16.09 MPa$\sqrt{m}$, $K_{ıieş}$ =8.33 MPa$\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani Kıı, $K_{ıieş}$ den daha büyük çıkmıştır. Ama her iki

değerde 60^o açılı çatlaklı numunelerde ki değerlere göre azalmıştır. Bu da açılma modunun etkisinin azalmasıyla beraber, kayma modunun etkisinin de iyice azaldığını göstermektedir. Şekil 6.36. incelendiğinde, gerek Kıı ve gerekse $K_{ıı_{eş}}$ değerlerinin azalmasıyla çatlak ilerleme miktarı da artmıştır. Ve numune diğerlerine göre daha yüksek yükleme şartlarında kopmuştur.

75^o açılı çatlaklı numunede bileşik mod da $K_{eş}$ değişimi başlangıçta $K_{eş}$ = 1.72 MPa$\sqrt{m}$ değerinden, gerilme şiddet faktörünün maksimum olduğu anda $K_{eş}$ =25.26 MPa$\sqrt{m}$ artış gösterirken, kırılma anında ise $K_{eş}$ = 18.62 MPa$\sqrt{m}$ düşüş göstermiştir. Şekil 6.68 de 75^o açılı çatlaklı numunenin çatlak ilerleme miktarının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü miktarları $K_{eş}$'e göre değişimi gösterilmiştir. Yine $K_{eş}$ değerleri, 60^o açılı çatlaklı numunelerde ki $K_{eş}$ değerlerine göre azalmıştır.



Şekil 6.67 75^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin Kıı-a grafiği

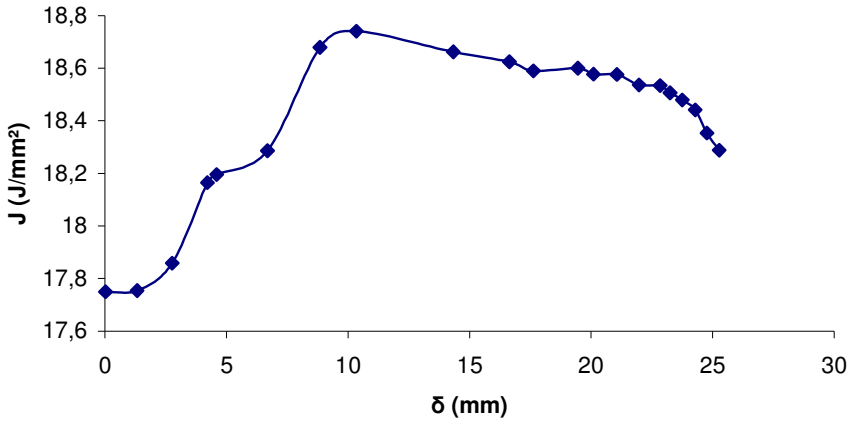


Şekil 6.68 75^o açılı çatlaklı kompozit malzemenin $K_{eş}$-a grafiği

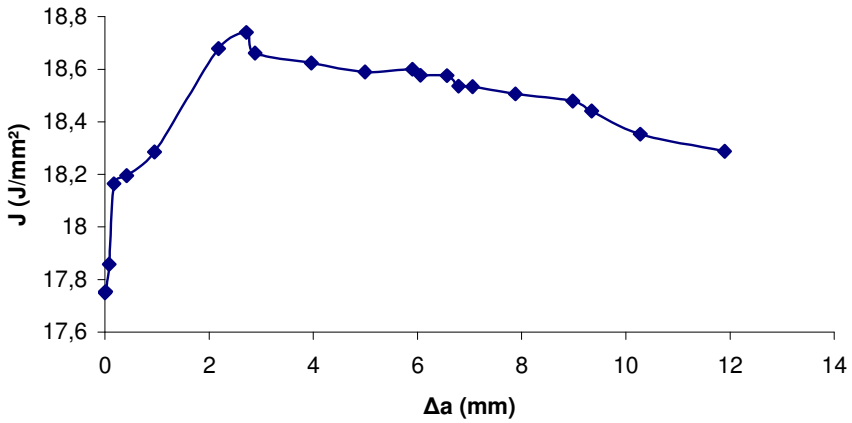
75^o açılı çatlaklı numune için elde edilen J değerleri EK I f de verilmiştir. Yine diğer açılı çatlaklı numuneler için kullanılan eşitlikler kullanılarak Jı, Jıı, ve J değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 6.69 da 75^o açılı çatlaklı numunede çekme neticesinde uzamanın şekil değiştirme enerji boşalma miktarı ile değişmesinin grafiği gösterilmiştir. 75^o açılı çatlaklı numuneyi çekme için başlangıçta J= 17.75 J/mm^2 lik bir enerji gerekmektedir. Gerilme şiddet faktörünün maksimum olduğu anda çatlaklı numuneyi koparmak için gereken bu enerji miktarı 18.74 J/mm^2 ye artmıştır. Numunenin koptuğu andaki enerji miktarı ise 18.29 J/mm^2 dır. Diğer açılı çatlaklı numuneler için gerekli enerji boşalma miktarından daha az çıkmıştır. Bu da beklenen bir durumdur.

Şekil 6.70 de çatlak ilerleme miktarı, şekil değiştirme enerji boşalma miktarına göre değişim grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta J =17.75 J/mm^2 iken, gerilme şiddet faktörünün maksimum olduğunda ise Δa= 2.71 mm ve P= 573.55 N da J =18.74 J/mm^2 olarak bulunmuştur. Çatlak ilerleme miktarı 9.34 mm den sonra hızlandığı, Δa = 11.90 mm ve J =18.29 J/mm^2 de çatlak ilerleme hızı kararlı olmayan bölgeye girerek numune aniden kopmuştur.

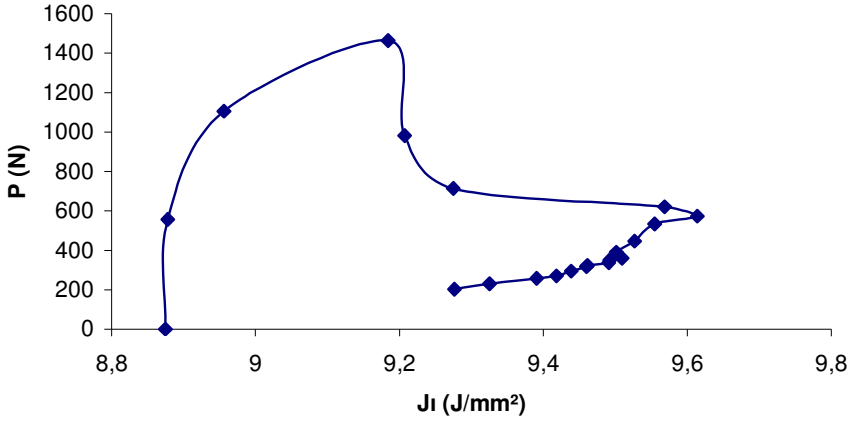


Şekil 6.69 75^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-δ grafiği



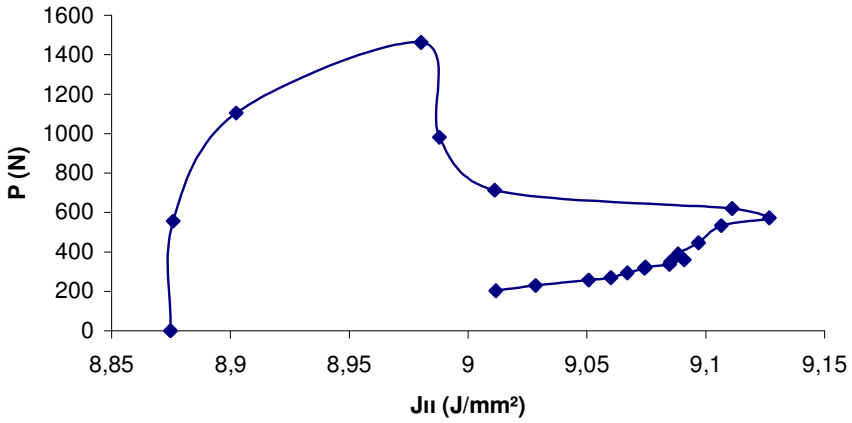
Şekil 6.70 75^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin J-Δa grafiği

Yüklemenin şekil değiştirme enerji boşalma miktarı Jı göre grafiği şekil 6.71 de gösterilmiştir. Enerji boşalma miktarı maksimum yüklemeye kadar lineer olarak artmış olup, yüklemenin azalmasıyla birlikte enerji boşalma miktarı 9.61 J/mm^2 kadar devam etmiştir. Jı= 9.61 J/mm^2 den sonra enerji miktarı da azalmıştır. P=201.94 N da numune aniden koptuğu için enerji boşalma miktarı 9.28 J/mm^2 den ilk enerji seviyesine gelmemiştir. Kalan bu enerji numune üzerinde kaldığı gözlenmiştir. Bu da çatlak ucu açılma ve ilerleme miktarlarının yükleme eksenine paralel konuma yaklaştığını ifade etmektedir, beklenen bir durumdur.



Şekil 6.71 75^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Jı grafiği

Şekil 6.72 de şekil değiştirme enerji boşalma miktarı Jıı in yüklemeye göre grafiği gösterilmiştir. Başlangıçta Jıı = 8.87 J/mm^2 de P = 0.13 N iken, Pmax =1463.39 N da Jıı =8.98 J/mm^2 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.72 75^{o} açılı çatlaklı kompozit malzemenin P-Jıı grafiği

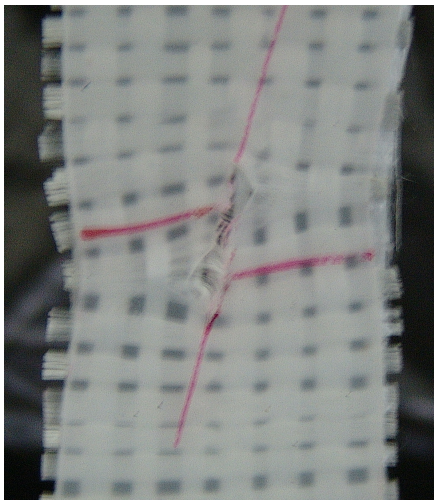
6.7.2. 75^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

75^{o} açılı çatlaklı numunede bileşik mod da (Mod I ve Mod II) hasar olmuştur. Hasar mekanizmasını incelenecek olursa, 75^{o} açılı çatlaklı numune yüklemeye tabi

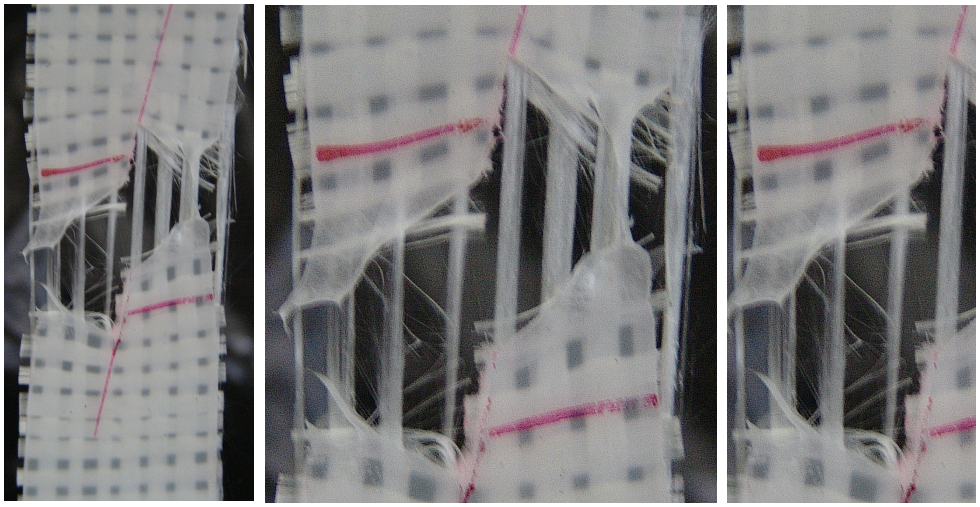
tutulduğunda öncelikle çatlak uçlarına yakın bölgelerde başladı. Daha sonra matris malzemede yırtılma ile birlikte matris çatlak ayrılması oluştu.

Şekil 6.73 ve şekil 6.74 de görüldüğü gibi yükleme ilerledikçe matris içerisindeki çatlak yırtılması da yataya (-75^o açıyla) yönelerek ve kink yaparak devam etti. Bu sırada fiberde köprülenme veya saçaklanma olayının meydana geldiği görüldü.

Çekme yükünün artması ile birlikte cam kumaş örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin kıvrım bölgesi uzayıp kısalırken eğilmeye maruz kaldığından, fiber üzerinde mikro çatlaklar oluşmuş ve daha sonra çekme yükünün devam etmesiyle birlikte bu çatlaklar büyüyerek cam kumaşı koparmıştır. Çatlak ilerlemesi, yüklemenin devam etmesiyle birlikte a= 9.34 mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerlerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve aniden gürültüyle numune kopmuştur. Ayrıca 0^o, 15^o, 30^o, 45^o ve 60^o açılı çatlaklı numunelere göre çatlak ilerlemesi daha yavaş olmuştur.



Şekil 6.73 75^o çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi



(a) (b) (c)

Şekil 6.74 Kırılma sonrası 75^o çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi

b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması

c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

6.8. TÜM ÇATLAK AÇILARINDA GRAFİKLERİN KIYASLANMASI

Burada 0^o, 15^o, 30^o, 45^o, 60^o ve 75^o açılı çatlaklı numunelere ait $K_{eş}$-a ve J-a grafiklerin kıyaslanması gösterilmiştir.

6.8.1. Tüm Çatlak Açılarında $K_{eş}$- a Grafikleri'nin Kıyaslanması

Burada 0^o, 15^o, 30^o, 45^o, 60^o ve 75^o açılı çatlaklı numunelere ait $K_{eş}$-a grafikleri şekil 6.41. de gösterilmiştir.

8. 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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

Yeh, H.L.,2005, Application of the Quadric Surfaces Criterion to Laminated Composites Containing a Through Thickness Crack, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.24.

Yao, X.F., Bijlaard, F.S.K., Yeh, H.Y., 2005, Tensile Strength and Fracture Behaviors of Complex GFRP Composites with a Central Hole, Journal of Composite Materials, Vol. 39.