T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜZERİNDE AÇILI ÇATLAK BULUNAN CAM-KUMAŞ/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE ÇATLAK AÇISININ KIRILMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

Fatih Mehmet ÇOLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ A.B.D.

Konya, 2006

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜZERİNDE AÇILI ÇATLAK BULUNAN CAM-KUMAŞ/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE ÇATLAK AÇISININ KIRILMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

FATİH MEHMET ÇOLAK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 27/07/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Ahmet AVCI	Yrd.Doç.Dr.Behçet DAĞHAN	Yrd.Doç.Dr. Faruk KÖSE
(Üye)	(Danışman)	(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÜZERİNDE AÇILI ÇATLAK BULUNAN CAM-KUMAŞ/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE ÇATLAK AÇISININ KIRILMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

Fatih Mehmet ÇOLAK
Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Yrd.Doç.Dr.Behçet DAĞHAN
2006, 172 Sayfa

Jüri : Prof.Dr.Ahmet AVCI
Yrd.Doç.Dr.Behçet DAĞHAN
Yrd.Doç.Dr.Faruk KÖSE

Bu çalışmada, merkezine farklı başlangıç çatlak boylarında ve farklı açılarda kalınlık boyunca çatlak açılmış epoksi matris ve iki yönlü E cam elyafı kumaştan üretilmiş termoset plastik kompozitin eksenel yük altında kırılma davranışı araştırılmıştır.

Farklı başlangıç çatlak boylarında ve yönlerde açılmış merkez çatlakları üzerinde durulmuştur. Deneyler sırasında çatlak ilerlemesi, çatlak açılma miktarı, şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı, gerilme şiddet faktörleri ve kırılma tokluğu incelenmiştir. Sonuçlarda çatlak ilerlemesi, çatlak açılma miktarı ve farklı yönlerdeki çatlak açılarına bağlı olarak gerilme şiddet faktörleri ve şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının grafikleri çizilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Eksenel yükleme, kalınlık boyunca çatlak, çatlak ilerleme davranışı, gerilme şiddet faktörü.

ABSTRACT

MS Thesis

THE EFFECT OF CRACK IN CLINATION ON FRACTURE BEHAVIOR OF GLASS / EPOXY COMPOSITES WITH CENTRAL CRACK

Fatih Mehmet ÇOLAK

Selcuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Asist.Prof.Dr.Behcet DAGHAN

2006, 172 Page

Jury : Prof.Dr.Ahmet AVCI

Asist.Prof.Dr.Behçet DAĞHAN

Asist.Prof.Dr.Faruk KÖSE

In this study, fracture behaviour of epoxy matrix which have middle through thickness that was widened on discrepant initial thickness lengths and differential angels through thickness and termoset plastic composites which was procuded by bidirectional E fiberglas material, were investigated.

Middle through thickness that it was widened discrete initial lengths and different directions, were emphasized. Crack propagation, crack exposition amount, shape altertion energy discharge amount, stress intensity factors and fracture toughness were researched during this study. In results, graphics which were contained crack propagation, crack exposition amount, stress intensity factors that was predicated on crack angels on discrepant directions and shape altertion energy discharge amount were drew.

Key Words : Axial loading, Through thickness crack, Crack propagation behavior, Stress intensity factor.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr.Behçet DAĞHAN'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Malzeme temininde İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler Sanayii ve Limited Şirketine, Deneyler konusunda TÜMOSAN yetkililerine teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım süresince bana yardımcı olan Prof.Dr.Ahmet AVCI, Prof.Dr.Ahmet AKDEMİR ve Yrd.Doç.Dr.Ahmet YAPICI'ya teşekkür ederim.

KISALTMALAR VE SEMBOLLER

LEKM	Lineer elastik kırılma mekaniği
GŞF	Gerilme şiddet faktörü
COD	Çatlak açılma miktarı (crack opening displacement)
EPKM	Elastik-plastik kırılma mekaniği
CTOD	Çatlak ucu açılma miktarı (crack tip opening displacement)
KM	Kompliyans metot
BÇDM	Başlangıç çatlak derinliği metodu
E	Elastisite modülü
W	Malzeme genişliği
K	Gerilme şiddet faktörü
$K_{eş}$	Eşdeğer gerilme şiddet faktörü
K_C	Kritik gerilme şiddet faktörü
$K_{Ceş}$	Kritik eşdeğer gerilme şiddet faktörü
K_I	Mod I gerilme şiddet faktörü
$K_{Ieş}$	Mod I eşdeğer gerilme şiddet faktörü
K_{IC}	Mod I kritik gerilme şiddet faktörü
$K_{ICeş}$	Mod I kritik eşdeğer gerilme şiddet faktörü
K_{II}	Mod II gerilme şiddet faktörü
$K_{IIeş}$	Mod II eşdeğer gerilme şiddet faktörü
K_{IIC}	Mod II kritik gerilme şiddet faktörü
$K_{IICeş}$	Mod II kritik eşdeğer gerilme şiddet faktörü
K_{III}	Mod III gerilme şiddet faktörü
2a	Başlangıç çatlak boyu
Δa	Çatlak ilerlemesi
C	Kompliyans
P	Uygulanan yük
B	Malzeme kalınlığı
2L	Malzeme boyu
ν	Poisson oranı
θ	Çatlağın yatay eksenle yaptığı açı

σ	Normal gerilme
δ	Uzama miktarı
α	Kink açısı
P_Q	Kritik gerilme şiddet faktörüne karşılık gelen yük
P_{dik}	Uygulanan yükün çatlak doğrultusuna dik bileşeni
P_{yatay}	Uygulanan yükün çatlak doğrultusundaki bileşeni
G	Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
G_C	Kritik şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
G_I	Mod I şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
G_{IC}	Mod I kritik şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
G_{II}	Mod II şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
G_{IIC}	Mod II kritik şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
A	Kesit alan
ε	Şekil değiştirme
ρ	Yoğunluk

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vi
İÇİNDEKİLER	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER	7
3.1 Giriş	7
3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	8
3.2.1 Elyaf(Fiber) Takviyeli Kompozit Malzemeler	9
3.2.1.1 Cam Fiberler	10
3.2.2 Tabakalı Kompozit Malzemeler	12
3.2.3 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler	13
3.3 Plastikler ve Plastik Teknolojisi	14
3.3.1 Plastiklerin Sınıflandırılması	15
4. KIRILMA MEKANİĞİ	17
4.1 Giriş	17
4.2 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği	18
4.3 Numune Geometrisine Göre Gerilme Şiddet Faktörünün Değerleri	21
4.3.1 Bir Levhada Kalınlık Boyunca Çatlak	21
4.3.2 Çift Kenar Çatlağı	22
4.3.3 Tek Kenar Çatlağı	23
4.4 Eliptik Yüzey Çatlağı Analizi	24
4.5 Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği	25
4.6 Gerilme Şiddet Faktörü (K)	26
4.7 Şekil Değiştirme Enerjisi Boşalma Miktarı (G)	31
5. DENEYLER	34
5.1 Deney Malzemesi	34

5.2 Yakma Deneyi 36
5.3 Çekme Deneyi 36
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA 39
6.1 Çekme Deneyleri 39
6.2 0^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları 40
6.2.1 0^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 48
6.3 15^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları 50
6.3.1 15^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 61
6.4 30^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları 63
6.4.1 30^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 74
6.5 45^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları 76
6.5.1 45^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 88
6.6 60^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları 89
6.6.1 60^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 101
6.7 75^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları 103
6.7.1 75^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması 114
6.8 Tüm Çatlak Açılarında Kritik Gerilme Şiddet Faktörü (K_C) 116
6.8.1 2a = 5 mm İçin Kritik Gerilme Şiddet Faktörü 116
6.8.2 2a = 7 mm İçin Kritik Gerilme Şiddet Faktörü 118
6.8.3 2a = 9 mm İçin Kritik Gerilme Şiddet Faktörü 120
6.9 Tüm Çatlak Açılarında Kritik Şekil Değiştirme Enerjisi Boşalma Miktarı 122
6.10 Açılı Çatlaklarda Bileşik Mod İçin Gerilme Şiddet Faktörü 124
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 127
8. KAYNAKLAR 129
9. EKLER 135

1. GİRİŞ

Teknolojinin her geçen gün gelişmesiyle bilinen malzemelerin geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Mühendislikte plastikler, metaller ve seramikler adı altında üç ana grupta kullanılan malzemelere dördüncü bir grup olarak kompozitler eklenmiştir.

Kompozit malzemeler genelde, matris olarak bir ana malzeme ile takviye olarak da tali bir malzemeden meydana gelir. En az iki veya daha fazla malzeme makro düzeyde birleştirilerek en iyi özelliklerin ortaya konduğu bir malzeme elde edilir. Mekanik özellikler, üretim şekli ve maliyet göz önüne alındığında kompozit malzemelerin, diğer malzemelerin yanında önemli bir yer teşkil ettiği görülmektedir.

Kompozit malzemeler ekonomik olmalarının yanı sıra, var olan doğal kaynakların daha iyi kullanılmasını sağlar. Bu malzemeler ilk çağlardan beri kullanılmaktadır. Örneğin orta çağ da kullanılan bazı kılıç ve zırhlar bunlardan bazılarıdır. Önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Günümüzde ise başta uzay ve havacılık sanayi olmak üzere bir çok alanda kullanılmaktadır. Bu kadar avantajına rağmen en büyük dezavantajı, henüz yeni malzemeler oldukları için tanımlanmamış birçok parametresinin bulunmasıdır. Bu sebeple araştırılması gerekli geniş bir alandır.

Kompozit malzemelerin kullanımının artmasıyla birlikte bu malzemelerde ortaya çıkan hasarlar ve sebepleri incelenmeye başlanmış, oldukça düşük gerilmelerde çatlakların ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Daha sonraki tarihlerde bu ilişki malzeme özelliklerini de içine alacak şekilde geliştirilmiştir. Günümüze kadar yapılan çalışmalar, değişik özelliklere sahip malzemelerde çatlak oluşumu, çatlağın ilerleme hızları ile bunların üzerinde etkisi olan faktörlerin araştırılması üzerine yoğunlaştırılmıştır. Çatlak boyutları ve ilerleme tarzı önceden bilinirse daha başlangıçta, dizayn esnasında gerekli önlemler alınabilir.

Kırılma mekaniğinin en önemli yönü, gerilme altındaki malzemelerde çatlak ve gerilme konsantrasyonunu arttırıcı faktörleri göz önüne alarak kırılma problemlerinin incelenmesidir. Makine ve konstrüksiyonlarda kullanılan malzemelerin çoğunda imalat sırasında meydana gelen mekanik çatlaklar olabilir. Makine parçasının üretimi

sırasında da çeşitli nedenlerden dolayı kılcal çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar civarında gerilme konsantrasyonları ve kırılmaya sebep olur.

Bu çalışmada, cam kumaş epoksi kompozitlerden hazırlanan numunelerde farklı çatlak boylarında ve parametrik açılarda oluşturulan kalınlık boyunca merkezi çatlaklarda kırılma davranışları incelenmiştir. Çekme deneylerinde uygulanan yük altında çatlak açılma miktarı ve çatlak ilerleme miktarları tespit edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak gerilme şiddet faktörü değerleri ve şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kompliyans metodu ve başlangıç çatlak derinliği metodu kullanılmıştır. Elde edilen değerlerin çatlak ilerleme miktarı ve açı değişimine göre grafikleri çizilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapı ve makine elemanlarında muhtelif şekillerde çatlaklar bulunabilir. Bunlar kenar çatlağı , boydan boya çatlak ve yüzey çatlağı olarak sayılabilir. Kırılma mekaniği açısından her biri farklı davranış gösterir. Yüzey çatlağı diğer çatlaklara nazaran daha farklı bir davranış gösterir. Çünkü gerek eliptik, gerek dairesel şekilli olan yüzey çatlağının ilerlemesi, merkeze göre alınan bir açıyla değişim gösterir. Diğer çatlaklarda böyle bir değişim söz konusu değildir.

Kompozit malzemelerin hasar davranışları mühendislik açsından çözülmesi gereken bir problemdir. Kompozit malzemeler genel olarak statik yada dinamik yük altında imalattan kaynaklanan hatalara karşı oldukça duyarlıdır. Bu sebeple kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesiyle ilgili geniş araştırmalar yapılmıştır.

Cam takviyeli kompozit malzemelerin hasar ve deformasyon davranışları Bax(1970) tarafından incelenmiştir. Bax, bu çalışmada flaman sarım kısa boylu iç basınca maruz tüplerin yorulma deneyleri ile deformasyon davranışlarını araştırmıştır. Karbon takviyeli kompozitlerin kırılma davranışlarını Hine(1988), üç noktadan eğme testi ile numune kompliyansından giderek incelemiştir. Cam takviyeli plastiklerin mukavemet ve kırılma tokluğu üzerine Cherry ve Harrison(1971) bir çalışma yaparak tekrarlı yükleme durumunda çatlak ilerlemesine etki eden bazı faktörleri incelemişlerdir.

Kompozit malzemelerin kırılma tokluğuna veya gerilme şiddet faktörüne etki eden sebeplerden biriside takviyenin geometrisidir(Harel 1980, Marom 1978). Bu takviye geometrisi tek yönde veya açılı olabilir. Kompozit malzeme tabakalardan meydana gelmişse kırılma tokluğunda değişmeler olabilir.Tabakalar arası kırılma tokluğu Smiley ve Pipes(1987) tarafından, açılı katlı kompozitlerdeki kırılma tokluğu ise Peters(1983) tarafından incelenmiştir. Ochiai ve Peters(1982) grafit epoksi tabakalı levhalarda elyaf açılarının kırılma tokluğuna etkisini tespit etmişlerdir. Elyaf matris ara yüzey özelliklerinin, kırılma tokluğuna etkisi çatlak ucundaki enerji absorbsiyonu yaklaşımı ile bulunabilir(Wells 1985). Kompozit malzemelerin enerji absorbsiyon kapasiteleri, hasar yükünün göstergesidir.

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).

Cam takviyeli plastiklerin (CTP), çeşitli takviye geometrileri için çatlak ilerlemesi ve gerilme şiddet faktörlerinin bulunması için pek çok çalışma yapılmıştır. Sanford ve Stoneisifer(1971) eş yönlü CTP' lerde kırılma tokluğunu Paris ve Sih(1965)' in izotropik malzemeler için geliştirdikleri deney metodunu kullanarak elde etmişlerdir.

Rebiere ve ark.'nın(2001) yaptıkları çalışmada amaç, yapıdaki enine ve boyuna çatlakların gerilme bölgesine etkisi, rijitlikteki düşüş ve poisson oranındaki düşüşün incelenmesidir. Deneyler statik ve alternatif(yorulma) yükler altında yapılmıştır. Bir çok araştırmacı boyuna çatlakların statik yük değeri ve çevrim sayısı arttıkça arttığını göstermişlerdir(Henaff-Garden 1990, Boniface 1989).

Çatlak dağılım hipotezi: 0 ve 90 derecelik tabakalardaki çatlakların enine ve boyuna eşit aralıklarda dağılmasıdır. Bu hipotez çatlak yoğunluğu arttıkça daha iyi gözlemlenir(Highsmith 1982).

Bir kompozit malzemenin yorulma direnci, matrisin hasara karşı direnci ile ilgilidir(Ferry 1998). Hasar başlayınca rijitlik azalır(O'brien 1981). Kompozit malzemelerde sekant modülündeki düşüş, hasarın yerel olarak toplanmasıyla belirlenir(Hwang 1986, Reisfinder 1983). Deneyin yapıldığı frekans düşük olursa malzeme yorulmadan çok sürünmeye maruz kalır, çünkü düşük frekans daha uzun yükleme periyodu demektir. Sekant modülündeki düşüş kompozit malzemelerde hasar kriteri olarak uzun zamandan beri kullanılmaktadır(Hwang 1986, Lee 1993).

Richard ve Perreux(2000) yaptıkları çalışmada tabakalı kompozit malzemelerde güvenilirlik yaklaşımıyla hasar mukavemetinin optimizasyonu konusunu incelmişlerdir. Hashin ve Rotten(1973) değişik modlar için elyaf takviyeli

malzemeler için yorulma mukavemet kriteri ortaya atmışlardır. Çok yönlü tabakalı kompozitler ele alındığında bir başka hasar türü olan tabaka ayrılması dikkate alınmalıdır(Rotten 1979).

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(Stevanoviç ve ark. 2000).

Tong(2002) yaptığı çalışmada sabit genlikte yükler altında cam takviyeli plastik levhalarda yorulma olayını incelemiştir. Bu çalışmada çatlak ilerleme safhaları incelenmiş, matris kırılması sonucunda oluşan ek gerilme dağılımı ve rijitlikteki düşüş sonlu elemanlar metoduyla modellenmiştir. Bu çalışma genel olarak yorulma yükü altında matris üzerindeki çatlakların ilerleme karakteristiklerini incelemektedir. Bu çalışmada kullanılan numuneler E-cam/Epoksi malzeme olup filaman sarma tekniği ile üretilmiştir. Reisfinder(1977) yorulma sırasında matris malzemesindeki çatlakların sürekli artmadığını ve belli bir çevrim sayısından sonra doyuma ulaşıp daha fazla ilerlemediği göstermişlerdir.

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

Shan ve Liao(2002) cam ve karbon takviyeli epoksi matris malzemelerin çekme-çekme durumundaki yorulma davranışlarını hem havada hem de 25 ^{o}C' de saf su içinde deneylere tabi tutmuşlardır. Maksimum mukavemetin %85' inde yapılan deneylerde yorulma ömründe belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Ancak maksimum mukavemetin(σ_{max}) %65 ve %45' inde yapılan deneylerde yorulma ömrü azalmıştır. Cam elyaf takviyeli numuneler 10^{6} çevrime kadar çıkmamışlardır. Ancak

karışım kompozitlerin (%30 Karbon elyaf + %70 Cam elyaf) daha iyi bir tutma ve yapısal birlik gösterdiği rapor edilmiştir.

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).

E-cam / epoksi kompozitler için üç ayrı ömür tahmini metodu mevcuttur. Bunlar, rijitliğin düşmesi, matristeki çatlak yoğunluğu ve malzemedeki delaminasyon bölgesinin büyüklüğüdür. Kompozit malzemelerde ömür tayini için bir çok metot ileri sürülmüştür. Bunlar, Elastisite modülünün düşmesi, kalıcı gerilmeler, kümülatif hasar ve enerji kriterleridir. Bu metotların avantaj ve dezavantajları olmakla birlikte sabit yük aralığında bir çok kompozit yapıya uygulanabilir(Bond 1999).

Cam elyaf takviye ile kullanılan en yaygın reçine türü polyesterdir. Daha pahalı olması sebebiyle ikinci sırayı epoksi reçine alır. CTP'nin kimyasal direnci, korozyona duyarlı cam elyafı ortam etkisinden koruyan reçinenin yapısına oldukça bağlıdır. Çözücülerin reçineye etkisi hem fiziksel hem de kimyasal olabilir(Allen 1979). Çözücüler reçineyi plastikleştirerek rijitlik ve mukavemeti azaltır(Ishai 1975).

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Giriş

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro seviyede birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılır (Şahin 2000).

Kompozit malzemeler birden çok metalik, organik veya inorganik bileşenden oluşabilir. Bu bileşim neredeyse sınırsızdır. Yani elde etmek istediğimiz sonuç yapının özelliklerine göre aşağı yukarı istediğimiz her malzemeden bir kompozit elde edebiliriz. Ancak bu yapı içerisinde bulunacak olan destek malzemeler için bazı sınırlar vardır. Bir kompozit içerisinde bulunabilecek olan destekleyici yapılar fiber, partikül, pulcuk, lamine yada dolgu olarak bulunabilir.

Kompozit malzemelerin bilinen klasik metal malzemelere göre üstün yanları malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olmasıdır. Kompozitlerin bu avantajları onlara malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkanı tanır. Dolayısı ile yapıda var olması istenen düşük ağırlık, yüksek mukavemet, yorulma ve aşınma dayanımı, estetik görünüm, elektriki iletkenlik, rijitlik gibi özellikler kompozit malzemelerle daha iyi elde edilebilir. Rijitlik, mukavemet, yoğunluk, termal ve elektriki özellikler için değişik değerler, uygun matris alaşımı, takviye elemanı, takviye şekli ve hacmi, takviyenin yönü ve bu kompozitlerin üretim metotları ile elde edilir (Moussa 2002).

Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını saran matris malzemesini içermektedir. Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, whiskerler, kırpılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır (Kelly ve Davies 1965). Matrisin fonksiyonu ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için elyaf-matrisi bir arada tutmak yanında, çoğu takviye elemanları gevrek ve kırılgan olduklarından onların yüzeylerini dış etkilere karşı korumaktır. Ayrıca plastiklik ve

süneklik üstünlüğü ile elyaflarda kırılgan çatlakların yayılmasını önler. Plastik deformasyonlar ve çatlaklar varsa elyaflara paralel olarak yönlerini değiştirir.

Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda kompozit malzemelerin üretimi ile avantajlı özellikler sağlanabilir (Taya ve Arsenault 1988) ;

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- Mükemmel aşınma direnci
- Yüksek sıcaklık kapasitesi
- İyi korozyon direnci
- İyi termal ve ısı iletkenliği
- Düşük ağırlık
- Çekicilik ve estetik görünüm.

Bu avantajların yanı sıra ;

- Üretim güçlüğü
- İşlenmesinin güç olması yanında maliyetinin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
- Diğer malzemeler gibi geriye dönüşümünün (recycle) olmayışı
- Kırılma uzamasının az oluşu gibi dezavantajları da mevcuttur.

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler, bileşenlerin türleri ve yapısal açıdan üç grupta sınıflandırılabilirler. Bunlar;

1- Elyaf (fiber) Takviyeli Kompozit Malzemeler

2- Tabakalı Kompozit Malzemeler

3- Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

3.2.1. Elyaf(Fiber) Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyen önemli parametreler sırasıyla; elyafın uzunluğu, elyafın yönlenmesi, elyafın şekli ve kompozisyonudur. Bunlardan yönlenme en önemli faktördür. Elyafların yönelimi hangi yönde mukavemetin daha yüksek olacağını belirler. Üç tip elyaf takviyesi vardır. Bunlar tek yönde, düzlemsel ve üç boyutlu takviyedir. Bunlardan tek yönde takviye yönlenme doğrultusunda en yüksek mukavemet ve elastisiteye sahiptir. Düzlemsel takviye her yönde farklı mukavemet gösterir. Bir yöndeki mukavemet o yöndeki elyaf sayısıyla orantılıdır. Elyaf yönlenmesi ne kadar rasgele olursa herhangi bir yönde mekanik özellikler zayıflar.

Fiber takviyeli kompozitler kendi içerisinde fiber geometrisine bağlı olarak beş sınıfa ayrılırlar. Bunlar; tek yönlü sürekli elyaflı, kırpılmış elyaflı, ortagonal elyaflı, çapraz dizilmiş sürekli elyaflı ve rasgele dizilmiş sürekli elyaflı kompozit malzemelerdir(Şahin 2000).

Bu kompozit malzemelerde fiber olarak, kullanım sırasına göre en çok cam, grafit, karbon v.b. malzemeler kullanılmaktadır. Özellikle cam elyafın geniş olarak kullanılmasının nedeni, diğerlerine göre daha ucuz olması, kolay temin edilebilmesi, çeşitliliğinin fazla olması ve yüksek dayanıma sahip olmasındandır. Dezavantajı ise neme karşı duyarlı olmasıdır. Ayrıca gelişen teknolojiyle özellikle kumaş türü olarak çelik tel örgü, plastik örgü, krom-nikel tel örgü gibi değişik fiberlerde kullanılmaya başlanmış ve bu sayede yeni kompozit malzemeler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bir fiber uzunluk/çap oranı ve kristal büyüklüğü ile karakterize edilir. Boyut küçüldükçe kompozit malzemede sertlik ve dayanımın arttığı görülmüştür.

Kısa elyaflardan imal edilmiş kompozitlerde elyaflar eğer yeterince düzgün yönlenmişse uzun elyafları olan kompozitlerden daha büyük mukavemete sahiptir. Zira kısa elyaflar daha az yüzey hatasına sahip bir biçimde imal edilebilirler. Kısa elyaflardan üretilmiş kompozitler düzlem yada düzensiz şekiller elde etmek için kullanılır.

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.

Elyaf takviyeli kompozitler için hem organik hem de inorganik elyaflar mevcuttur. Organik elyafların genel karakteristikleri hafiflikleri, esneklikleri ve ısıya duyarlılıklarıdır. İnorganik elyaflar ise çok yüksek mukavemet, ısı direnci, rijitlik ve düşük enerji absorbsiyonu ile tanınırlar.

3.2.2.1. Cam Fiberler

Cam, kil, dolamit, kaolin, kolemonit, kalker gibi bazı inorganik maddelerin birlikte ergitilmesi ve kristalize olmadan soğuyarak rijitleşmesi ile elde edilir. Ergitme fırınına konulan maddelerin oranlarının belirlenmesi iyi bir cam kompozisyonunun elde edilmesi için önemlidir(Eldeniz 1992). Cam elyafın imalatında ilk adım sürekli elyafın elde edilmesidir. Elyaf, ısı altındaki camın çok ince gözenekli (0,8-3,2 mm) platin eleklerden belirli bir hızla çekilmesiyle elde edilir. Sürekli elyaf ise, sonsuz uzunluktaki münferit liflerin birleşmesinden meydana gelir. Elyafın kalınlığı çekme hızıyla değişir. Elyaf, çekme işlemi sonrasında bir bağlayıcı maddeyle kaplanarak bobin üzerine sarılır. Bobinler kurutma fırınlarında kurutulduktan sonra elyaf demetleri bükülerek veya bükülmeden bir arada sarılarak değişik çaplarda demetler meydana getirilir(Akdemir 1992). Bu fiberler bükülmeden fitil yapımı için, bükülerek ise iplik yapımı için kullanılır.

Cam takviyeli kompozit malzemelerde takviye elemanının görevi; kompozit malzemenin rijitliğinin, mekanik direncinin ve boyutlarının sabit kalmasını sağlamaktır. Kompozit malzemenin mekanik direnci fiberin şekli, yerleştirilişi ve miktarı ile ilgilidir. Takviye elemanının yanında, kompozit malzemenin mekanik direncini katkı maddesi olan bağlayıcılar(reçineler) sağlar. Bağlayıcılar, epoksi veya polyester ile sertleştirici, bazı inceltici ve kimyasal reaksiyonu hızlandırıcı maddelerin birleşimi ile meydana gelir.

Tablo 3.1 Cam fiber özellikleri

Özellikler	E-Cam	S-Cam
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık, (mg/m^3)	2,54	2,48
Mekanik özellikler		
Çekme mukavemeti, (MPa)		
22 $^{\circ}C$	**3448**	**4585**
371 $^{\circ}C$	**2620**	**3758**
538 $^{\circ}C$	**1724**	**2413**
Elastisite modülü, (GPa) 22 $^{\circ}C$ ' de	72,4	85,5
Akma uzaması, %	4,8	5,7
Elastik Düzelme, %	400	100
Isıl Özellikler		
Isıl genleşme katsayısı, (mm/$^{\circ}C$)	5,0	5,6
Isıl iletkenlik katsayısı, (W/m)	10,4	-
Özgül ısı, 22 $^{\circ}C$ ' de	0,197	0,176
Elektrik özellikleri		
Yalıtkanlık sabiti, 22 $^{\circ}C$ ' de		
60 Hz.' de	5,9-6,4	5,0-5,4
10 Hz.' de	6,3	5,1
Hacimsel direnç, 22 $^{\circ}C$ ' de		
500 V' de	10	10
Yüzey direnci, 22 $^{\circ}C$ ' de		
500 V' de	10	10
Optik özellikler		
Kırılma indisi	1,547	1,523
Akustik özellikler		
Ses hızı, (m/s)	5530	5850

Cam takviyeli kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak Tablo 3.1' de özellikleri verilen üç tipik cam kompozisyonu kullanılır. Bunlar; E, S ve C camıdır. E camı (elektrik için) en çok kullanılan camdır. Çünkü, E camı iyi dayanım, katılık, elektrik ve aşınma özelliklerine sahiptir. C camı (aşınma için) E camından kimyasal aşınmaya karşı daha yüksek dirençlidir, fakat daha pahalı ve daha düşük dayanım özelliklerine sahiptir. S camı, E camından daha pahalıdır, fakat daha yüksek elastisite modülüne ve sıcaklık direncine sahiptir. Bu nedenle uçak endüstrisi gibi özel uygulamalarda kullanılır.

Cam takviyeli kompozit malzemenin dizaynında cam elyafın kimyasal bileşimi, elyaf çapının seçimi ve takviye malzemesinin geometrisi önemli kriterlerdir. Bu yüzden cam takviye, büzülmüş veya düz sürekli elyaf, keçe, kumaş ve kırpılmış kısa elyaf (3-5 mm) gibi değişik tiplerde üretilir.

Cam elyafın kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılmasının nedeni diğer takviye malzemelerine göre daha ucuz olması, kolay temin edilebilmesi, işlenmesinin kolaylığı ve yüksek mukavemetidir. Ancak cam elyafın neme karşı duyarlı olması en büyük dezavantajıdır.

3.2.2. Tabakalı Kompozit Malzemeler

En az iki değişik malzemenin tabakalar halinde dizilerek, teşkil etmiş olduğu kompozit malzemelere tabakalı kompozitler denir.

Tabakalama, tabakaları meydana getiren malzemelerin daha faydalı bir malzeme oluşturması için teşkil edilir. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemenin mukavemeti, rijitliği, korozyon direnci, aşınma direnci, termal izolasyonu iyileştirilir. Bu tür iyileştirilmiş özellikler bi metallerden haddelenmiş metallerden, tabakalanmış camlardan, plastik tabaklı laminantlarda(tabakalanmış kompozitlerde) çok güzel şekilde görülebilir(Kompozit Malzeme Ders Notları).

3.2.3. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bu kompozitler tek veya iki boyutlu mikroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1µm' den büyük ve elyaf hacim oranı %25'den fazla kullanılmamaktadır. En çok kullanılan parçacıklar ise Al_2O_3 ve SiC' den oluşan seramiklerdir. Burada yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır ve özellikler yine izotropiktir. Bunlar büyük parçacık içerdiklerinden kaymayı etkili olarak yapamazlar. Bu kompozitler; metal, seramik ve polimerlerin birleşiminden oluşabilirler. Sert metal uçlar ve beton da örnek olarak verilebilir.

Döküm yoluyla üretilen bu tür kompozitlerde pratikte karşılaşılan bir problem de parçacık ilave edildiğinde tozların karıştırılma zorluğu ve eriyik viskozitenin düşmesi veya sıvı metalin seramik parçacıkları ıslatamamasıdır. Takviyeli kompozitlerin üretiminde varolan problemlerin önemli olanlarından biri de gerekli mekanik özellikleri sağlayacak, matris içinde takviyelerin homojen dağılımını başarmaktır(Brechet 1991).

Islatılabilirliğin iyileştirilmesi için ;

a- Katı yüzey enerjisinin artırılması,
b- Sıvı metal yüzey geriliminin azaltılması,
c- Katı ve sıvı ara yüzey enerjisinin azaltılması gibi parametreler üzerinde durulması gerekir.

Bu nedenle de, parçacık yüzeyine kaplama yapılması ve ısıl işlem uygulanması veya matris bileşiminin ayarlanması gibi metotlar uygulanmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde ıslanabilirliği iyileştirmek için genellikle magnezyum elementi kullanılmaktadır. Bu şekilde kompozitin dayanımı;

a- Parçacıkların büyüklüğüne,
b- Parçacıklar arası mesafe ve homojen dağılıma,
c- Matrisin özelliklerine,
d- Parçacıkların özelliklerine bağlı olarak değişir(Şahin 2000).

3.3. Plastikler ve Plastik Teknolojisi

Plastik sanayiinin, nitroselülozun ticari üretimi ile 1868' de başladığı kabul edilir. Bu ise, yaklaşık 140 yıl öncesi demektir. Nitroselülozu takiben, tarihsel süreçte ikinci sentetik plastik olan fenol-formaldehit esaslı polimerler gelir. Bunların üretimleri ise, bu tarihten yaklaşık 40 yıl sonra gerçekleştirilmiştir. Bu ve bunları izleyen diğer plastik malzemelerin temel yapı taşları ve ham maddeleri olan polimerler, 19. yüzyılın ikinci yarısındaki bazı deney çalışmaları sonunda ve birçoğu tesadüfen ortaya çıkmıştır

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

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

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

köpük malzemeler, filmler, kaplamalar, yapıştırıcılar vb. gibi çeşitli değişik kullanım alanlarına yönelik olarak üretilebilmektedir. Polimer maddeler sert veya yumuşak, rijit veya esnek, kauçuğumsu veya camsı yapıda olabilmektedir. Polimer maddelere ayrıca değişik fiziksel yapılar kazandırılarak gözenekli/gözeneksiz, ısı ile sertleşip şekillenen veya ısı ile tekrar eriyebilen türlerde üretilebilmektedir. Son yıllarda bu özellik kazandırma daha da uç noktalara taşınmış olup; örneğin, ısıtıldıklarında akkor halde hala bozunmayan ve yanmayan türler dahi yapılabilmektedir

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

3.3.1. Plastiklerin Sınıflandırılması

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

Bunun yanı sıra, ısı ile farklı bir davranış gösteren ikinci grup polimer ailesi de bulunmaktadır. Isı ile bir kez şekil verildikten sonra tekrar ısıtıldıklarında bozunan bu grup "***termoset"*** polimerlerdir ve bunlar ısıtıldıklarında yumuşamaz ve ergimezler. Isının yükselmesine karşın ilk katı konumlarını korurlar. Ancak polimer

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

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

4. KIRILMA MEKANİĞİ

4.1. Giriş

Kırılma mekaniğinin en önemli yönü, gerilme altındaki malzemelerde çatlak ve gerilme konsantrasyonunu artırıcı faktörleri göz önüne alarak kırılma problemlerinin incelenmesidir. Makine ve konstrüksiyonlarda kullanılan malzemelerin çoğunda imalat sırasında meydana gelen mekanik çatlaklar olabilir. Malzemelerin üretimi sırasında da çeşitli nedenlerden dolayı kılcal çatlaklar bulunabilir. Bu çatlaklar civarında gerilme konsantrasyonu oluşur ve kırılmaya sebep olur. Gerilme konsantrasyonu sebebiyle meydana gelen çatlaklar, kullanılan malzemenin akma gerilmesinden daha düşük gerilmelerde de olabilir. Yapısında kılcal çatlaklar ve plastik deformasyona uğrayan iri boşluk ihtiva eden malzemeler genellikle gevrek kırılma gösterirler(Kayalı 1983).

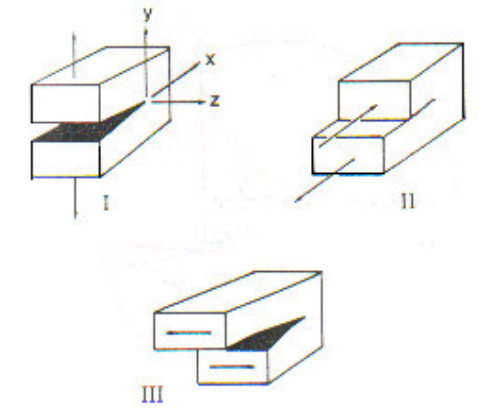
Metalik malzemelerin öncelikle gevrek kırılma karakterini inceleyen teoriler ve deneyler geliştirilmiştir. Bir konstrüksiyon mühendisi veya kırılma ile yakından ilgilenen araştırmacılar için bu deneyler yeterli olmamaktadır. Kırılma mekaniği analizi ile hem malzemenin hasar nedeni anlaşılabilir, hem de imalat ve kullanılma sırasında herhangi bir çatlağın teşekkülü önlenebilir.

Kırılma mekaniğinde kırılma ile ilgili parametreler kırılma tokluğu veya gerilme şiddet faktörü(GŞF) dür. Gerilme şiddet faktörü, "K" sembolü ile ifade edilir. Gerilme şiddet faktörü K, çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna bağlıdır.

Bir malzemenin kırılma tokluğu malzemede çatlak mevcutken yük taşıyabilme kapasitesi veya plastik olarak deforme olabilmesi diye tanımlanabilir. Malzeme tokluğu, düzlem gerilme şartlarında (K_C), düzlem deformasyon şartlarında (K_{IC}) kritik gerilme şiddet faktörü ile ifade edilebilir. Bu davranışlar, Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinde(LEKM) geçerlidir. Elastik–Plastik davranışlar için tokluk, J-integral, R-eğrisi ve çatlak ucu açılma miktarı(crack tip opening displacenment, CTOD) cinsinden ifade edilir.

4.2. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Elastik cisimlerde çatlağın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağlı 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.



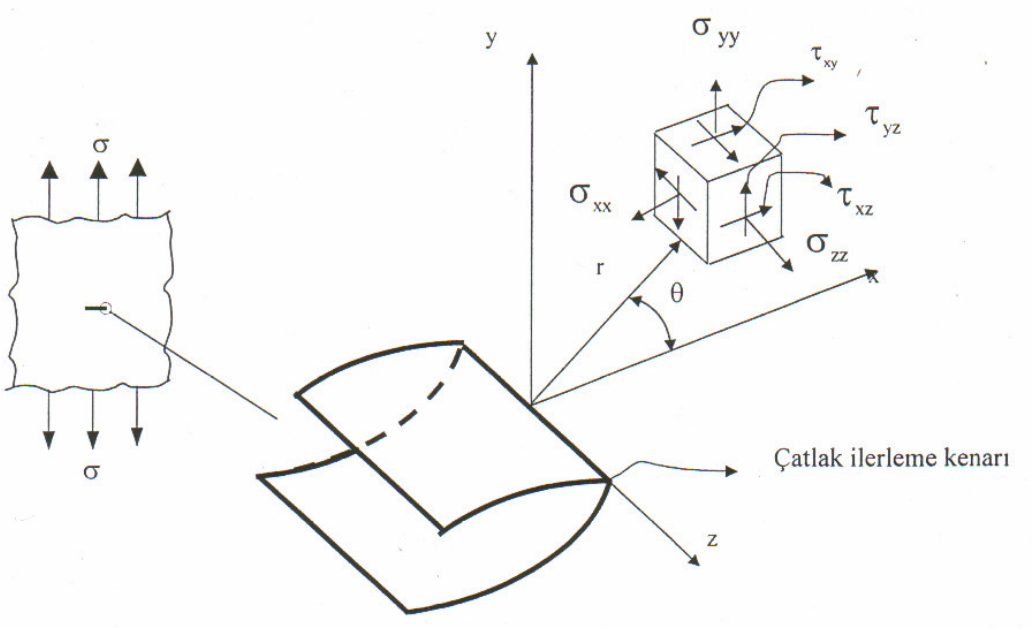
Şekil 4.1 Çatlak ilerleme modları I.açılma modu, II.kayma modu, III.yırtılma modu

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 Westergaard ve Irwin tarafından bulunmuştur(Westergaard 1939, Irwin 1957). Çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörleri her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$K_I = \sigma_i\sqrt{\pi a}\,, \qquad K_{II} = \tau_{ii}\sqrt{\pi a}\,, \qquad K_{III} = \tau_{iii}\sqrt{\pi a} \qquad 4.1$$

Burada, K_I, K_{II} ve K_{III} sırasıyla mod I, mod II ve mod III'e göre gerilme şiddet faktörleridir. Mod I çatlak ucu gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemi gösterimi Şekil 4.2' deki gibidir.



Şekil 4.2 Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilme bölgeleri dağılımı

Çatlak ucundaki gerilmeler denklem 4.2'deki gibidir;

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

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

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}}\left(Cos\frac{\theta}{2}Cos\frac{3\theta}{2}Sin\frac{\theta}{2}\right) \qquad 4.2$$

$$\sigma_{zz} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}}\left(2\nu^{*}Cos\frac{\theta}{2}\right)$$

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

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 faktörünü E: Elastisite modülü, θ: r' nin x ekseni ile yaptığı açıdır. u, v, w sırası ile x, y, z eksenlerindeki deplasmanlarıdır.

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

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

$$w = -\nu^* \frac{K_I}{E} \text{ (Düzlem gerilme hali için 0' dır)} \qquad 4.3$$

$$\nu^* = \nu, \quad k = \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} \text{ (Düzlem gerilme hali için)}$$

$$\nu = 0, \quad k = 3 - 4\nu \text{ (Düzlem deformasyon hali için)}$$

Mod II durumu için gerilmeler ;

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

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} Sin\frac{\theta}{2}Cos\frac{\theta}{2}Cos\frac{3\theta}{2} \qquad 4.4$$

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

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

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

Deplasmanlar denklem 4.5'deki gibi bulunur;

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

$$U_y = \frac{K_{II}}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} Cos\frac{\theta}{2}\left[-1 + 2\nu + Sin^2\frac{\theta}{2}\right] \qquad 4.5$$

$$w = 0$$

Mod III durumu için gerilmeler ve deplasmanlar;

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

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

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0 \qquad 4.6$$

$$u = v = 0$$

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

4.3. 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.

4.3.1. Bir Levhada Kalınlık Boyunca Çatlak

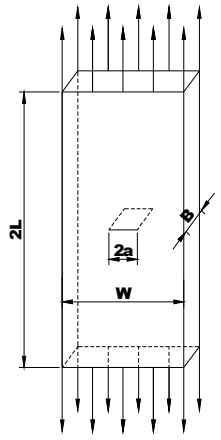
Şekil 4.3' de görüldüğü gibi $2a$ uzunluğunda bir çatlak içeren sonsuz genişlikteki bir levha, σ gibi düzgün bir gerilmeye maruz kalmış ise GŞF ifadesi;

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a} \qquad 4.7$$

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

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a\left[\frac{w}{\pi a}\tan\left(\frac{\pi a}{w}\right)\right]} \qquad 4.8$$

halini alır(Paris 1965).



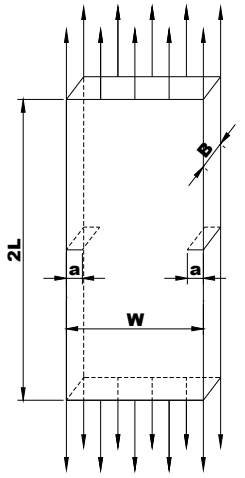
Şekil 4.3 Bir levhada kalınlık boyunca çatlak

4.3.2. Çift Kenar Çatlağı

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

$$K_I = 1.12\sigma\sqrt{\pi a} \qquad 4.9$$

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.

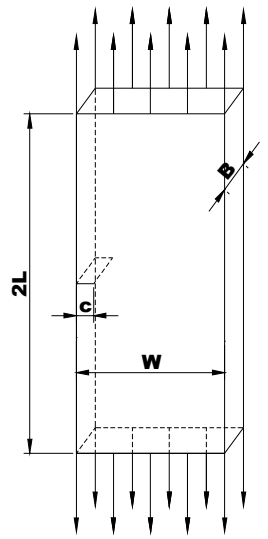
4.3.3. Tek Kenar Çatlağı

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.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}.f\left(\frac{a}{w}\right) \qquad 4.10$$

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



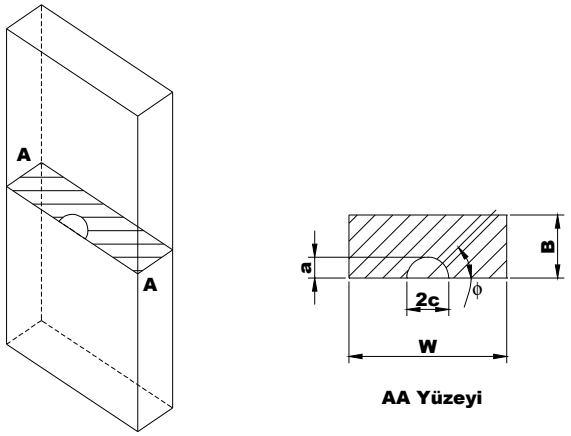
Şekil 4.5 Tek kenar çatlağı

4.4. 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.

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

$$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{E_K} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{a^2}{c^2}\right) Cos^2\phi\right]^{\frac{1}{4}} \qquad 4.11$$



Şekil 4.6 Yüzey çatlağı geometrisi(Lin 1999)

Burada;

$$E_K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{a^2}{c^2} \right) Sin^2\phi \right]^{\frac{1}{4}} d\theta \qquad 4.12$$

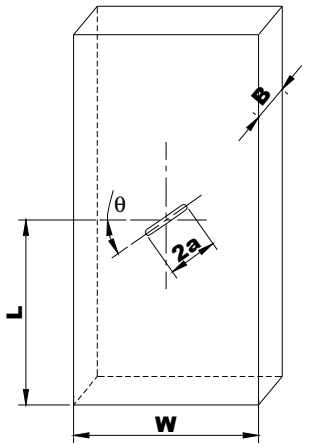
olup ikinci tür komple eliptik integraldir. σ normal gerilme, a ve c çatlak boyutlarıdır.

4.5. Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği

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

4.6. Gerilme Şiddet Faktörü (K)

Bu çalışmada, boyutları $W = 50$ mm, $L = 125$ mm ve $B = 1{,}2$ mm olan levhalar kullanılmıştır. Çekme deneylerinden elde edilen verilerle GŞF değişimi değerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.



Şekil 4.7 Çekme testi deney çubuğu ve ölçüleri

$$\psi = 2a/w \qquad\qquad 2a/w < 0{,}95$$

olmak şartıyla 0^o için K değeri aşağıda verilmiştir.

$$K = \left(\frac{P}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\psi}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\psi}{2}\right)}\right) \qquad 4.13$$

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).

$$K_I = \left(Cos^2\theta\right)\left(\frac{P}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\psi}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\psi}{2}\right)}\right) \qquad 4.14$$

$$K_{II} = \left(\frac{Sin\,2\theta}{2}\right)\left(\frac{P}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\psi}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\psi}{2}\right)}\right) \qquad 4.15$$

Burada θ çatlağın yatay eksenle yaptığı açıyı ifade etmektedir.

Bunun yanı sıra Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu kullanılarak K_I ve K_{II} değerleri aşağıdaki formüllerle de hesaplanabilir.

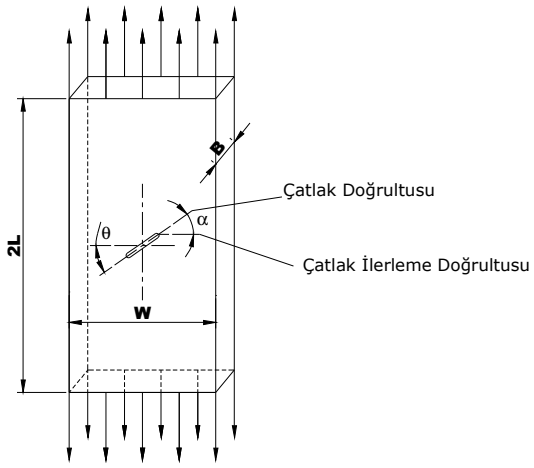
$$K_I = \left(Cos^2\theta\right)\sigma\sqrt{\pi\, a\, F_1} \qquad 4.16$$

$$K_{II} = \left(\frac{Sin\,2\theta}{2}\right)\sigma\sqrt{\pi\, a\, F_1} \qquad 4.17$$

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

$$F_1 = \sqrt{Sec\left(\frac{\pi\, a}{W}\right)}\cdot\left[1 - 0{,}025\left(\frac{2a}{W}\right)^2 + 0{,}06\left(\frac{2a}{W}\right)^4\right] \qquad 4.18$$

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 şekil 4.8' de görülen kink olayı dikkate alınarak GŞF değişim değerleri hesaplanmıştır. **Kink**: çatlak ilerlemesinin çatlak doğrultusunda gelişmeyip, herhangi bir α açısı kadar başka bir doğrultuda çatlağın ilerlemesi olayıdır. Bu yön değiştirme çatlak doğrultusuna $\pm\alpha$ açısı kadar farklı yönlerde oluşabilir.



Şekil 4.8 Kink olayı ve kink açısı

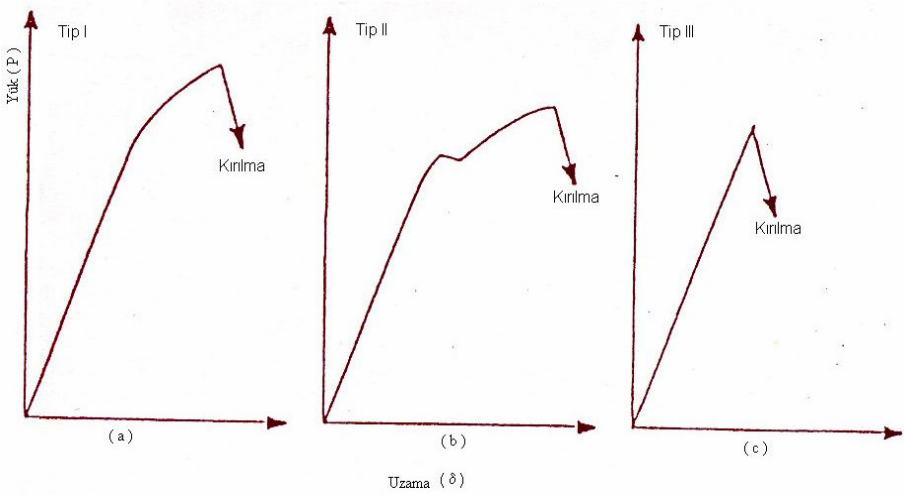
$$K_{I\,eş} = c_{11}K_I + c_{12}K_{II}$$
$$K_{II\,eş} = c_{21}K_I + c_{22}K_{II} \qquad 4.19$$

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;

$$K_{I\,eş} = Cos\,\alpha\,K_I + Sin\,\alpha\,K_{II}$$
$$K_{II\,eş} = Sin\alpha\,K_I + Cos\,\alpha\,K_{II} \qquad 4.20$$
$$K_{eş} = \sqrt{K_{I\,eş}^2 + K_{II\,eş}^2}$$

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 4.9' da verilmiştir.



Şekil 4.9 Çekme deneyinden elde edilebilecek üç ana tip diyagram

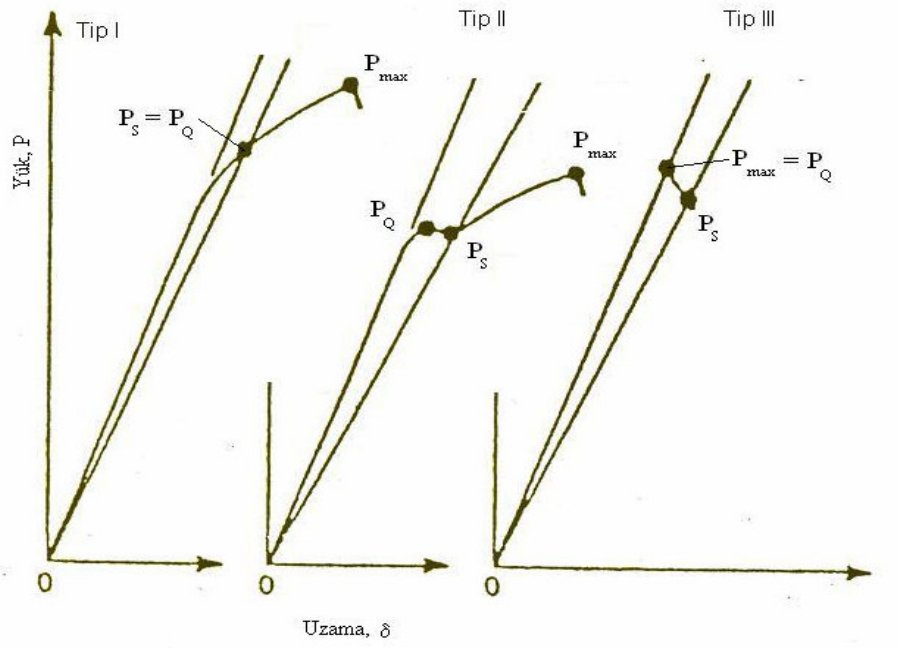
a) Plastik deformasyon sonucu kararlı çatlak ilerleyişini tanımlayan I. Tip
b) Kısa bir ani çatlak ilerleyişini ve sonrasında kararlı çatlak ilerleyişini tanımlayan II. Tip
c) Tümüyle elastik olarak davranan bir malzemenin kararsız çatlak ilerleyişini tanımlayan III. Tip

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 4.9c' deki gibi bir diyagram elde edilir.

K_{IC}' ye karşılık gelen yükü saptamak için Şekil 4.10' da 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 4.10 P_S ve P_Q değerlerinin yük-uzama diyagramları üzerinden saptanması

Buradaki hesaplamalarda $P_{\max} / P_Q < 1{,}1$ olduğunda deney geçerli sayılır. Eşitlik 4.14 ve eşitlik 4.15' de P_Q değeri yerine yazılarak K_{IC} ve K_{IIC} aşağıdaki gibi elde edilir.

$$K_{IC} = \left(Cos^2\theta\right)\left(\frac{P_Q}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\psi}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\psi}{2}\right)}\right) \qquad 4.21$$

$$K_{IIC} = \left(\frac{Sin\,2\theta}{2}\right)\left(\frac{P_Q}{B}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{\pi\psi}{2w}\right)\sec\left(\frac{\pi\psi}{2}\right)}\right) \qquad 4.22$$

Kritik eşdeğer GŞF için eşitlik 4.20 aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$K_{IC eş} = Cos\ \alpha\ K_{IC} + Sin\ \alpha\ K_{IIC}$$

$$K_{IIC eş} = Sin\alpha\ K_{IC} + Cos\ \alpha\ K_{IIC} \qquad 4.23$$

$$K_{C eş} = \sqrt{K_{IC eş}^2 + K_{IIC eş}^2}$$

4.7. Şekil Değiştirme Enerjisi Boşalma Miktarı (*G*)

Kırılma mekaniğinde, çatlak ucunda meydana gelen gerilme alanını tarif etmek için kullanılan, gerilme şiddet faktörü *K,* metaller ve seramikler gibi izotrop malzemeler için uygun bir parametredir. Yine kırılma mekaniğindeki yaklaşımlarda çatlak ilerlemesinin ilk başlangıcının tahmini için bir enerji kriteri olan şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı, *G* veya gerilme şiddet faktörü *K'* nın bilinmesi gereklidir. Metaller ve seramikler gibi homojen malzemeler için her iki yaklaşımdan benzer sonuçlar elde edilse bile gerilme şiddet faktörü yaklaşımı yorulmalı çatlak ilerlemesi bulunan kompozitlerde sınırlı uygulamalarda kalmaktadır(Devranjsinh 1997).

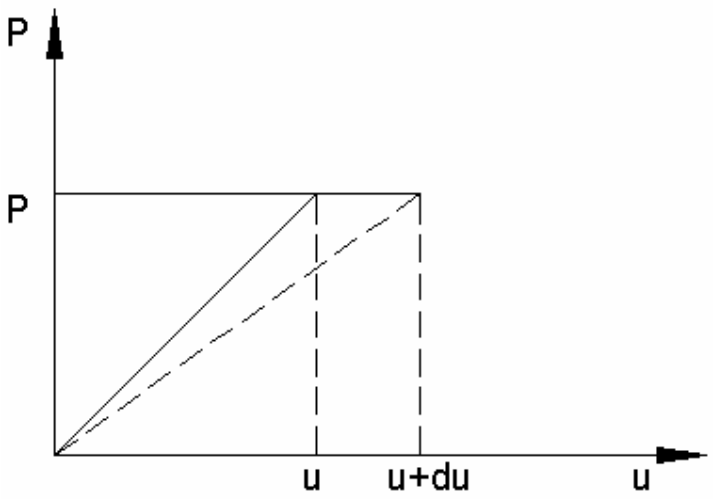
Enerji yaklaşımı ilk önce Griffith(1921) tarafından gevrek malzemeler için, birim çatlak boyu ilerlemesi yada birim çatlak alanı oluşturmak için gerekli olan enerji olarak tarif edilmiştir. Kararsız çatlak ilerlemesi için aşağıdaki şart sağlanmalıdır.

$$\frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} > \frac{dU'}{da} + \gamma \qquad 4.24$$

$$G > G_c \qquad 4.25$$

Eşitlik 4.19' un sol tarafı; cisme dışarıdan uygulanan W işi ile elastik şekil değiştirme enerjisi U 'nun farkının, eşitliğin sağ tarafındaki, kalıcı şekil değişimi U' ile yeni çatlak yüzeyi oluşturmak için gerekli enerji γ 'nın toplamından büyük olmalıdır. Eşitlik 4.21' de ki şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı G, gerilme şartlarına ve çatlak geometrisine bağlıdır. G_c ise G 'nin kritik değeri olup bir malzeme özelliğidir. Bu durumda G, kritik G_c değerini aştığı zaman kararsız çatlak

ilerlemesi başlayacaktır. G_c değeri lineer olmayan çatlak ilerlemesinde ve hasar bölgesi boyutlarının numune boyutlarına göre çok küçük olduğu durumlarda geçerli ve faydalı bir parametredir.



Şekil 4.11 Sabit yük altında deplasman artışı (*P-u*) grafiği

Başlangıç çatlak boyu a olan lineer elastik bir malzemede, uygulanan yük neticesinde çatlak boyunun $a + da$ olduğunu varsayalım. Bu durumda G ;

$$G = \frac{1}{B}\frac{dU}{da} \qquad 4.26$$

Burada; U :numune üzerinde depolanan toplam enerji ve B :numune genişliğidir. Sabit yük şartlarında, Şekil 4.11' de görülen üçgenlerin alanları farkına eşittir. Buradan;

$$\delta U = \frac{1}{2}(u+\delta u)P - \frac{1}{2}Pu = \frac{1}{2}P\delta u \qquad 4.27$$

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

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

elde edilir. Burada; *P*: uygulanan yük ve *u*: bu yük altındaki deplasmandır. Yine grafikte *P-u* eğrisinin eğiminin tersi yada *u/P*, *kompliyans* olarak tanımlanır ve *C* ile gösterilir.

$$C = \frac{u}{P} \tag{4.28}$$

Buradan, sabit yük yada sabit deplasman şartlarında Mod I ve Mod II için *G* 'nin değerleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$G_I = \frac{P_{dik}^2}{2B}\frac{dC}{da}$$

$$G_{II} = \frac{P_{yatay}^2}{2B}\frac{dC}{da} \tag{4.29}$$

Burada P_{dik} :uygulanan P yükünün çatlak doğrultusuna dik bileşeni, P_{yatay} : uygulanan P yükünün çatlak doğrultusundaki bileşenidir.

Toplam *G* değerleri de aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

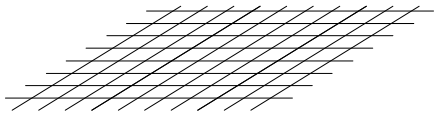
$$G = G_I + G_{II} \tag{4.30}$$

5. DENEYLER

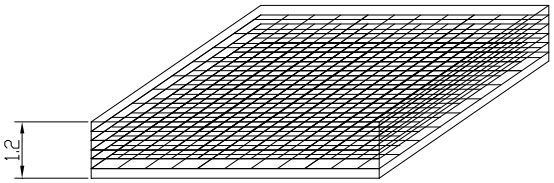
5.1. Deney Malzemesi

Deney malzemesi olarak İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler Sanayii ve Ticaret Limited Şirketinden temin edilen 1,20 mm kalınlığında, 5 tabakalı Epoksi/Cam Kumaş bazlı levhalar kullanıldı. Şekil 5.1' de levhalar da kullanılan E cam kumaş elyafı, şekil 5.2'de de kompozitin şematik resmi görülmektedir.

Levhaların üretiminde matris malzeme olarak özellikleri Tablo 5.1' de verilen Bisefonol A epoksi reçine, fiber olarak da iki yönlü $0^{\circ}/90^{\circ}$ E cam elyafı kumaş kullanılmıştır. Levhalar, sıcak presleme metodu kullanılarak, $2-4\ kg/cm^2$ basınç altında $120-130\ ^{\circ}C$' de 3 saat bekletilerek 500×1000 mm ebadında üretilmiştir.



Şekil 5.1 İki yönlü $0^{\circ}/90^{\circ}$ E cam elyaf kumaşın şematik resmi



Şekil 5.2 Beş tabakalı kompozit malzemenin şematik görünüşü

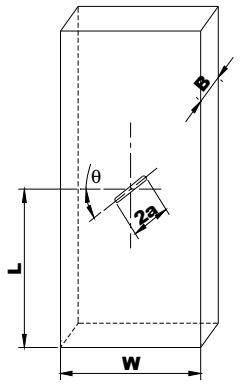
Tablo 5.1 Kompozit malzemeyi oluşturan matris ve fiberin özellikleri

Malzeme Özellikleri	Matris (Bisefonol A Epoksi)	Fiber (E cam kumaş)
Çekme Mukavemeti, (MPa)	50-60	2,4
Elastisite Modülü, (GPa)	3,4	72
Uzama, (%)	1,5-2	4,8
Yoğunluk, (gr/cm^3)	1,2	2,5

İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler Sanayii ve Ticaret Limited Şirketinden alınan 500×1000 mm ebadındaki Epoksi/Cam Kumaş bazlı levhalar yüksek devirde mermer kesme cihazında 50×250 mm boyutunda kesildi.

Deneylerde kullanılmak üzere ASTM E 647 standardına göre Şekil 5.3' de şematik resmi ve boyutları verilen numuneler hazırlandı. Şematik resimde görülen $W = 50$ mm, $L = 125$ mm ve $B = 1{,}2$ mm 'dir. Bu numunelerin merkezine $2a_0 = 5$, 7 ve 9 mm boyunda numune kalınlığı boyunca merkezi çatlaklar açıldı. Bu çatlaklar numunenin yatay ekseniyle 0^o, 15^o, 30^o, 45^o, 60^o ve 75^o açılar yapacak şekilde açılmıştır.

Çatlakları açmadan önce numune üzerine 2a boyunda çatlağın yeri asetat kalemi ile iki taraflı işaretlendi. Sonra mikro motor ve dişçi separesi kullanılarak işaretli bölge numunenin kalınlığı boyunca iki taraftan kesilerek boydan boya çatlak açıldı. Hassas kesim için üzerinde açı ve boy skalası bulunan el mikroskobu kullanıldı.



Şekil 5.3 Çekme testi deney çubuğu ve ölçüleri

5.2 Yakma Deneyi

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

24x28x1,2 mm boyutlarında kompozit malzemeden hazırlanan numune hassas terazide tartıldıktan sonra, 600^{o}C elektrik ısıtmalı fırında epoksi reçine tamamen buharlaşıncaya kadar yakıldı. Geriye kalan E cam kumaş yeniden tartılarak epoksi ve cam kumaşın ağırlıkları bulundu. Cam kumaşın yoğunluğu $\rho_f = 2.5\ g/cm^3$ ve kompozit malzemenin yoğunluğu da $\rho_c = 1.8\ g/cm^3$ olduğu bilindiğinden, kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı aşağıdaki bağıntıdan bulundu.

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

Burada W_f ve W_c sırasıyla fiber ve kompozitin ağırlıklarıdır. ρ_f ve ρ_c ise sırasıyla fiber ve kompozitin yoğunluklarıdır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yakma deneyi sonucunda kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı $V_f = 0.5$ olarak bulunmuştur. Ayrıca elyafın ağırlıkça oranı $V_{fağ} = W_f / W_c$ den 0.69 bulunmuştur.

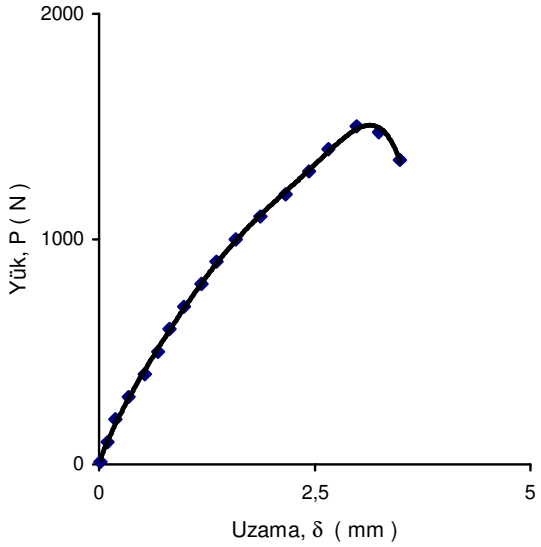
5.3 Çekme Deneyi

Şekil 5.3' de görülen numuneler hazırlanarak TÜMOSAN Traktör Fabrikası malzeme laboratuarında bulunan Schenck Trebel marka Üniversal Çekme ve Basma Test Cihazında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında ve 0,25 mm/dk ilerleme hızında yapılmıştır.

Çekme test cihazı maksimum 4 kN' luk yüke ayarlandı. Kompozit malzemeden hazırlanan çatlaksız numune çekme test cihazında 0,25 mm/dk ilerleme hızında çekmeye maruz bırakıldı. Yük altında uzama miktarı grafik olarak ve ölçü skalasından takip edildi. Numune 3,5 mm uzama gösterdikten sonra 1,5 kN yük değerinde kopma gerçekleşti.

Kompozit malzemeye ait yük-uzama miktarı $(P-\delta)$ grafiği Şekil 5.4 'te verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi $P-\delta$ eğrisi başlangıçtan itibaren doğrusala

yakın artış göstermiş, 1,5 kN yük değerinden sonra kopmanın başlaması ile yükte küçük bir düşüş meydana gelmiş ve kopma gerçekleşmiştir. Maksimum yükten sonra çatlak ağzındaki kumaş liflerin kopmaya başlaması ve devamında sıradaki liflerin yükü taşıyamamasından gevrek davranış ile kopma gerçekleşmiştir.



Şekil 5.4 Kompozit malzemeye ait yük-uzama $(P-\delta)$ miktarı grafiği

Başka numuneler üzerine yatay ve dikey konumda iki adet strain-gage yapıştırılmıştır. Buradan da malzemenin elastisite modülü(E) ve poisson oranı (ν) bulunmuştur. Her bir grup deney için 2 adet test yapıldı ve elde edilen sonuçların ortalaması alındı. Elde edilen kompozit malzemeye ait mekanik özellikleri gösteren değerler Tablo 5.2 'de verilmiştir.

Hazırlanan numuneye uygulanan gerilmenin her noktada eşit olması gerekir. Buda numune boyutlarına bağlıdır ve numune boyutlarının önemini daha da artırmaktadır. Bu sebepledir ki, ortasına çatlak açılmış numuneler hazırlanırken ve çekme cihazına bağlanırken eksen ve boyutlar dikkatli bir şekilde kontrol edilmiştir.

Tablo 5.2 Deney malzemesinin mekanik özellikleri

Özellikler	Bulunan değerler
x yönündeki Elastisite Modülü (E_1)	28 GPa
y yönündeki Elastisite Modülü (E_2)	22 GPa
x yönündeki Kopma Gerilmesi (σ_{1K})	280 MPa
y yönündeki Kopma Gerilmesi (σ_{2K})	180 MPa
x-y yönündeki Kayma Modülü (G_{12})	12 GPa
x-y yönündeki Poisson Oranı ($\nu_{12} = \nu_{21}$)	0,16

Çekme deneyi esnasında numunelerdeki uzama miktarları 0,60-0,85 mm arasında kaldığından numunelerdeki uzama miktarlarının tespit edilemeyeceğine karar verildi. Şeffaf olan cam kumaş epoksi plakalara ters taraftan verilen parlak bir ışık yardımıyla çatlak ucu hasar bölgesi net olarak görülmüştür. Numuneler çekme işlemine tabi tutulurken Olimpus 8.2 mega piksel dijital fotoğraf makinesi ile film çekimi yapıldı. Film çekimi esnasında yük değerleri tespit edildi. Bilgisayar ortamına aktarılan filmlerden çatlak ağzı açılma miktarları ve çatlak ilerleme miktarları yeniden ölçüldü.

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. Çekme Deneyleri

Gerilme şiddet faktörü(GŞF) değerlerinin(K_I ve K_{II}) hesaplanmasında ilk olarak eşitlik 4.14 ve eşitlik 4.15' de verilen formüller kullanılmıştır. Bunun yanı sıra başlangıç çatlak boylarının farklı olması da dikkate alınarak başlangıç çatlak derinliği metodu kullanılarak GŞF değerleri K_I ve K_{II} eşitlik 4.16 ve eşitlik 4.17 kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda bulunan GŞF değerleri K_I ve K_{II}' nin bir malzeme sabiti olarak kullanılabilmesi için eşdeğer bir K bulunması gereklidir. Çatlak ilerlemesi sırasında kink olayı meydana geldiğinden ve Sole fonksiyonları da kink açısının fonksiyonları olduğundan eşitlik 4.20 ile verilen formüller kullanılarak eşdeğer GŞF değerleri $K_{Ieş}$, $K_{IIeş}$ ve $K_{eş}$ hesaplanmıştır. Elde edilen değerler tüm çatlak açıları için EK 1' de verilmiştir.

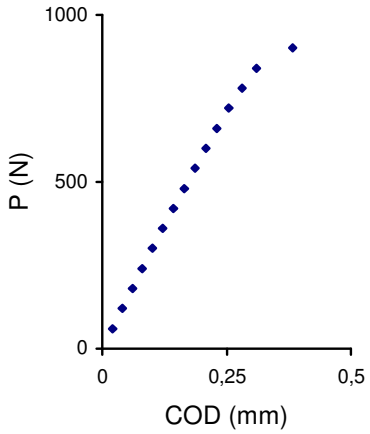
Kritik GŞF değerlerinin(K_{IC} ve K_{IIC}) hesaplanabilmesi için çatlaksız numunelerle yapılan deney sonucu elde edilen P-δ grafiği Tip I' e bezediğinden $P_Q = P_S = 1200\,N$ olarak tespit edilmiştir. Elde edilen P_Q değeri kullanılarak kritik GŞF değerleri K_{IC} ve K_{IIC} eşitlik 4.21 ve eşitlik 4.22, kritik eşdeğer GŞF değerleri $K_{ICeş}$, $K_{IICeş}$ ve $K_{Ceş}$ de eşitlik 4.23 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerler tüm çatlak açıları için EK 2' de verilmiştir.

Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının hesaplanması için kompliyans yöntemi kullanılmıştır. Her çatlak açısı için C-Δa grafikleri çizilmiştir. Çizilen grafikler üzerinden eğrilerin ikinci derece denklemleri elde edilmiştir. Bundan sonra şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının(G_I, G_{II} ve G) hesaplanması için eşitlik 4.29 ve eşitlik 4.30 kullanılmıştır. Elde edilen değerler tüm çatlak açıları için EK 1' de verilmiştir.

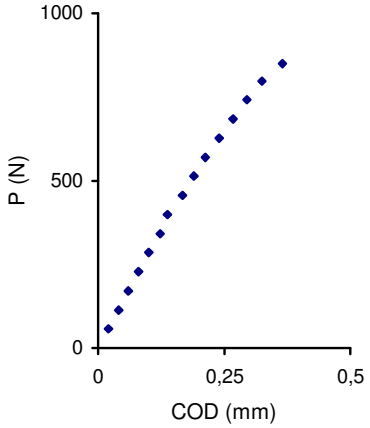
6.2. 0^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları

Ortasında 0^o açılı çatlak bulunan kompozit numuneler bir önceki bölümde anlatılan şartlarda çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler esnasında numunelerde uzama miktarı tespit edilemeyecek kadar küçük olduğundan uzama miktarları tespit edilemedi. Cam kumaş epoksi plakalara ters taraftan verilen parlak bir ışık yardımıyla çatlak ucu hasar bölgesi net olarak görüldüğünden çekme deneyi yapılırken her 5 saniyede çatlak bölgesinin filmi çekildi. Bilgisayar ortamına aktarılan filmlerden çatlak ağzı açılma miktarları, çatlak ilerleme miktarları yeniden hesaplandı. Elde edilen bu değerler EK 1' de verildi.

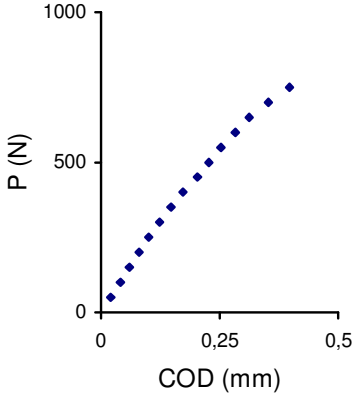
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri şekil 6.1' de verilmiştir. Şekil 6.1a' da $2a = 5$ mm, şekil 6.1b' de $2a = 7$ mm ve şekil 6.1c' de $2a = 9$ mm olan numunelerin P-COD grafikleri görülmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi COD miktarının, uygulanan eksenel yükle hemen hemen lineer değiştiği söylenebilir. Üç grafikte de kopmanın gerçekleştiği yüke kadar kararlı bir şekilde COD miktarlarının arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 900 N yükte 0,382 mm, $2a = 7$ mm için 850 N yükte 0,365 mm ve $2a = 9$ mm için 750 N yükte 0,3975 mm COD değeri gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükü azalırken COD miktarlarının birbirine yakın değerlerde çıktığı görülmektedir ki buda gevrek kırılmanın bir sonucudur.



Şekil 6.1a $\theta = 0^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

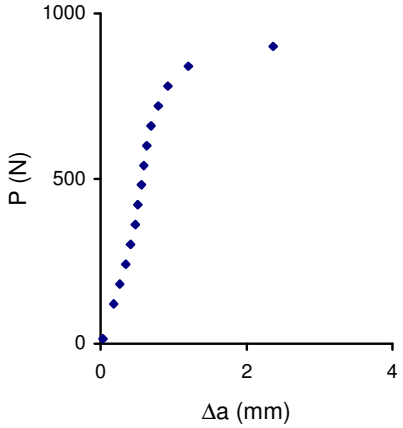


Şekil 6.1b $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

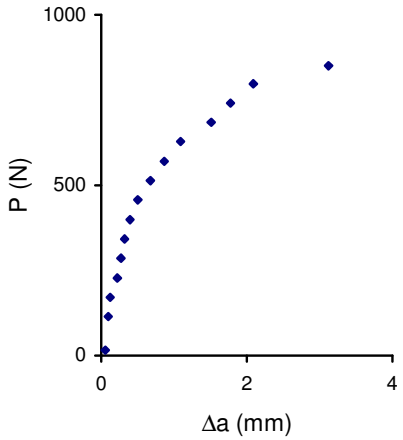


Şekil 6.1c $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

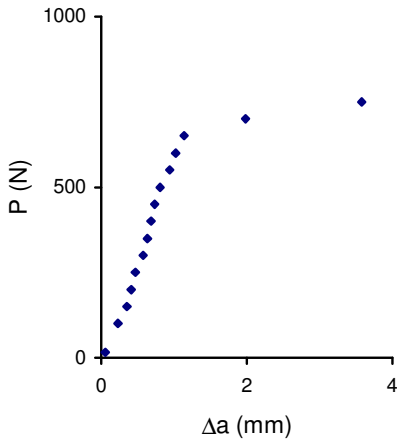
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafikleri şekil 6.2' de verilmiştir. Üç grafikte de başlangıçtan itibaren çatlak ilerlemesi kararlı bir şekilde devam ederken kopmanın gerçekleştiği yüke yakın değerlerde çatlak ilerlemesinin hızlandığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 900 N yükte 2,37 mm, $2a = 7$ mm için 850 N yükte 3,12 mm ve $2a = 9$ mm için 750 N yükte 3,58 mm çatlak ilerlemesi gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükü azalırken çatlak ilerleme miktarlarında artış görülmektedir.



Şekil 6.2a $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

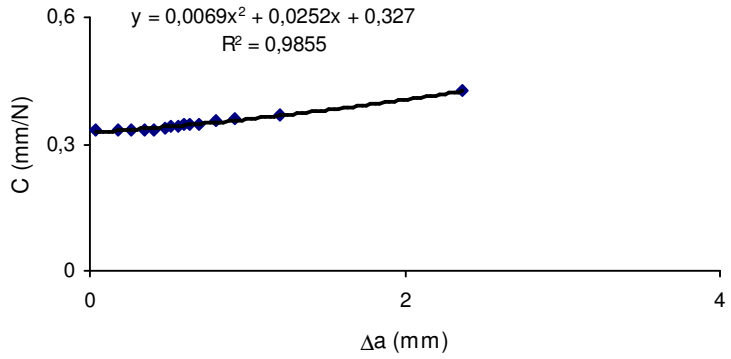


Şekil 6.2b $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

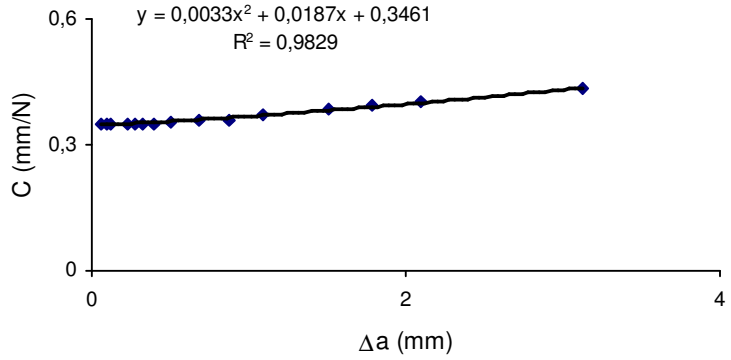


Şekil 6.2c $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

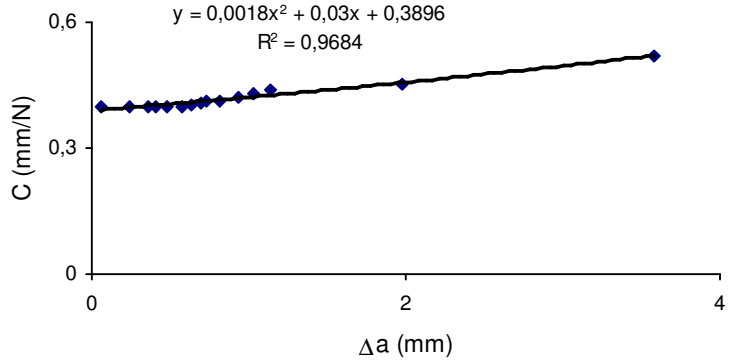
Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının (G) bulunabilmesi için öncelikle şekil 6.3' te görülen C-Δa grafikleri çizilerek eğrinin ikinci derece denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 6.3a $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

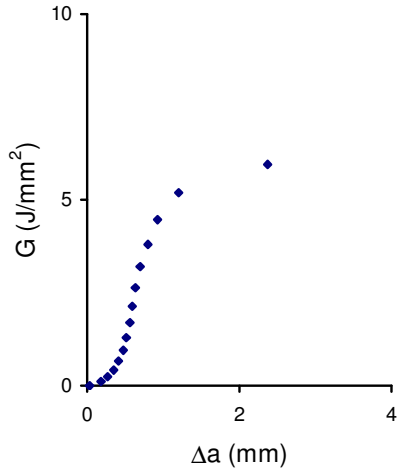


Şekil 6.3b $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

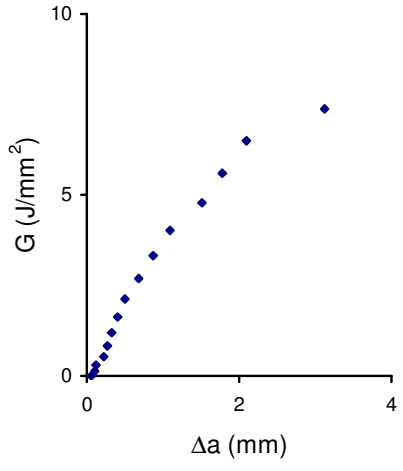


Şekil 6.3c $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

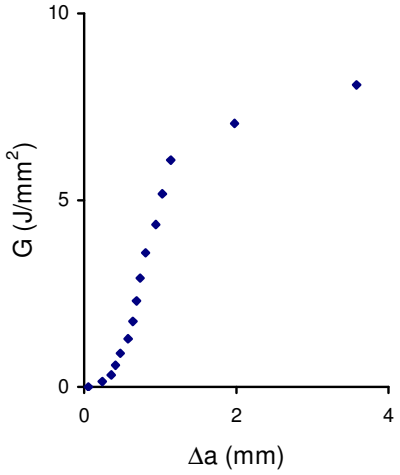
Kompliyans metodu ile hesaplanan *G* değerleriyle, çatlak ilerleme miktarları arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şekil 6.4' te verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi başlangıçta G artarken çatlak ilerlemeleri oldukça düşük düzeylerde seyir etmiş kopma noktasına yaklaşıldığında yüksek çatlak ilerlemeleri görülmüştür. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça hem çatlak ilerlemesinde hem de şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında artış gözlenmiştir. Numunelerde kırılma anındaki şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı, $2a = 5$ mm için 5,96 J/mm^2 , $2a = 7$ mm için 7,37 J/mm^2 ve $2a = 9$ mm için 8,09 J/mm^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.4a $\theta = 0^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin *G*-Δa değişimi

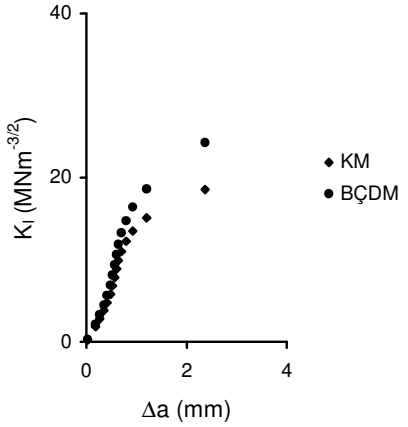


Şekil 6.4b $\theta = 0^o$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin *G*-Δa değişimi

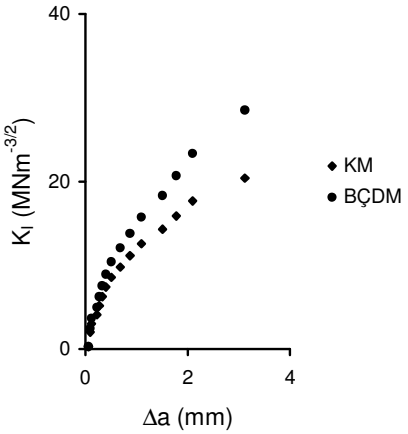


Şekil 6.4c $\theta = 0^o$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin *G*-Δa değişimi

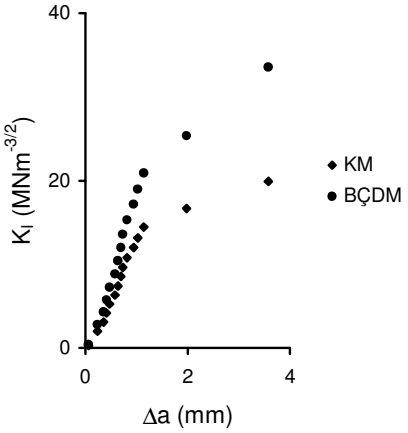
Şekil 6.5' de 0^o açılı çatlaklı numunelerin çatlak ilerleme miktarı ile K_I arasındaki değişimin grafiği gösterilmiştir. 0^o açılı çatlaklı numunede sadece ayrılma modunda (Mod I) hasar oluştuğundan K_I değerleri bulunmuş ve değerlendirmeler buna göre yapılmıştır. K_I değerleri kompliyasn metot (KM) ve başlangıç çatlak derinliği metodu (BÇDM) ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. Şekil 6.5 incelendiğinde K_I artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın değerlerde ise aniden artığı görülmektedir. Numunelerde kırılma anındaki K_I değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 18,55 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 24,23 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 20,43 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 28,54 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 19,91 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 33,56 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.5a $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

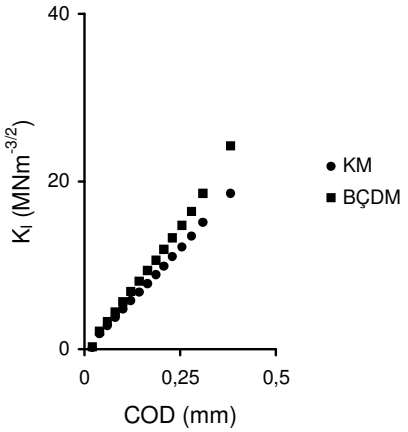


Şekil 6.5b $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

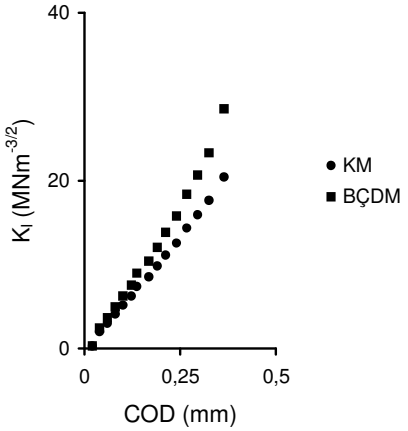


Şekil 6.5c $\theta = 0^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

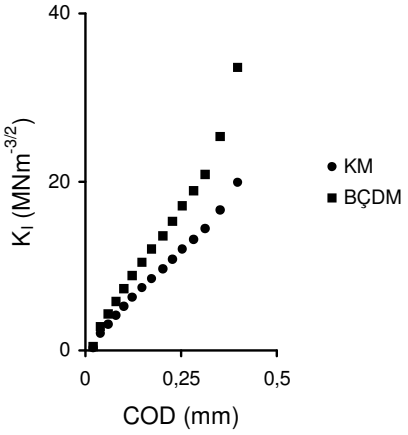
Hesaplanan K_I değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.6' da gösterilmiştir. Şekil 6.6 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça K_I değerlerinde ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.6a $\theta = 0^o$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi



Şekil 6.6b $\theta = 0^o$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi



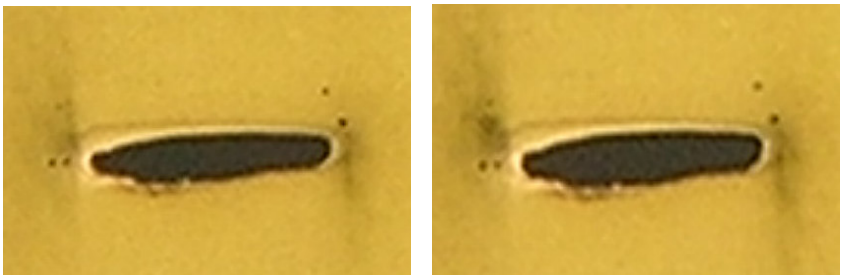
Şekil 6.6c $\theta = 0^o$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I-COD değişimi

6.2.1. 0^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

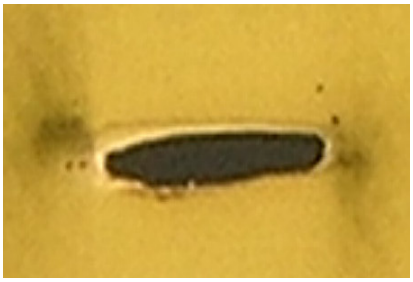
0^o de çatlağa uygulanan yük dik olduğundan çatlak ilerlemesi hızlı ve hasar düşük yüklerde meydana gelmiştir. Hasar mekanizması incelenecek olursa, deneyin başlamasıyla beraber ilk yüklemede çatlak ağızlarında beyazlaşma oluşmaya başlamıştır(Şekil 6.7a). İlerleyen yüklerde beyaz bölgede artış gözlenmiş ve bu arada fiber-matris ara yüzey ayrılması meydana gelmiştir (şekil 6.7b ve şekil 6.7c). bu olay kopma olayı meydana gelene kadar 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. Herhangi bir yöne doğru çatlak yönlenerek ilerlememiştir.

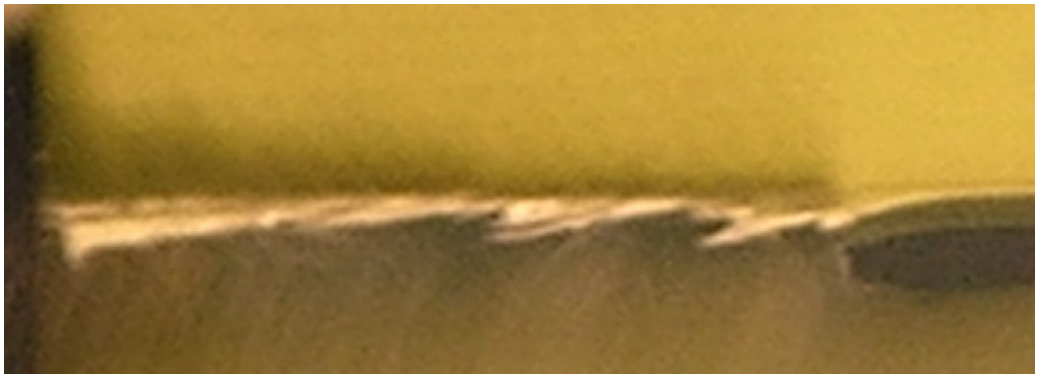
Fiber kopması şekil 6.7d'de görüldüğü gibi fiber-matris ara yüzey ayrılması ile meydana gelmiştir. Epoksi, kompozit malzeme üretimi sırasında sıcak presleme metodu kullanıldığından cam kumaşa iyice nüfuz etmiştir.



(a) (b)



(c)



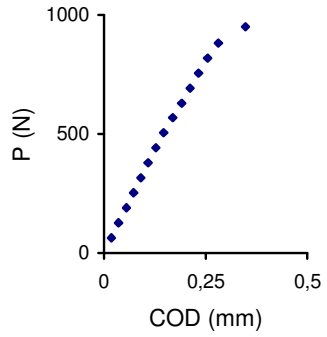
(d)

Şekil 6.7 Numune çatlak ucunda meydana gelen hasarlanma ve kopma

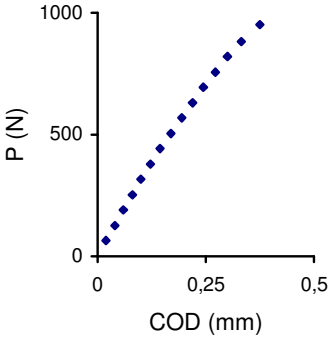
Çatlak ilerlemesi yükün artışıyla birlikte $2a = 5$ mm için Δa=1,20 mm, $2a = 7$ mm için Δa=2,09 mm ve $2a = 9$ mm için Δa=1,98 mm seviyesine kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerlerden sonra çatlak ilerlemesi hızla artarak ortalama $2a = 5$ mm için 900 N yükte 2,37 mm, $2a = 7$ mm için 850 N yükte 3,12 mm ve $2a = 9$ mm için 750 N yükte 3,58 mm' de aniden kopmuştur.

6.3. 15^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları

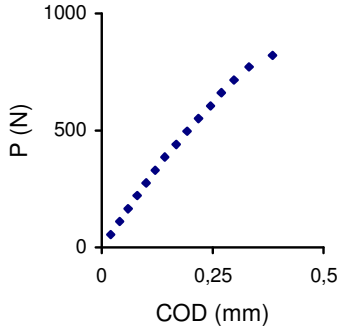
Ortasında 15^o açılı çatlak bulunan kompozit numuneler bir önceki bölümde anlatılan şartlarda çekme deneyine tabi tutulmuştur. Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri şekil 6.8' de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi COD miktarının, uygulanan eksenel yükle hemen hemen lineer değiştiği söylenebilir. Üç grafikte de kopmanın gerçekleştiği yüke kadar kararlı bir şekilde COD miktarlarının arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 950 N yükte 0,347 mm, $2a = 7$ mm için 950 N yükte 0,375 mm ve $2a = 9$ mm için 820 N yükte 0,385 mm COD değeri gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükü azalırken COD miktarlarında artış görülmektedir. 0^o açılı numunelerle kıyaslandığında kırılma anındaki yükte artış gözlenirken, COD değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 6.8a $\theta = 15^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

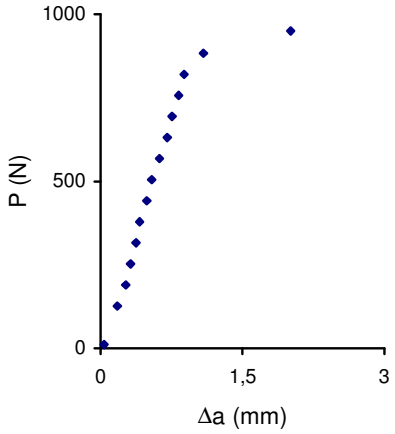


Şekil 6.8b $\theta = 15^o$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

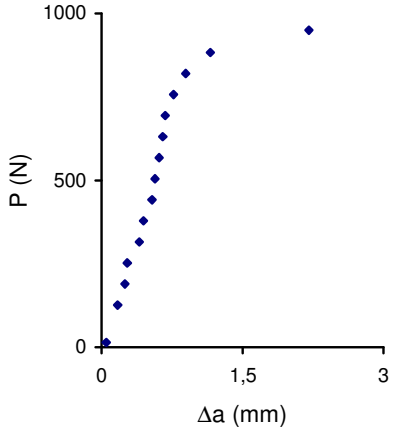


Şekil 6.8c $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

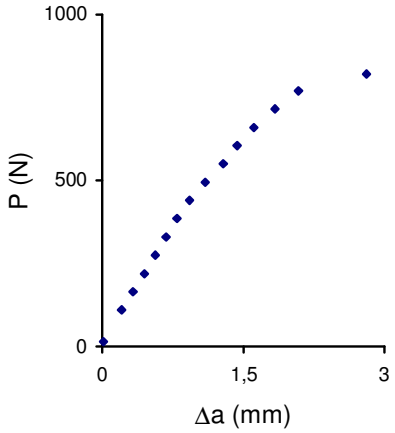
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ilerleme miktarı grafikleri şekil 6.9' da verilmiştir. Üç grafikte de başlangıçtan itibaren çatlak ilerlemesi kararlı bir şekilde devam ederken kopmanın gerçekleştiği yüke yakın değerlerde çatlak ilerlemesinin arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 950 N yükte 2,01 mm, $2a = 7$ mm için 950 N yükte 2,205 mm ve $2a_0 = 9$ mm için 820 N yükte 2,805 mm çatlak ilerlemesi gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükü azalırken çatlak ilerleme miktarlarında artış görülmektedir. 0^{o} açılı numunelerle kıyaslandığında çatlak ilerlemesinde ortalama %20 oranın da bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalma çatlağın yatayla yaptığı açı sonucu yükün çatlağa dik olarak etkimemesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.9a $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

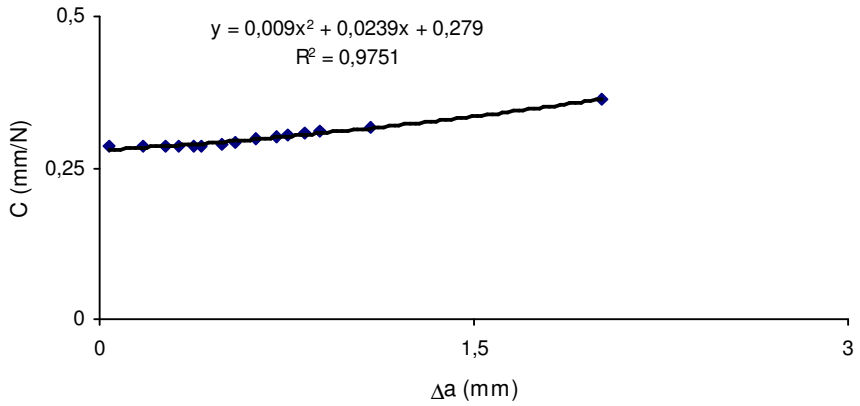


Şekil 6.9b $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

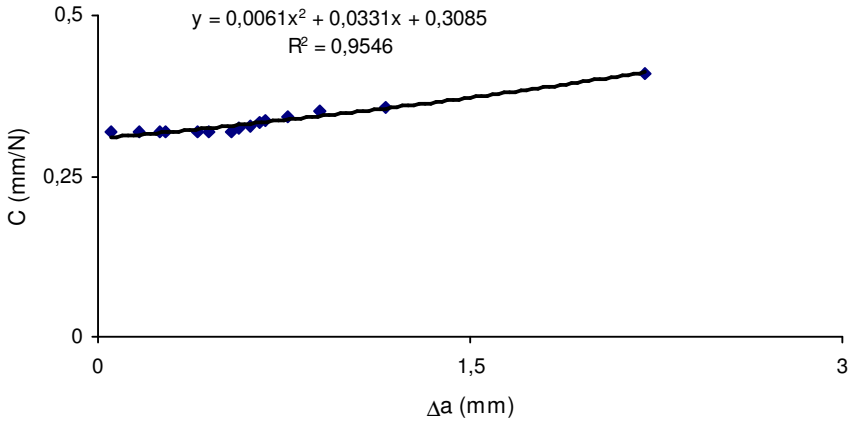


Şekil 6.9c $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

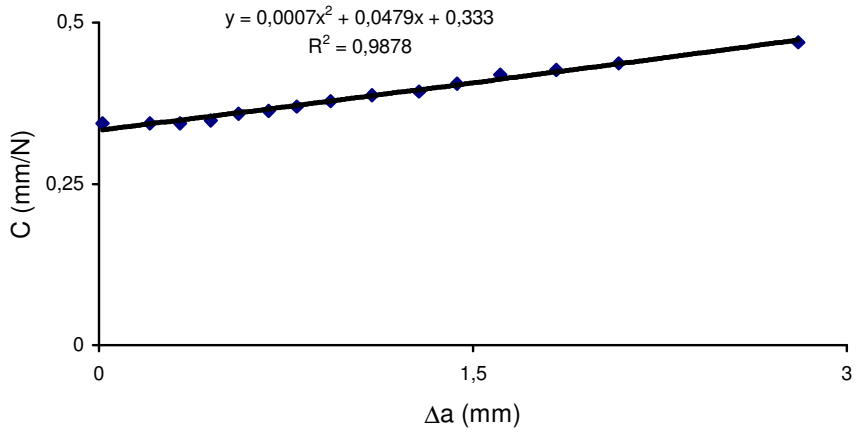
Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının (G) bulunabilmesi için öncelikle şekil 6.10' da görülen C-Δa grafikleri çizilerek eğrinin ikinci derece denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 6.10a $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

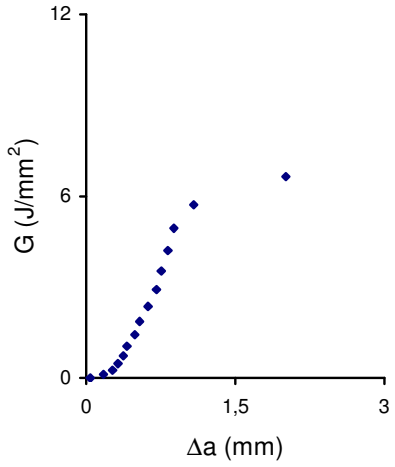


Şekil 6.10b $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

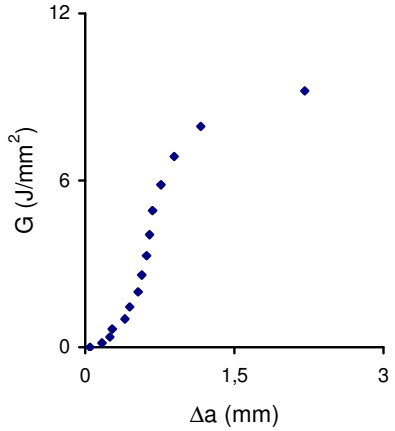


Şekil 6.10c $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

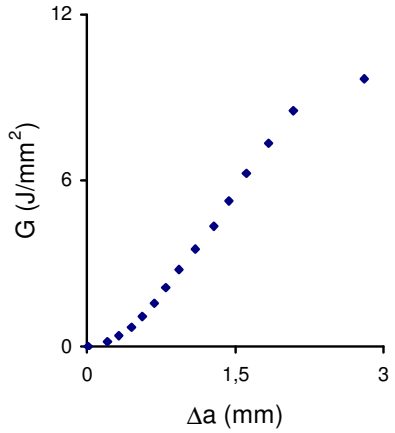
Kompliyans metodu ile hesaplanan G değerleriyle, çatlak ilerleme miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şekil 6.11' de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi başlangıçta G artarken çatlak ilerlemeleri oldukça düşük düzeylerde seyir ederken kopma noktasına yaklaşıldığında yüksek çatlak ilerlemeleri görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça hem çatlak ilerlemesinde hem de şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında artış gözlenmiştir. Kırılma anında numunelerde G değerleri $2a = 5$ mm için 950 N yükte 6,64 J/mm^2, $2a = 7$ mm için 950 N yükte 9,21 J/mm^2 ve $2a_0 = 9$ mm için 820 N yükte 9,67 J/mm^2 olarak hesaplanmıştır. 0^o açılı numunelerle kıyaslandığında şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında ortalama %18 oranın da bir artma tespit edilmiştir. Buda çatlağın ilerlemesinin daha çok enerji gerektirdiğinin göstergesidir. Kırılma anındaki yük artışlarının da arttığı göz önüne alındığında bu beklenen bir sonuçtur.



Şekil 6.11a $\theta = 15^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin G-Δa değişimi



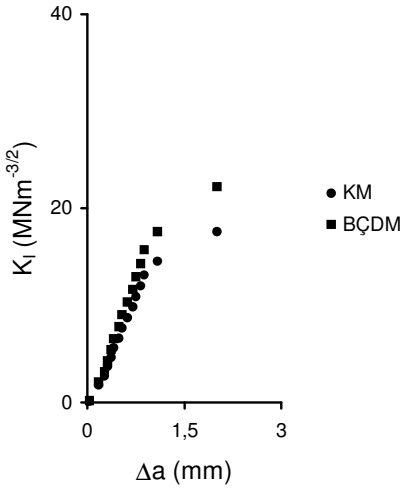
Şekil 6.11b $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin G-Δa değişimi



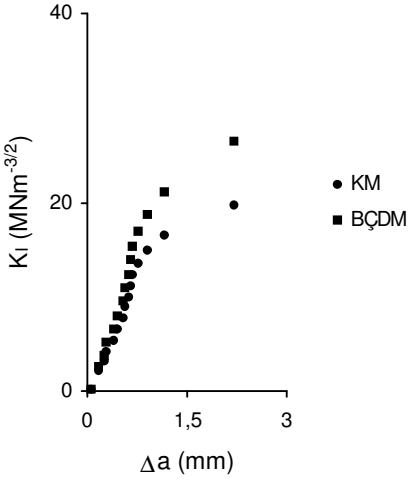
Şekil 6.11c $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin G-Δa değişimi

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 bileşik mod meydana getirmiştir. Dolayısıyla çatlak ucunda gerilme şiddet faktörü K_I ve K_{II} oluşmaktadır. Hesaplamalarda kompliyasn metot (KM) ve başlangıç çatlak derinliği metodu (BÇDM) kullanılmıştır. Hesaplanan K_I, K_{II}, $K_{I\,eş}$, $K_{II\,eş}$ ve $K_{eş}$ değerleri Ek 1' de verilmiştir. Şekil 6.12' de 15^{o} açılı çatlaklı numunelerin K_I değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği

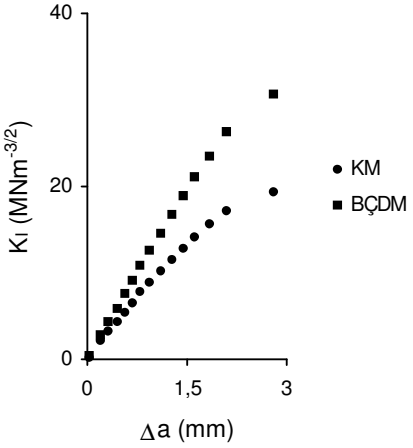
gösterilmiştir. Şekil 6.12 incelendiğinde K_I artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Ayrıca BÇDM ile hesaplanan K_I değerleri KM ile hesaplananlardan yüksek çıkmıştır. Kullanılan iki metot arasında ki fark $2a = 5$ mm için ortalama %20, $2a = 7$ mm için ortalama %25, $2a = 9$ mm için ortalama %35 oranlarında gerçekleşmiştir. İki metot arasındaki fark K_{II} değerleri içinde aynı oranlarda gerçekleşmiştir. Numunelerde kırılma anındaki K_I değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 17,58 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 22,22 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 19,78 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 26,54 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 19,31 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 30,73 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.12a $\theta = 15^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

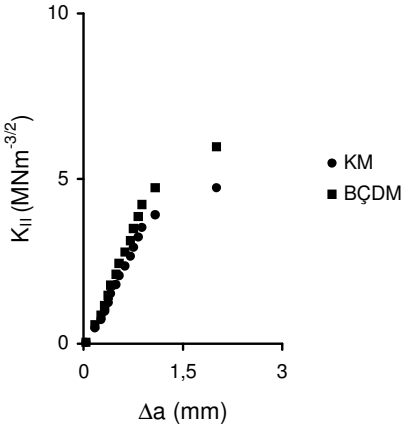


Şekil 6.12b $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

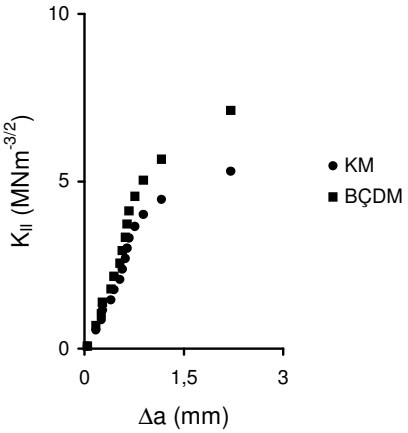


Şekil 6.12c $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

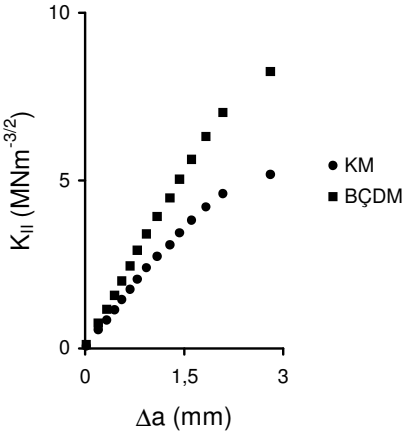
Şekil 6.13' de 15^{o} açılı çatlaklı numunelerin K_{II} değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 6.13 incelendiğinde K_{II} artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Numunelerde kırılma anındaki K_{II} değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 4,71 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 5,95 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 5,30 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 7,11 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 5,17 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 8,23 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.13a $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

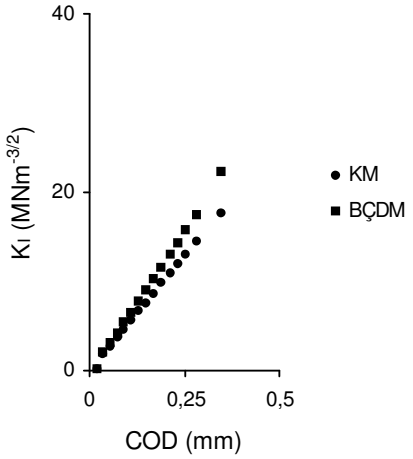


Şekil 6.13b $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

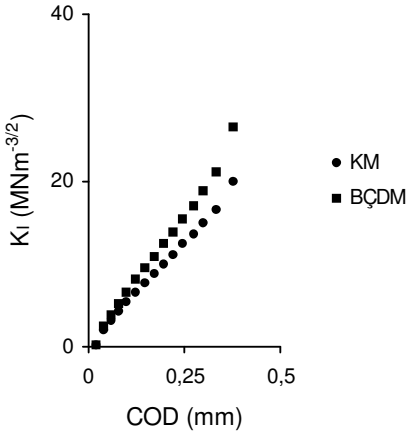


Şekil 6.13c $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

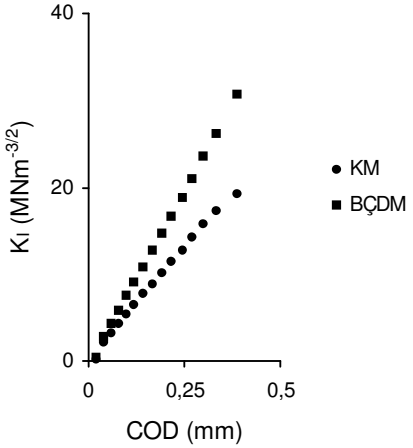
Hesaplanan K_I değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.14' de gösterilmiştir. Şekil 6.14 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça K_I değerlerinde ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.14a $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I-COD değişimi

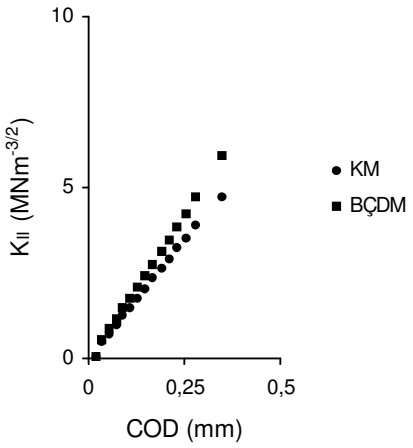


Şekil 6.14b $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I-COD değişimi

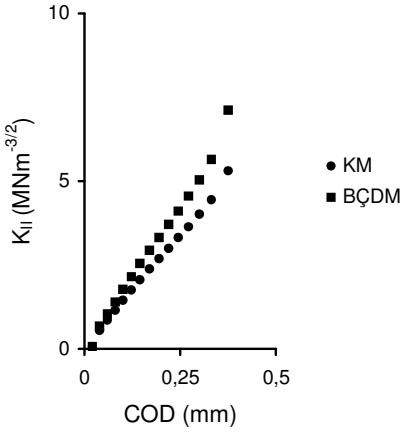


Şekil 6.14c $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi

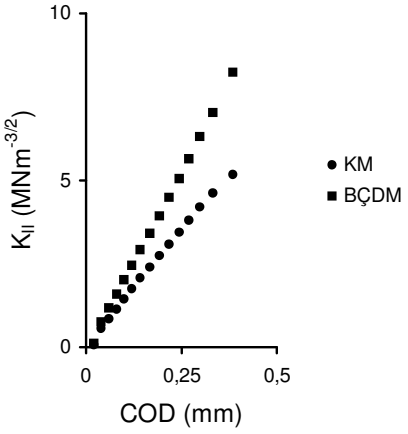
Hesaplanan K_{II} değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.15' de gösterilmiştir. Şekil 6.15 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça K_{II} değerleri ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.15a $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi



Şekil 6.15b $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi



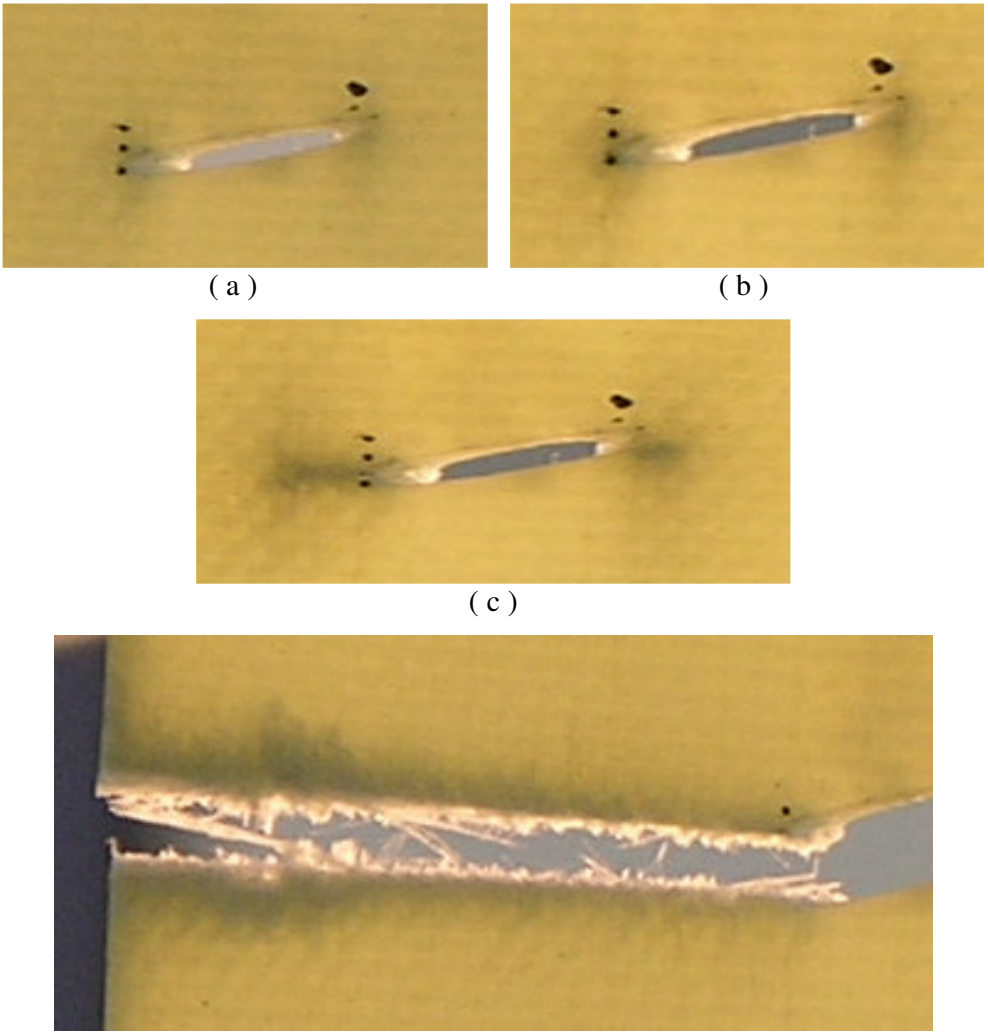
Şekil 6.15c $\theta = 15^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi

6.3.1. 15^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

15^{o} de uygulanan yük çatlağa dik olmadığından hem ayrılma modu (mod I), hem de kayma modunda (mod II) hasar meydana gelmektedir. Eğimden dolayı yükün etki ettiği kesit alanda bir artış olacağından 0^{o} göz önüne alındığında kırılma yüklerinde artış olduğu, buna karşılık çatlak ilerleme miktarında düşüş olduğu gözlenmiştir. Hasar mekanizması incelenecek olursa, deneyin başlamasıyla beraber ilk yüklemede çatlak ağızlarında beyazlaşma oluşmaya başlamıştır(Şekil 6.16a). İlerleyen yüklerde beyaz bölgede artış gözlenmiş ve bu arada fiber-matris ara yüzey

ayrılması meydana gelmiştir (şekil 6.16b ve şekil 6.16c). Bu olay kopma olayı meydana gelene kadar devam etmiştir.

15^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -15^o açı yapacak şekilde kink yaparak yatayda ilerlemiştir. Bundan dolayı çatlağın bir ucundaki ilerleme düzlemi ile diğer ucu arasındaki düzlemler farklı olduğundan açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana getirmiştir. Bu sırada fiberde brinding yani saçaklanma olayının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.16d'de kink, fiber-matris ara yüzey ayrılması ve saçaklanma ile kırılma anı görülmektedir.



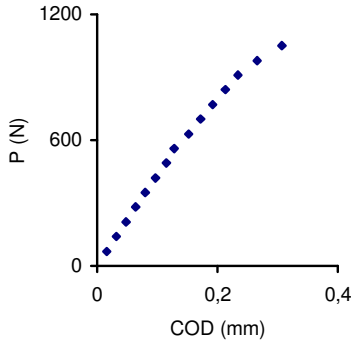
(a) (b) (c) (d)

Şekil 6.16 Numune çatlak ucunda meydana gelen hasarlanma ve kopma

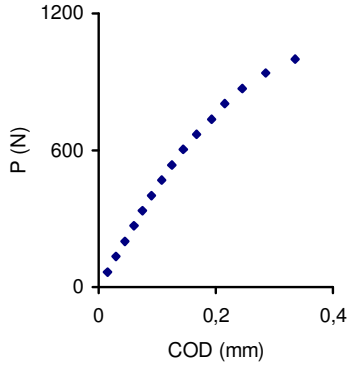
Çatlak ilerlemesi yükün artışıyla birlikte $2a = 5$ mm için Δa=1,08 mm, $2a = 7$ mm için Δa=1,16 mm ve $2a = 9$ mm için Δa=2,08 mm seviyesine kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerlerden sonra çatlak ilerlemesi hızla artarak ortalama $2a = 5$ mm için 950 N yükte 2,01mm, $2a = 7$ mm için 950 N yükte 2,20 mm ve $2a = 9$ mm için 820 N yükte 2,80 mm' de aniden kopmuştur.

6.4. 30^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları

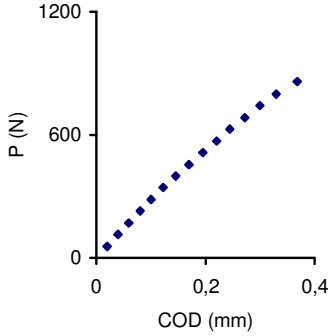
Ortasında 30^o açılı çatlak bulunan kompozit numuneler bir önceki bölümde anlatılan şartlarda çekme deneyine tabi tutulmuştur. Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri şekil 6.17' de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi COD miktarının, uygulanan eksenel yükle hemen hemen lineer değiştiği söylenebilir. Üç grafikte de kopmanın gerçekleştiği yüke kadar kararlı bir şekilde COD miktarlarının arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 1050 N yükte 0,3065 mm, $2a = 7$ mm için 1000 N yükte 0,335 mm ve $2a = 9$ mm için 860 N yükte 0,3675 mm COD değeri gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükü azalırken COD miktarlarında artış görülmektedir. 0^o ve 15^o açılı numunelerde COD değerleri birbirine yakın değerlerde olmasına karşın 30^o açılı numunelerde COD değerlerinde ortalama %8 oranında azalma tespit edilmiştir. Buda çatlağın yatayla yaptığı açının giderek artmasıyla birlikte eksenel kuvvetin çatlağa dik etkiyen bileşeninin giderek azalmaya başlamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.17a $\theta = 30^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

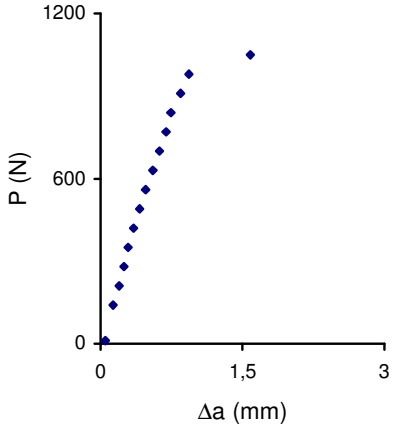


Şekil 6.17b $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

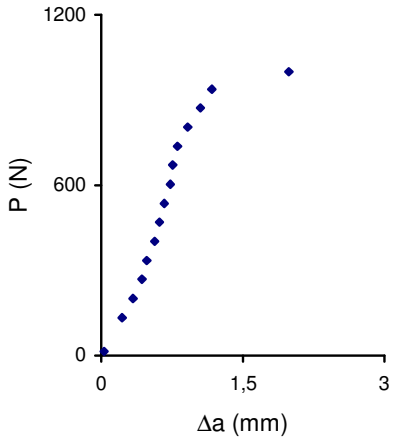


Şekil 6.17c $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

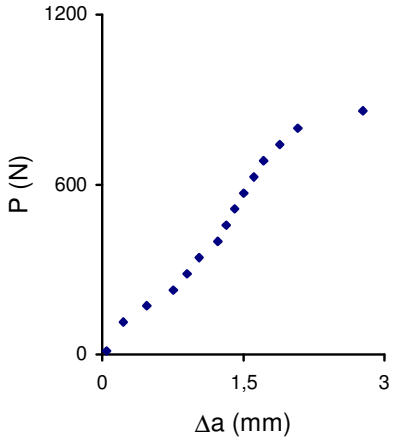
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ilerleme miktarı grafikleri şekil 6.18' de verilmiştir. Üç grafikte de başlangıçtan itibaren çatlak ilerlemesi kararlı bir şekilde devam ederken kopmanın gerçekleştiği yüke yakın değerlerde çatlak ilerlemesinin arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 1050 N yükte 1,58 mm, $2a = 7$ mm için 1000 N yükte 1,985 mm ve $2a = 9$ mm için 860 N yükte 2,77 mm çatlak ilerlemesi gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükü azalırken çatlak ilerleme miktarlarında artış görülmektedir. 15^{o} açılı numunelerle kıyaslandığında çatlak ilerlemesinde ortalama %8 oranın da bir azalma tespit edilmiştir. 0^{o} açılı numunelerle kıyaslandığında çatlak ilerlemesindeki azalmanın daha yüksek oranlarda olduğu görülmüştür.



Şekil 6.18a $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

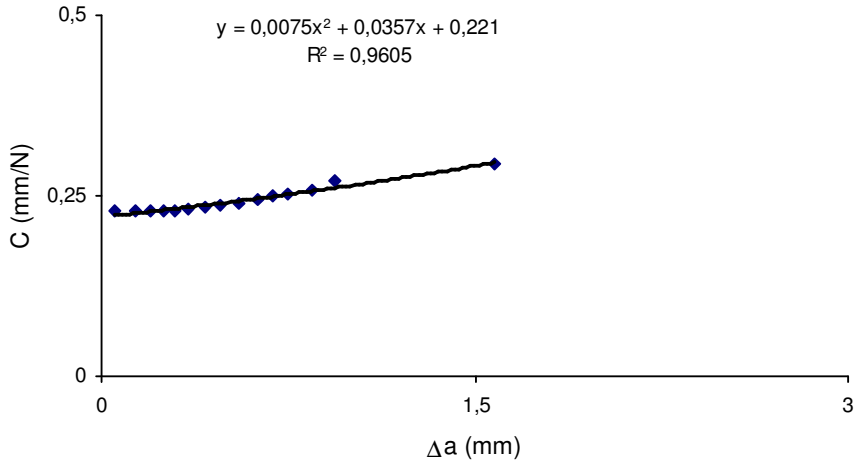


Şekil 6.18b $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

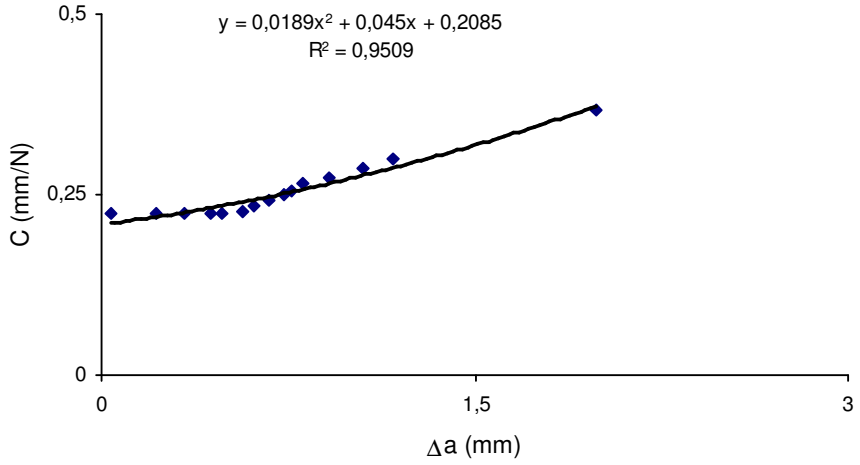


Şekil 6.18c $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

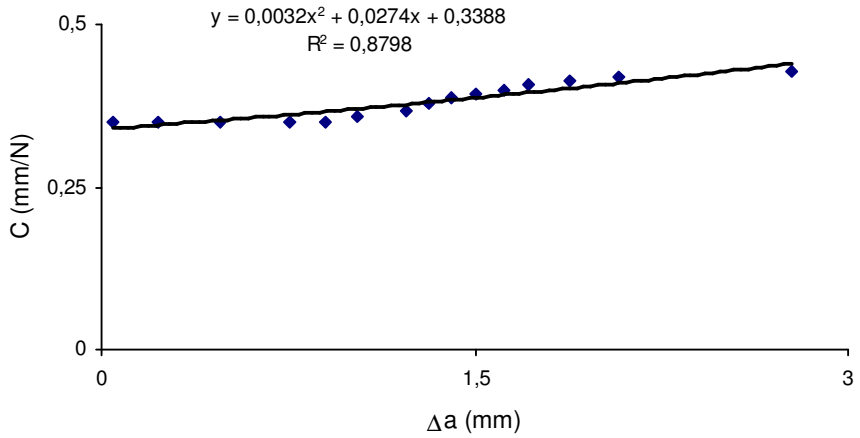
Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının (G) bulunabilmesi için öncelikle şekil 6.19' da görülen C-Δa grafikleri çizilerek eğrinin ikinci derece denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 6.19a $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

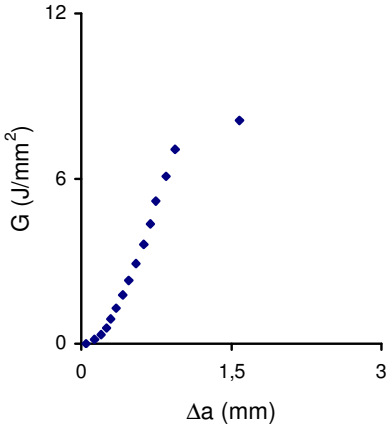


Şekil 6.19b $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

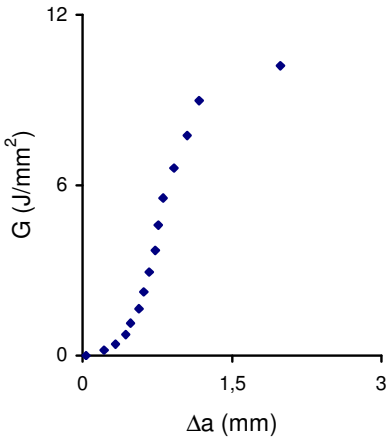


Şekil 6.19c $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

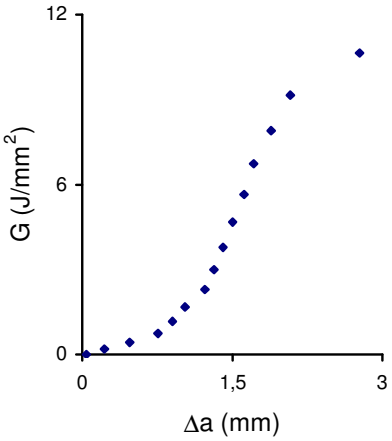
Kompliyans metodu ile hesaplanan G değerleriyle, çatlak ilerleme miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şekil 6.20' de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi başlangıçta G ve çatlak ilerlemeleri oldukça düşük düzeylerde seyir ederken kopma noktasına yaklaşıldıkça G değerlerinde artış fazlalaşırken çatlak ilerleme miktarlarında düşük artış devam etmiş ve kırılma anında yüksek çatlak ilerlemeleri görülmüştür. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça hem çatlak ilerlemesinde hem de şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında artış gözlenmiştir. Numunelerde G değerleri $2a = 5$ mm için 1050 N yükte 8,11 J/mm^2, $2a = 7$ mm için 1000 N yükte 10,21 J/mm^2 ve $2a = 9$ mm için 860 N yükte 10,64 J/mm^2 olarak hesaplanmıştır. 15^{o} açılı numunelerle kıyaslandığında şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında ortalama %11 oranın da bir artma tespit edilmiştir. Buda çatlağın ilerlemesinin daha çok enerji gerektirdiğinin göstergesidir. 0^{o} açılı numunelerle kıyaslandığında şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarındaki artışın daha da yüksek oranlarda olduğu görülmüştür.



Şekil 6.20a $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin G-Δa değişimi

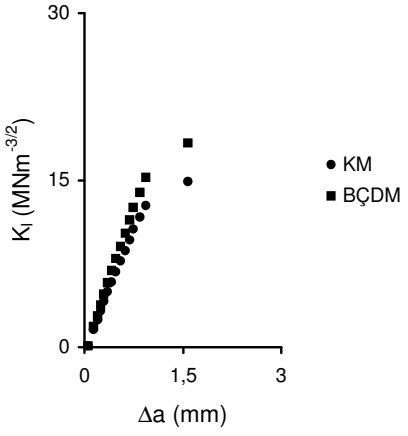


Şekil 6.20b $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin G-Δa değişimi

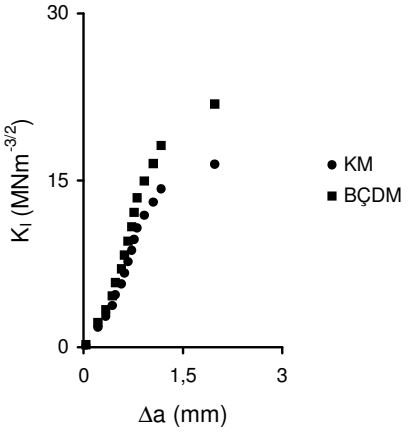


Şekil 6.20c $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin G-Δa değişimi

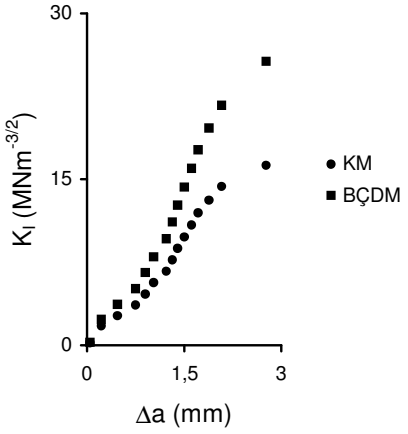
30^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -30^o açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir. Bundan dolayı çatlağın bir ucundaki ilerleme düzlemi ile diğer ucu arasındaki düzlemler farklı olduğundan açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana getirmiştir. Dolayısıyla çatlak ucunda gerilme şiddet faktörü K_I ve K_{II} oluşmaktadır. Hesaplamalarda kompliyasn metot (KM) ve başlangıç çatlak derinliği metodu (BÇDM) kullanılmıştır. Hesaplanan K_I, K_{II}, $K_{I eş}$, $K_{II eş}$ ve $K_{eş}$ değerleri Ek 1' de verilmiştir. Şekil 6.21' de 30^o açılı çatlaklı numunelerin K_I değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 6.21 incelendiğinde K_I artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Ayrıca BÇDM ile hesaplanan K_I değerleri KM ile hesaplananlardan yüksek çıkmıştır. Kullanılan iki metot arasında ki fark $2a = 5$ mm için ortalama %18, $2a = 7$ mm için ortalama %23, $2a = 9$ mm için ortalama %35 oranlarında gerçekleşmiştir. İki metot arasındaki fark K_{II} değerleri içinde aynı oranlarda gerçekleşmiştir. Numunelerde kırılma anındaki K_I değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 14,86 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 18,33 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 16,40 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 21,82 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 16,24 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 25,63 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.21a $\theta = 30^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

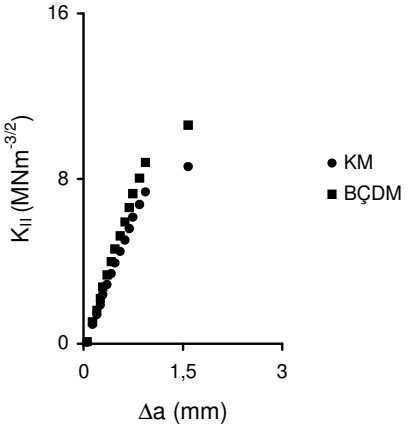


Şekil 6.21b $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

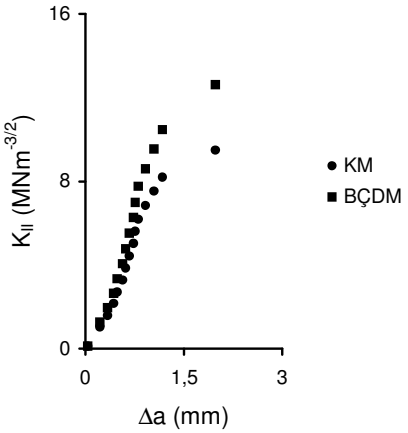


Şekil 6.21c $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

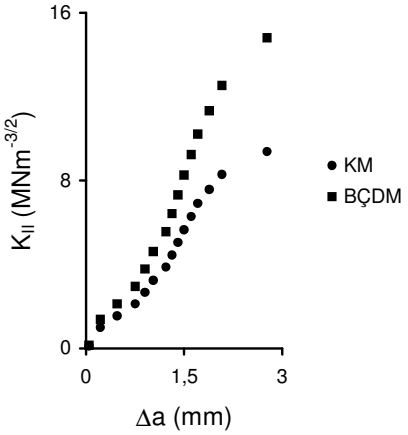
Şekil 6.22' de 30^{o} açılı çatlaklı numunelerin K_{II} değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 6.22 incelendiğinde K_{II} artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Numunelerde kırılma anındaki K_{II} değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 8,57 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 10,58 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 9,47 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 12,60 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 9,37 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 14,79 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.22a $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

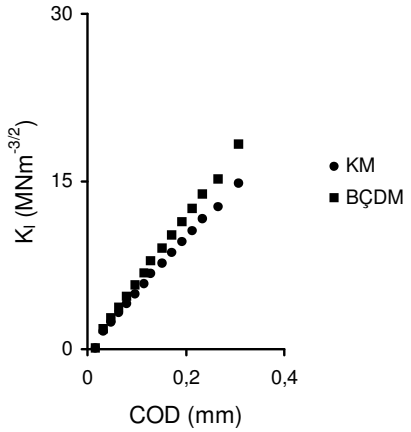


Şekil 6.22b $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

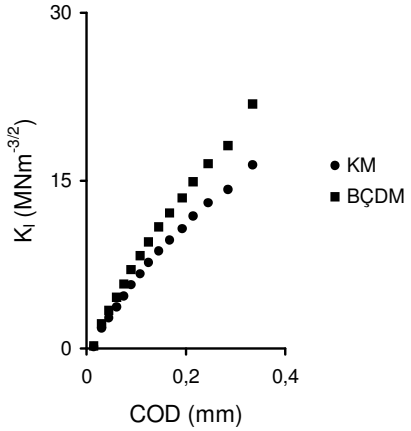


Şekil 6.22c $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

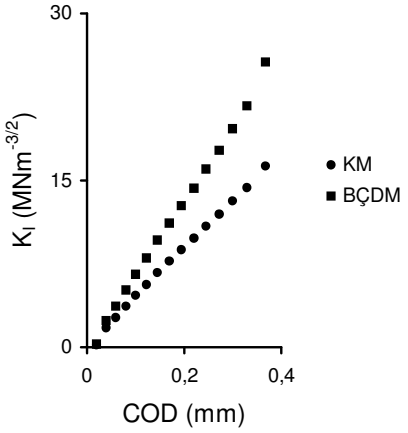
Hesaplanan K_I değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.23' de gösterilmiştir. Şekil 6.23 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça K_I değerlerinde ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.23a $\theta = 30^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_I-COD değişimi

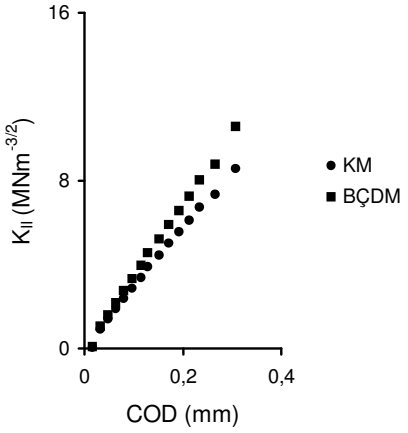


Şekil 6.23b $\theta = 30^o$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_I-COD değişimi

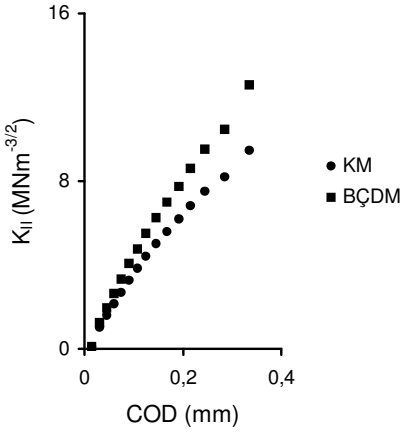


Şekil 6.23c $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi

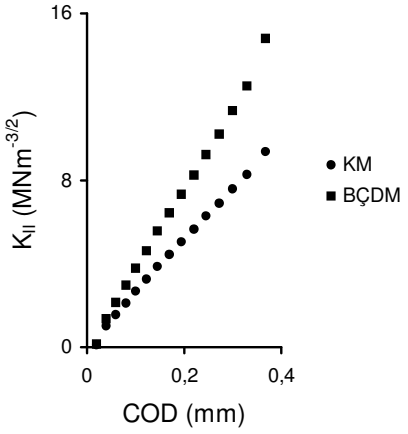
Hesaplanan K_{II} değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.24' de gösterilmiştir. Şekil 6.24 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça K_{II} değerlerinde ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.24a $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi



Şekil 6.24b $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi



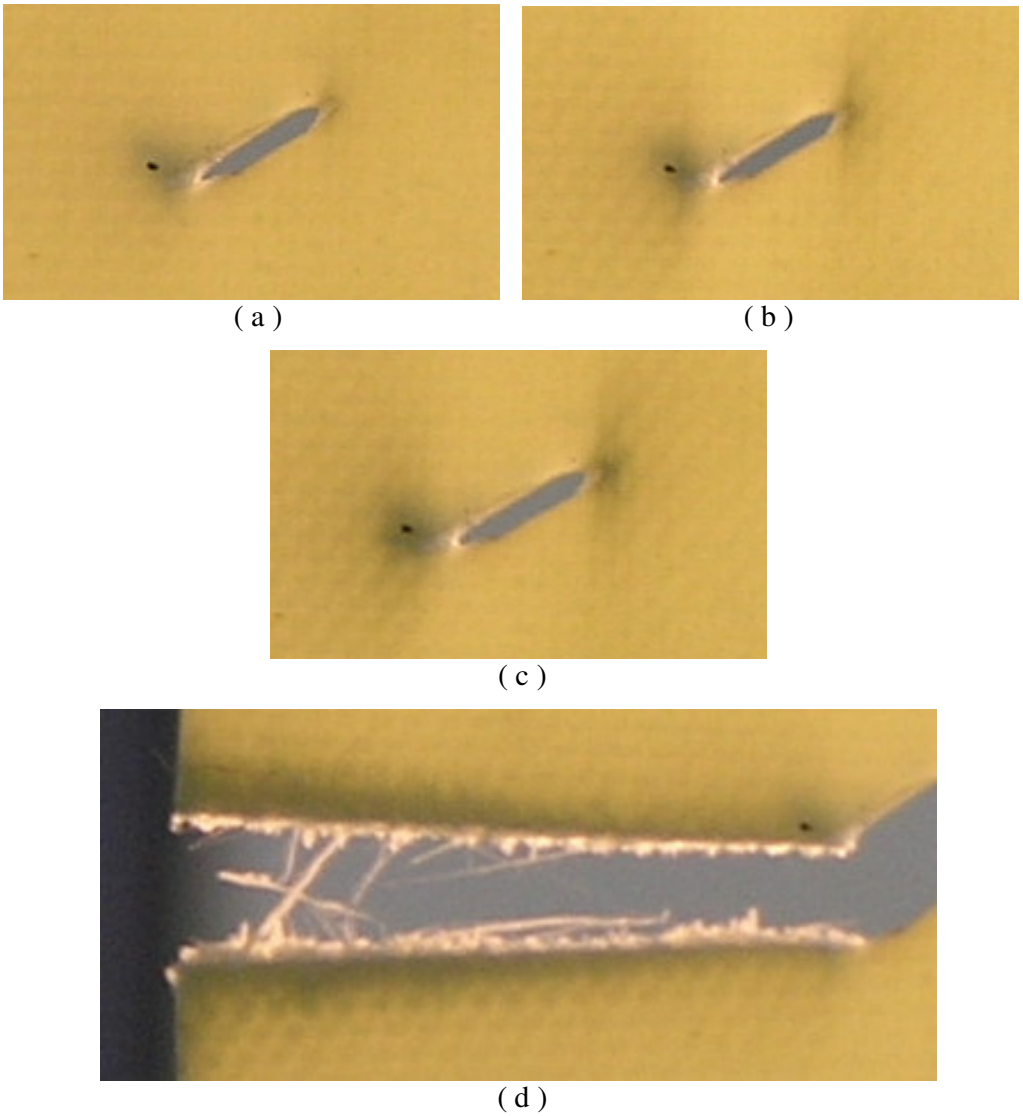
Şekil 6.24c $\theta = 30^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi

6.4.1. 30^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

30^{o} de uygulanan yük çatlağa dik olmadığından hem ayrılma modu (mod I), hem de kayma modunda (mod II) hasar meydana gelmektedir. Eğimden dolayı yükün etki ettiği kesit alanda bir artış olacağından kırılma yüklerindeki artışın ve çatlak ilerleme miktarındaki azalmanın devam ettiği gözlenmiştir. Hasar mekanizması incelenecek olursa, deneyin başlamasıyla beraber ilk yüklemede çatlak ağızlarında beyazlaşma oluşmaya başlamıştır(Şekil 6.25a). İlerleyen yüklerde beyaz bölgede artış gözlenmiş ve bu arada fiber-matris ara yüzey ayrılması meydana

gelmiştir (şekil 6.25b ve şekil 6.25c). Bu olay kopma olayı meydana gelene kadar devam etmiştir.

30^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -30^o açı yapacak şekilde kink yaparak yatayda ilerlemiştir. Bundan dolayı açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana getirmiştir. Bu sırada fiberde brinding yani saçaklanma olayının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.25d'de kink, fiber-matris ara yüzey ayrılması ve saçaklanma ile kırılma anı görülmektedir.



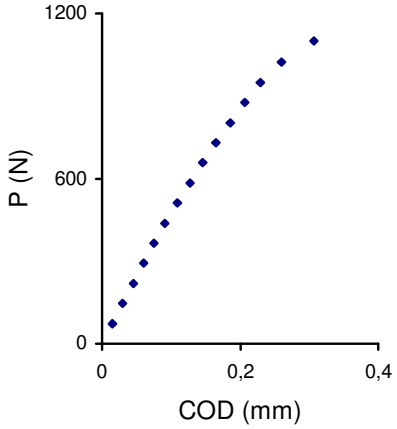
(a) (b) (c) (d)

Şekil 6.25 Numune çatlak ucunda meydana gelen hasarlanma ve kopma

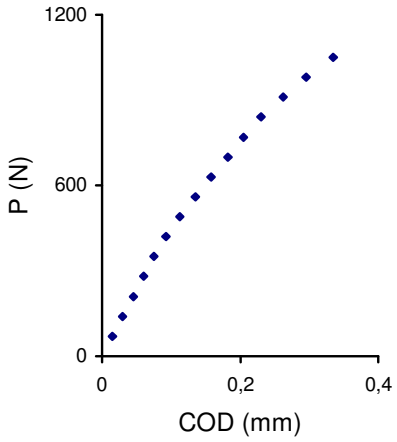
Çatlak ilerlemesi yükün artışıyla birlikte $2a = 5$ mm için Δa=0,93 mm, $2a = 7$ mm için Δa=1,17 mm ve $2a = 9$ mm için Δa=2,08 mm seviyesine kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerlerden sonra çatlak ilerlemesi hızla artarak ortalama $2a = 5$ mm için 1050 N yükte 1,58 mm, $2a = 7$ mm için 1000 N yükte 1,98 mm ve $2a = 9$ mm için 860 N yükte 2,77 mm' de aniden kopmuştur.

6.5. 45^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları

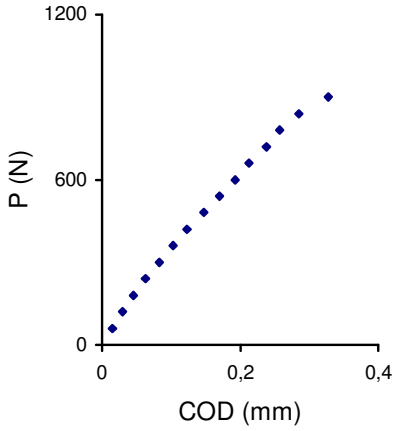
Ortasında 45^o açılı çatlak bulunan kompozit numuneler bir önceki bölümde anlatılan şartlarda çekme deneyine tabi tutulmuştur. Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri şekil 6.26' da verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi COD miktarının, uygulanan eksenel yükle hemen hemen lineer değiştiği söylenebilir. Üç grafikte de kopmanın gerçekleştiği yüke kadar kararlı bir şekilde COD miktarlarının arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 1100 N yükte 0,3065 mm, $2a = 7$ mm için 1050 N yükte 0,335 mm ve $2a = 9$ mm için 900 N yükte 0,3275 mm COD değeri gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükünün azaldığı görülmüştür. 0^o ve 15^o açılı numunelerde COD değerleri birbirine yakın değerlerde olmasına karşın 30^o açılı numunelerde COD değerlerinde ortalama %8 oranında azalma tespit edilmişti, 45^o açılı numunelerde bu oran ortalama %11 olarak tespit edilmiştir. 30^o açılı numunelere göre COD değerlerinin %3 daha azaldığı görülmüştür. Bunda çatlağın açılmasını sağlayan çatlak düzlemine dik etki eden kuvvetteki azalma etkili olmaktadır.



Şekil 6.26a $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-COD değişimi

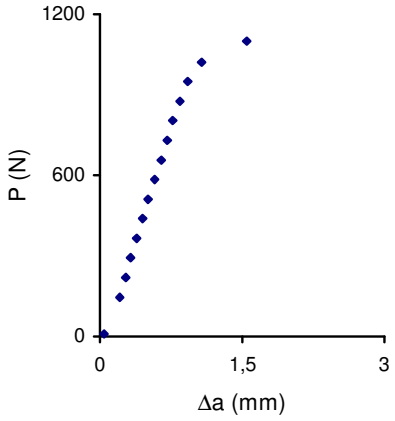


Şekil 6.26b $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-COD değişimi

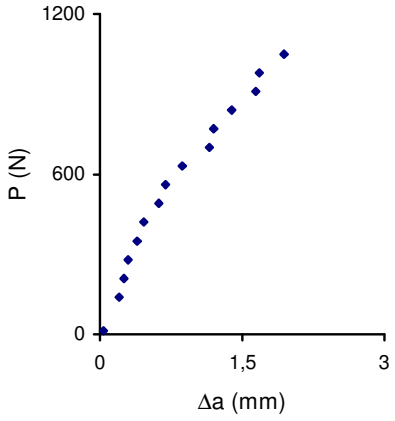


Şekil 6.26c $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-COD değişimi

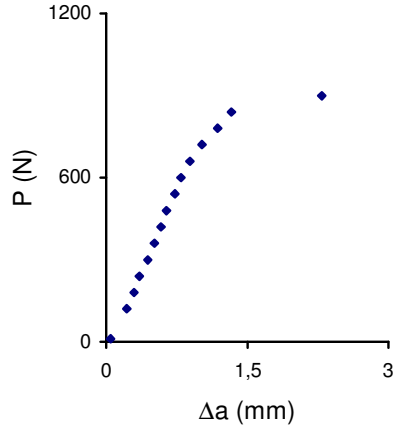
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ilerleme miktarı grafikleri şekil 6.27' de verilmiştir. Üç grafikte de başlangıçtan itibaren çatlak ilerlemesi kararlı bir şekilde devam ederken kopmanın gerçekleştiği yüke yakın değerlerde çatlak ilerlemesinin arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 1100 N yükte 1,55 mm, $2a = 7$ mm için 1050 N yükte 1,94 mm ve $2a = 9$ mm için 900 N yükte 2,29 mm çatlak ilerlemesi gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükü azalırken çatlak ilerleme miktarlarında artış görülmektedir. 30^o açılı numunelerle kıyaslandığında çatlak ilerlemesinde ortalama %3 oranın da bir azalma tespit edilmiştir. 0^o ve 15^o açılı numunelerle kıyaslandığında çatlak ilerlemesindeki azalmanın daha yüksek oranlarda olduğu görülmüştür.



Şekil 6.27a $\theta = 45^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

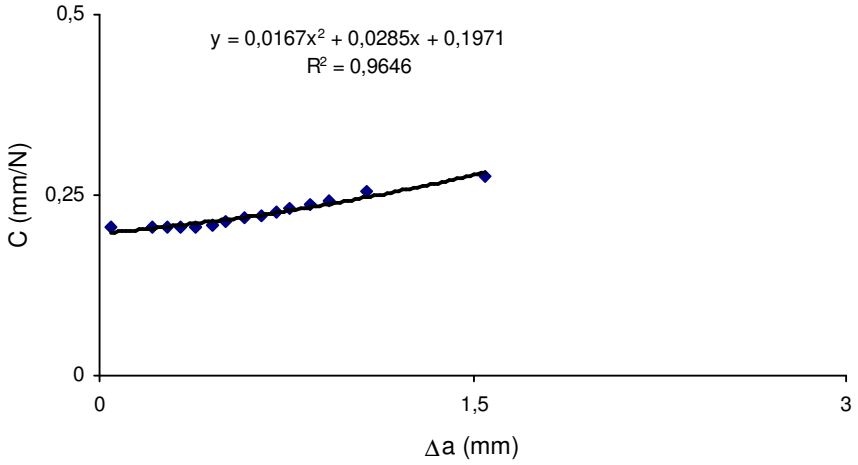


Şekil 6.27b $\theta = 45^o$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

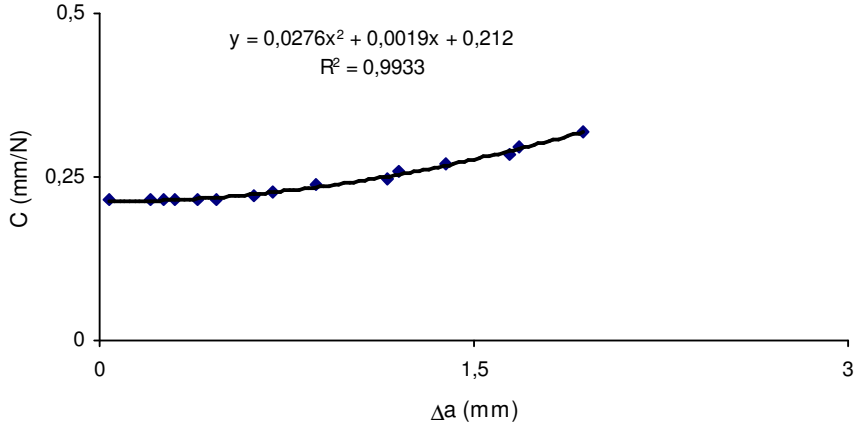


Şekil 6.27c $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

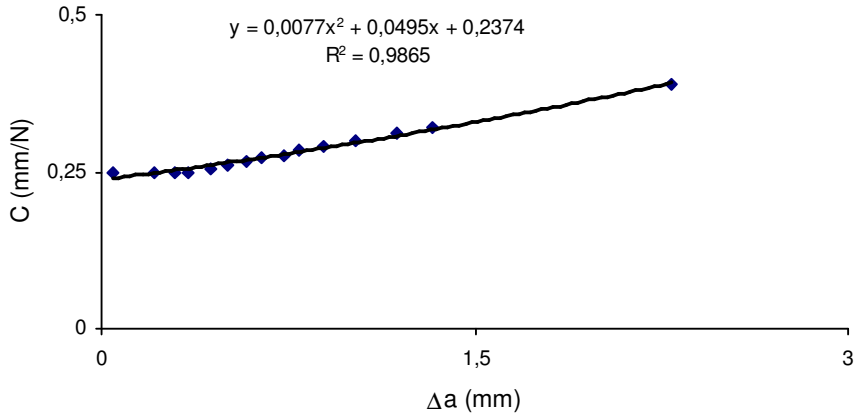
Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının (G) bulunabilmesi için öncelikle şekil 6.28' de görülen C-Δa grafikleri çizilerek eğrinin ikinci derece denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 6.28a $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin C-Δa değişimi



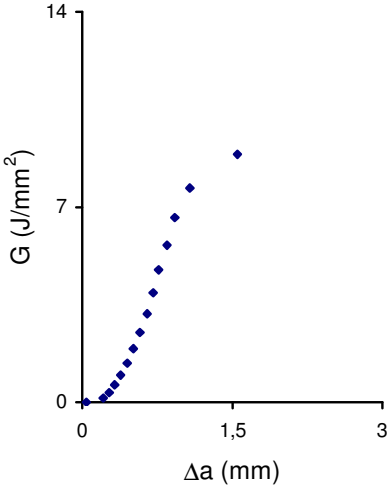
Şekil 6.28b $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin C-Δa değişimi



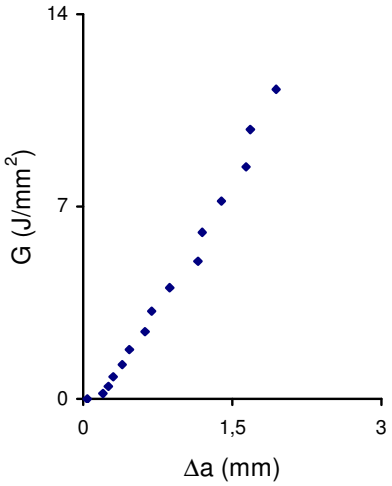
Şekil 6.28c $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

Kompliyans metodu ile hesaplanan G değerleriyle, çatlak ilerleme miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şekil 6.29' da verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi başlangıçta G ve çatlak ilerlemeleri oldukça düşük düzeylerde seyir ederken kopma noktasına yaklaşıldıkça G değerlerinde artış fazlalaşırken çatlak ilerleme miktarlarında düşük artış devam etmiş ve kırılma anına yakın yüksek çatlak ilerlemeleri görülmüştür. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça hem çatlak ilerlemesinde hem de şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında artış gözlenmiştir. Numunelerde G değerleri $2a = 5$ mm için 1100 N yükte 8,89 J/mm^2, $2a = 7$ mm için 1050 N yükte 11,25 J/mm^2 ve $2a = 9$ mm için 900 N yükte 11,65 J/mm^2 olarak hesaplanmıştır. 30^{o} açılı numunelerle

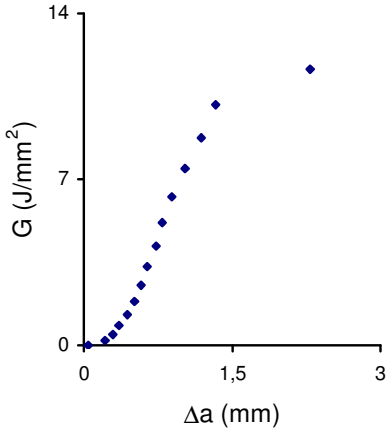
kıyaslandığında şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında ortalama %10 oranın da bir artma tespit edilmiştir. 0^o ve 15^o açılı numunelerle kıyaslandığında şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarındaki artışın daha da yüksek oranlarda olduğu görülmüştür.



Şekil 6.29a $\theta = 45^o$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin G-Δa değişimi

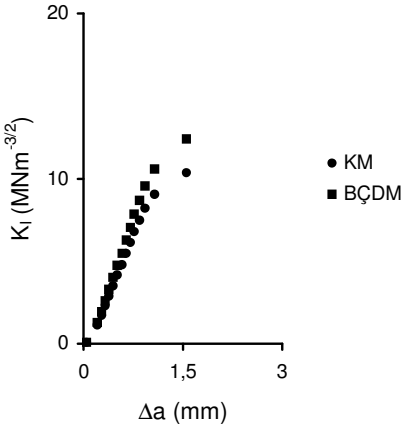


Şekil 6.29b $\theta = 45^o$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin G-Δa değişimi

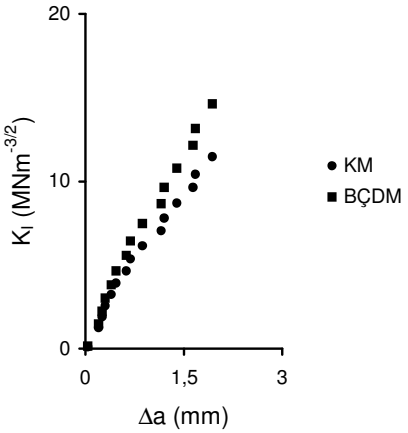


Şekil 6.29c $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin *G*-Δa değişimi

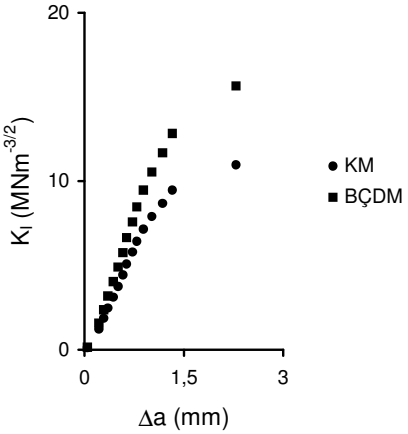
45^{o} açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -45^{o} açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir. Bundan dolayı çatlağın bir ucundaki ilerleme düzlemi ile diğer ucu arasındaki düzlemler farklı olduğundan açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana getirmiştir. Dolayısıyla çatlak ucunda gerilme şiddet faktörü K_I ve K_{II} oluşmaktadır. Hesaplamalarda kompliyasn metot (KM) ve başlangıç çatlak derinliği metodu (BÇDM) kullanılmıştır. Hesaplanan K_I, K_{II}, $K_{I eş}$, $K_{II eş}$ ve $K_{eş}$ değerleri Ek 1' de verilmiştir. Şekil 6.30' da 45^{o} açılı çatlaklı numunelerin K_I değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 6.30 incelendiğinde K_I artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Ayrıca BÇDM ile hesaplanan K_I değerleri KM ile hesaplananlardan yüksek çıkmıştır. Kullanılan iki metot arasında ki fark $2a = 5$ mm için ortalama %16, $2a = 7$ mm için ortalama %21, $2a = 9$ mm için ortalama %30 oranlarında gerçekleşmiştir. İki metot arasındaki fark K_{II} değerleri içinde aynı oranlarda gerçekleşmiştir. Numunelerde kırılma anındaki K_I değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 10,33 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 12,37 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 11,44 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 14,62 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 10,95 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 15,63 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.30a $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

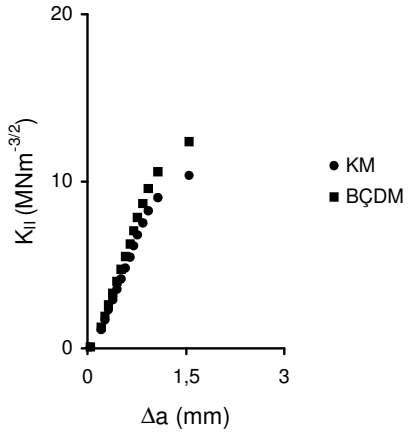


Şekil 6.30b $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

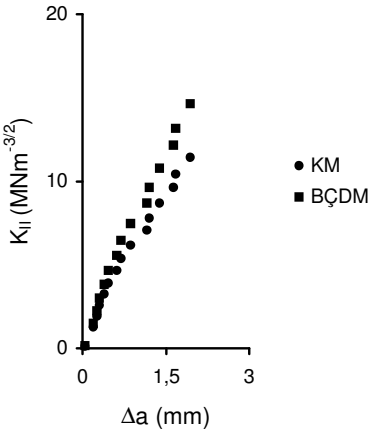


Şekil 6.30c $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

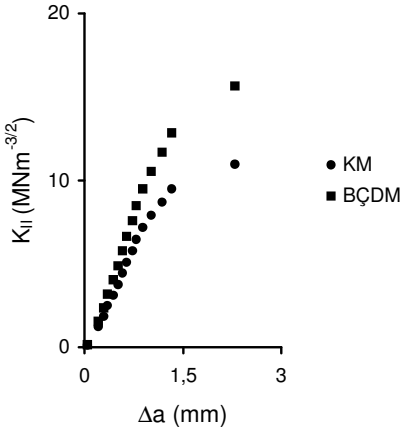
Şekil 6.31' de 45^o açılı çatlaklı numunelerin K_{II} değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 6.31 incelendiğinde K_{II} artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Numunelerde kırılma anındaki K_{II} değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 10,33 MNm$^{-3/2}$ ve BÇDM ile 12,37 MNm$^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 11,44 MNm$^{-3/2}$ ve BÇDM ile 14,62 MNm$^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 10,95 MNm$^{-3/2}$ ve BÇDM ile 15,63 MNm$^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.31a $\theta = 45^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_{II}-Δa değişimi

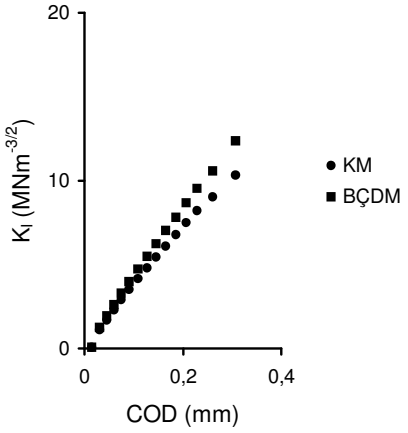


Şekil 6.31b $\theta = 45^o$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_{II}-Δa değişimi

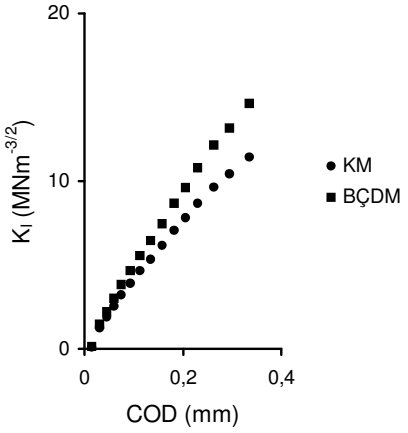


Şekil 6.31c $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

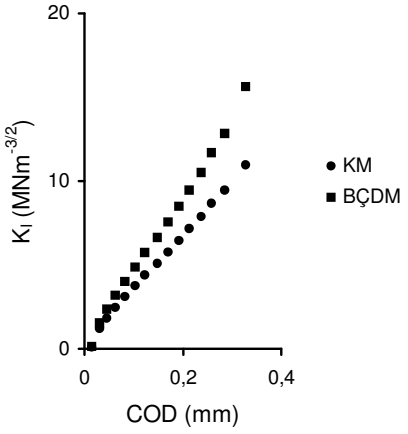
Hesaplanan K_I değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.32' de gösterilmiştir. Şekil 6.32 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında başlangıç çatlak boyu arttıkça K_I değerlerinde ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.32a $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi

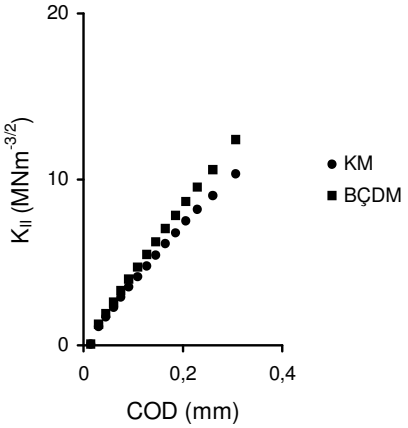


Şekil 6.32b $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi

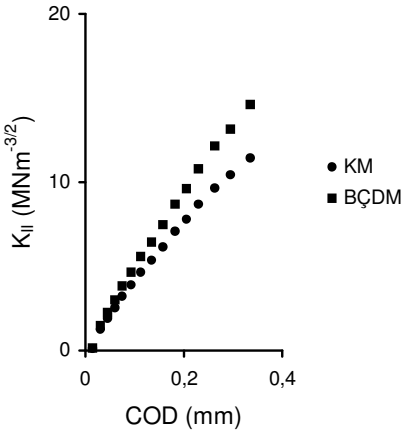


Şekil 6.32c $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi

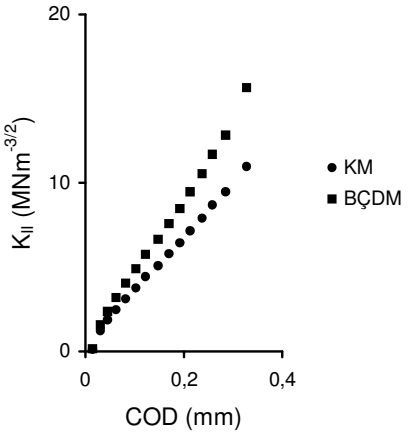
Hesaplanan K_{II} değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.33' de gösterilmiştir. Şekil 6.33 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında başlangıç çatlak boyu arttıkça K_{II} değerlerinde ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.33a $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II}-COD değişimi



Şekil 6.33b $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II}-COD değişimi



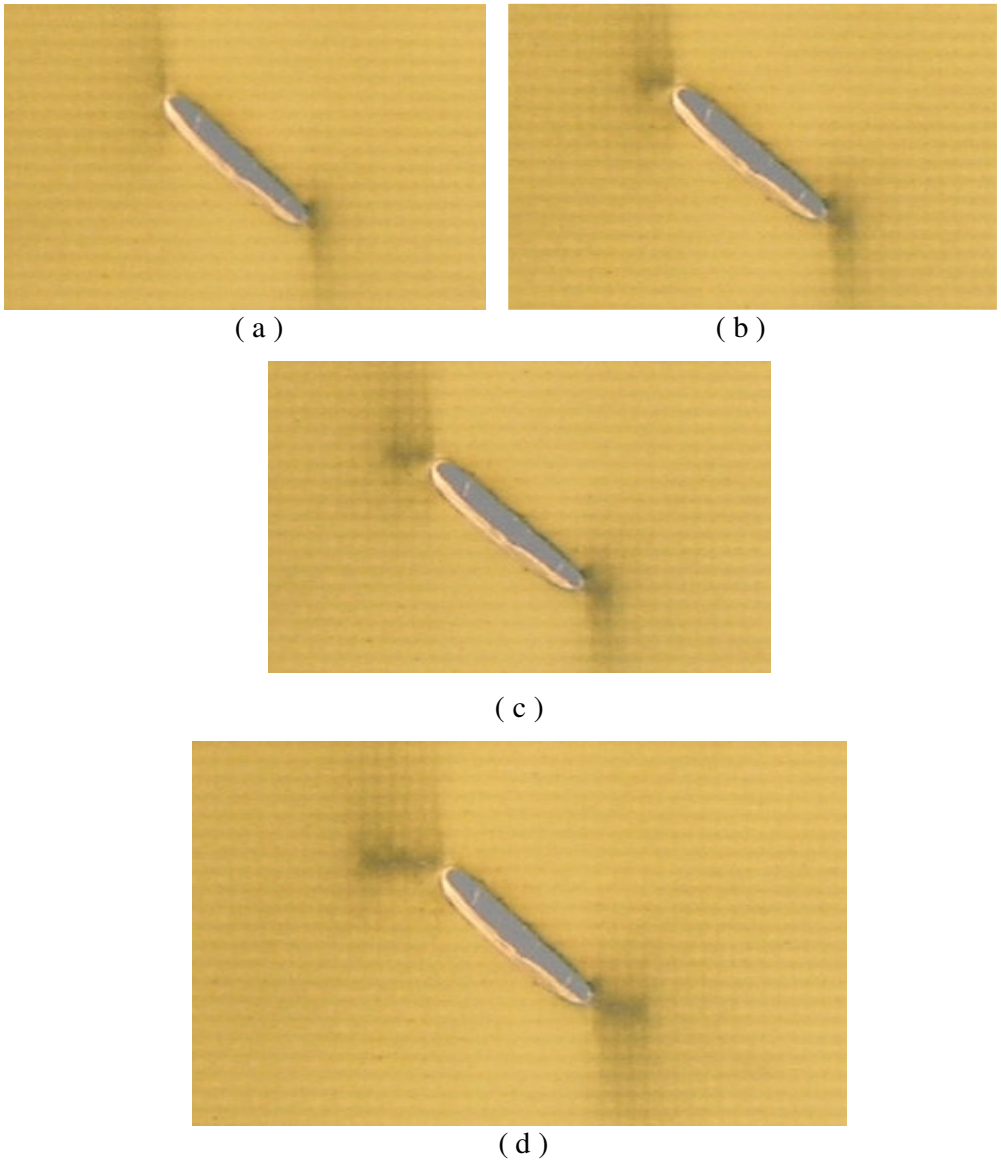
Şekil 6.33c $\theta = 45^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II}-COD değişimi

6.5.1. 45^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

45^o de uygulanan yük çatlağa dik olmadığından hem ayrılma modu (mod I), hem de kayma modunda (mod II) hasar meydana gelmektedir. Eğimden dolayı yükün etki ettiği kesit alanda bir artış olacağından kırılma yüklerindeki artışın ve çatlak ilerleme miktarındaki azalmanın devam ettiği gözlenmiştir. Hasar mekanizması incelenecek olursa, deneyin başlamasıyla beraber ilk yüklemede çatlak ağızlarında beyazlaşma oluşmaya başlamıştır(Şekil 6.34a). İlerleyen yüklerde beyaz bölgede artış gözlenmiş ve bu arada fiber-matris ara yüzey ayrılması meydana gelmiştir (şekil 6.34b ve şekil 6.34c). Bu olay kopma olayı meydana gelene kadar devam etmiştir.

45^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -45^o açı yapacak şekilde kink yaparak yatayda ilerlemiştir. Bundan dolayı açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana getirmiştir. Bu sırada fiberde brinding yani saçaklanma olayının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.34d'de kink ve çatlak ilerleme anı kırılmadan hemen önce görülmektedir.

Çatlak ilerlemesi yükün artışıyla birlikte $2a = 5$ mm için Δa=1,075 mm, $2a = 7$ mm için Δa=1,68 mm ve $2a = 9$ mm için Δa=1,33 mm seviyesine kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerlerden sonra çatlak ilerlemesi hızla artarak ortalama $2a = 5$ mm için 1100 N yükte 1,55 mm, $2a = 7$ mm için 1050 N yükte 1,94 mm ve $2a = 9$ mm için 900 N yükte 2,29 mm' de aniden kopmuştur.



(a) (b)

(c)

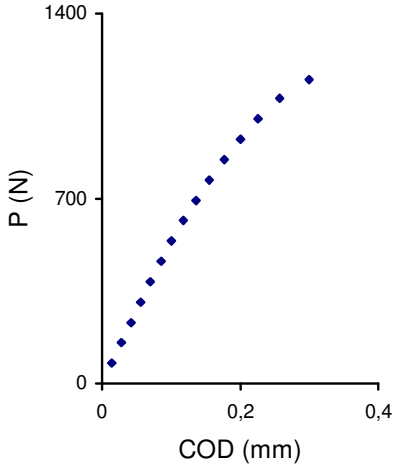
(d)

Şekil 6.34 Numune çatlak ucunda meydana gelen hasarlanma ve kopma

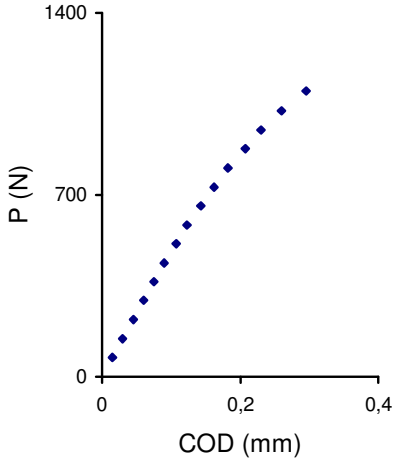
6.6. 60^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları

Ortasında 60^{o} açılı çatlak bulunan kompozit numuneler bir önceki bölümde anlatılan şartlarda çekme deneyine tabi tutulmuştur. Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri şekil 6.35' de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi COD miktarının, uygulanan eksenel yükle hemen hemen lineer değiştiği söylenebilir. Üç grafikte de kopmanın gerçekleştiği yüke kadar kararlı bir şekilde COD miktarlarının arttığı görülmektedir. Numuneler

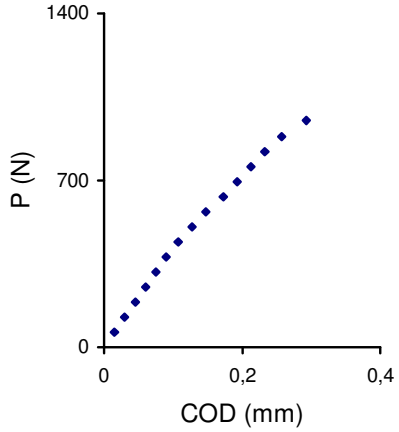
ortalama $2a = 5$ mm için 1150 N yükte 0,2995 mm, $2a = 7$ mm için 1100 N yükte 0,295 mm ve $2a = 9$ mm için 950 N yükte 0,2925 mm COD değeri gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükünün azaldığı, COD değerlerinin birbirine neredeyse eşit olduğu görülmüştür. COD değerlerinin 45^o açılı numunelerdeki değerlerine oranla %4 daha azaldığı tespit edilmiştir. Bunda çatlağın açılmasını sağlayan çatlak düzlemine dik etki eden kuvvetteki azalma etkili olmaktadır.



Şekil 6.35a $\theta = 60^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

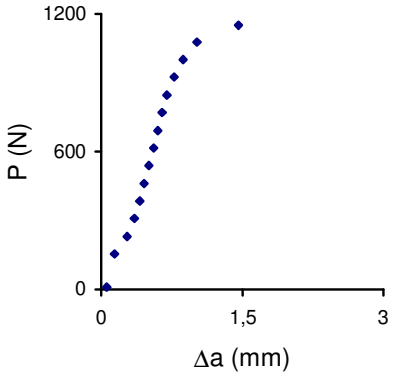


Şekil 6.35b $\theta = 60^o$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

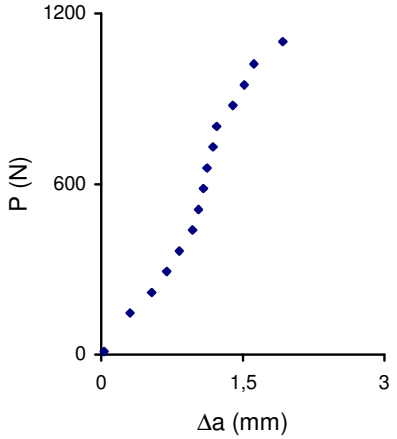


Şekil 6.35c $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

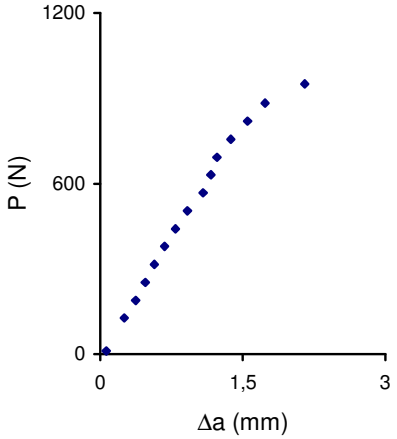
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ilerleme miktarı grafikleri şekil 6.36' da verilmiştir. Üç grafikte de başlangıçtan itibaren çatlak ilerlemesi kararlı bir şekilde devam ederken kopmanın gerçekleştiği yüke yakın değerlerde çatlak ilerlemesinin arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 1150 N yükte 1,46 mm, $2a = 7$ mm için 1100 N yükte 1,924 mm ve $2a = 9$ mm için 950 N yükte 2,155 mm çatlak ilerlemesi gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükü azalırken çatlak ilerleme miktarlarında artış görülmektedir. 45^{o} açılı numunelerle kıyaslandığında çatlak ilerlemesinde ortalama %4 oranında bir azalma tespit edilmiştir. 0^{o} , 15^{o} ve 30^{o} açılı numunelerle kıyaslandığında çatlak ilerlemesindeki azalmanın daha yüksek oranlarda olduğu görülmüştür.



Şekil 6.36a $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

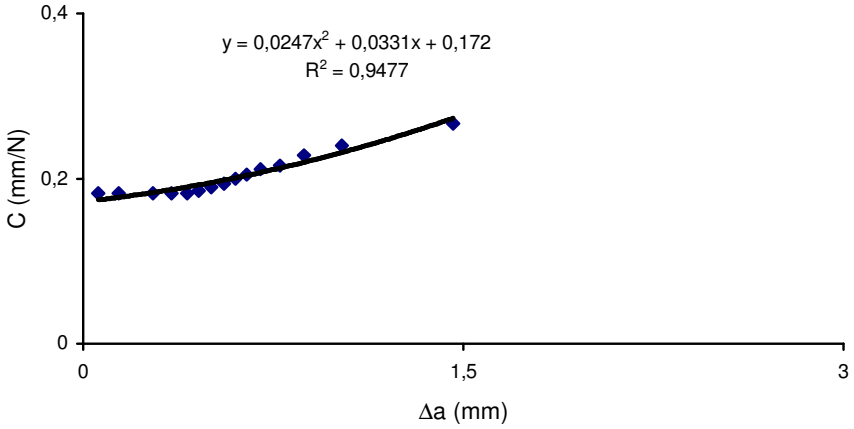


Şekil 6.36b $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

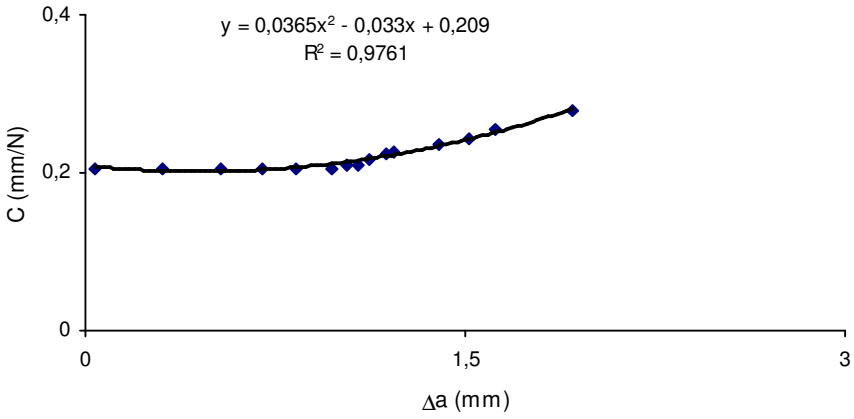


Şekil 6.36c $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

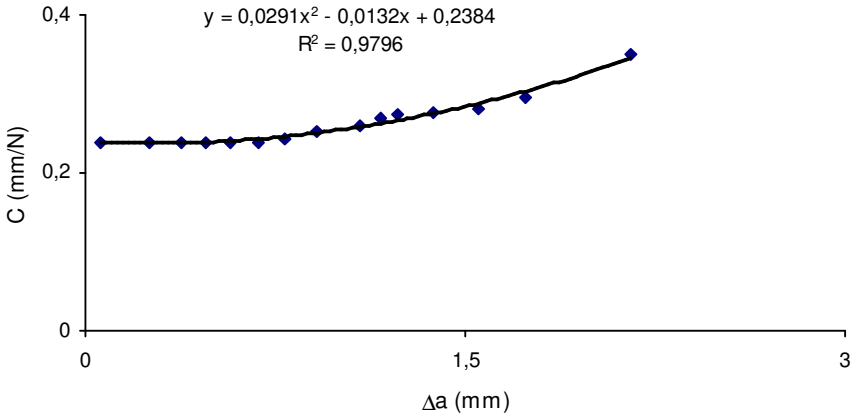
Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının (G) bulunabilmesi için öncelikle şekil 6.37' de görülen C-Δa grafikleri çizilerek elde edilen eğrinin ikinci derece denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 6.37a $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

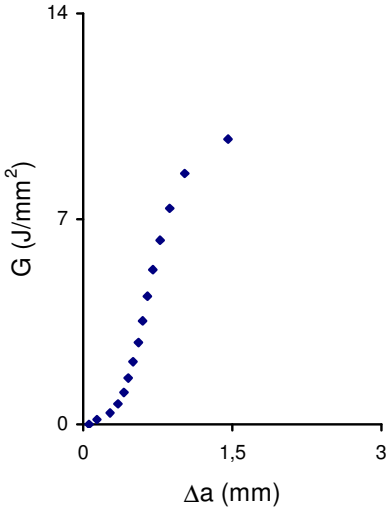


Şekil 6.37b $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

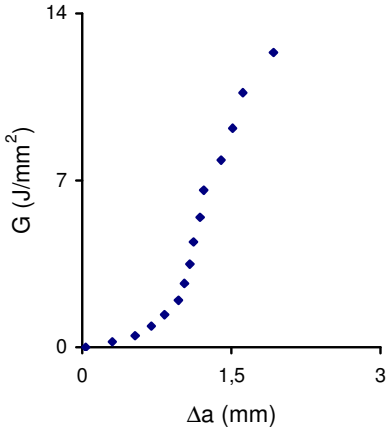


Şekil 6.37c $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

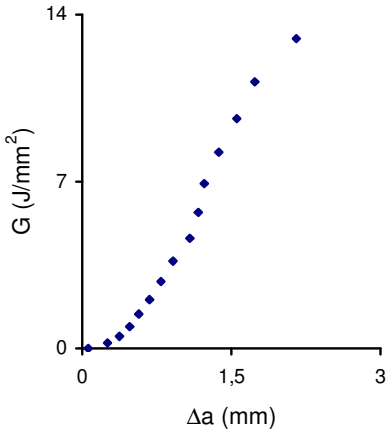
Kompliyans metodu ile hesaplanan G değerleriyle, çatlak ilerleme miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şekil 6.38' de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi başlangıçta G ve çatlak ilerlemeleri oldukça düşük düzeylerde seyir ederken kopma noktasına yaklaşıldıkça G değerlerinde artış fazlalaşırken çatlak ilerleme miktarlarında düşük artış devam etmiş ve kırılma anında yüksek çatlak ilerlemeleri görülmüştür. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça hem çatlak ilerlemesinde hem de şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında artış gözlenmiştir. Numunelerde G değerleri $2a = 5$ mm için 1150 N yükte 9,72 J/mm^2, $2a = 7$ mm için 1100 N yükte 12,35 J/mm^2 ve $2a = 9$ mm için 950 N yükte 12,98 J/mm^2 olarak hesaplanmıştır. 45^o açılı numunelerle kıyaslandığında şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında ortalama %10 oranın da bir artma tespit edilmiştir. 0^o , 15^o ve 30^o açılı numunelerle kıyaslandığında şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarındaki artışın daha da yüksek oranlarda olduğu görülmüştür.



Şekil 6.38a $\theta = 60^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin G-Δa değişimi



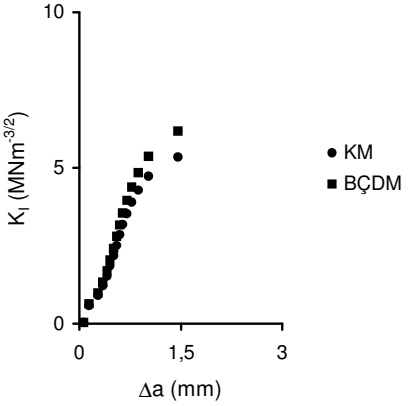
Şekil 6.38b $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin *G*-Δa değişimi



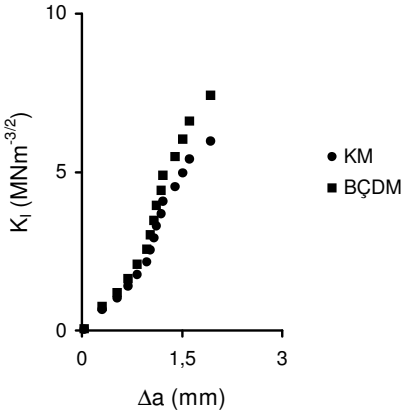
Şekil 6.38c $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin *G*-Δa değişimi

60^{o} açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -60^{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 bileşik mod meydana getirmiştir. Dolayısıyla çatlak ucunda gerilme şiddet faktörü K_I ve K_{II} oluşmaktadır. Hesaplamalarda kompliyasn metot (KM) ve başlangıç çatlak derinliği metodu (BÇDM) kullanılmıştır. Hesaplanan K_I, K_{II}, $K_{I\,eş}$, $K_{II\,eş}$ ve $K_{eş}$ değerleri Ek 1' de verilmiştir. Şekil 6.39' da 60^{o} açılı çatlaklı numunelerin K_I değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği

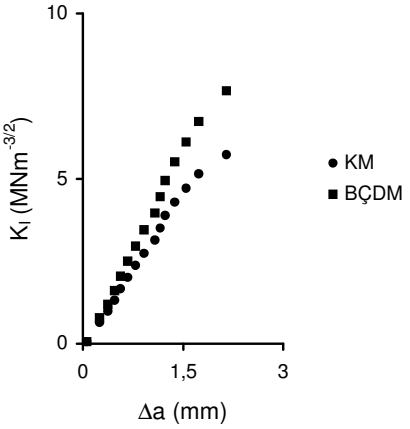
gösterilmiştir. Şekil 6.39 incelendiğinde K_I artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Ayrıca BÇDM ile hesaplanan K_I değerleri KM ile hesaplananlardan yüksek çıkmıştır. Kullanılan iki metot arasında ki fark $2a = 5$ mm için ortalama %13, $2a = 7$ mm için ortalama %19, $2a = 9$ mm için ortalama %25 oranlarında gerçekleşmiştir. İki metot arasındaki fark K_{II} değerleri içinde aynı oranlarda gerçekleşmiştir. Numunelerde kırılma anındaki K_I değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 5,34 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 6,18 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 5,98 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 7,42 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 5,72 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 7,67 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.39a $\theta = 60^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

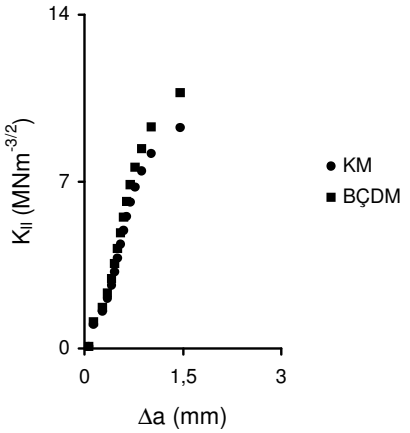


Şekil 6.39b $\theta = 60^o$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

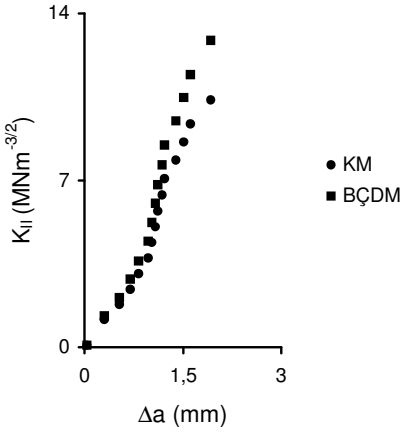


Şekil 6.39c $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

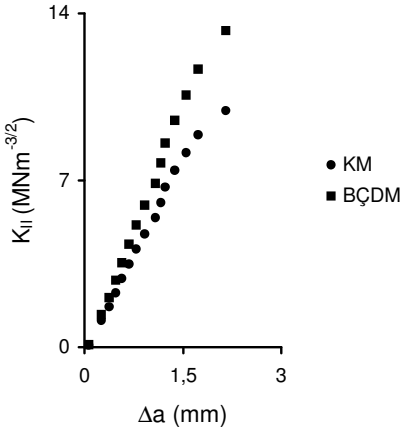
Şekil 6.40' da 60^{o} açılı çatlaklı numunelerin K_{II} değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 6.40 incelendiğinde K_{II} artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Numunelerde kırılma anındaki K_{II} değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 9,26 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 10,71 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 10,36 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 12,86 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 9,91 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 13,26 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.40a $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

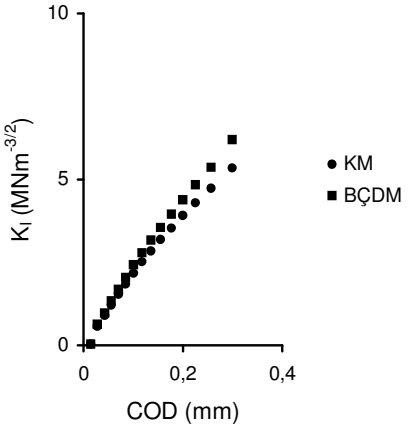


Şekil 6.40b $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

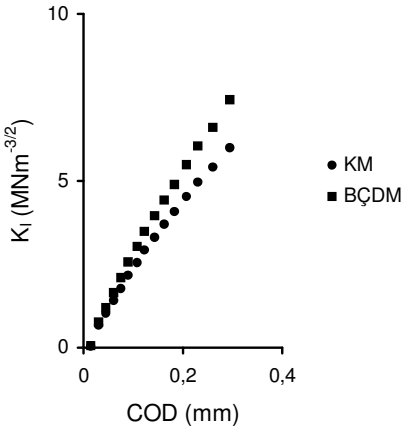


Şekil 6.40c $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

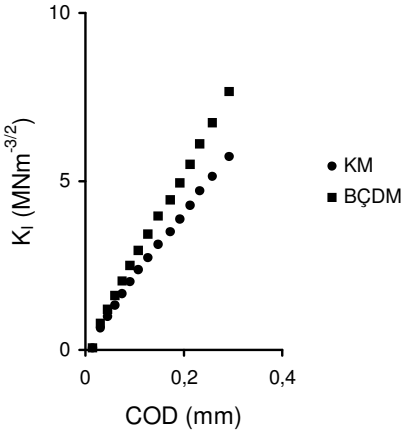
Hesaplanan K_I değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.41' de gösterilmiştir. Şekil 6.41 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında başlangıç çatlak boyu arttıkça K_I değerlerinde ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.41a $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi

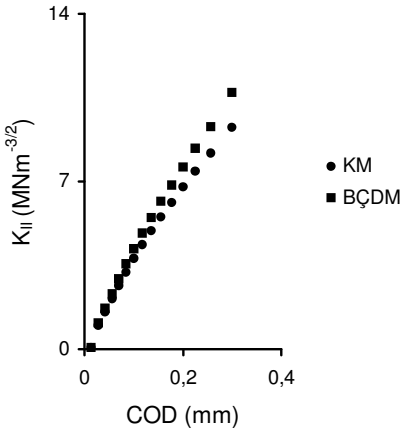


Şekil 6.41b $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi

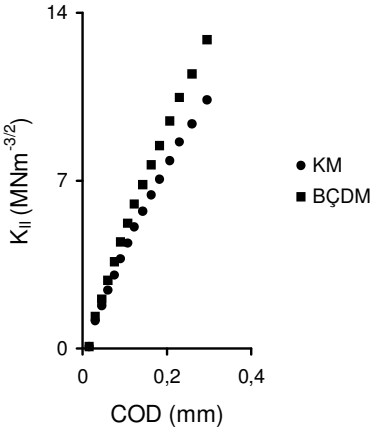


Şekil 6.41c $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi

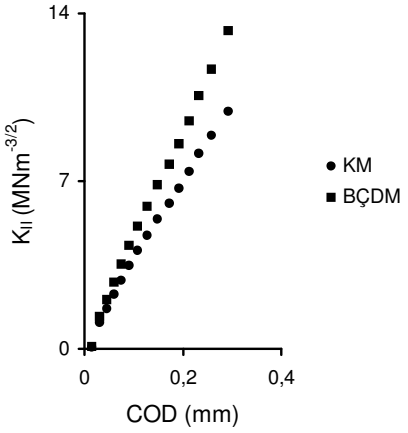
Hesaplanan K_{II} değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.42' de gösterilmiştir. Şekil 6.42 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında başlangıç çatlak boyu arttıkça K_{II} değerlerinde vr çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.42a $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II}-COD değişimi



Şekil 6.42b $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II}-COD değişimi

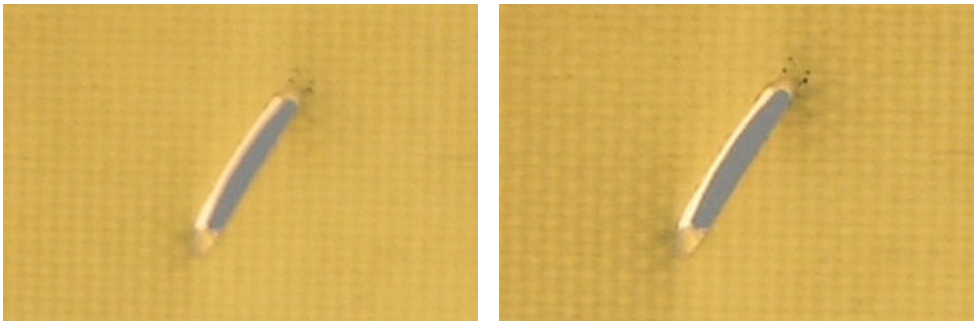


Şekil 6.42c $\theta = 60^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi

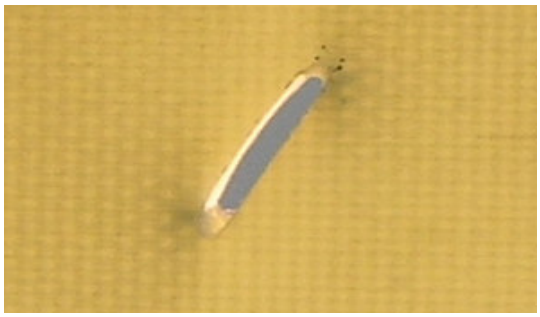
6.6.1. 60^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

60^{o} de uygulanan yük çatlağa dik olmadığından hem ayrılma modu (mod I), hem de kayma modunda (mod II) hasar meydana gelmektedir. Eğimden dolayı yükün etki ettiği kesit alanda bir artış olacağından kırılma yüklerindeki artışın ve çatlak ilerleme miktarındaki azalmanın devam ettiği gözlenmiştir. Hasar mekanizması incelenecek olursa, deneyin başlamasıyla beraber ilk yüklemede çatlak ağızlarında beyazlaşma oluşmaya başlamıştır(Şekil 6.43a). İlerleyen yüklerde beyaz bölgede artış gözlenmiş ve bu arada fiber-matris ara yüzey ayrılması meydana gelmiştir (şekil 6.43b ve şekil 6.43c). Bu olay kopma olayı meydana gelene kadar devam etmiştir.

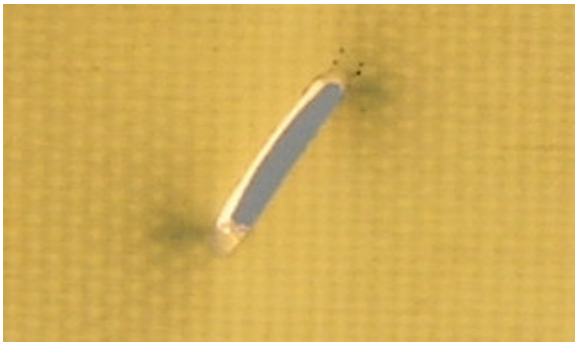
60^{o} açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde –60^{o} açı yapacak şekilde kink yaparak yatayda ilerlemiştir. Bundan dolayı açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana getirmiştir. Bu sırada fiberde brinding yani saçaklanma olayının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.43d'de kink ve çatlak ilerleme anı kırılmadan hemen önce görülmektedir.



(a) (b)



(c)



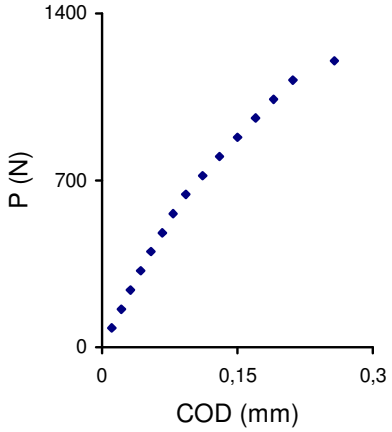
(d)

Şekil 6.43 Numune çatlak ucunda meydana gelen hasarlanma ve kopma

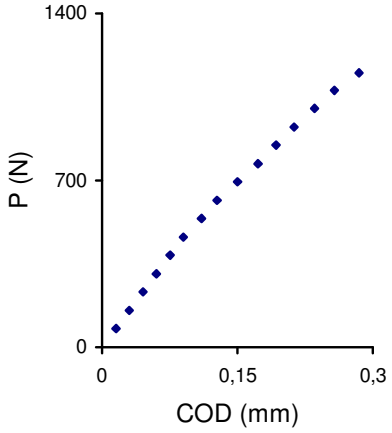
Çatlak ilerlemesi yükün artışıyla birlikte $2a = 5$ mm için Δa=1,02 mm, $2a = 7$ mm için Δa=1,616 mm ve $2a = 9$ mm için Δa=1,735 mm seviyesine kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerlerden sonra çatlak ilerlemesi hızla artarak ortalama $2a = 5$ mm için 1150 N yükte 1,46 mm, $2a = 7$ mm için 1100 N yükte 1,924 mm ve $2a = 9$ mm için 950 N yükte 2,155 mm' de aniden kopmuştur.

6.7. 75^o Açılı Çatlaklı Numunelerde Çekme Deneyi Sonuçları

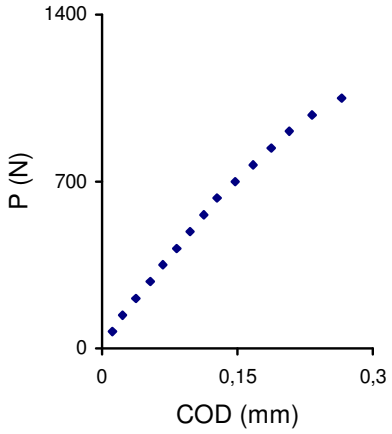
Ortasında 75^o açılı çatlak bulunan kompozit numuneler bir önceki bölümde anlatılan şartlarda çekme deneyine tabi tutulmuştur. Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ağzı açılma miktarının (COD) grafikleri şekil 6.44' de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi COD miktarının, uygulanan eksenel yükle hemen hemen lineer değiştiği söylenebilir. Üç grafikte de kopmanın gerçekleştiği yüke kadar kararlı bir şekilde COD miktarlarının arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 1200 N yükte 0,2575 mm, $2a = 7$ mm için 1150 N yükte 0,285 mm ve $2a = 9$ mm için 1050 N yükte 0,265 mm COD değeri gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükünün azaldığı görülmüştür. COD miktarlarının giderek azalmaya başladığı görülmüştür. Bunda çatlağın açılmasını sağlayan çatlak düzlemine dik etki eden kuvvetteki azalma etkili olmaktadır. COD değerlerinin 60^o açılı numunelerdeki değerlerine oranla %5 daha azaldığı tespit edilmiştir. Bunda çatlağın açılmasını sağlayan çatlak düzlemine dik etki eden kuvvetteki azalma etkili olmaktadır.



Şekil 6.44a $\theta = 75^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

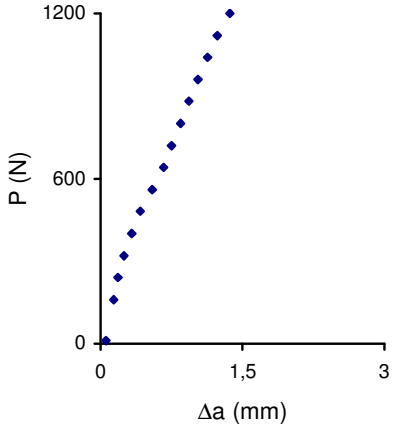


Şekil 6.44b $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

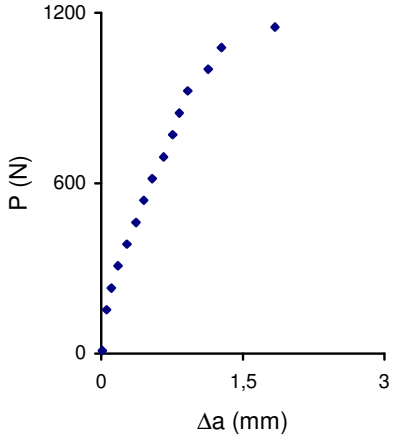


Şekil 6.44c $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin P-COD değişimi

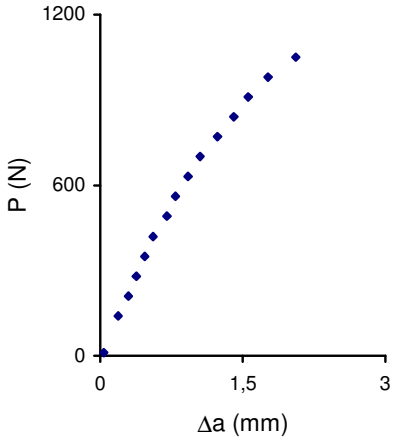
Numuneye uygulanan eksenel yüke karşılık, çatlak ilerleme miktarı grafikleri şekil 6.45' de verilmiştir. Üç grafikte de başlangıçtan itibaren çatlak ilerlemesi kararlı bir şekilde devam ederken kopmanın gerçekleştiği yüke yakın değerlerde çatlak ilerlemesinin arttığı görülmektedir. Numuneler ortalama $2a = 5$ mm için 1200 N yükte 1,365 mm, $2a = 7$ mm için 1150 N yükte 1,84 mm ve $2a = 9$ mm için 1050 N yükte 2,057 mm çatlak ilerlemesi gösterdikten sonra kırılmıştır. Başlangıç çatlak boyu arttıkça kopma yükü azalırken çatlak ilerleme miktarlarında artış görülmektedir. 60^{o} açılı numunelerle kıyaslandığında çatlak ilerlemesinde ortalama %3 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Diğer açılı numunelerle kıyaslandığında çatlak ilerlemesindeki azalmanın daha yüksek oranlarda olduğu görülmüştür.



Şekil 6.45a $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

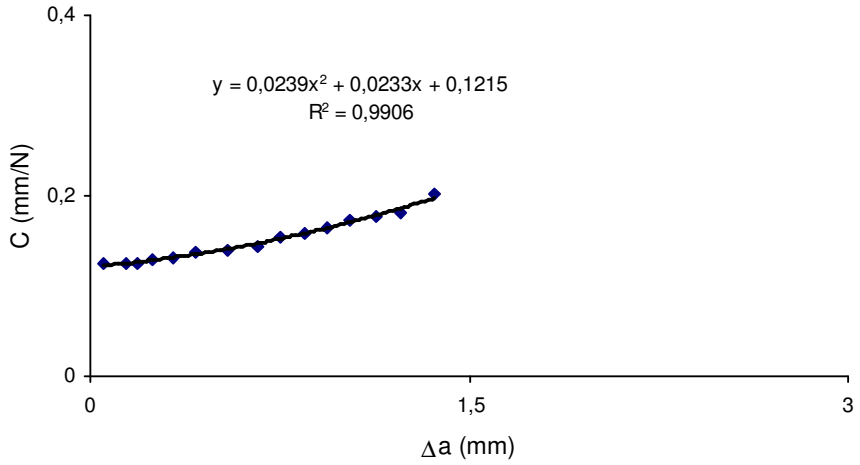


Şekil 6.45b $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

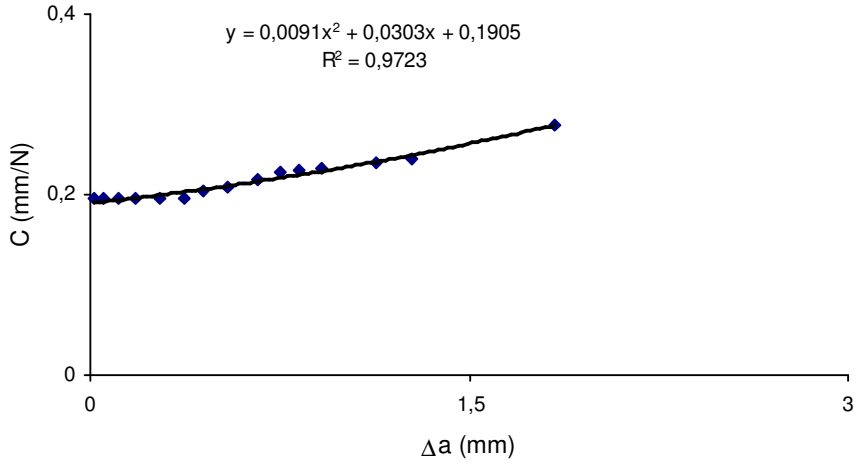


Şekil 6.45c $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin P-Δa değişimi

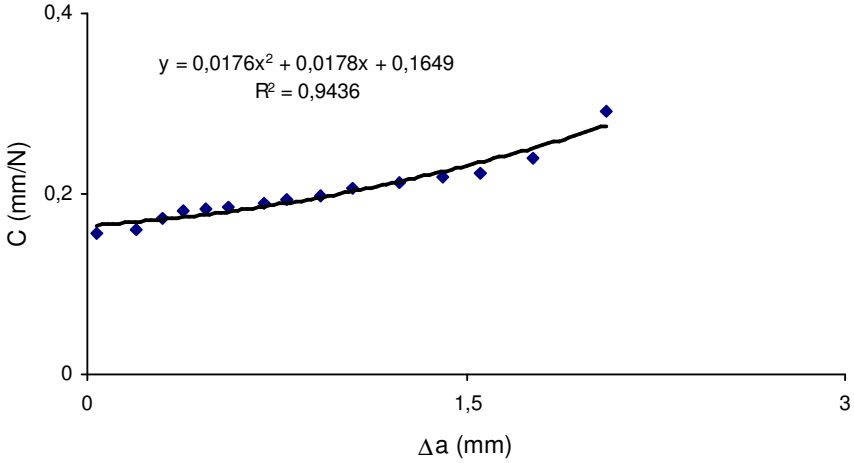
Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının (G) bulunabilmesi için öncelikle şekil 6.46' da görülen C-Δa grafikleri çizilerek eğrinin ikinci derece denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 6.46a $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

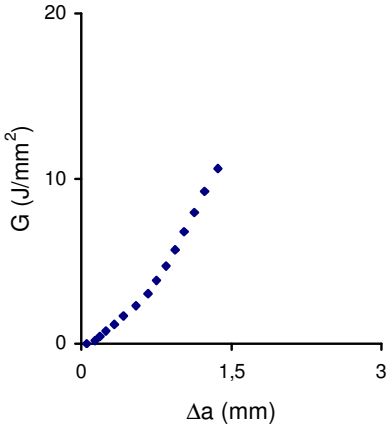


Şekil 6.46b $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

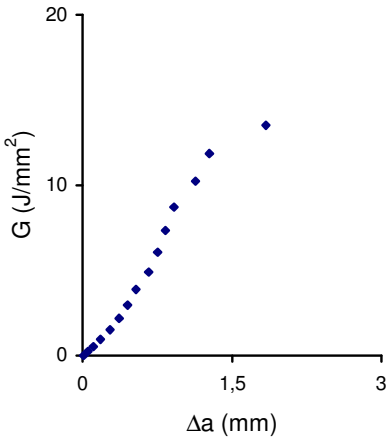


Şekil 6.46c $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin C-Δa değişimi

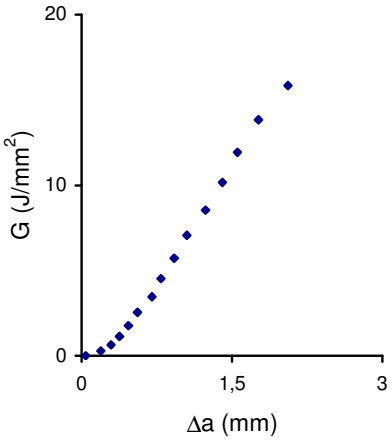
Kompliyans metodu ile hesaplanan G değerleriyle, çatlak ilerleme miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şekil 6.47' de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi başlangıçta G ve çatlak ilerlemeleri oldukça düşük düzeylerde seyir ederken kopma noktasına yaklaşıldıkça G değerlerinde artış fazlalaşırken çatlak ilerleme miktarlarında düşük artış devam etmiş ve kırılma anında yüksek çatlak ilerlemeleri görülmüştür. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında, başlangıç çatlak boyu arttıkça hem çatlak ilerlemesinde hem de şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında artış gözlenmiştir. Numunelerde G değerleri $2a = 5$ mm için 1200 N yükte 10,58 J/mm^2, $2a = 7$ mm için 1150 N yükte 13,50 J/mm^2 ve $2a = 9$ mm için 1050 N yükte 15,85 J/mm^2 olarak hesaplanmıştır. 60^{o} açılı numunelerle kıyaslandığında şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarının hemen hemen eşit oldukları tespit edilmiştir. Diğer açılı numunelerle kıyaslandığında şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında artışı olduğu görülmektedir.



Şekil 6.47a $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin G-Δa değişimi

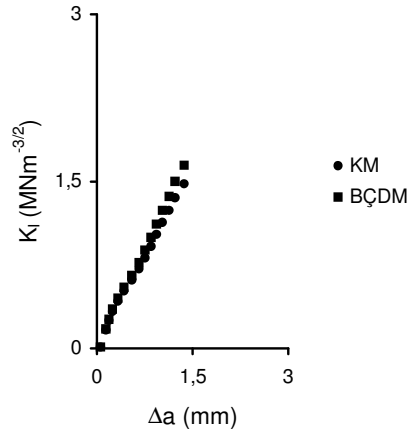


Şekil 6.47b $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin G-Δa değişimi

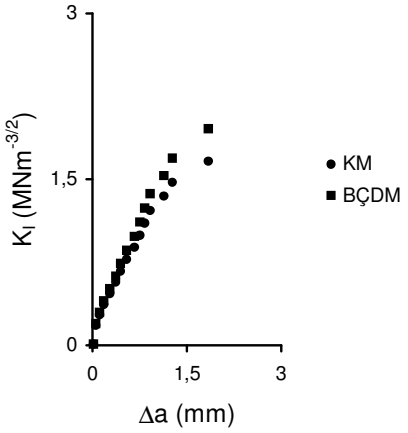


Şekil 6.47c $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin G-Δa değişimi

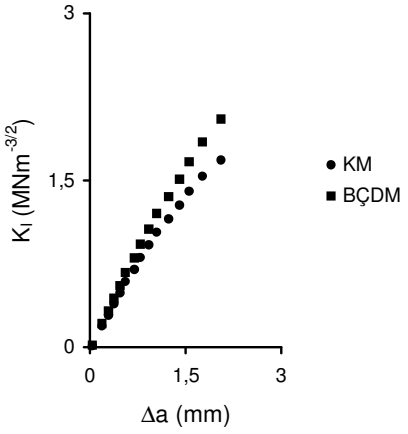
75^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -75^o açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir. Bundan dolayı çatlağın bir ucundaki ilerleme düzlemi ile diğer ucu arasındaki düzlemler farklı olduğundan açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana getirmiştir. Dolayısıyla çatlak ucunda gerilme şiddet faktörü K_I ve K_{II} oluşmaktadır. Hesaplamalarda kompliyasn metot (KM) ve başlangıç çatlak derinliği metodu (BÇDM) kullanılmıştır. Hesaplanan K_I, K_{II}, $K_{I eş}$, $K_{II eş}$ ve $K_{eş}$ değerleri Ek 1' de verilmiştir. Şekil 6.48' de 75^o açılı çatlaklı numunelerin K_I değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 6.48 incelendiğinde K_I artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Kullanılan iki metot arasında ki fark $2a = 5$ mm için ortalama %9, $2a = 7$ mm için ortalama %14, $2a = 9$ mm için ortalama %17 oranlarında gerçekleşmiştir. İki metot arasındaki fark K_{II} değerleri içinde aynı oranlarda gerçekleşmiştir. Numunelerde kırılma anındaki K_I değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 1,48 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 1,64 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 1,66 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 1,95 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 1,68 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 2,04 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.48a $\theta = 75^o$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

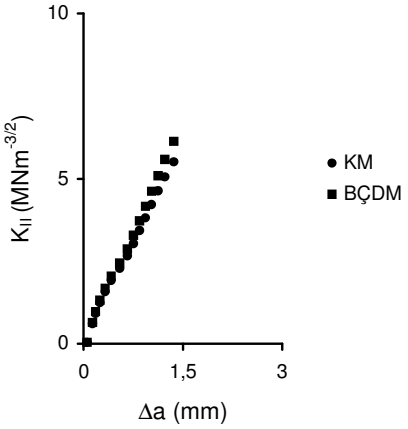


Şekil 6.48b $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

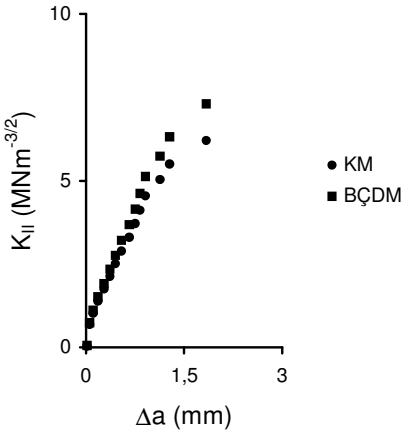


Şekil 6.48c $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I -Δa değişimi

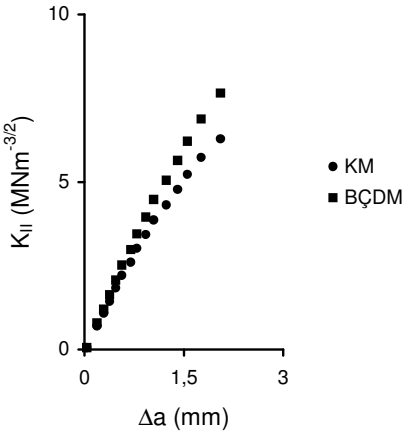
Şekil 6.49' da 75^{o} açılı çatlaklı numunelerin K_{II} değerleri ile çatlak ilerleme miktarı arasındaki değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 6.49 incelendiğinde K_{II} artarken çatlak ilerlemesinin de kararlı bir şekilde arttığı, kırılmaya yakın ise değerlerde ani artışla kararsız bölgeye girerek kırıldığı görülmektedir. Numunelerde kırılma anındaki K_{II} değerleri, $2a = 5$ mm için KM ile 5,51 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 6,12 $MNm^{-3/2}$, $2a = 7$ mm için KM ile 6,42 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 7,29 $MNm^{-3/2}$ ve $2a = 9$ mm için KM ile 6,27 $MNm^{-3/2}$ ve BÇDM ile 7,64 $MNm^{-3/2}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.49a $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 5\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

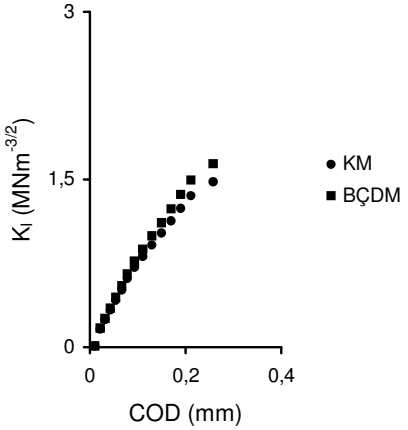


Şekil 6.49b $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 7\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

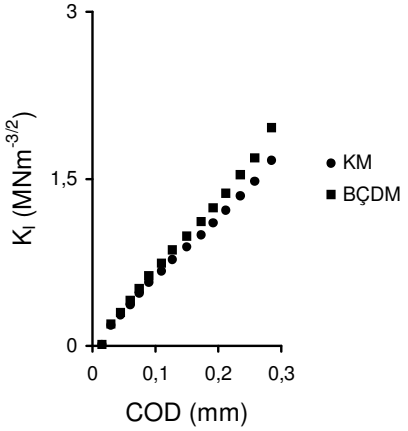


Şekil 6.49c $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 9\,\text{mm}$ çatlaklı numunenin K_{II} -Δa değişimi

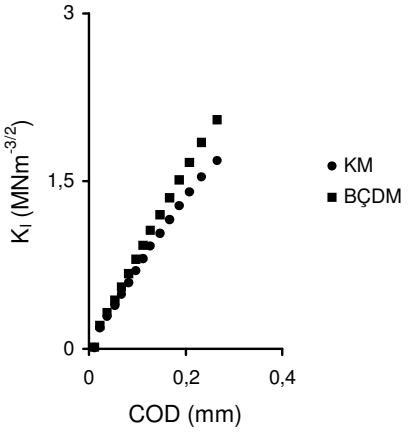
Hesaplanan K_I değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.50' de gösterilmiştir. Şekil 6.50 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında başlangıç çatlak boyu arttıkça K_I değerlerinde ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.50a $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_I-COD değişimi

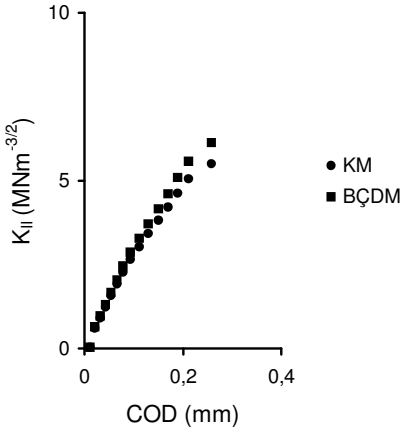


Şekil 6.50b $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_I-COD değişimi

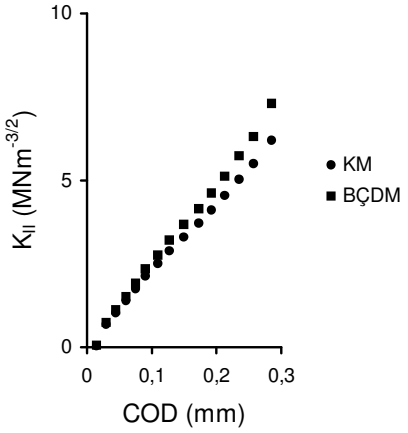


Şekil 6.50c $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_I -COD değişimi

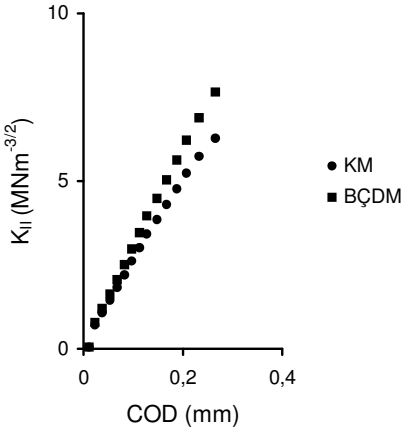
Hesaplanan K_{II} değerlerinin COD ile yaptıkları değişim şekil 6.51' de gösterilmiştir. Şekil 6.51 incelendiğinde başlangıçtan itibaren hemen hemen lineer olarak bir değişim görülmektedir. Başlangıç çatlak boyları göz önüne alındığında başlangıç çatlak boyu arttıkça K_{II} değerlerinde ve çatlak açılma miktarında artış görülmektedir. Buda yükü karşılayan kesit alanın küçülmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.51a $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 5$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi



Şekil 6.51b $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 7$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi



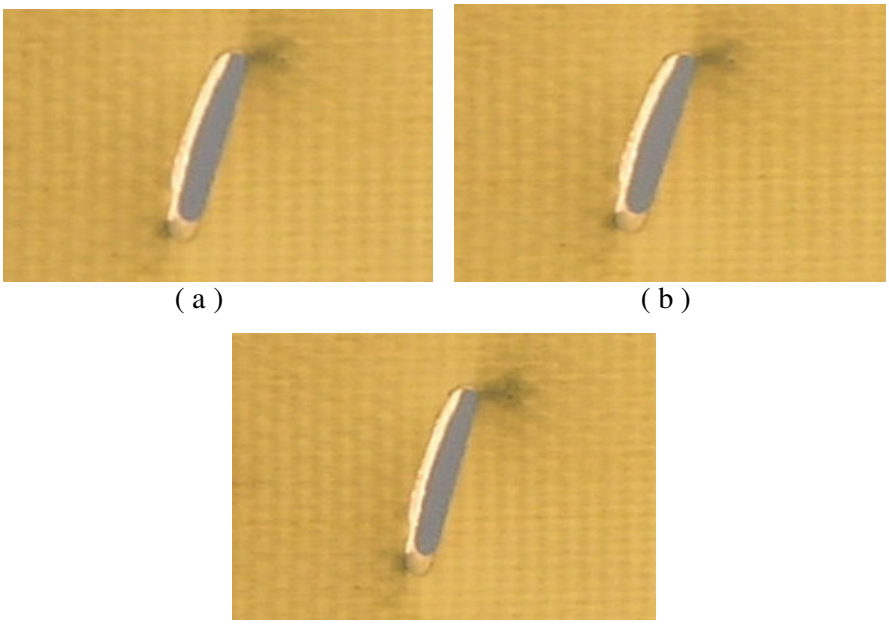
Şekil 6.51c $\theta = 75^{o}$ ve $2a = 9$ mm çatlaklı numunenin K_{II} -COD değişimi

6.7.1. 75^{o} Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

75^{o} de uygulanan yük çatlağa dik olmadığından hem ayrılma modu (mod I), hem de kayma modunda (mod II) hasar meydana gelmektedir. Eğimden dolayı yükün etki ettiği kesit alanda bir artış olacağından kırılma yüklerindeki artışın ve çatlak ilerleme miktarındaki azalmanın devam ettiği gözlenmiştir. Hasar mekanizması incelenecek olursa, deneyin başlamasıyla beraber ilk yüklemede çatlak ağızlarında beyazlaşma oluşmaya başlamıştır(Şekil 6.52a). İlerleyen yüklerde beyaz bölgede artış gözlenmiş ve bu arada fiber-matris ara yüzey ayrılması meydana

gelmiştir (şekil 6.52b ve şekil 6.52c). Bu olay kopma olayı meydana gelene kadar devam etmiştir.

75^o açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde -75^o açı yapacak şekilde kink yaparak yatayda ilerlemiştir. Bundan dolayı açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana getirmiştir. Bu sırada fiberde brinding yani saçaklanma olayının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.52d'de kink, fiber-matris ara yüzey ayrılması ve saçaklanma ile kırılma anı görülmektedir.



(a) (b)

(c)

(d)

Şekil 6.52 Numune çatlak ucunda meydana gelen hasarlanma ve kopma

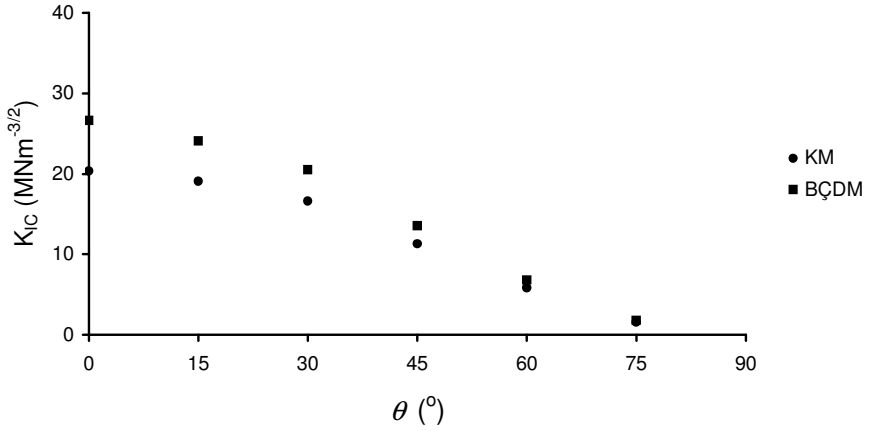
Çatlak ilerlemesi yükün artışıyla birlikte $2a = 5$ mm için Δa=1,23 mm, $2a = 7$ mm için Δa=1,275 mm ve $2a = 9$ mm için Δa=1,765 mm seviyesine kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerlerden sonra çatlak ilerlemesi hızla artarak ortalama $2a = 5$ mm için 1200 N yükte 1,365 mm, $2a = 7$ mm için 1150 N yükte 1,84 mm ve $2a = 9$ mm için 1050 N yükte 2,057 mm' de aniden kopmuştur.

6.8. Tüm Çatlak Açılarında Kritik Gerilme Şiddet Faktörü (K_C)

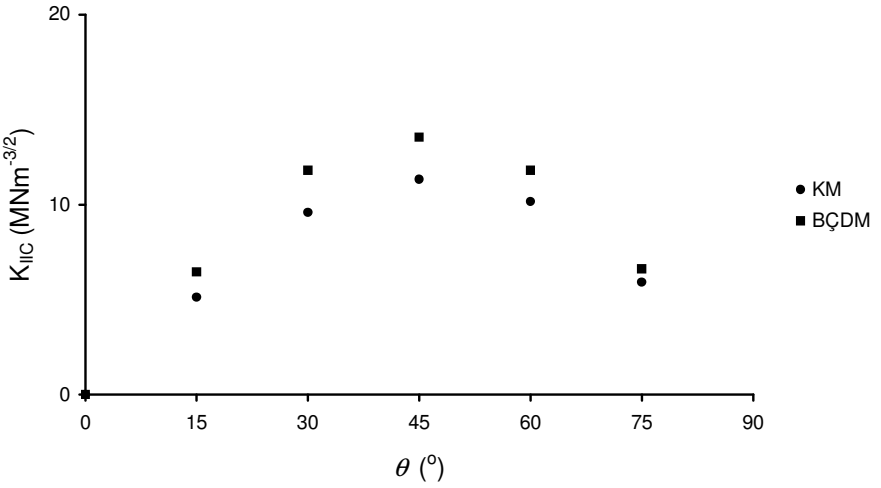
Kompozit malzeme eksenel yükleme altında gevrek olarak kırıldığından çatlaklı numunelerde $P_Q = P_{\max}$ olarak alınmış ve kritik GŞF değerleri buna göre hesaplanmıştır. Elde edilen değerler EK 2'de verilmiştir.

6.8.1. 2a = 5 mm İçin Kritik Gerilme Şiddet Faktörü

Başlangıç çatlak boyu $2a = 5$ mm için kritik GŞF değerleri (K_{IC} ve K_{IIC}) hesaplanarak elde edilen değerler EK 2' de verilmiştir. Elde edilen K_{IC} ve K_{IIC} değerleri ile çatlak açıları arasındaki değişimin grafiği şekil 6.53 ve şekil 6.54' de görülmektedir.



Şekil 6.53 $2a = 5$ mm numuneler için K_{IC}-θ değişimi



Şekil 6.54 $2a = 5$ mm numuneler için K_{IIC}-θ değişimi

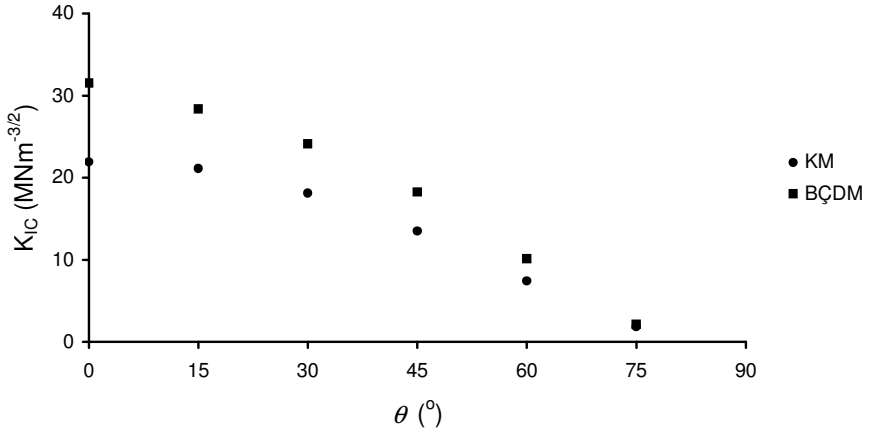
Başlangıç çatlak boyu $2a = 5$ mm numuneler için çizilen şekil 6.53 incelenecek olursa 0^o de K_{IC} değerinin en büyük değerini aldığı ve açı arttıkça K_{IC} değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. 0^o derecede sadece ayrılma modu (mod I) meydana geldiğinden ve kuvvet çatlak düzlemine dik olarak etkidiğinden K_{IC} en büyük değerini burada almıştır. 15^o den 75^o ye kadar açı arttıkça ayrılma modu (mod I) ile birlikte kayma modu (mod II) da oluşmaya başlamıştır. Eksenel yük çatlak düzlemiyle θ kadar açı yaptığından bu yükü çatlak düzlemine dik ve çatlak düzleminde iki bileşene ayırabiliriz. Çatlak düzlemine dik bileşen mod I' i meydana getirirken çatlak düzlemindeki bileşen de mod II' yi meydana getirir. Çatlak açılarının artmasıyla kırılma yükü artarken çatlak ilerleme ve çatlak açılma miktarlarında azalma olmaktadır. Bunun sonucunda da K_{IC} değerleri çatlak açısı arttıkça azalmaktadır. K_{IC} değerleri iki farklı metotla hesaplanmış ve grafik buna göre çizilmiştir. BÇDM ile hesaplanan K_{IC} değerleri KM ile hesaplanan K_{IC} değerlerinden yüksek çıkmıştır. Aradaki fark 0^o de %30 iken açı arttıkça azalarak 75^o de %11' e düşmüştür.

Şekil 6.54 incelendiğinde 0^o de mod II olmadığı için bu açıda K_{IIC} değerinin sıfır olduğu görülmektedir. 15^o den 45^o ye kadar olan kısımda grafikte de görüldüğü gibi K_{IIC} artarken, 45^o den sonra azalmaya başlamıştır. 0^o den sonra mod II' yi

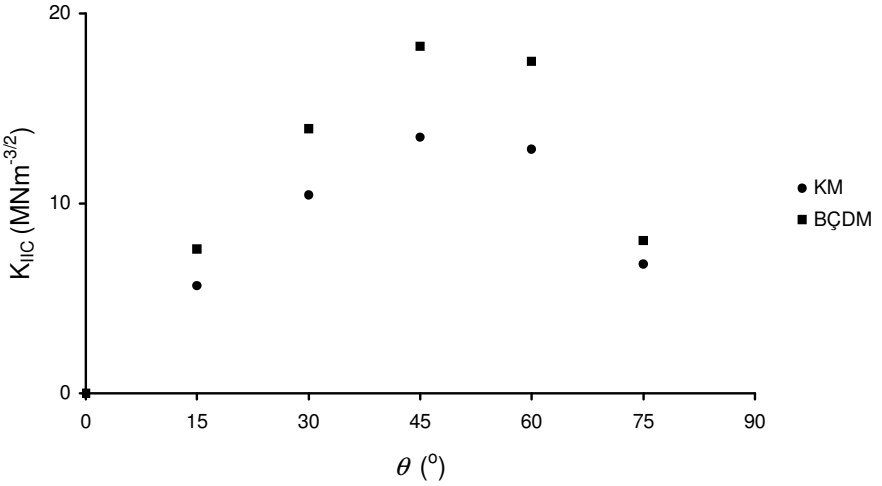
meydana getiren çatlak düzlemindeki kuvvet artarken çatlak ilerleme ve çatlak açılma miktarlarında azalma olmaktadır. Bunun yanında çatlak ilerlemesinin çatlak düzlemi doğrultusunda olması beklenirken iki yönlü $0^o/90^o$ cam kumaşın da etkisiyle çatlak ilerlemesi yatay düzlemde olacak şekilde kink yaparak gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak da 45^o ye kadar artış eğilimi gösteren K_{IIC} değeri bu açıdan sonra azalma göstermiştir. K_{IIC} değerleri iki farklı metotla hesaplanmış ve grafik buna göre çizilmiştir. BÇDM ile hesaplanan K_{IIC} değerleri KM ile hesaplanan K_{IIC} değerlerinden yüksek çıkmıştır. Aradaki fark 15^o de %26 iken açı arttıkça azalarak 75^o de %11' e düşmüştür.

6.8.2. 2a = 7 mm İçin Kritik Gerilme Şiddet Faktörü

Başlangıç çatlak boyu $2a = 7$ mm için kritik GŞF değerleri (K_{IC} ve K_{IIC}) hesaplanarak elde edilen değerler EK 2' de verilmiştir. Elde edilen K_{IC} ve K_{IIC} değerleri ile çatlak açıları arasındaki değişimin grafiği şekil 6.55 ve şekil 6.56' da görülmektedir.



Şekil 6.55 $2a = 7$ mm numuneler için K_{IC}-θ değişimi



Şekil 6.56 $2a = 7$ mm numuneler için K_{IIC}-θ değişimi

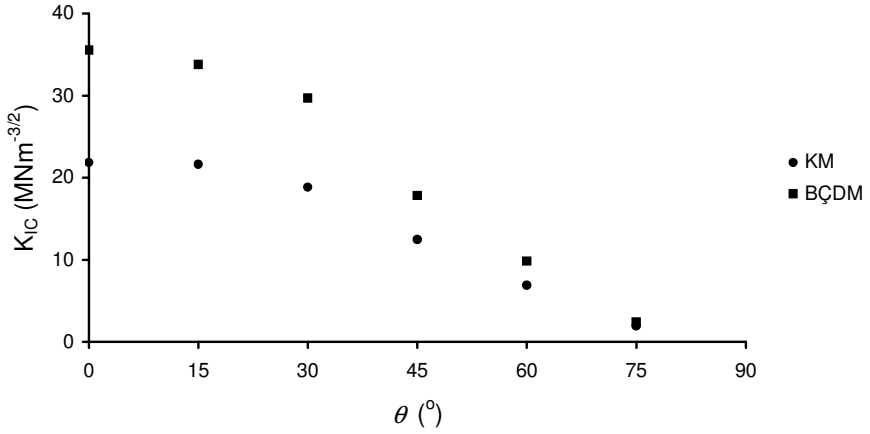
Başlangıç çatlak boyu $2a = 7$ mm numuneler için çizilen şekil 6.55 incelenecek olursa 0^o de K_{IC} değerinin en büyük değerini aldığı ve açı arttıkça K_{IC} değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. 0^o derecede sadece ayrılma modu (mod I) meydana geldiğinden ve kuvvet çatlak düzlemine dik olarak etkidiğinden K_{IC} en büyük değerini burada almıştır. 15^o den 75^o ye kadar açı arttıkça ayrılma modu (mod I) ile birlikte kayma modu (mod II) da oluşmaya başlamıştır. Eksenel yük çatlak düzlemiyle θ kadar açı yaptığından bu yükü çatlak düzlemine dik ve çatlak düzleminde iki bileşene ayırabiliriz. Çatlak düzlemine dik bileşen mod I' i meydana getirirken çatlak düzlemindeki bileşen de mod II' yi meydana getirir. Çatlak açılarının artmasıyla kırılma yükü artarken çatlak ilerleme ve çatlak açılma miktarlarında azalma olmaktadır. Bunun sonucunda da K_{IC} değerleri çatlak açısı arttıkça azalmaktadır. K_{IC} değerleri iki farklı metotla hesaplanmış ve grafik buna göre çizilmiştir. BÇDM ile hesaplanan K_{IC} değerleri KM ile hesaplanan K_{IC} değerlerinden yüksek çıkmıştır. Aradaki fark 0^o de %43 iken açı arttıkça azalarak 75^o de %18' e düşmüştür.

Şekil 6.56 incelendiğinde 0^o de mod II olmadığı için bu açıda K_{IIC} değerinin sıfır olduğu görülmektedir. 15^o den 45^o ye kadar olan kısımda grafikte de görüldüğü gibi K_{IIC} artarken 45^o den sonra azalmaya başlamıştır. 0^o den sonra mod II' yi

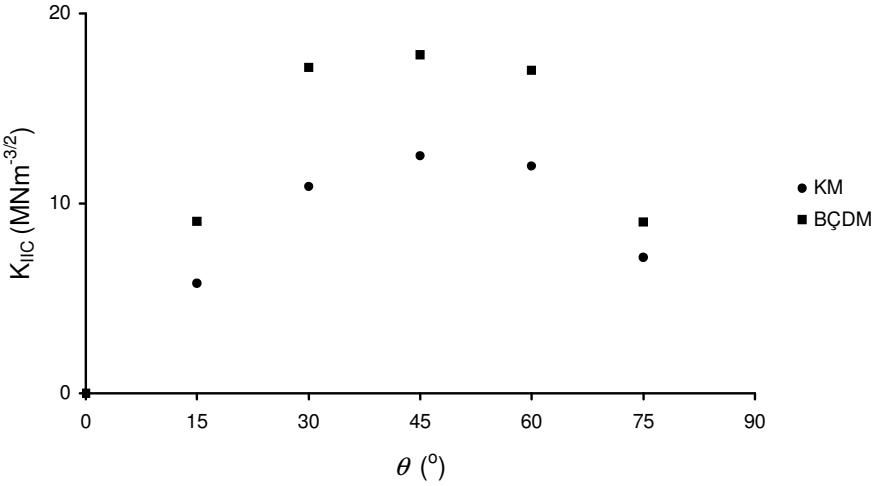
meydana getiren çatlak düzlemindeki kuvvet artarken çatlak ilerleme ve çatlak açılma miktarlarında azalma olmaktadır. Bunun yanında çatlak ilerlemesinin çatlak düzlemi doğrultusunda olması beklenirken iki yönlü $0^o/90^o$ cam kumaşın da etkisiyle çatlak ilerlemesi yatay düzlemde olacak şekilde kink yaparak gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak da 45^o ye kadar artış eğilimi gösteren K_{IIC} değeri bu açıdan sonra azalma göstermiştir. K_{IIC} değerleri iki farklı metotla hesaplanmış ve grafik buna göre çizilmiştir. BÇDM ile hesaplanan K_{IIC} değerleri KM ile hesaplanan K_{IIC} değerlerinden yüksek çıkmıştır. Aradaki fark 15^o de %34 iken açı arttıkça azalarak 75^o de %18' e düşmüştür.

6.8.3. 2a = 9 mm İçin Kritik Gerilme Şiddet Faktörü

Başlangıç çatlak boyu $2a = 9$ mm için kritik GŞF değerleri (K_{IC} ve K_{IIC}) hesaplanarak elde edilen değerler EK 2' de verilmiştir. Elde edilen K_{IC} ve K_{IIC} değerleri ile çatlak açıları arasındaki değişimin grafiği şekil 6.57 ve şekil 6.58' de görülmektedir.



Şekil 6.57 $2a = 9$ mm numuneler için K_{IC}-θ değişimi



Şekil 6.58 $2a = 9$ mm numuneler için K_{IIC}-θ değişimi

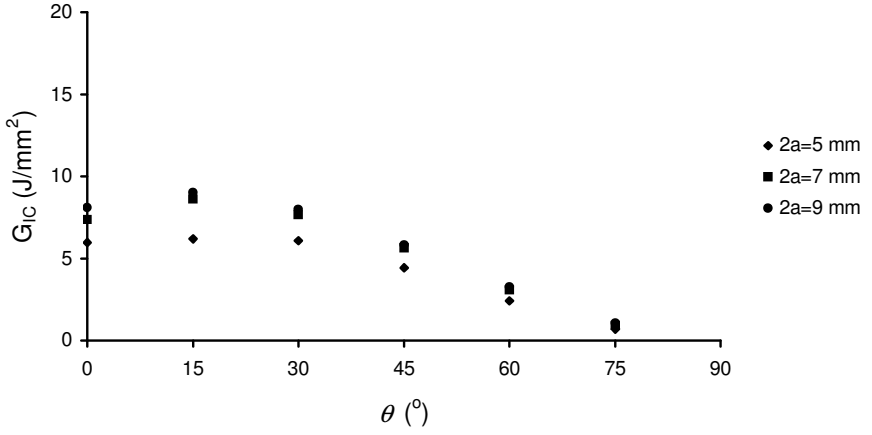
Başlangıç çatlak boyu $2a = 9$ mm numuneler için çizilen şekil 6.57 incelenecek olursa 0^o de K_{IC} değerinin en büyük değerini aldığı ve açı arttıkça K_{IC} değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. 0^o derecede sadece ayrılma modu (mod I) meydana geldiğinden ve kuvvet çatlak düzlemine dik olarak etkidiğinden K_{IC} en büyük değerini burada almıştır. 15^o den 75^o ye kadar açı arttıkça ayrılma modu (mod I) ile birlikte kayma modu (mod II) da oluşmaya başlamıştır. Eksenel yük çatlak düzlemiyle θ kadar açı yaptığından bu yükü çatlak düzlemine dik ve çatlak düzleminde iki bileşene ayırabiliriz. Çatlak düzlemine dik bileşen mod I' i meydana getirirken çatlak düzlemindeki bileşen de mod II' yi meydana getirir. Çatlak açılarının artmasıyla kırılma yükü artarken çatlak ilerleme ve çatlak açılma miktarlarında azalma olmaktadır. Bunun sonucunda da K_{IC} değerleri çatlak açısı arttıkça azalmaktadır. K_{IC} değerleri iki farklı metotla hesaplanmış ve grafik buna göre çizilmiştir. BÇDM ile hesaplanan K_{IC} değerleri KM ile hesaplanan K_{IC} değerlerinden yüksek çıkmıştır. Aradaki fark 0^o de %63 iken açı arttıkça azalarak 75^o de %26' ya düşmüştür.

Şekil 6.58 incelendiğinde 0^o de mod II olmadığı için bu açıda K_{IIC} değerinin sıfır olduğu görülmektedir. 15^o den 45^o ye kadar olan kısımda grafikte de görüldüğü gibi K_{IIC} artarken 45^o den sonra azalmaya başlamıştır. 0^o den sonra mod II' yi

meydana getiren çatlak düzlemindeki kuvvet artarken çatlak ilerleme ve çatlak açılma miktarlarında azalma olmaktadır. Bunun yanında çatlak ilerlemesinin çatlak düzlemi doğrultusunda olması beklenirken iki yönlü $0^o/90^o$ cam kumaşın da etkisiyle çatlak ilerlemesi yatay düzlemde olacak şekilde kink yaparak gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak da 45^o ye kadar artış eğilimi gösteren K_{IIC} değeri bu açıdan sonra azalma göstermiştir. K_{IIC} değerleri iki farklı metotla hesaplanmış ve grafik buna göre çizilmiştir. BÇDM ile hesaplanan K_{IIC} değerleri KM ile hesaplanan K_{IIC} değerlerinden yüksek çıkmıştır. Aradaki fark 15^o de %56 iken açı arttıkça azalarak 75^o de %26' ya düşmüştür.

6.9. Tüm Çatlak Açılarında Kritik Şekil Değiştirme Enerjisi Boşalma Miktarı

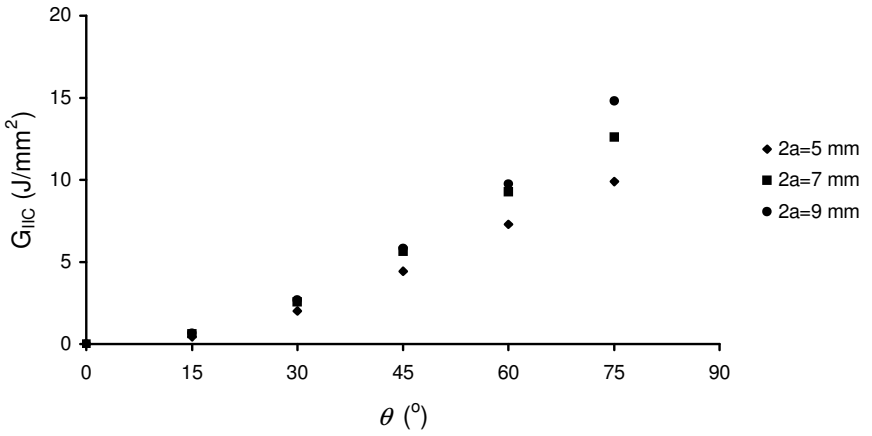
Tüm çatlak açıları ve başlangıç çatlak boyları göz önüne alınarak hesaplanan G_{IC} ve G_{IIC} değerleri EK 2' de verilmiştir. Elde edilen sonuçlarla çizilen G_{IC}-θ ve G_{IIC}-θ grafikleri şekil 6.59 ve şekil 6.60' da verilmiştir.



Şekil 6.59 Tüm başlangıç çatlak boyları için G_{IC}-θ değişimi

Şekil 6.59 incelenirse G_{IC} değerlerinin 15^o de en büyük değerini aldığını ve ondan sonra azalmaya başladığını açıkça görmekteyiz. Başlangıç çatlak boyu 5 mm için G_{IC} en küçük değerlerini alırken başlangıç çatlak boyu arttıkça G_{IC} değerlerinin

arttığı görülmüştür. Başlangıç çatlak boyu 7 ve 9 mm için G_{IC} değerleri birbirine yakın olmasına rağmen 9 mm çatlak boyunun G_{IC} değerleri biraz daha büyük çıkmıştır. Her üç başlangıç çatlak boyu için G_{IC} değerleri arasındaki fark küçük açılarda fazla iken açı büyüdükçe faklar azalmakta ve G_{IC} değerleri birbirine yaklaşmaktadır. 0^o de $2a = 5$ mm için $G_{IC} = 5{,}96$ J/mm^2, $2a = 7$ mm için $G_{IC} = 7{,}37$ J/mm^2 ve $2a = 9$ mm için $G_{IC} = 8{,}09$ J/mm^2 iken 75^o de $2a = 5$ mm için $G_{IC} = 0{,}71$ J/mm^2, $2a = 7$ mm için $G_{IC} = 0{,}90$ J/mm^2 ve $2a = 9$ mm için $G_{IC} = 1{,}06$ J/mm^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.60 Tüm başlangıç çatlak boyları için G_{IIC}-θ değişimi

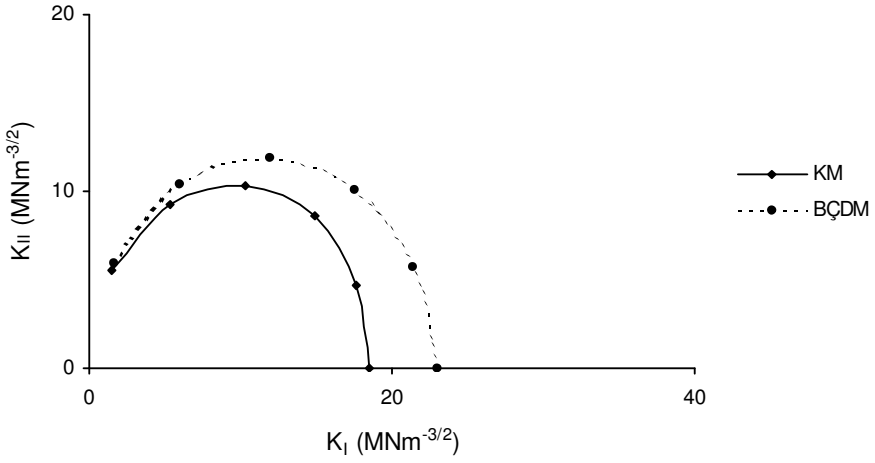
Şekil 6.60 incelenirse G_{IIC} değerlerinin 0^o den itibaren çatlak açısı büyüdükçe büyüdüğü görülmektedir. Başlangıç çatlak boyu 5 mm için G_{IIC} en küçük değerlerini alırken başlangıç çatlak boyu arttıkça G_{IIC} değerlerinin arttığı görülmüştür. Başlangıç çatlak boyu 7 ve 9 mm için G_{IIC} değerleri birbirine yakın olmasına rağmen 9 mm çatlak boyunun G_{IIC} değerleri biraz daha büyük çıkmıştır. Her üç başlangıç çatlak boyu için G_{IIC} değerleri arasındaki fark küçük açılarda az iken açı büyüdükçe faklar artmakta ve G_{IIC} değerleri birbirinden uzaklaşmaktadır. 0^o de sadece mod I gerçekleştiğinden G_{IIC} değerleri sıfırdır. 15^o de $2a = 5$ mm için

G_{IIC} = 0,44 J/mm^2, $2a = 7$ mm için G_{IIC} = 0,62 J/mm^2 ve $2a = 9$ mm için G_{IIC} = 0,65 J/mm^2 iken 75^o de $2a = 5$ mm için G_{IIC} = 9,88 J/mm^2, $2a = 7$ mm için G_{IIC} = 12,59 J/mm^2 ve $2a = 9$ mm için G_{IIC} = 14,79 J/mm^2 olarak hesaplanmıştır.

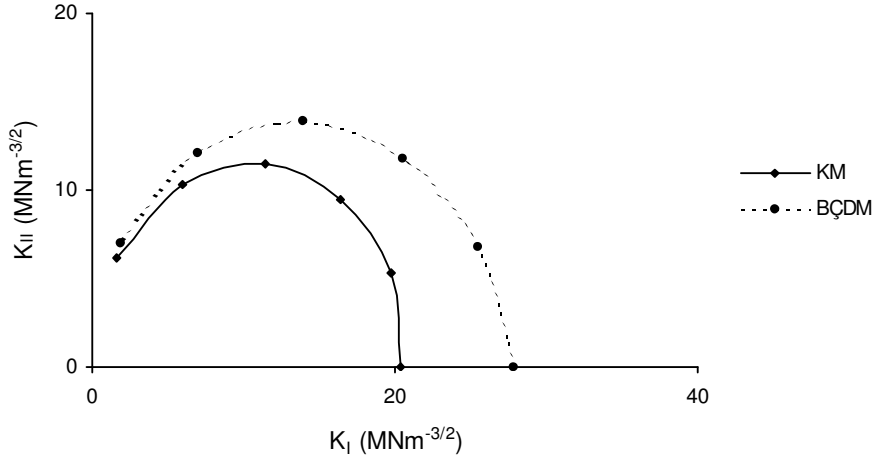
Şekil 6.59 ve şekil 6.60' a birlikte bakılırsa G_{IC} ile G_{IIC} değerlerinin birbirine ters hareket sergilediği görülür. G_{IC} değerleri çatlak açısı büyürken azalma gösterirken, G_{IIC} değerleri çatlak açısı büyürken artma göstermektedir.

6.10 Açılı Çatlaklarda Bileşik Mod İçin Gerilme Şiddet Faktörü

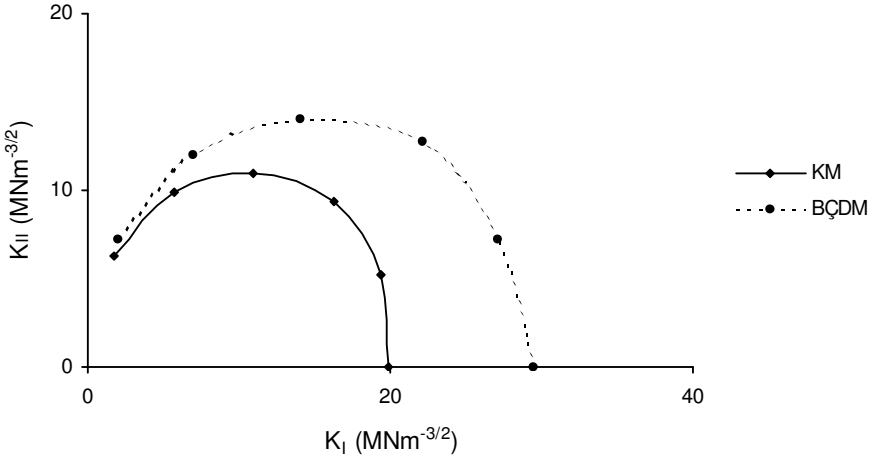
Malzeme üzerinde bulunan çatlak yatayda olduğunda eksenel olarak uygulanan yük çatlak düzlemine dik olarak etki edeceğinden sadece ayrılma modu (mod I) meydana gelir. Çatlak yatayla θ kadarlık bir açı yapıyorsa uygulanan eksenel yük çatlak düzlemine dik olarak etki edemez. Eksenel yük, çatlak düzlemine dik ve çatlak düzlemi doğrultusunda iki bileşene ayrılabilir. Çatlak düzlemine dik etki eden kuvvet ayrılma modunu (mod I) meydana getirirken, çatlak düzlemi doğrultusunda etki eden kuvvet kayma modunu (mod II) meydana getirir. Dolayısıyla açılı çatlak bulunan numuneler için bileşik moddan söz edilebilir. Şekil 6.61' de farklı başlangıç çatlak boylarında mod I ve mod II için gerilme şiddet faktörü değerleri K_I ve K_{II} arasındaki değişim verilmiştir.



Şekil 6.61a $2a = 5$ mm numunelerde bileşik modda K_I-K_{II} değişimi



Şekil 6.61b $2a = 7$ mm numunelerde bileşik modda K_I-K_{II} değişimi



Şekil 6.61c $2a = 9$ mm numunelerde bileşik modda K_I-K_{II} değişimi

Grafiklerin çiziminde kırılma anındaki gerilme şiddet faktörü değerleri kullanılmıştır. Şekil 6.61 incelendiğinde başlangıç çatlak boyu arttıkça K_I ve K_{II} değerleride artış göstermektedir. Gerilme şiddet faktörleri iki farklı metot kullanılarak hesaplandığı için grafikler her iki metot göz önüne alınarak çizilmiştir. BÇDM ile hesaplanan K_I ve K_{II} değerlerinin, KM ile hesaplanan K_I ve K_{II} değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Başlangıç çatlak boyu arttıkça iki metot arasındaki farkta artmaktadır. Bunda kuvvetin etki ettiği kesit alandaki azalmanın etkisi büyüktür. İki metot arasındaki fark $2a = 5$ mm için 0^o de %20 iken 75^o de

%8'e, $2a = 7$ mm için 0^o de %26 iken 75^o de %10'a, $2a = 9$ mm için 0^o de %32 iken 75^o de %12'ye düşmüştür. Bu düşüşte çatlağın yatayla yaptığı açı arttıkça çatlak ilerlemesi ve çatlak açılma miktarındaki düşüşlerin etkisi fazladır. Kopma yükü açı arttıkça artmasına rağmen çatlak ilerlemesi ve çatlak açılma miktarı için çok etkili bir yük artışı meydana gelmemektedir. Bununda sebebi numunelerdeki gevrek kırılmadır.

Çatlağın yatay eksenle yaptığı açı arttıkça K_I değerlerinde düzenli olarak bir azalma meydana gelirken, K_{II} değerleri 45^o ye kadar artış gösterirken bu açıdan sonra azalma göstermiştir. Buda gevrek kırılma ve çatlak ilerlemesi esnasında kink olayı meydana gelmesinin etkisidir. Çatlak ilerleme miktarı ve çatlak açılma miktarını azalması, kopma yükündeki artışında düşük düzeylerde gerçekleşmesi sonucu K_{II} değerlerinde meydana gelen artış 45^o den sonra azalmaya dönmüştür.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, iki yönlü E cam elyaf kumaş takviyeli epoksi kompozit malzemenin eksenel yükleme altında kırılma davranışları incelenmiştir. Öncelikle malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Hazırlanan deney numunelerine $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 75° açılarda ve başlangıç çatlak boyu $2a = 5, 7$ ve 9 mm olarak merkez çatlakları açılmıştır. Hazırlanan tüm numuneler eksenel yüklemeye tabi tutularak kırılma davranışları incelenmiştir. Hazırlanan numuneler ve deneyler ASTM standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Deneyler maksimum 4 kN' luk yüke ayarlanmış çekme test cihazında 0,25 mm/dk ilerleme hızında yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır.

1- Kırılma anındaki eksenel yük $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 75° lik numunelerde, aynı sırayla giderek artmıştır. Beklenildiği gibi en düşük eksenel yük 0° deki numunede olurken, en yüksek eksenel yük 75° deki numunede gerçekleşmiştir.

2- Kırılma anındaki eksenel yük başlangıç çatlak boyu $2a = 5, 7$ ve 9 mm olan numunelerde, aynı sırayla giderek azalmıştır. Beklenildiği gibi en yüksek eksenel yük 5 mm başlangıç çatlak boyundaki numunelerde olurken, en düşük eksenel yük 9 mm başlangıç çatlak boyundaki numunelerde gerçekleşmiştir.

3- Eksenel yük arttıkça x-eksenine dikey konumda olan cam elyaf lifler, çatlak ilerleme miktarına ve matris ayrılmasına bağlı olarak kopmuştur. Kırılma anında stabil olmayan çatlak ilerlemesi oluştuğu için cam elyaf topluca kopmuş, bu esnada matris de ayrılarak kırılma olayı gerçekleşmiştir.

4- 0° deki çatlaklı numunelerde uygulanan yük çatlağa dik olduğundan sadece açılma modundan dolayı hasar oluşmuş, diğer açılarda ise bileşik modda; yani açılma ve kayma modlarında gerçekleşmiştir. Ayrıca 0° açılı çatlaklı numune hariç diğer çatlak oryantasyon açılarında çatlak ilerlemesi yatayda devam ederek kink olayı meydana gelmiştir.

5- Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı G, tüm çatlak açılarındaki ve başlangıç çatlak boylarındaki numuneler için hesaplanmış ve G-Δa

grafiklerinde 0° den sonra dalgalı bir seyir göstermesine rağmen giderek artış göstermiştir. Çatlak ilerleme miktarı ise tam tersine en yüksek değerini 0° de almış ve diğer açılarda giderek azalma göstermiştir.

6- Kompliyans metot ve başlangıç çatlak derinliği metodu ile yapılan hesaplamalardan oluşturulan K_I-Δa, K_I-COD ve K_{II}-Δa, K_{II}-COD grafiklerindeki eğimler birbirlerine yakın denecek şekilde çıkmıştır.

7- Tüm çatlak açılarındaki ve başlangıç çatlak boyundaki numunelerin çekme deneyi sonucu elde edilen grafiklerden tümüyle elastik olarak davranan bir malzemenin kararsız çatlak ilerleyişini tanımlayan III. tip diyagrama uyduğu görülmüştür. P_Q, numunenin kırıldığı yük alınarak K_{IC}, K_{IIC} ve G_{IC}, G_{IIC} değerleri hesaplanmıştır.

8- Kompliyans metot ve başlangıç çatlak derinliği metodu ile yapılan hesaplamalardan oluşturulan $K_{IC}-\theta$ ve $K_{IIC}-\theta$ grafiklerindeki eğimler birbirlerine yakın denecek şekilde çıkmıştır. $K_{IC}-\theta$ grafiğinden K_{IC}' nin en büyük değerini 0° deki numunede alırken, diğer açılarda giderek azaldığı görülmüştür. $K_{IIC}-\theta$ grafiğinden K_{IIC}' nin 0° de oluşmadığı, 45° ye kadar artış gösterdiği en büyük değerini bu açıda aldıktan sonra tekrar azalmaya başladığı görülmüştür.

9- Hesaplamalar sonucu oluşturulan $G_{IC}-\theta$ grafiğinden G_{IC}' nin en büyük değerini 0° deki numunede alırken, diğer açılarda giderek azaldığı görülmüştür. $G_{IIC}-\theta$ grafiğinde ise tam tersi G_{IIC}' nin en küçük değerini 0° deki numunede alırken, diğer açılarda giderek arttığı görülmüştür.

10- Üretilen kompozit malzeme otomotiv gövde panelleri, mutfak eşyaları, ambalaj malzemeleri, boru ve tank üretimi gibi bir çok alanda güvenli bir şekilde kullanılabilir hale gelmiştir.

Mevcut çalışmaya ilave olarak, sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak deney sonuçları teorik sonuçlarla kıyaslanabilir. Deneyler farklı kompozit malzemeler için tekrarlanabileceği gibi, tüm çatlak geometrileri içinde bu deneysel çalışma tekrarlanabilir.

8. KAYNAKLAR

Akdemir, A. 1992, Yüzey çatlaklı cam takviyeli plastiklerde gerilmeli korozyon, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Allen, R.C. 1979. Some corrosion mechanisms in attack of resin and resin- glass laminates, Polymer Eng. and Science, 19(5) : 329-336.

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

ASTM E 647 - 93 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.

Bax, J. 1970. Deformation behaviour and failure of glass fiber reinforced resign material, Plastics and polymers, 2 : 27-30.

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

Bond, I.P. 1999, Fatigue life prediction for GRP subjected to variable amplitude loading, Composites : Part A 30, 961–970.

Boniface, L., Ogin, S.L. 1989. Application of the paris equation to the fatigue growth of transverse ply cracks, Int. j. Comp. Mater., 23 : 35-54.

Brechet, Y., et al., 1991, Acta Metal. Mater. 39 :1781.

Cherry, B.W., Harrison, N.L. 1971. The strength and fracture toughness of glass fiber reinforced plastics, Applied polymer symposium, 17 : 73-94.

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

Eldeniz, İ., 1992, Yüzey çatlaklı kompozit malzemelerde yorulma çatlak büyümesi ve tabaka ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

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

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

Ferry, L., Perreux, D., Rousseau, J., Richard, F. 1998. Interaction between plasticity and damage in the behaviour of $[+\Phi,-\Phi]_n$ fibre reinforced composite pipes in biaxial loading (internal pressure and tension), Composites Part B 29B 715–723.

Gross, B., Srawley, J., Brown, W.F. 1964, Stress Intensity Factors for a Single Edge Notch Tension Specimen by Boundary Collocation of a stress Function, NASA TN D-2395.

Harel, H., Marom, G., Fischer, S., Roman, I. 1980. Effect of reinforcement geometry on stress intensity factor calibrations in composites. April : 69-72.

Hashin, Z., Rotten, A. 1973. A fatigue criterion for fiber reinforced materials, Jour. Comp. Materials, 7 : 448-464.

Henaff-Garden, C. 1990, Influence de la séquence d'empilement sur la fissuration en fatigue des plis transverses de stratifiés a fibres longues, Thése de Doktorat, Université de Poitiers, France.

Highsmith, A.L., Reisfinder, K.L. 1982. Stiffness reduction mechanisms in composite laminates, in: Reisfinder, K.L., editor, Damage in comosite materials, ASTM STP 775, pp.103-117.

Hine, P., Brew, B., Duvkett, R.A., Ward, I.M. 1988. The fracture behaviour of carbon fiber reinforced polyether etherketone, Composite science and Tech., 33 : 35-71.

Hwang, W., Han, K.S. 1986. Fatigue of Composites – fatigue modulus consept and life prediction, Journal of composie materials, 20 : 154-165.

Hwang, W., Han, K. 1986. Fatigue of composite material - damage model and life prediction, Composite material Fatigue and fracture, 2nd. Volume, ASTM STP 1012, Paul A. Lagace(Vol.Ed.) American society for testing and materials, Philadelphia, 87-102.

Irwin, G.R. 1957, Analysis of Stress and Strain Near the End of Crack Traversing a Plate, Transaction ASME, J Applications Mechanics, pp.24.

Ishai, O. 1975. Environmental effects on deformation, strength and degradation of unidirectional glass fiber reinforced plastics, Journal of survey, Polymer Eng. and Science, 15(7) : 486-490.

Kayalı, E.S. 1983, Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İ.T.Ü. Yayınları pp.143-170.

Kelly, A., Davies, G.J. 1965, The principles of the fibre reinforced metals, Met. Rev., pp: 10-37.

Lee, L.J., Tang, J.N., Sheu, D.Y. 1993. Prediction of fatigue life for matrix dominated composite laminates, Composite Science and technology, 46 : 21-28

Lin, X.B., Smith, R.A. 1999, Finite Element Modelling of Fatigue Crack Growth of Surface Cracked Plates Part I: The Numerical Technigue, Engineering Fracture Mechanics, V.63, pp.503-522.

Lin, X.B., Smith, R.A. 1999, Finite Element Modelling of Fatigue Crack Growth of Surface Cracked Plates Part II: Carck Shape Change, Engineering Fracture Mechanics, V.63, pp.523-540.

Marom, G., Fischer, S., Tuler, F.R., Wagner, H.D. 1978. Hybrid effect in composites, J. comp. mater. Science, 13 : 14-19.

Moussa, B., Simpson, E.J., Garimella, S.V. 2002, Concentration fields in the solidification processing of metal matrix composites, International Journal of Heat and Mass Transfer 45 : 4251-4266.

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.

O'brien, T.K., Reisfinder, K.L. 1981. Fatigue damage evaluation through stiffness measurement in boron-epoxy laminates, Journal of composite materials, 15 : 55-70.

Ochiai, S., Peters, W.M., 1982. Tensile fracture of centre notched angle ply (0/45/0)s and (0/90)s graphite epoxy composites, J. Mater. Sc., 17 : 417-428.

Paris, C.P., Sih, G.C. 1965, Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and It's Aplications, ASTM STP No.381, American Society for Testing and Metarials, Philadelphia.

Peters, W.M. 1983. On the increasing fracture toughness at increasing notch length of 0/90 and 0/45/0 graphite epoxy laminates, composites, 14 : 365-369.

Rebiere, J.L., Maatallah, M.N., Gamby, D. 2001. İnitiation and growth of longitudional and transverse cracks in composite cross ply laminates, composite sturtures 53 : 173-187.

Reisfinder, K.L., Schulte, K., Duke, J.C. 1983. Long term fatigue behaviour of composite materials, ASTM STP 813, American Society for testing and materials, pp. 136-159.

Reisfinder, K.L. 1977, Some fundamental aspects of the tafigue and fracture response of composite materials, İn: Proceeding of 30th. annual society of engineering meeting, 14-6, Leheigh University Bethehem P.A.

Richard, F., Perreux, D. 2000. A reliability method for optimization of $+\phi$, $-\phi$ fiber reinforced composite pipes, Reliability Engineering and System Safety, 68 : 53–59.

Rotten, A. 1979. A fatigue failure of multidirectional laminate, AIAA. J., 17(3) : 271-277.

Sanford, R.J., Stoneisifer, F.R. 1971. Fracture toughness measurements in unidirectional glass reinforced plastics, J. of comp. materials, 5 : 113-117.

Smiley, A.J., Pipes, R.B. 1987. Rate effects on mode 1 interlaminar fracture toughness in composite materials, J. Comp. Materilas, 21 : 671-687.

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.

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

Taya, M., Arsenault R.J. 1988, Metal matrix composites-thermal and mechanical behaviour, Pergamon Pres.

Tong, J. 2002. Characteristics of fatigue crack growth in GFRP laminates, International Journal of Fatigue, 24 : 291–297.

Xiangiao, Y. 2005. Stress Intensives and Propagation of Mixed Mode Cracks, Engineering Failure Analysis.

Wells, J.K., Beaumont, P. 1985. Crack tip energy absorbtion processes in fibre composites, journal of materials science, 20 : 2735-2749.

Westergaard, H.M. 1939, Bearing Pressures and Cracks, Journal of Applied Mechanics, ASME.

Ying, S., Liao, K. 2002. Environmental fatigue behavior and life prediction of unidirectional glass–carbon/epoxy hybrid composites, International Journal of Fatigue, 24 : 847–859.

9. EKLER

EK 1 a) 2a = 5 mm - $\theta = 0^o$ numuneye ait deney sonuçları

θ (^{o})	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
0	0,03	0,00253	60	0	60	0,33333	0,02
0	0,185	0,002685	120	0	120	0,33333	0,04
0	0,265	0,002765	180	0	180	0,33333	0,06
0	0,345	0,002845	240	0	240	0,33333	0,08
0	0,41	0,00291	300	0	300	0,33333	0,1
0	0,475	0,002975	360	0	360	0,33611	0,121
0	0,515	0,003015	420	0	420	0,34047	0,143
0	0,56	0,00306	480	0	480	0,34271	0,1645
0	0,595	0,003095	540	0	540	0,345365	0,1865
0	0,635	0,003135	600	0	600	0,34667	0,208
0	0,695	0,003195	660	0	660	0,34848	0,23
0	0,795	0,003295	720	0	720	0,353475	0,2545
0	0,925	0,003425	780	0	780	0,359615	0,2805
0	1,205	0,003705	840	0	840	0,368455	0,3095
0	2,37	0,00487	900	0	900	0,424445	0,382

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,026443	0	0,026443	0,89153	0	0,89153	0	0,89153
0,10578	0	0,10578	1,836868	0	1,836868	0	1,836868
0,238018	0	0,238018	2,796049	0	2,796049	0	2,796049
0,423165	0	0,423165	3,781613	0	3,781613	0	3,781613
0,661222	0	0,661222	4,780712	0	4,780712	0	4,780712
0,952199	0	0,952199	5,800572	0	5,800572	0	5,800572
1,296082	0	1,296082	6,812677	0	6,812677	0	6,812677
1,69289	0	1,69289	7,843806	0	7,843806	0	7,843806
2,142612	0	2,142612	8,874605	0	8,874605	0	8,874605
2,645267	0	2,645267	9,924188	0	9,924188	0	9,924188
3,200895	0	3,200895	11,02058	0	11,02058	0	11,02058
3,809571	0	3,809571	12,20915	0	12,20915	0	12,20915
4,471324	0	4,471324	13,48497	0	13,48497	0	13,48497
5,1866	0	5,1866	15,10424	0	15,10424	0	15,10424
5,958409	0	5,958409	18,55384	0	18,55384	0	18,55384

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,39E-05	11,12595	0,999752	0,991787	0	0,991787	0	0,991787
5,36E-05	22,40645	0,999722	2,057594	0	2,057594	0	2,057594
5,34E-05	33,7306	0,999705	3,143277	0	3,143277	0	3,143277
5,32E-05	45,13654	0,999689	4,266549	0	4,266549	0	4,266549
5,3E-05	56,58669	0,999675	5,409599	0	5,409599	0	5,409599
5,29E-05	68,10443	0,999661	6,582943	0	6,582943	0	6,582943
5,28E-05	79,59973	0,999652	7,745591	0	7,745591	0	7,745591
5,27E-05	91,1577	0,999642	8,936166	0	8,936166	0	8,936166
5,26E-05	102,7163	0,999634	10,12663	0	10,12663	0	10,12663
5,25E-05	114,338	0,999625	11,34495	0	11,34495	0	11,34495
5,23E-05	126,1179	0,999611	12,63288	0	12,63288	0	12,63288
5,21E-05	138,217	0,999587	14,05965	0	14,05965	0	14,05965
5,18E-05	150,6373	0,999555	15,62217	0	15,62217	0	15,62217
5,11E-05	164,3578	0,999484	17,72749	0	17,72749	0	17,72749
4,83E-05	186,2891	0,999145	23,0325	0	23,0325	0	23,0325

EK 1 b) 2a = 5 mm - θ = 15^o numuneye ait deney sonuçları

θ (^{o})	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
15	0,04	0,00254	63	16,3056	60,85333	0,28571	0,018
15	0,175	0,002675	126	32,6112	121,7067	0,28571	0,036
15	0,265	0,002765	189	48,9168	182,56	0,28571	0,054
15	0,32	0,00282	252	65,2224	243,4133	0,28571	0,072
15	0,375	0,002875	315	81,528	304,2666	0,28571	0,09
15	0,41	0,00291	378	97,8336	365,12	0,28571	0,108
15	0,49	0,00299	441	114,1392	425,9733	0,28798	0,127
15	0,54	0,00304	504	130,4448	486,8266	0,290675	0,1465
15	0,625	0,003125	567	146,7504	547,6799	0,29718	0,1685
15	0,705	0,003205	630	163,056	608,5333	0,30238	0,1905
15	0,755	0,003255	693	179,3616	669,3866	0,30447	0,211
15	0,825	0,003325	756	195,6672	730,2399	0,30688	0,232
15	0,885	0,003385	819	211,9728	791,0933	0,31013	0,254
15	1,085	0,003585	882	228,2784	851,9466	0,31803	0,2805
15	2,01	0,00451	950	245,8781	917,6295	0,361965	0,3475

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,0272	0,001953	0,029153	0,875124	0,234489	0,905995	0,452997	1,012933
0,10881	0,007812	0,116622	1,796158	0,481279	1,85952	0,92976	2,079006
0,244836	0,017578	0,262415	2,739187	0,733963	2,835815	1,417907	3,170537
0,43528	0,031252	0,466532	3,688395	0,988302	3,818507	1,909254	4,269221
0,680149	0,048832	0,728981	4,655237	1,247367	4,819456	2,409728	5,388316
0,979436	0,07032	1,049756	5,620185	1,505924	5,818444	2,909222	6,505218
1,333189	0,095719	1,428908	6,646402	1,780898	6,880861	3,440431	7,693037
1,741363	0,125024	1,866388	7,659136	2,052259	7,929321	3,96466	8,86525
2,204032	0,158242	2,362274	8,73616	2,340847	9,044339	4,522169	10,11188
2,721165	0,195371	2,916536	9,830309	2,634023	10,17708	5,088542	11,37833
3,292715	0,236406	3,529121	10,89736	2,919939	11,28178	5,640889	12,61341
3,918777	0,281356	4,200132	12,01518	3,219458	12,43903	6,219515	13,90726
4,599295	0,330215	4,92951	13,13336	3,519074	13,59666	6,798329	15,20153
5,334771	0,383019	5,717791	14,55547	3,900125	15,06893	7,534463	16,84757
6,192711	0,444617	6,637328	17,58433	4,711706	18,20464	9,102318	20,3534

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,41E-05	11,64328	0,99975	0,970288	0,259988	1,004516	0,502258	1,123083
5,38E-05	23,42685	0,999724	2,003449	0,536822	2,074123	1,037061	2,31894
5,36E-05	35,28196	0,999705	3,067601	0,821961	3,175814	1,587907	3,550668
5,34E-05	47,15883	0,999694	4,140794	1,109522	4,286865	2,143432	4,792861
5,33E-05	59,09451	0,999682	5,239135	1,403822	5,423951	2,711976	6,064162
5,32E-05	71,02534	0,999675	6,335074	1,697478	6,558551	3,279275	7,332683
5,3E-05	83,16291	0,999657	7,518884	2,014679	7,784121	3,892061	8,702912
5,29E-05	95,25889	0,999646	8,684163	2,326915	8,990508	4,495254	10,05169
5,27E-05	107,5811	0,999627	9,943569	2,664371	10,29434	5,14717	11,50942
5,25E-05	119,9716	0,999608	11,22974	3,009	11,62588	5,812942	12,99813
5,24E-05	132,271	0,999597	12,47714	3,343239	12,91728	6,458641	14,44196
5,22E-05	144,7598	0,99958	13,80114	3,698005	14,28799	7,143997	15,97446
5,21E-05	157,2567	0,999565	15,12713	4,053303	15,66076	7,83038	17,50926
5,16E-05	170,9288	0,999515	16,92064	4,533873	17,51754	8,75877	19,58521
4,94E-05	192,3838	0,999256	21,35786	5,722822	22,11129	11,05564	24,72117

EK 1 c) 2a = 5 mm - $\theta = 30^{o}$ numuneye ait deney sonuçları

θ (^{o})	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
30	0,051	0,002551	70	35	60,62178	0,22857	0,016
30	0,135	0,002635	140	70	121,2436	0,22857	0,032
30	0,2	0,0027	210	105	181,8653	0,22857	0,048
30	0,25	0,00275	280	140	242,4871	0,22857	0,064
30	0,295	0,002795	350	175	303,1089	0,22857	0,08
30	0,35	0,00285	420	210	363,7307	0,23095	0,097
30	0,415	0,002915	490	245	424,3524	0,23469	0,115
30	0,475	0,002975	560	280	484,9742	0,2375	0,128
30	0,55	0,00305	630	315	545,596	0,240475	0,1515
30	0,625	0,003125	700	350	606,2178	0,245	0,1715
30	0,69	0,00319	770	385	666,8396	0,248705	0,1915
30	0,745	0,003245	840	420	727,4613	0,252975	0,2125
30	0,845	0,003345	910	455	788,0831	0,257145	0,234
30	0,935	0,003435	980	490	848,7049	0,27092	0,2655
30	1,58	0,00408	1050	525	909,3267	0,293405	0,3065

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{IIleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,026994	0,008998	0,035992	0,78332	0,45225	0,9045	0,78332	1,196541
0,107981	0,035994	0,143974	1,592224	0,919271	1,838542	1,592224	2,432163
0,242967	0,080989	0,323956	2,417615	1,39581	2,791621	2,417615	3,692967
0,431955	0,143985	0,575939	3,253197	1,878234	3,756468	3,253197	4,96934
0,674948	0,224983	0,899931	4,099632	2,366924	4,733848	4,099632	6,262292
0,97196	0,323987	1,295946	4,967727	2,868119	5,736237	4,967727	7,588328
1,323	0,441	1,763999	5,861401	3,384081	6,768163	5,861401	8,953438
1,728065	0,576022	2,304087	6,767334	3,907122	7,814244	6,767334	10,33727
2,187187	0,729062	2,916249	7,70862	4,450574	8,901148	7,70862	11,77511
2,700359	0,90012	3,600479	8,669804	5,005514	10,01103	8,669804	13,24334
3,26757	1,08919	4,35676	9,635458	5,563034	11,12607	9,635458	14,7184
3,888814	1,296271	5,185085	10,60164	6,120858	12,24172	10,60164	16,19427
4,564245	1,521415	6,08566	11,66073	6,732328	13,46466	11,66073	17,81206
5,293746	1,764582	7,058329	12,72553	7,347089	14,69418	12,72553	19,43857
6,079494	2,026498	8,105992	14,85958	8,579182	17,15836	14,85958	22,69838

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,47E-05	12,80142	0,999748	0,859399	0,496174	0,992348	0,859399	1,312753
5,45E-05	25,69758	0,999732	1,753317	1,012278	2,024556	1,753317	2,678236
5,43E-05	38,65706	0,999719	2,669843	1,541435	3,08287	2,669843	4,078253
5,42E-05	51,65685	0,999709	3,600536	2,07877	4,157541	3,600536	5,49991
5,41E-05	64,69998	0,999699	4,546382	2,624855	5,249709	4,546382	6,944713
5,4E-05	77,82988	0,999688	5,522519	3,188428	6,376855	5,522519	8,435786
5,38E-05	91,06478	0,999674	6,534842	3,772893	7,545785	6,534842	9,982136
5,37E-05	104,3533	0,999661	7,565057	4,367688	8,735375	7,565057	11,55582
5,35E-05	117,7926	0,999644	8,646228	4,991902	9,983805	8,646228	13,20733
5,33E-05	131,3226	0,999627	9,757076	5,63325	11,2665	9,757076	14,90418
5,31E-05	144,8789	0,999612	10,87558	6,279017	12,55803	10,87558	16,61272
5,3E-05	158,4432	0,999599	11,99582	6,925791	13,85158	11,99582	18,32392
5,28E-05	172,4274	0,999575	13,25404	7,652221	15,30444	13,25404	20,24587
5,26E-05	186,4541	0,999553	14,52361	8,385208	16,77042	14,52361	22,18517
5,1E-05	205,8345	0,999382	17,47231	10,08764	20,17528	17,47231	26,68939

EK 1 d) 2a = 5 mm - θ = 45° numuneye ait deney sonuçları

θ (°)	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
45	0,045	0,002545	73	51,6188	51,6188	0,20548	0,015
45	0,21	0,00271	146	103,2376	103,2376	0,20548	0,03
45	0,27	0,00277	219	154,8564	154,8564	0,20548	0,045
45	0,325	0,002825	293	207,1823	207,1823	0,20548	0,06
45	0,385	0,002885	365	258,094	258,094	0,20548	0,075
45	0,45	0,00295	438	309,7128	309,7128	0,20776	0,091
45	0,51	0,00301	511	361,3316	361,3316	0,213305	0,109
45	0,58	0,00308	584	412,9504	412,9504	0,217465	0,127
45	0,65	0,00315	657	464,5692	464,5692	0,22146	0,1455
45	0,71	0,00321	730	516,188	516,188	0,22603	0,165
45	0,765	0,003265	803	567,8067	567,8067	0,23101	0,1855
45	0,845	0,003345	876	619,4255	619,4255	0,23573	0,2065
45	0,925	0,003425	949	671,0443	671,0443	0,241305	0,229
45	1,075	0,003575	1022	722,6631	722,6631	0,254405	0,26
45	1,55	0,00405	1100	777,8175	777,8175	0,277135	0,3065

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,019571	0,019571	0,039143	0,543953	0,543953	0,769266	0,769266	1,087906
0,078293	0,078293	0,156587	1,122618	1,122618	1,587622	1,587622	2,245237
0,176167	0,176167	0,352334	1,702467	1,702467	2,407652	2,407652	3,404934
0,315346	0,315346	0,630691	2,300232	2,300232	3,253019	3,253019	4,600463
0,489388	0,489388	0,978777	2,895747	2,895747	4,095204	4,095204	5,791493
0,704749	0,704749	1,409497	3,513824	3,513824	4,969297	4,969297	7,027647
0,959278	0,959278	1,918555	4,140941	4,140941	5,856175	5,856175	8,281882
1,25299	1,25299	2,505979	4,787217	4,787217	6,770148	6,770148	9,574434
1,585886	1,585886	3,171771	5,446476	5,446476	7,702481	7,702481	10,89295
1,957958	1,957958	3,915916	6,109004	6,109004	8,639436	8,639436	12,21801
2,369212	2,369212	4,738424	6,77723	6,77723	9,58445	9,58445	13,55446
2,819701	2,819701	5,639403	7,483372	7,483372	10,58309	10,58309	14,96674
3,309401	3,309401	6,618802	8,203359	8,203359	11,6013	11,6013	16,40672
3,838487	3,838487	7,676975	9,02577	9,02577	12,76437	12,76437	18,05154
4,448101	4,448101	8,896202	10,33989	10,33989	14,62282	14,62282	20,67979

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (Pa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,56E-05	13,11785	0,999749	0,586404	0,586404	0,829301	0,829301	1,172808
5,53E-05	26,42373	0,999717	1,218884	1,218884	1,723762	1,723762	2,437767
5,51E-05	39,73917	0,999704	1,853273	1,853273	2,620924	2,620924	3,706546
5,5E-05	53,29467	0,999693	2,509986	2,509986	3,549656	3,549656	5,019971
5,48E-05	66,56532	0,99968	3,168082	3,168082	4,480344	4,480344	6,336164
5,47E-05	80,10628	0,999666	3,855228	3,855228	5,452115	5,452115	7,710455
5,45E-05	93,70411	0,999653	4,555242	4,555242	6,442085	6,442085	9,110484
5,44E-05	107,4213	0,999637	5,28241	5,28241	7,470456	7,470456	10,56482
5,42E-05	121,2236	0,999621	6,028443	6,028443	8,525506	8,525506	12,05689
5,41E-05	135,0517	0,999607	6,779729	6,779729	9,587984	9,587984	13,55946
5,39E-05	148,9206	0,999594	7,539684	7,539684	10,66272	10,66272	15,07937
5,37E-05	163,0394	0,999575	8,354936	8,354936	11,81566	11,81566	16,70987
5,35E-05	177,2594	0,999555	9,191533	9,191533	12,99879	12,99879	18,38307
5,32E-05	192,1871	0,999518	10,18128	10,18128	14,3985	14,3985	20,36256
5,2E-05	211,3866	0,99939	11,91839	11,91839	16,85514	16,85514	23,83677

EK 1 e) 2a = 5 mm - θ = 60° numuneye ait deney sonuçları

θ (°)	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
60	0,06	0,00256	77	66,68396	38,5	0,18182	0,014
60	0,14	0,00264	154	133,3679	77	0,18182	0,028
60	0,275	0,002775	231	200,0519	115,5	0,18182	0,042
60	0,35	0,00285	308	266,7358	154	0,18182	0,056
60	0,41	0,00291	385	333,4198	192,5	0,18182	0,07
60	0,455	0,002955	462	400,1037	231	0,184985	0,085
60	0,505	0,003005	539	466,7877	269,5	0,189455	0,1005
60	0,555	0,003055	616	533,4716	308	0,193745	0,1175
60	0,6	0,0031	693	600,1556	346,5	0,19975	0,136
60	0,645	0,003145	770	666,8396	385	0,20495	0,1555
60	0,7	0,0032	847	733,5235	423,5	0,211475	0,177
60	0,775	0,003275	924	800,2075	462	0,21595	0,2
60	0,87	0,00337	1001	866,8914	500,5	0,228275	0,2255
60	1,02	0,00352	1078	933,5754	539	0,239405	0,257
60	1,46	0,00396	1150	995,9292	575	0,266935	0,2995

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{IIleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,010888	0,032663	0,04355	0,287723	0,498352	0,575447	0,498352	0,761245
0,043552	0,130657	0,17421	0,584369	1,012157	1,168738	1,012157	1,546095
0,098001	0,294004	0,392005	0,898686	1,556571	1,797373	1,556571	2,377701
0,174233	0,522698	0,696931	1,214333	2,103287	2,428667	2,103287	3,212824
0,272249	0,816747	1,088996	1,533812	2,65664	3,067623	2,65664	4,058084
0,39205	1,17615	1,568199	1,854751	3,212523	3,709501	3,212523	4,907209
0,53364	1,600921	2,134561	2,182106	3,779519	4,364212	3,779519	5,77331
0,697022	2,091065	2,788087	2,514498	4,355238	5,028995	4,355238	6,652735
0,882193	2,64658	3,528774	2,849568	4,935597	5,699136	4,935597	7,539248
1,089159	3,267476	4,356635	3,189085	5,523657	6,378169	5,523657	8,437525
1,317928	3,953784	5,271713	3,538534	6,128921	7,077069	6,128921	9,362082
1,568518	4,705554	6,274073	3,905195	6,763996	7,81039	6,763996	10,33217
1,840941	5,522824	7,363765	4,29155	7,433183	8,583101	7,433183	11,35437
2,13526	6,405779	8,541038	4,723407	8,181182	9,446815	8,181182	12,49696
2,430693	7,29208	9,722773	5,34455	9,257033	10,6891	9,257033	14,14035

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,69E-05	13,54299	0,999746	0,303595	0,525842	0,60719	0,525842	0,803236
5,67E-05	27,17775	0,999731	0,618688	1,0716	1,237377	1,0716	1,636895
5,63E-05	41,00106	0,999703	0,956923	1,65744	1,913847	1,65744	2,531781
5,62E-05	54,8433	0,999688	1,297159	2,246745	2,594318	2,246745	3,43196
5,6E-05	68,73036	0,999675	1,642629	2,845117	3,285258	2,845117	4,345988
5,59E-05	82,63576	0,999665	1,990164	3,447066	3,980329	3,447066	5,26548
5,58E-05	96,61576	0,999654	2,346443	4,064159	4,692886	4,064159	6,208105
5,57E-05	110,656	0,999643	2,70968	4,693304	5,419361	4,693304	7,169141
5,56E-05	124,73	0,999633	3,076713	5,329024	6,153426	5,329024	8,140218
5,55E-05	138,8588	0,999622	3,449981	5,975543	6,899963	5,975543	9,127793
5,53E-05	153,1092	0,99961	3,837129	6,646102	7,674258	6,646102	10,15209
5,51E-05	167,5734	0,999592	4,248515	7,358644	8,49703	7,358644	11,24051
5,49E-05	182,2917	0,999569	4,688167	8,120144	9,376334	8,120144	12,40372
5,46E-05	197,6096	0,999532	5,193889	8,996079	10,38778	8,996079	13,74174
5,35E-05	214,9693	0,999415	5,992555	10,37941	11,98511	10,37941	15,85481

EK 1 f) 2a = 5 mm - θ = 75° numuneye ait deney sonuçları

θ (°)	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
75	0,055	0,002555	80	77,27407	20,70552	0,124375	0,0105
75	0,14	0,00264	160	154,5481	41,41105	0,124375	0,021
75	0,185	0,002685	240	231,8222	62,11657	0,124375	0,0315
75	0,245	0,002745	320	309,0963	82,82209	0,12845	0,0425
75	0,33	0,00283	400	386,3703	103,5276	0,132125	0,054
75	0,42	0,00292	480	463,6444	124,2331	0,13854	0,0665
75	0,545	0,003045	560	540,9185	144,9387	0,140175	0,0785
75	0,665	0,003165	640	618,1925	165,6442	0,14453	0,0925
75	0,75	0,00325	720	695,4666	186,3497	0,154165	0,111
75	0,845	0,003345	800	772,7407	207,0552	0,159375	0,13
75	0,935	0,003435	880	850,0147	227,7608	0,165455	0,15
75	1,03	0,00353	960	927,2888	248,4663	0,17208	0,17
75	1,13	0,00363	1040	1004,563	269,1718	0,17769	0,19
75	1,23	0,00373	1120	1081,837	289,8773	0,18084	0,2115
75	1,365	0,003865	1200	1159,111	310,5829	0,201085	0,2575

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,003149	0,043861	0,04701	0,080021	0,298641	0,309176	0,154588	0,34567
0,012597	0,175452	0,188049	0,162682	0,607137	0,628554	0,314277	0,702745
0,028344	0,394778	0,423122	0,246094	0,918434	0,950833	0,475416	1,063064
0,050391	0,701854	0,752245	0,331771	1,238186	1,281864	0,640932	1,433168
0,07874	1,096706	1,175446	0,421086	1,571513	1,62695	0,813475	1,818985
0,113392	1,579348	1,69274	0,513275	1,915568	1,983141	0,991571	2,21722
0,154351	2,149838	2,30419	0,611504	2,282163	2,362669	1,181334	2,641544
0,201617	2,808166	3,009783	0,712499	2,659083	2,752885	1,376442	3,077819
0,255186	3,554277	3,809462	0,812254	3,031372	3,138307	1,569154	3,508734
0,315063	4,388261	4,703324	0,9156	3,417065	3,537606	1,768803	3,955163
0,381248	5,310099	5,691347	1,020619	3,809003	3,94337	1,971685	4,408821
0,453744	6,319838	6,773582	1,128694	4,212345	4,36094	2,18047	4,875679
0,532553	7,417503	7,950056	1,239951	4,62756	4,790803	2,395401	5,35628
0,617674	8,603094	9,220768	1,3536	5,051705	5,229909	2,614955	5,847217
0,709126	9,876847	10,58597	1,476298	5,50962	5,703978	2,851989	6,377242

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,83E-05	13,71858	0,999747	0,082322	0,307231	0,318069	0,159034	0,355612
5,81E-05	27,53347	0,999731	0,167947	0,626786	0,648897	0,324448	0,725489
5,8E-05	41,37711	0,999722	0,25453	0,94992	0,983429	0,491715	1,099507
5,79E-05	55,30678	0,99971	0,343996	1,283812	1,3291	0,66455	1,485979
5,77E-05	69,37809	0,999692	0,438143	1,635173	1,692855	0,846428	1,89267
5,74E-05	83,56679	0,999673	0,53607	2,00064	2,071215	1,035608	2,315689
5,71E-05	98,00647	0,999645	0,642005	2,395997	2,480519	1,240259	2,773304
5,69E-05	112,5748	0,999618	0,751818	2,805821	2,9048	1,4524	3,247665
5,66E-05	127,1027	0,999598	0,860155	3,210142	3,323383	1,661692	3,715655
5,64E-05	141,796	0,999575	0,973503	3,633161	3,761325	1,880663	4,205289
5,62E-05	156,575	0,999553	1,089322	4,065404	4,208816	2,104408	4,705599
5,6E-05	171,5049	0,999529	1,209564	4,514155	4,673397	2,336699	5,225017
5,57E-05	186,597	0,999504	1,334497	4,98041	5,1561	2,57805	5,764695
5,55E-05	201,8197	0,999477	1,463093	5,460336	5,652956	2,826478	6,320196
5,52E-05	217,5052	0,999441	1,605057	5,990155	6,201465	3,100732	6,933448

EK 1 g) 2a = 7 mm - $\theta = 0^o$ numuneye ait deney sonuçları

θ (^{o})	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
0	0,055	0,003555	57	0	57	0,35088	0,02
0	0,1	0,0036	114	0	114	0,35088	0,04
0	0,12	0,00362	171	0	171	0,35088	0,06
0	0,225	0,003725	228	0	228	0,35088	0,08
0	0,27	0,00377	285	0	285	0,35088	0,1
0	0,325	0,003825	342	0	342	0,35088	0,1225
0	0,4	0,0039	399	0	399	0,35088	0,1375
0	0,5	0,004	456	0	456	0,353825	0,1675
0	0,68	0,00418	513	0	513	0,35637	0,19
0	0,87	0,00437	570	0	570	0,35781	0,2125
0	1,09	0,00459	627	0	627	0,372775	0,24
0	1,51	0,00501	684	0	684	0,386085	0,2675
0	1,78	0,00528	741	0	741	0,39311	0,295
0	2,095	0,005595	798	0	798	0,400765	0,325
0	3,12	0,00662	850	0	850	0,434405	0,365

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,033169	0	0,033169	1,003968	0	1,003968	0	1,003968
0,132675	0	0,132675	2,020605	0	2,020605	0	2,020605
0,29852	0	0,29852	3,039316	0	3,039316	0	3,039316
0,530702	0	0,530702	4,110773	0	4,110773	0	4,110773
0,829223	0	0,829223	5,169411	0	5,169411	0	5,169411
1,194082	0	1,194082	6,24838	0	6,24838	0	6,24838
1,62528	0	1,62528	7,360899	0	7,360899	0	7,360899
2,122819	0	2,122819	8,519628	0	8,519628	0	8,519628
2,6867	0	2,6867	9,797865	0	9,797865	0	9,797865
3,316924	0	3,316924	11,13119	0	11,13119	0	11,13119
4,013493	0	4,013493	12,54875	0	12,54875	0	12,54875
4,776421	0	4,776421	14,30217	0	14,30217	0	14,30217
5,605685	0	5,605685	15,90606	0	15,90606	0	15,90606
6,501301	0	6,501301	17,63318	0	17,63318	0	17,63318
7,376318	0	7,376318	20,43042	0	20,43042	0	20,43042

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,15E-05	11,07484	0,999523	1,170115	0	1,170115	0	1,170115
5,14E-05	22,19626	0,999511	2,359934	0	2,359934	0	2,359934
5,13E-05	33,32554	0,999506	3,553032	0	3,553032	0	3,553032
5,11E-05	44,65335	0,999479	4,829241	0	4,829241	0	4,829241
5,1E-05	55,935	0,999467	6,08574	0	6,08574	0	6,08574
5,08E-05	67,29634	0,999452	7,375018	0	7,375018	0	7,375018
5,06E-05	78,79147	0,999432	8,718926	0	8,718926	0	8,718926
5,04E-05	90,47619	0,999404	10,13934	0	10,13934	0	10,13934
5E-05	102,6657	0,999353	11,7611	0	11,7611	0	11,7611
4,95E-05	115,1236	0,999298	13,48427	0	13,48427	0	13,48427
4,9E-05	128,001	0,999232	15,36483	0	15,36483	0	15,36483
4,8E-05	142,5713	0,9991	17,87847	0	17,87847	0	17,87847
4,73E-05	156,5669	0,999013	20,15475	0	20,15475	0	20,15475
4,66E-05	171,3476	0,998908	22,7047	0	22,7047	0	22,7047
4,41E-05	192,6913	0,998555	27,76848	0	27,76848	0	27,76848

EK 1 h) 2a = 7 mm - θ = 15^o numuneye ait deney sonuçları

θ (^{o})	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
15	0,05	0,00355	63	16,3056	60,85333	0,31746	0,02
15	0,17	0,00367	126	32,6112	121,7067	0,31746	0,04
15	0,25	0,00375	189	48,9168	182,56	0,31746	0,06
15	0,275	0,003775	252	65,2224	243,4133	0,31746	0,08
15	0,4	0,0039	315	81,528	304,2666	0,31746	0,1
15	0,45	0,00395	378	97,8336	365,12	0,31746	0,1225
15	0,535	0,004035	441	114,1392	425,9733	0,3186	0,145
15	0,57	0,00407	504	130,4448	486,8266	0,32392	0,17
15	0,615	0,004115	567	146,7504	547,6799	0,328915	0,195
15	0,65	0,00415	630	163,056	608,5333	0,333205	0,22
15	0,675	0,004175	693	179,3616	669,3866	0,337035	0,245
15	0,765	0,004265	756	195,6672	730,2399	0,34345	0,2725
15	0,895	0,004395	819	211,9728	791,0933	0,35163	0,3
15	1,16	0,00466	882	228,2784	851,9466	0,356985	0,3325
15	2,205	0,005705	950	245,8781	917,6295	0,40966	0,375

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,037805	0,002714	0,040519	1,034588	0,277217	1,071085	0,535542	1,197509
0,15122	0,010857	0,162077	2,103859	0,563727	2,178075	1,089037	2,435162
0,340246	0,024429	0,364674	3,189999	0,854758	3,30253	1,651265	3,692341
0,604881	0,043429	0,64831	4,267486	1,143469	4,418027	2,209013	4,939504
0,945129	0,067857	1,012986	5,421957	1,452809	5,613223	2,806612	6,275774
1,360987	0,097714	1,458702	6,547924	1,754511	6,77891	3,389455	7,579051
1,852457	0,133	1,985458	7,721003	2,068837	7,993371	3,996685	8,93686
2,419537	0,173715	2,593252	8,862192	2,374617	9,174816	4,587408	10,25776
3,062229	0,219858	3,282087	10,02493	2,686172	10,37857	5,189287	11,6036
3,780532	0,27143	4,051962	11,18608	2,997302	11,58069	5,790343	12,9476
4,574446	0,32843	4,902876	12,3417	3,306949	12,77707	6,388534	14,2852
5,443976	0,39086	5,834836	13,60802	3,646258	14,08806	7,044029	15,75093
6,389125	0,458719	6,847843	14,96501	4,009863	15,49292	7,746461	17,32161
7,409904	0,532007	7,941912	16,59494	4,4466	17,18034	8,590172	19,20821
8,596666	0,617213	9,213879	19,7773	5,299311	20,47496	10,23748	22,89171

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,18E-05	12,1701	0,999524	1,198857	0,321233	1,241148	0,620574	1,387646
5,15E-05	24,47637	0,999493	2,451503	0,656878	2,537983	1,268991	2,837551
5,13E-05	36,852	0,999472	3,730994	0,999717	3,862609	1,931305	4,318528
5,12E-05	49,19355	0,999465	4,997043	1,338954	5,173319	2,58666	5,783947
5,09E-05	61,85418	0,999432	6,38617	1,711169	6,611449	3,305725	7,391825
5,08E-05	74,40033	0,999418	7,730534	2,07139	8,003238	4,001619	8,947892
5,06E-05	87,15032	0,999394	9,15212	2,452303	9,474972	4,737486	10,59334
5,05E-05	99,76598	0,999385	10,52225	2,819427	10,89343	5,446716	12,17923
5,04E-05	112,4772	0,999372	11,92821	3,196155	12,349	6,174498	13,8066
5,03E-05	125,1832	0,999362	13,33196	3,572289	13,80226	6,901132	15,4314
5,03E-05	137,8659	0,999355	14,72677	3,946026	15,24628	7,623138	17,04585
5,01E-05	151,0483	0,999329	16,30767	4,369628	16,88294	8,441472	18,87571
4,97E-05	164,6621	0,99929	18,04602	4,835417	18,68261	9,341307	20,8878
4,91E-05	179,6253	0,99921	20,26989	5,4313	20,98493	10,49247	23,46187
4,66E-05	203,8879	0,998871	25,45285	6,820071	26,35073	13,17537	29,46101

EK 1 ı) 2a = 7 mm - θ = 30° numuneye ait deney sonuçları

θ (°)	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
30	0,035	0,003535	67	33,5	58,0237	0,22388	0,015
30	0,22	0,00372	134	67	116,0474	0,22388	0,03
30	0,335	0,003835	201	100,5	174,0711	0,22388	0,045
30	0,435	0,003935	268	134	232,0948	0,22388	0,06
30	0,485	0,003985	335	167,5	290,1185	0,22388	0,075
30	0,57	0,00407	402	201	348,1422	0,225855	0,09
30	0,615	0,004115	469	234,5	406,1659	0,23411	0,1075
30	0,67	0,00417	536	268	464,1896	0,243175	0,125
30	0,73	0,00423	603	301,5	522,2133	0,248965	0,145
30	0,76	0,00426	670	335	580,237	0,255	0,1675
30	0,81	0,00431	737	368,5	638,2607	0,265185	0,1925
30	0,915	0,004415	804	402	696,2844	0,27241	0,215
30	1,05	0,00455	871	435,5	754,3081	0,286285	0,245
30	1,17	0,00467	938	469	812,3318	0,29834	0,285
30	1,985	0,005485	1000	500	866,0254	0,366235	0,335

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{IIleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,034371	0,011457	0,045828	0,882584	0,50956	1,01912	0,882584	1,348169
0,137484	0,045828	0,183312	1,810769	1,045448	2,090896	1,810769	2,765995
0,30934	0,103113	0,412453	2,757818	1,592227	3,184454	2,757818	4,212637
0,549938	0,183313	0,73325	3,724724	2,150471	4,300941	3,724724	5,68961
0,859279	0,286426	1,145705	4,685393	2,705113	5,410225	4,685393	7,157056
1,237363	0,412454	1,649817	5,68212	3,280573	6,561147	5,68212	8,679581
1,68419	0,561397	2,245586	6,665687	3,848436	7,696872	6,665687	10,18201
2,19976	0,733253	2,933013	7,66867	4,427509	8,855017	7,66867	11,71409
2,784074	0,928025	3,712098	8,6891	5,016654	10,03331	8,6891	13,27282
3,43713	1,14571	4,58284	9,688732	5,593792	11,18758	9,688732	14,79978
4,15893	1,38631	5,54524	10,71997	6,189177	12,37835	10,71997	16,37502
4,949479	1,649826	6,599306	11,83611	6,83358	13,66716	11,83611	18,07995
5,808777	1,936259	7,745036	13,01702	7,515379	15,03076	13,01702	19,88382
6,736819	2,245606	8,982426	14,20199	8,19952	16,39904	14,20199	21,69389
7,656936	2,552312	10,20925	16,40881	9,473633	18,94727	16,40881	25,06488

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,26E-05	12,72763	0,999528	1,005717	0,580651	1,161302	1,005717	1,536258
5,22E-05	25,67178	0,99948	2,080898	1,201407	2,402814	2,080898	3,178624
5,19E-05	38,71237	0,999449	3,186024	1,839452	3,678904	3,186024	4,866732
5,17E-05	51,85619	0,999422	4,322985	2,495876	4,991753	4,322985	6,603468
5,16E-05	64,9711	0,999408	5,450572	3,146889	6,293778	5,450572	8,325886
5,14E-05	78,27501	0,999385	6,636252	3,831442	7,662883	6,636252	10,13704
5,12E-05	91,51329	0,999372	7,801333	4,504102	9,008204	7,801333	11,91673
5,11E-05	104,8567	0,999356	8,998301	5,195171	10,39034	8,998301	13,74513
5,1E-05	118,297	0,999339	10,22437	5,903043	11,80609	10,22437	15,61798
5,09E-05	131,6271	0,99933	11,4167	6,591436	13,18287	11,4167	17,4393
5,08E-05	145,1319	0,999316	12,66161	7,310187	14,62037	12,66161	19,34094
5,05E-05	159,1153	0,999285	14,04941	8,111432	16,22286	14,04941	21,46083
5,02E-05	173,4874	0,999244	15,55054	8,978109	17,95622	15,55054	23,75384
4,99E-05	187,9105	0,999207	17,06371	9,851737	19,70347	17,06371	26,06525
4,8E-05	208,5011	0,998945	20,51651	11,84521	23,69043	20,51651	31,33949

EK 1 j) 2a = 7 mm - θ = 45° numuneye ait deney sonuçları

θ (°)	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
45	0,04	0,00354	70	49,49747	49,49747	0,21429	0,015
45	0,2	0,0037	140	98,99495	98,99495	0,21429	0,03
45	0,255	0,003755	210	148,4924	148,4924	0,21429	0,045
45	0,3	0,0038	280	197,9899	197,9899	0,21429	0,06
45	0,395	0,003895	350	247,4874	247,4874	0,21429	0,075
45	0,465	0,003965	420	296,9848	296,9848	0,21622	0,0925
45	0,62	0,00412	490	346,4823	346,4823	0,22209	0,1125
45	0,69	0,00419	560	395,9798	395,9798	0,228345	0,135
45	0,87	0,00437	630	445,4773	445,4773	0,237865	0,1575
45	1,155	0,004655	700	494,9747	494,9747	0,246215	0,1825
45	1,2	0,0047	770	544,4722	544,4722	0,258785	0,205
45	1,39	0,00489	840	593,9697	593,9697	0,268805	0,23
45	1,64	0,00514	910	643,4672	643,4672	0,284945	0,2625
45	1,68	0,00518	980	692,9646	692,9646	0,29602	0,295
45	1,94	0,00544	1050	742,4621	742,4621	0,31905	0,335

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,025012	0,025012	0,050024	0,61517	0,61517	0,869981	0,869981	1,23034
0,100048	0,100048	0,200095	1,257837	1,257837	1,77885	1,77885	2,515674
0,225108	0,225108	0,450215	1,900727	1,900727	2,688034	2,688034	3,801454
0,400191	0,400191	0,800383	2,549444	2,549444	3,605458	3,605458	5,098887
0,6253	0,6253	1,2506	3,226394	3,226394	4,562811	4,562811	6,452789
0,900433	0,900433	1,800867	3,906309	3,906309	5,524356	5,524356	7,812619
1,225593	1,225593	2,451186	4,645587	4,645587	6,569852	6,569852	9,291174
1,600776	1,600776	3,201552	5,354156	5,354156	7,57192	7,57192	10,70831
2,025988	2,025988	4,051977	6,151449	6,151449	8,699463	8,699463	12,3029
2,501232	2,501232	5,002463	7,054308	7,054308	9,976298	9,976298	14,10862
3,026493	3,026493	6,052985	7,797156	7,797156	11,02684	11,02684	15,59431
3,601788	3,601788	7,203575	8,676219	8,676219	12,27003	12,27003	17,35244
4,227115	4,227115	8,45423	9,636517	9,636517	13,62809	13,62809	19,27303
4,902456	4,902456	9,804912	10,41809	10,41809	14,73341	14,73341	20,83618
5,627844	5,627844	11,25569	11,43895	11,43895	16,17712	16,17712	22,87791

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,4E-05	12,97154	0,999527	0,68381	0,68381	0,967053	0,967053	1,367619
5,36E-05	26,129	0,999485	1,408176	1,408176	1,991461	1,991461	2,816352
5,34E-05	39,2903	0,999471	2,133145	2,133145	3,016722	3,016722	4,26629
5,33E-05	52,49314	0,999459	2,866961	2,866961	4,054495	4,054495	5,733921
5,31E-05	65,8981	0,999433	3,643749	3,643749	5,153039	5,153039	7,287498
5,29E-05	79,32865	0,999414	4,425571	4,425571	6,258702	6,258702	8,851141
5,26E-05	93,20497	0,99937	5,300244	5,300244	7,495677	7,495677	10,60049
5,24E-05	106,8615	0,99935	6,128186	6,128186	8,666563	8,666563	12,25637
5,2E-05	121,2184	0,999298	7,099074	7,099074	10,03961	10,03961	14,19815
5,13E-05	136,4834	0,999212	8,249228	8,249228	11,66617	11,66617	16,49846
5,12E-05	150,4485	0,999198	9,137082	9,137082	12,92179	12,92179	18,27416
5,07E-05	165,6011	0,999139	10,2583	10,2583	14,50743	14,50743	20,5166
5,01E-05	181,5487	0,999058	11,52962	11,52962	16,30534	16,30534	23,05924
5E-05	195,8891	0,999045	12,48857	12,48857	17,66151	17,66151	24,97714
4,94E-05	212,5321	0,99896	13,8849	13,8849	19,63622	19,63622	27,76981

EK 1 k) 2a = 7 mm - θ = 60° numuneye ait deney sonuçları

θ (°)	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
60	0,035	0,003535	73	63,21985	36,5	0,20548	0,015
60	0,305	0,003805	146	126,4397	73	0,20548	0,03
60	0,535	0,004035	219	189,6596	109,5	0,20548	0,045
60	0,695	0,004195	293	253,7454	146,5	0,20548	0,06
60	0,83	0,00433	365	316,0993	182,5	0,20548	0,075
60	0,97	0,00447	438	379,3191	219	0,20548	0,09
60	1,03	0,00453	511	442,539	255,5	0,21037	0,1075
60	1,08	0,00458	584	505,7588	292	0,2105	0,1225
60	1,12	0,00462	657	568,9787	328,5	0,216895	0,1425
60	1,185	0,004685	730	632,1985	365	0,224125	0,1625
60	1,22	0,00472	803	695,4184	401,5	0,227275	0,1825
60	1,395	0,004895	876	758,6383	438	0,236875	0,2075
60	1,515	0,005015	949	821,8581	474,5	0,24236	0,23
60	1,616	0,005116	1022	885,078	511	0,2544	0,26
60	1,924	0,005424	1100	952,6279	550	0,278185	0,295

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{IIleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,013601	0,040803	0,054403	0,32054	0,555192	0,641081	0,555192	0,84807
0,054404	0,163211	0,217614	0,665114	1,15201	1,330227	1,15201	1,759725
0,122409	0,367226	0,489634	1,027381	1,779477	2,054763	1,779477	2,718196
0,219109	0,657326	0,876435	1,401521	2,427506	2,803042	2,427506	3,708076
0,340025	1,020076	1,360101	1,773793	3,0723	3,547586	3,0723	4,693015
0,489638	1,468913	1,95855	2,16269	3,745888	4,325379	3,745888	5,721939
0,666452	1,999356	2,665807	2,540016	4,399436	5,080031	4,399436	6,720249
0,870468	2,611405	3,481874	2,918852	5,055599	5,837703	5,055599	7,722556
1,101687	3,305062	4,406749	3,298017	5,712332	6,596033	5,712332	8,725732
1,360109	4,080328	5,440437	3,690152	6,39153	7,380303	6,39153	9,763224
1,645733	4,937199	6,582932	4,074301	7,056897	8,148603	7,056897	10,77959
1,958564	5,875692	7,834256	4,526341	7,839853	9,052682	7,839853	11,97557
2,298597	6,895791	9,194388	4,963279	8,596651	9,926557	8,596651	13,1316
2,665833	7,997499	10,66333	5,398626	9,350695	10,79725	9,350695	14,28342
3,088294	9,264883	12,35318	5,983015	10,36289	11,96603	10,36289	15,82957

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,57E-05	13,10216	0,999528	0,345104	0,597738	0,690208	0,597738	0,913059
5,51E-05	26,51268	0,999457	0,724483	1,254841	1,448965	1,254841	1,916801
5,45E-05	40,17169	0,999394	1,130382	1,957879	2,260764	1,957879	2,99071
5,41E-05	54,12695	0,999349	1,552934	2,689761	3,105868	2,689761	4,108678
5,38E-05	67,83378	0,99931	1,97722	3,424645	3,95444	3,424645	5,231232
5,35E-05	81,91203	0,999268	2,425813	4,201632	4,851627	4,201632	6,418099
5,33E-05	95,82208	0,99925	2,856714	4,947973	5,713428	4,947973	7,558154
5,32E-05	109,7579	0,999235	3,290163	5,698729	6,580325	5,698729	8,704952
5,31E-05	123,7009	0,999223	3,724258	6,450604	7,448516	6,450604	9,853461
5,3E-05	137,8503	0,999203	4,179306	7,238771	8,358613	7,238771	11,05741
5,29E-05	151,8762	0,999192	4,621683	8,00499	9,243367	8,00499	12,22782
5,25E-05	167,0098	0,999137	5,175423	8,964096	10,35085	8,964096	13,69288
5,22E-05	181,9262	0,999099	5,706239	9,883495	11,41248	9,883495	15,09729
5,19E-05	196,8352	0,999066	6,235627	10,80042	12,47125	10,80042	16,49792
5,12E-05	214,9176	0,998965	7,010064	12,14179	14,02013	12,14179	18,54688

EK 1 l) 2a = 7 mm - θ = 75° numuneye ait deney sonuçları

θ (°)	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
75	0,015	0,003515	77	74,37629	19,92907	0,19481	0,015
75	0,055	0,003555	154	148,7526	39,85813	0,19481	0,03
75	0,11	0,00361	231	223,1289	59,7872	0,19481	0,045
75	0,18	0,00368	308	297,5052	79,71627	0,19481	0,06
75	0,275	0,003775	385	371,8814	99,64533	0,19481	0,075
75	0,37	0,00387	462	446,2577	119,5744	0,19523	0,09
75	0,45	0,00395	539	520,634	139,5035	0,20408	0,11
75	0,54	0,00404	616	595,0103	159,4325	0,20798	0,1275
75	0,665	0,004165	693	669,3866	179,3616	0,21645	0,15
75	0,755	0,004255	770	743,7629	199,2907	0,224025	0,1725
75	0,83	0,00433	847	818,1392	219,2197	0,22727	0,1925
75	0,915	0,004415	924	892,5155	239,1488	0,229975	0,2125
75	1,135	0,004635	1001	966,8918	259,0779	0,234765	0,235
75	1,275	0,004775	1078	1041,268	279,0069	0,23887	0,2575
75	1,84	0,00534	1150	1110,815	297,6419	0,277825	0,285

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,004055	0,056474	0,060529	0,090338	0,337147	0,34904	0,17452	0,390238
0,016219	0,225896	0,242115	0,181701	0,678119	0,70204	0,35102	0,784905
0,036492	0,508267	0,544759	0,274652	1,025017	1,061175	0,530588	1,18643
0,064875	0,903587	0,968462	0,369737	1,379876	1,428553	0,714276	1,597171
0,101367	1,411857	1,513223	0,468098	1,746967	1,808594	0,904297	2,022069
0,145968	2,033077	2,179045	0,568742	2,122575	2,197452	1,098726	2,456826
0,198679	2,767247	2,965926	0,670356	2,501803	2,590057	1,295028	2,895771
0,2595	3,614369	3,873869	0,7748	2,891593	2,993598	1,496799	3,346944
0,32843	4,574445	4,902875	0,885032	3,302986	3,419502	1,709751	3,82312
0,40547	5,647471	6,052941	0,993937	3,709425	3,840279	1,92014	4,293563
0,49062	6,833448	7,324068	1,102925	4,116172	4,261375	2,130687	4,764362
0,583879	8,13238	8,716258	1,214943	4,53423	4,694181	2,34709	5,248253
0,685249	9,544285	10,22953	1,348584	5,032983	5,210527	2,605264	5,825547
0,794728	11,06914	11,86387	1,474092	5,501386	5,695454	2,847727	6,367711
0,904442	12,59726	13,5017	1,662985	6,206345	6,425281	3,21264	7,183682

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,78E-05	13,32412	0,999533	0,093771	0,349957	0,362302	0,181151	0,405066
5,77E-05	26,69259	0,999523	0,188918	0,705053	0,729925	0,364962	0,816081
5,76E-05	40,1307	0,999509	0,286214	1,068166	1,105846	0,552923	1,236374
5,74E-05	53,66422	0,999491	0,386425	1,442159	1,493032	0,746516	1,669261
5,72E-05	67,34782	0,999465	0,491172	1,833078	1,897742	0,948871	2,12174
5,69E-05	81,141	0,99944	0,599158	2,236089	2,31497	1,157485	2,588215
5,67E-05	94,9848	0,999418	0,708588	2,644486	2,737773	1,368886	3,060923
5,65E-05	108,9688	0,999393	0,822107	3,068147	3,176379	1,58819	3,5513
5,62E-05	123,244	0,999358	0,944063	3,523292	3,647581	1,82379	4,078119
5,6E-05	137,4658	0,999332	1,064307	3,972046	4,112165	2,056082	4,59754
5,58E-05	151,6999	0,99931	1,184804	4,42175	4,577733	2,288866	5,118061
5,56E-05	166,0977	0,999285	1,309908	4,888644	5,061097	2,530548	5,658478
5,51E-05	181,6634	0,999218	1,467877	5,478192	5,671442	2,835721	6,340865
5,48E-05	196,8377	0,999175	1,614296	6,024635	6,237161	3,11858	6,973358
5,34E-05	215,3158	0,998993	1,867218	6,968554	7,214378	3,607189	8,06592

EK 1 m) 2a = 9 mm - $\theta = 0^o$ numuneye ait deney sonuçları

θ (^{o})	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
0	0,055	0,004555	50	0	50	0,4	0,02
0	0,235	0,004735	100	0	100	0,4	0,04
0	0,355	0,004855	150	0	150	0,4	0,06
0	0,41	0,00491	200	0	200	0,4	0,08
0	0,475	0,004975	250	0	250	0,4	0,1
0	0,575	0,005075	300	0	300	0,4	0,1225
0	0,64	0,00514	350	0	350	0,402145	0,1475
0	0,69	0,00519	400	0	400	0,407625	0,1725
0	0,735	0,005235	450	0	450	0,41015	0,2025
0	0,81	0,00531	500	0	500	0,41238	0,2275
0	0,94	0,00544	550	0	550	0,42095	0,2525
0	1,025	0,005525	600	0	600	0,42921	0,2825
0	1,14	0,00564	650	0	650	0,43887	0,3125
0	1,98	0,00648	700	0	700	0,45419	0,3525
0	3,58	0,00808	750	0	750	0,52	0,3975

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,035948	0	0,035948	0,996875	0	0,996875	0	0,996875
0,143793	0	0,143793	2,032762	0	2,032762	0	2,032762
0,323538	0	0,323538	3,08754	0	3,08754	0	3,08754
0,57518	0	0,57518	4,139974	0	4,139974	0	4,139974
0,898723	0	0,898723	5,209109	0	5,209109	0	5,209109
1,294169	0	1,294169	6,313444	0	6,313444	0	6,313444
1,761515	0	1,761515	7,412705	0	7,412705	0	7,412705
2,300761	0	2,300761	8,512769	0	8,512769	0	8,512769
2,911909	0	2,911909	9,618296	0	9,618296	0	9,618296
3,594967	0	3,594967	10,76328	0	10,76328	0	10,76328
4,349946	0	4,349946	11,98367	0	11,98367	0	11,98367
5,176823	0	5,176823	13,17483	0	13,17483	0	13,17483
6,075622	0	6,075622	14,42051	0	14,42051	0	14,42051
7,046661	0	7,046661	16,64618	0	16,64618	0	16,64618
8,090104	0	8,090104	19,91586	0	19,91586	0	19,91586

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
4,91E-05	10,18994	0,999242	1,218502	0	1,218502	0	1,218502
4,86E-05	20,5609	0,999187	2,506689	0	2,506689	0	2,506689
4,83E-05	31,02507	0,99915	3,829989	0	3,829989	0	3,829989
4,82E-05	41,48001	0,999132	5,149511	0	5,149511	0	5,149511
4,81E-05	52,01831	0,999112	6,500319	0	6,500319	0	6,500319
4,78E-05	62,73526	0,999079	7,917802	0	7,917802	0	7,917802
4,77E-05	73,43068	0,999058	9,326732	0	9,326732	0	9,326732
4,75E-05	84,13259	0,999042	10,73779	0	10,73779	0	10,73779
4,74E-05	94,86466	0,999027	12,1598	0	12,1598	0	12,1598
4,73E-05	105,8067	0,999003	13,65899	0	13,65899	0	13,65899
4,69E-05	117,1609	0,99896	15,30844	0	15,30844	0	15,30844
4,67E-05	128,3697	0,998931	16,9033	0	16,9033	0	16,9033
4,65E-05	139,8933	0,998893	18,61104	0	18,61104	0	18,61104
4,44E-05	157,4874	0,998604	22,45458	0	22,45458	0	22,45458
4,06E-05	184,6927	0,998063	29,39742	0	29,39742	0	29,39742

EK 1 n) 2a = 9 mm - θ = 15^o numuneye ait deney sonuçları

θ (^{o})	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
15	0,015	0,004515	55	14,23505	53,12592	0,34364	0,02
15	0,205	0,004705	110	28,47009	106,2518	0,34364	0,04
15	0,325	0,004825	165	42,70514	159,3778	0,34364	0,06
15	0,45	0,00495	220	56,94019	212,5037	0,34864	0,08
15	0,56	0,00506	275	71,17524	265,6296	0,35864	0,1
15	0,68	0,00518	330	85,41028	318,7555	0,36292	0,12
15	0,795	0,005295	385	99,64533	371,8814	0,36963	0,1425
15	0,93	0,00543	440	113,8804	425,0074	0,37818	0,1675
15	1,095	0,005595	495	128,1154	478,1333	0,38689	0,1925
15	1,285	0,005785	550	142,3505	531,2592	0,393075	0,2175
15	1,435	0,005935	605	156,5855	584,3851	0,40496	0,245
15	1,61	0,00611	660	170,8206	637,511	0,41909	0,27
15	1,835	0,006335	715	185,0556	690,637	0,426085	0,2975
15	2,085	0,006585	770	199,2907	743,7629	0,43682	0,3325
15	2,805	0,007305	820	212,2316	792,0592	0,469515	0,385

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,040583	0,002914	0,043497	1,018604	0,272934	1,054537	0,527268	1,179008
0,162335	0,011655	0,17399	2,079633	0,557236	2,152994	1,076497	2,407121
0,365256	0,026224	0,39148	3,15898	0,846446	3,270417	1,635208	3,656437
0,649348	0,046621	0,69597	4,266185	1,143121	4,41668	2,20834	4,937998
1,014614	0,072846	1,08746	5,39166	1,444691	5,581858	2,790929	6,240707
1,461056	0,104899	1,565955	6,546265	1,754066	6,777192	3,388596	7,577131
1,988673	0,14278	2,131454	7,721623	2,069003	7,994013	3,997006	8,937578
2,597473	0,18649	2,783964	8,936505	2,394529	9,25175	4,625875	10,34377
3,287462	0,236029	3,523491	10,20518	2,734469	10,56518	5,282589	11,81223
4,058644	0,291398	4,350042	11,53002	3,089459	11,93675	5,968376	13,3457
4,911006	0,352594	5,263601	12,8464	3,442184	13,29958	6,649788	14,86938
5,844569	0,419621	6,26419	14,21938	3,810071	14,72099	7,360493	16,45856
6,859349	0,492479	7,351828	15,68541	4,202893	16,23873	8,119365	18,15545
7,955348	0,571168	8,526516	17,22208	4,614642	17,82961	8,914803	19,93411
9,022468	0,647784	9,670253	19,31711	5,176004	19,99854	9,999272	22,35905

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
4,95E-05	11,10393	0,999255	1,233407	0,33049	1,276916	0,638458	1,427636
4,91E-05	22,41421	0,999196	2,541507	0,680995	2,631161	1,315581	2,941728
4,88E-05	33,81979	0,999159	3,883286	1,040523	4,020273	2,010137	4,494802
4,85E-05	45,37205	0,999119	5,276698	1,413887	5,462839	2,73142	6,10764
4,82E-05	57,02555	0,999084	6,705146	1,796639	6,941678	3,470839	7,761032
4,79E-05	68,84179	0,999045	8,189778	2,194444	8,478682	4,239341	9,479454
4,77E-05	80,78053	0,999008	9,715979	2,603389	10,05872	5,029361	11,24599
4,73E-05	92,95251	0,998963	11,32135	3,033547	11,72072	5,860362	13,10417
4,69E-05	105,4538	0,998908	13,03729	3,493331	13,4972	6,748598	15,09032
4,65E-05	118,3203	0,998843	14,8738	3,985424	15,3985	7,699248	17,21604
4,61E-05	131,1682	0,998792	16,70086	4,474982	17,29	8,645001	19,33081
4,57E-05	144,4075	0,998732	18,65509	4,998616	19,31317	9,656584	21,59278
4,52E-05	158,3119	0,998654	20,82366	5,579682	21,55824	10,77912	24,10284
4,46E-05	172,7852	0,998567	23,17051	6,20852	23,98788	11,99394	26,81926
4,28E-05	191,4278	0,998319	27,03412	7,24377	27,98778	13,99389	31,29129

EK 1 o) 2a = 9 mm - $\theta = 30^o$ numuneye ait deney sonuçları

θ (^{o})	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
30	0,045	0,004545	57	28,5	49,36345	0,35088	0,02
30	0,225	0,004725	114	57	98,7269	0,35088	0,04
30	0,475	0,004975	171	85,5	148,0903	0,35088	0,06
30	0,755	0,005255	228	114	197,4538	0,35088	0,08
30	0,9	0,0054	285	142,5	246,8172	0,35088	0,1
30	1,03	0,00553	342	171	296,1807	0,358185	0,1225
30	1,225	0,005725	399	199,5	345,5441	0,368365	0,145
30	1,315	0,005815	456	228	394,9076	0,379805	0,17
30	1,405	0,005905	513	256,5	444,271	0,386115	0,195
30	1,5	0,006	570	285	493,6345	0,391965	0,22
30	1,615	0,006115	627	313,5	542,9979	0,39925	0,245
30	1,715	0,006215	684	342	592,3614	0,407895	0,2725
30	1,885	0,006385	741	370,5	641,7248	0,411895	0,3
30	2,08	0,00658	798	399	691,0883	0,41853	0,33
30	2,77	0,00727	860	430	744,7818	0,426825	0,3675

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,035038	0,011679	0,046718	0,851392	0,491551	0,983103	0,851392	1,300522
0,140155	0,046718	0,186874	1,736175	1,002381	2,004763	1,736175	2,652052
0,315355	0,105118	0,420473	2,672273	1,542838	3,085675	2,672273	4,081965
0,56064	0,18688	0,74752	3,661928	2,114215	4,22843	3,661928	5,593687
0,876009	0,292003	1,168011	4,640134	2,678982	5,357965	4,640134	7,087921
1,261463	0,420488	1,68195	5,634788	3,253247	6,506493	5,634788	8,607281
1,717012	0,572337	2,28935	6,688826	3,861795	7,72359	6,688826	10,21735
2,242641	0,747547	2,990188	7,704227	4,448037	8,896075	7,704227	11,7684
2,838359	0,94612	3,784479	8,734073	5,042619	10,08524	8,734073	13,34152
3,504168	1,168056	4,672224	9,782281	5,647803	11,29561	9,782281	14,94268
4,240075	1,413358	5,653433	10,86315	6,27184	12,54368	10,86315	16,59373
5,046072	1,682024	6,728095	11,94721	6,897728	13,79546	11,94721	18,24967
5,92219	1,974063	7,896253	13,11864	7,574052	15,1481	13,11864	20,03906
6,868424	2,289475	9,157898	14,34189	8,280295	16,56059	14,34189	21,9076
7,977509	2,65917	10,63668	16,24641	9,379871	18,75974	16,24641	24,81681

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,05E-05	11,27844	0,999245	1,010388	0,583348	1,166695	1,010388	1,543393
5,01E-05	22,75135	0,99919	2,078109	1,199797	2,399593	2,078109	3,174364
4,95E-05	34,54062	0,999112	3,237203	1,869	3,738	3,237203	4,944909
4,88E-05	46,6879	0,999021	4,496909	2,596292	5,192584	4,496909	6,869143
4,85E-05	58,77873	0,998973	5,73892	3,313367	6,626734	5,73892	8,766345
4,82E-05	70,99129	0,99893	7,014089	4,049586	8,099172	7,014089	10,7142
4,77E-05	83,63566	0,998864	8,407532	4,854091	9,708182	8,407532	12,84272
4,75E-05	96,01834	0,998833	9,727736	5,616311	11,23262	9,727736	14,85936
4,73E-05	108,5142	0,998802	11,07828	6,39605	12,7921	11,07828	16,92236
4,7E-05	121,1556	0,99877	12,46775	7,19826	14,39652	12,46775	19,04481
4,68E-05	134,0576	0,99873	13,92676	8,040619	16,08124	13,92676	21,27348
4,65E-05	146,999	0,998696	15,39529	8,888473	17,77695	15,39529	23,51669
4,61E-05	160,6576	0,998637	17,05382	9,84603	19,69206	17,05382	26,05015
4,57E-05	174,7895	0,998569	18,83447	10,87409	21,74818	18,83447	28,77013
4,4E-05	195,4593	0,998331	22,13589	12,78016	25,56033	22,13589	33,81313

EK 1 p) 2a = 9 mm - θ = 45° numuneye ait deney sonuçları

θ (°)	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
45	0,045	0,004545	60	42,42641	42,42641	0,25	0,015
45	0,215	0,004715	120	84,85281	84,85281	0,25	0,03
45	0,295	0,004795	180	127,2792	127,2792	0,25	0,045
45	0,35	0,00485	240	169,7056	169,7056	0,25	0,0625
45	0,44	0,00494	300	212,132	212,132	0,253335	0,0825
45	0,51	0,00501	360	254,5584	254,5584	0,261225	0,1025
45	0,58	0,00508	420	296,9848	296,9848	0,266165	0,1225
45	0,64	0,00514	480	339,4113	339,4113	0,2711	0,1475
45	0,73	0,00523	540	381,8377	381,8377	0,276885	0,17
45	0,79	0,00529	600	424,2641	424,2641	0,28316	0,1925
45	0,89	0,00539	660	466,6905	466,6905	0,28997	0,2125
45	1,02	0,00552	720	509,1169	509,1169	0,29976	0,2375
45	1,185	0,005685	780	551,5433	551,5433	0,310125	0,2575
45	1,33	0,00583	840	593,9697	593,9697	0,319285	0,285
45	2,29	0,00679	900	636,3961	636,3961	0,38924	0,3275

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,025882	0,025882	0,051765	0,597468	0,597468	0,844947	0,844947	1,194936
0,103531	0,103531	0,207062	1,217079	1,217079	1,721209	1,721209	2,434158
0,232946	0,232946	0,465892	1,841041	1,841041	2,603625	2,603625	3,682082
0,414128	0,414128	0,828256	2,46876	2,46876	3,491354	3,491354	4,93752
0,647079	0,647079	1,294158	3,114452	3,114452	4,4045	4,4045	6,228903
0,931798	0,931798	1,863595	3,763729	3,763729	5,322716	5,322716	7,527458
1,268286	1,268286	2,536571	4,421587	4,421587	6,253069	6,253069	8,843175
1,656543	1,656543	3,313086	5,082998	5,082998	7,188445	7,188445	10,166
2,096574	2,096574	4,193148	5,768221	5,768221	8,157496	8,157496	11,53644
2,588373	2,588373	5,176746	6,445794	6,445794	9,115729	9,115729	12,89159
3,131951	3,131951	6,263902	7,157079	7,157079	10,12164	10,12164	14,31416
3,727312	3,727312	7,454623	7,901321	7,901321	11,17416	11,17416	15,80264
4,37446	4,37446	8,748921	8,686758	8,686758	12,28493	12,28493	17,37352
5,073385	5,073385	10,14677	9,473527	9,473527	13,39759	13,39759	18,94705
5,824396	5,824396	11,64879	10,95411	10,95411	15,49145	15,49145	21,90822

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,23E-05	11,4821	0,999245	0,685756	0,685756	0,969805	0,969805	1,371511
5,18E-05	23,14491	0,999193	1,407881	1,407881	1,991045	1,991045	2,815763
5,17E-05	34,84641	0,999168	2,137552	2,137552	3,022955	3,022955	4,275104
5,15E-05	46,58092	0,999151	2,873687	2,873687	4,064007	4,064007	5,747374
5,13E-05	58,47127	0,999123	3,640494	3,640494	5,148437	5,148437	7,280989
5,11E-05	70,39603	0,9991	4,413839	4,413839	6,242111	6,242111	8,827679
5,1E-05	82,3994	0,999078	5,202361	5,202361	7,357249	7,357249	10,40472
5,08E-05	94,43754	0,999058	5,997449	5,997449	8,481674	8,481674	11,9949
5,06E-05	106,6957	0,999029	6,83489	6,83489	9,665995	9,665995	13,66978
5,05E-05	118,889	0,999009	7,659478	7,659478	10,83214	10,83214	15,31896
5,02E-05	131,4028	0,998976	8,545185	8,545185	12,08472	12,08472	17,09037
4,99E-05	144,2445	0,998933	9,492529	9,492529	13,42446	13,42446	18,98506
4,95E-05	157,5145	0,998877	10,5193	10,5193	14,87654	14,87654	21,0386
4,92E-05	170,8315	0,998828	11,55294	11,55294	16,33833	16,33833	23,10589
4,69E-05	192,0318	0,998496	14,01284	14,01284	19,81715	19,81715	28,02568

EK 1 r) 2a = 9 mm - $\theta = 60^{o}$ numuneye ait deney sonuçları

θ (^{o})	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
60	0,061	0,004561	63	54,5596	31,5	0,23809	0,015
60	0,255	0,004755	126	109,1192	63	0,23809	0,03
60	0,375	0,004875	189	163,6788	94,5	0,23809	0,045
60	0,475	0,004975	252	218,2384	126	0,23809	0,06
60	0,57	0,00507	315	272,798	157,5	0,23809	0,075
60	0,68	0,00518	378	327,3576	189	0,23809	0,09
60	0,79	0,00529	441	381,9172	220,5	0,24376	0,1075
60	0,915	0,005415	504	436,4768	252	0,25298	0,1275
60	1,085	0,005585	567	491,0364	283,5	0,26014	0,1475
60	1,165	0,005665	630	545,596	315	0,26881	0,1725
60	1,23	0,00573	693	600,1556	346,5	0,27278	0,1925
60	1,375	0,005875	756	654,7152	378	0,277085	0,2125
60	1,552	0,006052	819	709,2748	409,5	0,281385	0,2325
60	1,735	0,006235	882	763,8344	441	0,294295	0,2575
60	2,155	0,006655	950	822,7241	475	0,349535	0,2925

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{IIleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,014268	0,042803	0,057071	0,314222	0,544249	0,628445	0,544249	0,831354
0,057072	0,171215	0,228287	0,641671	1,111407	1,283342	1,111407	1,697702
0,128412	0,385237	0,513649	0,974576	1,688016	1,949153	1,688016	2,578487
0,22829	0,68487	0,91316	1,312696	2,273655	2,625391	2,273655	3,473066
0,356705	1,070115	1,426821	1,656462	2,869077	3,312925	2,869077	4,382588
0,513659	1,540977	2,054636	2,009203	3,480042	4,018407	3,480042	5,315852
0,699152	2,097456	2,796607	2,368829	4,102933	4,737659	4,102933	6,267333
0,913185	2,739556	3,652741	2,739033	4,744145	5,478066	4,744145	7,246801
1,155763	3,467288	4,62305	3,12941	5,420296	6,258819	5,420296	8,27964
1,426875	4,280624	5,707499	3,501938	6,065534	7,003875	6,065534	9,265256
1,726525	5,179576	6,906102	3,874169	6,710257	7,748337	6,710257	10,25009
2,054727	6,164181	8,218908	4,279509	7,412327	8,559018	7,412327	11,32252
2,411478	7,234433	9,645911	4,705457	8,150091	9,410915	8,150091	12,44947
2,796776	8,390328	11,1871	5,143463	8,908739	10,28693	8,908739	13,60832
3,244736	9,734207	12,97894	5,723572	9,913517	11,44714	9,913517	15,14315

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,45E-05	11,56948	0,999241	0,346094	0,599452	0,692188	0,599452	0,915678
5,4E-05	23,33852	0,999181	0,712829	1,234657	1,425659	1,234657	1,885969
5,37E-05	35,19553	0,999143	1,088438	1,88523	2,176876	1,88523	2,879736
5,35E-05	47,13805	0,999112	1,472618	2,550649	2,945236	2,550649	3,896181
5,32E-05	59,17493	0,999081	1,866195	3,232345	3,73239	3,232345	4,937488
5,3E-05	71,36384	0,999045	2,274839	3,940137	4,549678	3,940137	6,018658
5,27E-05	83,67486	0,999009	2,695396	4,668563	5,390792	4,668563	7,131347
5,24E-05	96,17586	0,998968	3,134412	5,428961	6,268824	5,428961	8,292874
5,2E-05	109,0468	0,998911	3,609135	6,251205	7,218269	6,251205	9,548873
5,18E-05	121,6122	0,998884	4,053682	7,021184	8,107365	7,021184	10,72504
5,16E-05	134,1775	0,998862	4,498055	7,79086	8,99611	7,79086	11,90073
5,13E-05	147,3684	0,998813	5,002249	8,66415	10,0045	8,66415	13,23471
5,09E-05	160,9822	0,998752	5,545887	9,605758	11,09177	9,605758	14,67304
5,04E-05	174,8751	0,998689	6,114715	10,591	12,22943	10,591	16,17801
4,94E-05	192,1988	0,998543	6,942613	12,02496	13,88523	12,02496	18,36843

EK 1 s) 2a = 9 mm - θ = 75° numuneye ait deney sonuçları

θ (°)	Δa (mm)	a+Δa (m)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	C (mm/N)	COD (mm)
75	0,04	0,00454	70	67,61481	18,11733	0,157145	0,011
75	0,19	0,00469	140	135,2296	36,23467	0,160715	0,0225
75	0,295	0,004795	210	202,8444	54,352	0,173575	0,0375
75	0,38	0,00488	280	270,4592	72,46933	0,180765	0,053
75	0,47	0,00497	350	338,074	90,58667	0,182855	0,0675
75	0,56	0,00506	420	405,6888	108,704	0,18643	0,0825
75	0,7	0,0052	490	473,3037	126,8213	0,18898	0,0975
75	0,79	0,00529	560	540,9185	144,9387	0,193895	0,1125
75	0,925	0,005425	630	608,5333	163,056	0,19838	0,1275
75	1,05	0,00555	700	676,1481	181,1733	0,20571	0,1475
75	1,235	0,005735	770	743,7629	199,2907	0,21253	0,1675
75	1,405	0,005905	840	811,3777	217,408	0,217715	0,1875
75	1,555	0,006055	910	878,9925	235,5253	0,22302	0,2075
75	1,765	0,006265	980	946,6073	253,6427	0,23874	0,2325
75	2,057	0,006557	1050	1014,222	271,76	0,29238	0,265

Kompliyans Metod							
G_I (J/mm^2)	G_{II} (J/mm^2)	G (J/mm^2)	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0,00472	0,065738	0,070458	0,093335	0,348331	0,360619	0,180309	0,403184
0,018879	0,262955	0,281834	0,189729	0,708078	0,733056	0,366528	0,819582
0,042479	0,591653	0,634131	0,287762	1,073941	1,111825	0,555913	1,243058
0,075518	1,051833	1,127351	0,387068	1,444557	1,495516	0,747758	1,672037
0,117998	1,643498	1,761496	0,488276	1,822272	1,886555	0,943277	2,109232
0,169918	2,36665	2,536568	0,591213	2,206437	2,284272	1,142136	2,553894
0,231279	3,221303	3,452582	0,699226	2,609546	2,701601	1,3508	3,020482
0,302081	4,20744	4,509521	0,806001	3,008037	3,114149	1,557075	3,481725
0,382324	5,325087	5,707411	0,918249	3,426951	3,547841	1,773921	3,966607
0,472009	6,574234	7,046243	1,031964	3,851343	3,987204	1,993602	4,45783
0,571137	7,954917	8,526054	1,153926	4,30651	4,458427	2,229213	4,984673
0,679708	9,467111	10,14682	1,27735	4,767135	4,935302	2,467651	5,517835
0,797721	11,11081	11,90853	1,401262	5,229582	5,414061	2,707031	6,053105
0,925179	12,88609	13,81127	1,534998	5,728691	5,930778	2,965389	6,630811
1,062088	14,79298	15,85506	1,682533	6,2793	6,500809	3,250405	7,268126

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu							
A (m^2)	σ (MPa)	F_1	K_I ($MNm^{-3/2}$)	K_{II} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{leş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{lleş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{eş}$ ($MNm^{-3/2}$)
5,71E-05	12,25732	0,999247	0,098023	0,365826	0,378731	0,189366	0,423434
5,67E-05	24,67015	0,999201	0,200517	0,748341	0,77474	0,38737	0,866185
5,65E-05	37,17028	0,999168	0,305476	1,140051	1,180268	0,590134	1,31958
5,63E-05	49,73997	0,999142	0,412379	1,539019	1,59331	0,796655	1,781374
5,61E-05	62,41445	0,999113	0,522201	1,948882	2,017632	1,008816	2,255781
5,59E-05	75,18695	0,999084	0,634726	2,368829	2,452392	1,226196	2,741858
5,55E-05	88,24893	0,999039	0,755213	2,818495	2,917921	1,45896	3,262334
5,53E-05	101,2498	0,999009	0,873925	3,261532	3,376587	1,688293	3,775139
5,5E-05	114,5772	0,998965	1,001476	3,73756	3,869407	1,934703	4,326128
5,47E-05	128,0064	0,998923	1,131649	4,223371	4,372355	2,186177	4,888441
5,42E-05	141,9597	0,99886	1,275709	4,76101	4,92896	2,46448	5,510745
5,38E-05	156,0388	0,998802	1,42282	5,310035	5,497353	2,748676	6,146227
5,35E-05	170,1801	0,998751	1,57131	5,864209	6,071076	3,035538	6,78767
5,3E-05	185,0147	0,998678	1,737589	6,484771	6,713529	3,356764	7,505953
5,23E-05	200,8879	0,998577	1,930032	7,202979	7,457072	3,728536	8,33726

EK 2 a) 2a = 5 mm numunelere ait deney sonuçları

θ (°)	P_Q (N)	Kompliyans Metod							
		G_{IC} (J/mm^2)	G_{IIC} (J/mm^2)	G_C (J/mm^2)	K_{IC} (MNm$^{-3/2}$)	K_{IIC} (MNm$^{-3/2}$)	$K_{ICeş}$ (MNm$^{-3/2}$)	$K_{IICeş}$ (MNm$^{-3/2}$)	$K_{Ceş}$ (MNm$^{-3/2}$)
0	900	5,958409	0	5,958409	18,55384	0	18,55384	0	18,55384
15	950	6,192711	0,444617	6,637328	17,58433	4,711706	18,20464	9,102318	20,3534
30	1050	6,079494	2,026498	8,105992	14,85958	8,579182	17,15836	14,85958	22,69838
45	1100	4,448101	4,448101	8,896202	10,33989	10,33989	14,62282	14,62282	20,67979
60	1150	2,430693	7,29208	9,722773	5,34455	9,257033	10,6891	9,257033	14,14035
75	1200	0,709126	9,876847	10,58597	1,476298	5,50962	5,703978	2,851989	6,377242

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu				
K_{IC} (MNm$^{-3/2}$)	K_{IIC} (MNm$^{-3/2}$)	$K_{ICeş}$ (MNm$^{-3/2}$)	$K_{IICeş}$ (MNm$^{-3/2}$)	$K_{Ceş}$ (MNm$^{-3/2}$)
23,0325	0	23,0325	0	23,0325
21,35786	5,722822	22,11129	11,05564	24,72117
17,47231	10,08764	20,17528	17,47231	26,68939
11,91839	11,91839	16,85514	16,85514	23,83677
5,992555	10,37941	11,98511	10,37941	15,85481
1,605057	5,990155	6,201465	3,100732	6,933448

EK 2 b) 2a = 7 mm numunelere ait deney sonuçları

θ (°)	P_Q (N)	Kompliyans Metod							
		G_{IC} (J/mm^2)	G_{IIC} (J/mm^2)	G_C (J/mm^2)	K_{IC} (MNm$^{-3/2}$)	K_{IIC} (MNm$^{-3/2}$)	$K_{ICeş}$ (MNm$^{-3/2}$)	$K_{IICeş}$ (MNm$^{-3/2}$)	$K_{Ceş}$ (MNm$^{-3/2}$)
0	850	7,376318	0	7,376318	20,43042	0	20,43042	0	20,43042
15	950	8,596666	0,617213	9,213879	19,7773	5,299311	20,47496	10,23748	22,89171
30	1000	7,656936	2,552312	10,20925	16,40881	9,473633	18,94727	16,40881	25,06488
45	1050	5,627844	5,627844	11,25569	11,43895	11,43895	16,17712	16,17712	22,87791
60	1100	3,088294	9,264883	12,35318	5,983015	10,36289	11,96603	10,36289	15,82957
75	1150	0,904442	12,59726	13,5017	1,662985	6,206345	6,425281	3,21264	7,183682

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu				
K_{IC} (MNm$^{-3/2}$)	K_{IIC} (MNm$^{-3/2}$)	$K_{ICeş}$ (MNm$^{-3/2}$)	$K_{IICeş}$ (MNm$^{-3/2}$)	$K_{Ceş}$ (MNm$^{-3/2}$)
27,76848	0	27,76848	0	27,76848
25,45285	6,820071	26,35073	13,17537	29,46101
20,51651	11,84521	23,69043	20,51651	31,33949
13,8849	13,8849	19,63622	19,63622	27,76981
7,010064	12,14179	14,02013	12,14179	18,54688
1,867218	6,968554	7,214378	3,607189	8,06592

EK 2 c) 2a = 9 mm numunelere ait deney sonuçları

θ (^{o})	P_Q (N)	Kompliyans Metod							
		G_{IC} (J/mm^2)	G_{IIC} (J/mm^2)	G_C (J/mm^2)	K_{IC} ($MNm^{-3/2}$)	K_{IIC} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{ICeş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{IICeş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{Ceş}$ ($MNm^{-3/2}$)
0	750	8,090104	0	8,090104	19,91586	0	19,91586	0	19,91586
15	820	9,022468	0,647784	9,670253	19,31711	5,176004	19,99854	9,999272	22,35905
30	860	7,977509	2,65917	10,63668	16,24641	9,379871	18,75974	16,24641	24,81681
45	900	5,824396	5,824396	11,64879	10,95411	10,95411	15,49145	15,49145	21,90822
60	950	3,244736	9,734207	12,97894	5,723572	9,913517	11,44714	9,913517	15,14315
75	1050	1,062088	14,79298	15,85506	1,682533	6,2793	6,500809	3,250405	7,268126

Başlangıç Çatlak Derinliği Metodu				
K_{IC} ($MNm^{-3/2}$)	K_{IIC} ($MNm^{-3/2}$)	$K_{ICeş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{IICeş}$ ($MNm^{-3/2}$)	$K_{Ceş}$ ($MNm^{-3/2}$)
29,39742	0	29,39742	0	29,39742
27,03412	7,24377	27,98778	13,99389	31,29129
22,13589	12,78016	25,56033	22,13589	33,81313
14,01284	14,01284	19,81715	19,81715	28,02568
6,942613	12,02496	13,88523	12,02496	18,36843
1,930032	7,202979	7,457072	3,728536	8,33726