

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ BOYUTLU KARIŞIK MOD KIRILMA  
KRİTERLERİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Oğuzhan DEMİR**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali Osman AYHAN**

**Kasım 2016**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU KARIŞIK MOD KIRILMA  
KRİTERLERİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Oğuzhan DEMİR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 0 / 11 / 2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof.Dr.  
Serkan DAĞ  
Jüri Başkanı

Prof.Dr.  
Ali Osman AYHAN  
Üye



Prof.Dr.  
Kenan GENEL  
Üye



Doç.Dr.  
Murat MAKARACI  
Üye



Yrd.Doç.Dr.  
Yaşar KAHRAMAN  
Üye

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Oğuzhan DEMİR

14.11.2016

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmayı bilimsel temeller ışığında şekillendiren, özellikle yoğun zaman alan deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde bilgi, tecrübe ve desteğiyle büyük bir özveri göstererek bu çalışmanın ortaya çıkmasında vermiş olduğu katkılarından dolayı sayın hocam, danışmanım Prof. Dr. Ali Osman AYHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında deneylerin gerçekleştirilmesi için malzemelerin temini, numune, tutucu ve aparatların işlenmesi, test sistemlerinin kurulumunda yapmış olduğu katkılar ve tez çalışması süresince vermiş olduğu fikir ve desteklerinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Sedat İRİÇ'e, 5 no.lu Bölüm'de verilen deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde vermiş olduğu katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ'e ve Arş. Gör. Safa ŞENAYSOY'a teşekkür ederim. Ayrıca, laboratuvar imkanlarından faydalanmamı sağlayan Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'ne ve Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmasına, yapmış oldukları bir kısım analiz ve deneyler ile katkıda bulunan proje bursiyer öğrencileri Arş. Gör. M. Faruk YAREN ve Murat BOZKURT'a, çalışmalarımı 113M407 no.lu proje kapsamında finansal olarak destekleyen, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Hayatımın tüm döneminde her türlü maddi manevi desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen, bugünlere gelmemde büyük bir pay sahibi olan aileme ve büyük bir sabır ve özveri göstererek fedakarlıkta bulunan ve her zaman desteğini yanımda hissettiğim sevgili eşim, Gülberk DEMİR'e teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
TABLOLAR LİSTESİ.....	xxxı
ÖZET .....	xxxv
SUMMARY .....	xxxvi

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Kırılma Mekaniğinin Önemi ve Tarihçesi .....	1
1.2. Üç Boyutlu Kırılma Analizlerinin Önemi.....	3
1.3. FCPAS (Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi).....	4
1.4. Kırılma ve Çatlak İlerleme Problemleri ile İlgili Literatür Çalışmaları Özeti.....	7

### BÖLÜM 2.

ÜÇ BOYUTLU KARIŞIK MODLU YÜKLEME ALTINDA ÇATLAK İLERLEME DENEY KABİLİYETİ GELİŞTİRİLMESİ.....	11
2.1. Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Planlanması ve Malzeme Karakterizasyonu.....	11
2.2. Mod-I Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri .....	18
2.2.1. Mod-I kırılma tokluğu testleri .....	19
2.2.2. Alüminyum numunelerin mod-I kırılma tokluğu test sonuçları .	22
2.2.3. Çelik numunelerin mod-I kırılma tokluğu test sonuçları.....	23
2.2.4. Mod-I çatlak ilerleme testleri ve sonuçları .....	25

2.3. Mod-I/II Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri .....	32
2.3.1. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi tasarım ve kırılma analizleri.....	33
2.3.2. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi strain-gage doğrulama çalışması.....	42
2.3.3. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi kırılma tokluğu testleri .....	45
2.3.4. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi çatlak ilerleme testleri .....	48
2.3.5. Mod-I/II T-numunesi (yeni numune) tasarım ve kırılma analizleri.....	52
2.3.6. Mod-I/II T-numunesi strain-gage doğrulama çalışması .....	58
2.3.7. Mod-I/II T-numunesi kırılma tokluğu testleri .....	61
2.3.8. Mod-I/II T-numunesi çatlak ilerleme testleri .....	65
2.4. Mod-I/III Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri (Bozkurt, 2016) .....	67
2.4.1. Mod-I/III CTT numune ve tutucusu .....	67
2.4.2. Mod-I/III CTT numunesi analiz prosedürü .....	68
2.4.3. Mod-I/III CTT numunesi gerilme analizleri.....	70
2.4.4. Mod-I/III CTT numunesi kırılma analizleri .....	74
2.4.5. Mod-I/III CTT numunesi strain-gage doğrulama çalışması .....	76
2.4.6. Mod-I/III kırılma ve çatlak ilerleme test sonuçları.....	78
2.5. Mod-I/II/III Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri.....	86
2.5.1. Farklı mod-I/II/III numune tutucusu tasarım ve analizleri .....	88
2.5.1.1. T-numunesi için geliştirilen tutucu tasarım ve analizleri .....	88
2.5.1.2. CTST (compact tension shearing and tearing) numunesi için geliştirilen tutucu ön tasarım ve analizleri .....	92
2.5.2. Mod-I/II/III CTST (compact tension shearing and tearing) numunesi tasarım ve kırılma analizleri .....	100
2.5.3. Mod-I/II/III CTST numunesi strain-gage doğrulama çalışması ..	111
2.5.4. Mod-I/II/III CTST numunesi kırılma tokluğu testleri .....	116
2.5.5. Mod-I/II/III CTST numunesi çatlak ilerleme testleri .....	123

2.6. Karışık Modlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Değerlendirilmesi ve Literatür Modelleri ile Karşılaştırılması.....	127
2.6.1. İki boyutlu karışık mod kırılma kriterleri.....	128
2.6.1.1. Maksimum teğetsel gerilme (maximum tangential stress-MTS) kriteri.....	128
2.6.1.2. Maksimum enerji salınım hızı (maximum energy release rate-MERR) kriteri .....	128
2.6.1.3. Minimum birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu (minimum strain energy density-MSED) kriteri .....	129
2.6.1.4. Maksimum teğetsel birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu (maximum tangential strain energy density-MTSED) kriteri.....	129
2.6.1.5. Tanaka kriteri.....	130
2.6.1.6. Pook kriteri .....	130
2.6.1.7. Richard kriteri.....	131
2.6.2. Üç boyutlu karışık mod kırılma kriterleri.....	132
2.6.2.1. Minimum birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu (minimum strain energy density- $S_{min}$ ) kriteri.....	132
2.6.2.2. Schöllmann ( ) kriteri.....	132
2.6.2.3. Richard kriteri.....	134
2.6.2.4. Pook kriteri .....	134
2.6.2.5. Kikuchi kriteri .....	135
2.6.2.6. Tanaka kriteri.....	135
2.6.2.7. Irwin kriteri.....	136
2.6.3. Mod-I/II karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme testlerinin değerlendirilmesi ve literatür modelleri ile karşılaştırılması.....	136
2.6.3.1. CTS (Richard) numune sonuçlarının değerlendirilmesi	136
2.6.3.2. T-numunesi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	140
2.6.4. Mod-I/III karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme testlerinin değerlendirilmesi ve literatür modelleri ile karşılaştırılması.....	144

2.6.5. Mod-I//II/III karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme testlerinin değerlendirilmesi ve literatür modelleri ile karşılaştırılması.....	149
2.7. İki Boyutlu Kırılma ve Çatlak Yüzeyi İlerleme Kriteri Geliştirilmesi..	157
2.7.1. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi sonuçlarını kullanılarak geliştirilen kriter.....	157
2.7.2. CTS numune verileri ile geliştirilen kriterin T-numunesine uygulanması.....	160
2.7.3. Mod-I/II CTS (Richard) ve T-numunesi sonuçlarını kullanılarak geliştirilen kriter .....	162
2.7.4. Mod-I/II CTS (Richard) ve T-numunesi sonuçlarını kullanılarak geliştirilen çatlak sapma açısı kriteri .....	164
2.8. Üç Boyutlu Kırılma ve Çatlak Yüzeyi İlerleme Kriteri Geliştirilmesi..	167

### BÖLÜM 3.

KARIŞIK MODLU YÜKLEME ALTINDA ÜÇ BOYUTLU ÇATLAK İLERLEME ANALİZ KABİLİYETİ GELİŞTİRİLMESİ .....	175
3.1. FRAC3D'de Karışık Mod Yükleme İçin Çatlak İlerleme Profili Tahmini ve Test Edilmesi .....	175
3.2. Mod-I/II Richard Numunesi Çatlak İlerleme Testlerinin Modellenmesi.....	184
3.3. Eğik Çatlak İçeren CT Modeli Analizi.....	194
3.4. Mod-I/III Yükleri Altında CTT Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Maksimum Teğetsel Gerilme Kriteri).....	198
3.4.1. Mod-I/III 45° yükleme açısında CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri .....	198
3.4.2. Mod-I/III 60° yükleme açısında CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri .....	202
3.4.3. Mod-I/III 75° yükleme açısında CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri .....	205
3.5. Mod-I/II/III Yükleri Altında CTST Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Maksimum Teğetsel Gerilme Kriteri).....	209

3.5.1. Farklı ağ yapısı kullanarak gerçekleştirilen üç boyutlu çatlak ilerleme analiz yöntemi.....	209
3.5.2. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yükleme açısında CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri .....	213
3.5.3. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısında CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri .....	216
3.5.4. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri .....	219

#### BÖLÜM 4.

ÜÇ BOYUTLU KIRILMA ve ÇATLAK İLERLEME ANALİZ KABİLİYETLERİNİ SAĞLAMA PROBLEMLERİ.....	223
4.1. İki Adet Kenar Çatlağı İçeren Plakada Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II) Çatlak İlerleme Analizi.....	223
4.2. Eğik Çatlak İçeren Plakada Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod-I/III) Çatlak İlerleme Analizi .....	228
4.3. 10 mm Çapa Sahip Silindirik Çelik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yükleme Altında Çatlak İlerleme Analizi .....	237
4.4. 15 mm Çapa Sahip Alüminyum Alaşım (Al-7075 T-651) Silindirik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yükleme Altında Kırılma Analizi.....	242
4.5. 25mm Çapa Sahip Alüminyum Alaşım (Al-7075 T-651) Silindirik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yükleme Altında Kırılma ve Çatlak İlerleme Analizi.....	247
4.6. Mod-I/III Yükleri Altında CTT Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Geliştirilen Üç Boyutlu Kriter).....	254
4.6.1. Mod-I/III 45° yükleme açısında CTT numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri.....	256

4.6.2. Mod-I/III 60° yükleme açısında CTT numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri.....	260
4.6.3. Mod-I/III 75° yükleme açısında CTT numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri.....	263
4.7. Mod-I/II/III Yükleri Altında CTST Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Geliştirilen Üç Boyutlu Kriter).....	268
4.7.1. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yükleme açısında CTST numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri .....	269
4.7.2. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısında CTST numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri .....	272
4.7.3. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında CTST numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri .....	276

## BÖLÜM 5.

HADDE YÖNÜNÜN KIRILMA TOKLUĞU ve ÇATLAK İLERLEME DAVRANIŞINA ETKİSİ (Ayhan, 2016b).....	281
5.1. Mod-I ve Mod-I/II Kırılma Tokluğu Test Sonuçları (TS Hadde Yönü) .....	281
5.2. Mod-I ve Mod-I/II Çatlak İlerleme Test Sonuçları (TS Hadde Yönü). .....	285
5.3. Mod-I/III CTT Numunesi Çatlak İlerleme Davranışının LT ve TS Hadde Yönlerine Göre Değerlendirilmesi .....	291
5.4. Mod-I/II/III CTST Numunesi Çatlak İlerleme Davranışının LT ve TS Hadde Yönlerine Göre Değerlendirilmesi.....	296

## BÖLÜM 6.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER .....	301
6.1. Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Deney Kabiliyeti Geliştirilmesi.....	301

6.2. Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Analiz Kabilyeti Geliştirilmesi.....	302
6.3. Üç Boyutlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Kabilyetlerinin Uygulama Problemleri ile Sağlanması.....	302
6.4. Hadde Yönünün Kırılma Tokluğu ve Çatlak İlerleme Davranışına Etkisinin İncelenmesi.....	303

## BÖLÜM 7.

GELECEKTE YAPILABİLECEK BİLİMSEL ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER.....	301
KAYNAKLAR.....	306
ÖZGEÇMİŞ.....	315

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	: Çatlağın derinlik yönündeki uzunluğu
c	: Çatlağın yüzeydeki uzunluğu
C	: Malzeme sabiti
$\Delta a$	: Çatlak artış uzunluğu
$\Delta K$	: Gerilme şiddet faktörü genliği
FCPAS	: Fracture and Crack Propagation Analysis System (Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi)
GŞF	: Gerilme şiddet faktörü
K	: Gerilme şiddet faktörü sembolü
$K_I$	: Mod-I yüklemesi altında oluşan gerilme şiddet faktörü
$K_{II}$	: Mod-II yüklemesi altında oluşan gerilme şiddet faktörü
$K_{III}$	: Mod-III yüklemesi altında oluşan gerilme şiddet faktörü
$K_{Ic}$	: Düzlem şekil değişimi hali için malzemenin kırılma tokluğu
$K_{eş}$	: Eşdeğer gerilme şiddet faktörü
n	: Malzeme sabiti
N	: Yük çevrim sayısı
R	: Yük çevrim oranı
$\sigma_Y$	: Akma gerilmesi
v	: Poisson oranı



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	SS Schenectady adındaki tanker gemisinin ani kırılma sonucu ortadan ikiye ayrılarak hasara uğramış görünümü (Parker, 1957)...	2
Şekil 1.2.	"de Havilland Comet" isimli uçağın kare şeklindeki pencerenin köşesinde oluşan çatlakın sebep olduğu ani kırılma sonucu oluşan hasarın görünümü( <a href="http://www.fracturemechanics.org/history.html">http://www.fracturemechanics.org/history.html</a> ).	3
Şekil 1.3.	Çatlak ucuna değen zenginleştirilmiş elemanlar (a) 20-düğüm noktalı eleman, (b) 10-düğüm noktalı eleman (Uslu ve ark., 2014).	5
Şekil 2.1.	30x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın (a) kimyasal, (b) mekanik özellikleri.....	13
Şekil 2.2.	70x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri.....	14
Şekil 2.3.	90x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri.....	15
Şekil 2.4.	Temin edilen çelik malzemesinin kimyasal özellikleri.....	16
Şekil 2.5.	Temin edilen çelik malzemesinin kimyasal özellikleri.....	16
Şekil 2.6.	Çekme testi sonrası alüminyum ve çelik malzemelerinin görünüşü..	17
Şekil 2.7.	Yorulma ön çatlak oluşumunu oluşturulması için imal edilen yorulma cihazı.....	19
Şekil 2.8.	Test esnasında ön çatlak oluşumunu görüntülemek için kullanılan yüksek çözünürlüklü kamera.....	20
Şekil 2.9.	(a) Çekme cihazına bağlanan CT numunesi ve üzerine yapıştırılan milimetrik grid, (b) Temsili çatlak derinlik değerleri, $a_1$ , $a_2$ ve $a_3$ . ...	20
Şekil 2.10.	Zwick marka 50 kN kapasiteli çekme cihazı.....	22
Şekil 2.11.	Kırılma tokluğu testi sonucunda alüminyum malzemelerin perspektif görünüşü.....	22

Şekil 2.12. Kırılma tokluğu testi sonucunda çelik malzemelerin perspektif görünümü. ....	24
Şekil 2.13. Schimadzu 100 kN kapasiteli eksenel yorulma cihazı. ....	25
Şekil 2.14. Çatlak ilerleme davranışının üç bölgesini gösteren temsili yorulmalı çatlak ilerleme ömür grafiği. ....	27
Şekil 2.15. Otomatikleştirilmiş ekran görüntüsü alma program ara yüzü. ....	28
Şekil 2.16. Mod-I çatlak ilerleme testi için hazırlanan numunelerin perspektif görünümü. ....	28
Şekil 2.17. Mod-I çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numunelerin yüzey görüntüleri. ....	29
Şekil 2.18. Deneysel sonucu elde edilen $da/dN-\Delta K$ grafiğinin literatür verileri ile karşılaştırılması. ....	29
Şekil 2.19. Farklı "C" ve "n" değerleri için çizdirilen $da/dN-\Delta K$ grafiklerinin karşılaştırılması. ....	31
Şekil 2.20. Karışık modlu yüklemeler için modellenen (a) CTS numunesi ve (b) test konfigürasyonu. ....	33
Şekil 2.21. ANSYS ve FCPAS programında gerçekleştirilen CTS numunesi analizlerinin proses şeması. ....	34
Şekil 2.22. Lineer yük artışına bağlı olarak GŞF değerlerinin lineer değişimi. ...	35
Şekil 2.23. Temas tipinin çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri üzerine etkisi. ....	35
Şekil 2.24. Sürtünme katsayısının çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri üzerine etkisi. ....	36
Şekil 2.25. $\theta=45^\circ$ , 10 kN yükleme durumunda burç, pim, tutucular ve numunede oluşan gerilmelerin dağılımı. ....	37
Şekil 2.26. $\theta=45^\circ$ , 10 kN yükleme durumunda çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri. ....	37
Şekil 2.27. $\theta=90^\circ$ lik yükleme durumunu temsil etmek için numuneye uygulanan yüklerin gösterimi. ....	38
Şekil 2.28. $\theta=90^\circ$ lik yükleme durumunda K <sub>III</sub> etkisinin görsel olarak gösterilmesi – yükleme öncesi ve sonrası çatlak yüzeylerinin üst görünüşü. ....	39

Şekil 2.29. Farklı yükleme açıları için gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizleri sonrasında çatlak ucunda oluşan gerilme ve GŞF dağılımları. ....	39
Şekil 2.30. $\theta=45^\circ$ yükleme durumunda, $t=25$ ve $10$ mm kalınlıktaki CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma analiz sonuçları. ....	41
Şekil 2.31. Farklı ön çatlak uzunluklarının analiz modelinde gösterimi. ....	41
Şekil 2.32. $\theta=45^\circ$ yükleme açısı ve $10$ kN yükleme durumu için strain-gagelerin yerleştirileceği bölgeler. ....	43
Şekil 2.33. $\theta=45^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü. ....	43
Şekil 2.34. Richard numunesi için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği. ....	44
Şekil 2.35. Schimadzu $200$ kN kapasiteli aksenal çekme cihazı. ....	46
Şekil 2.36. CTS numunesi mod-I/II kırılma tokluğu testleri için kullanılan ekipmanların ve gerçekleştirilen deneylerin genel görünümü. ....	47
Şekil 2.37. Farklı açılarda kırılan numune yüzeylerinin perspektif görünümü. ....	47
Şekil 2.38. Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrasında $\theta=45^\circ$ yükleme açısı için elde edilen kuvvet-uzama eğrileri. ....	48
Şekil 2.39. Çatlak ilerleme testinden bir görünüm. ....	50
Şekil 2.40. Çevrim sayısına göre çatlak uzunluk değerlerinin değişimi, (a) $\theta=30^\circ$ , (b) $\theta=45^\circ$ ve (c) $\theta=60^\circ$ . ....	50
Şekil 2.41. Deney sonucu numunelerin kırılan yüzeylerinin perspektif ve üst görüşleri sırasıyla verilmiştir. ....	52
Şekil 2.42. Tasarlanan yeni numune ve uygun tutucu modeli. ....	52
Şekil 2.43. Detaylı ölçüleri verilen (a) numune ve (b) tutucu modeli. ....	53
Şekil 2.44. ANSYS ve FRAC3D programında gerçekleştirilen T-numune analizlerinin proses şeması. ....	54
Şekil 2.45. T-numunesi için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerlerinin dağılımları. ....	55
Şekil 2.46. Karşılaştırma analizlerinde kullanılan numunelerin detaylı ölçüleri. ....	56

Şekil 2.47. Kırılma analizleri sonrası her üç numune için elde edilen GŞF değerleri.....	57
Şekil 2.48. CTS-10 mm (Richard) ve T-25 mm kalınlık ve farklı yükleme açıları için gerçekleştirilen kırılma deneylerinden elde edilen kopma yükü değerleri.....	58
Şekil 2.49. Mod-I yüklemde 10 kN yüklemde gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numunede oluşan asal gerilmeler ve strain-gagelerin yerleştirildiği yerler. ....	59
Şekil 2.50. Mod-I yüklemesi altında 10 kN yüke kadar değişen yüklerde gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü.....	60
Şekil 2.51. T-numunesi için gerçekleştirilen deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği. ....	60
Şekil 2.52. T-numune kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kullanılan cihaz ve test sisteminin genel görünümü.....	62
Şekil 2.53. T-numune kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kullanılan numune ve tutucuların genel görünümü.....	62
Şekil 2.54. Farklı açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra T-numunelerinin genel görünümü ve oluşan çatlak sapma açıları.....	63
Şekil 2.55. Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrasında $\theta=45^\circ$ yükleme açısı için elde edilen kuvvet-uzama eğrileri. ....	64
Şekil 2.56. T-numune çatlak ilerleme deneyleri sonrasında numunelerin kırılan yüzeylerinin genel görünümleri.....	66
Şekil 2.57. $\theta=45^\circ$ yükleme açısında çevrim sayısına göre çatlak uzunluk değerlerinin değişimi.....	66
Şekil 2.58. Mod-I/III CTT numunesi ve boyutları. ....	67
Şekil 2.59. Mod-I/III CTT numune tutucusu.....	68
Şekil 2.60. Mod-I/III analiz modeli detayı. ....	69
Şekil 2.61. Mod-I/III analiz prosedürü.....	70

Şekil 2.62. 25 mm et kalınlığı ve 0 derece yükleme durumu için (a) tutucuda, (b) civatalarda, (c) numunede oluşan gerilme analizi sonuçları.....	71
Şekil 2.63. 25 mm et kalınlığı ve 45 derece yükleme durumu için (a) tutucuda, (b) civatalarda, (c) numunede oluşan gerilme analizi sonuçları.....	72
Şekil 2.64. 25 mm et kalınlığı ve 90 derece yükleme durumu için (a) tutucuda, (b) civatalarda, (c) numunede oluşan gerilme analizi sonuçları.....	73
Şekil 2.65. Farklı yükleme açıları için elde edilen $K_I$ gerilme şiddet faktörü değerleri.....	75
Şekil 2.66. Farklı yükleme açıların için elde edilen $K_{II}$ gerilme şiddet faktörü değerleri.....	75
Şekil 2.67. Farklı yükleme açıları için elde edilen $K_{III}$ gerilme şiddet faktörü değerleri.....	75
Şekil 2.68. Mod-I/III 45°, 6 kN yüklemede gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numunede oluşan gerilmeler ve strain-gagelerin yerleştirildiği yerler.....	76
Şekil 2.69. 45° mod-I/III yüklemesi altında 6 kN'ye kadar değişen yüklerde gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü.....	77
Şekil 2.70. Mod-I/III CTT numune için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana (yüke) bağlı değişim grafiği.....	77
Şekil 2.71. 12,5 mm kalınlıktaki mod-I/III CTT numunesi.....	79
Şekil 2.72. Mod-I/III CTT numune tutucusu.....	79
Şekil 2.73. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kuvvet-uzama grafikleri (t = 25mm).....	82
Şekil 2.74. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kuvvet-uzama grafikleri (t = 12,5mm).....	83
Şekil 2.75. Farklı açılarda yapılan da/dN testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri.....	84
Şekil 2.76. Farklı açılarda yapılan da/dN testleri kırılma yüzeyleri (sırt görünüş).....	85
Şekil 2.77. Mod-I/III ve mod-II/III testlerinde kullanılan tüm numuneler (üst görünüş).....	86

Şekil 2.78. Mod-I/II/III yüklemesi için tasarlanan T-numune tutucusu ve aparatları.....	88
Şekil 2.79. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarının kırılma analizleri için hazırlanan sonlu eleman modelleri.....	89
Şekil 2.80. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında tutucu, numune ve pimde oluşan gerilme dağılımının genel görünümü. ....	89
Şekil 2.81. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında tutucularda oluşan gerilme dağılımları. ....	90
Şekil 2.82. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında pimlerde oluşan gerilme dağılımları.....	90
Şekil 2.83. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında numunelerde oluşan gerilme dağılımları. ....	91
Şekil 2.84. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme çatlak ucunda elde edilen GŞF değerlerinin dağılımı.....	91
Şekil 2.85. Mod-I/II/III yüklemesi yapabilen CTST numune tutucusu ve aparatları.....	92
Şekil 2.86. 15 derecelik aralıklarla uygulanabilen yükleme tiplerinin gösterimi, (a) mod-I/II, (b) mod-I/III, (c) mod-II/III yükleme durumları. ....	93
Şekil 2.87. Mod-I/II-90°, mod-I/III-90° ve mod-II/III-15° yükleme durumu ve bunun etkisinde oluşacak kırılma modlarının birbirlerine göre etkinliği.....	94
Şekil 2.88. Mod-I/II-45°, mod-I/III-45° ve mod-II/III-45° yükleme durumu ve bunun etkisinde oluşacak kırılma modlarının birbirlerine göre etkinliği.....	95
Şekil 2.89. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda cıvatalı ve cıvatasız konfigürasyonlarda oluşan gerilme dağılımları. ....	97
Şekil 2.90. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda pim ve cıvatalarda oluşan gerilme dağılımları.....	97

Şekil 2.91. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda tutucularda oluşan gerilme dağılımları. ....	98
Şekil 2.92. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda tutucu civatalarında oluşan gerilme dağılımları. ....	98
Şekil 2.93. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri. ....	99
Şekil 2.94. Mod-I/II/III tutucusu için tasarımı tamamlanan nihai konfigürasyon. ....	100
Şekil 2.95. Nihai mod-I/II/III konfigürasyonunu oluşturan parça ve modellerin perspektif görünümü. ....	101
Şekil 2.96. Mod-I/II açılı yüklemeyi sağlayan tutucu modelinin detaylı boyutları ve perspektif görünümü. ....	101
Şekil 2.97. Tutucu ile kulak arasındaki bağlantıyı sağlayan bağlantı elemanının ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü. ....	102
Şekil 2.98. Mod-II/III yüklemesinin verilmesini sağlayan modelin ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü. ....	102
Şekil 2.99. Mod-I/II/III-CTST numunesinin ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü. ....	103
Şekil 2.100. CTST-numune için gerçekleştirilen gerilme analizleri sonrası test sisteminde oluşan gerilme dağılımları, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° yükleme durumu. ....	104
Şekil 2.101. Farklı yükleme açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu merkezinden elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75°. ....	106
Şekil 2.102. Farklı yükleme açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu arka kenarından elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75°. ....	108
Şekil 2.103. Farklı yükleme açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu ön kenarından elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca	

değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75° .....	110
Şekil 2.104. Strain-gage uygulaması için oluşturulan sonlu eleman modelleri ve analiz sonrası strain-gagelerin yerleştirileceği yerlerin belirlenmesi, (a) mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45°, (b) mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yükleme durumu. ....	112
Şekil 2.105. Strain-gage deneyleri esnasında cihazın ve test sisteminin genel görünümü. ....	113
Şekil 2.106. Her iki yükleme açısı için numuneye yapıştırılan strain-gagelerin görüntüleri. ....	114
Şekil 2.107. Deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin değişen yüklere bağlı olarak zamanla değişim grafiği, (a) mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45°, (b) mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yükleme durumu.....	114
Şekil 2.108. CTST numunesi ve tasarım boyutlarına uygun olarak üretilen tutucu aparatlarının genel görünümü.....	117
Şekil 2.109. Mod-I/II/III CTST numune tutucusunun mod-II/III yüklemesi yapabilmesi için tasarlanan ve kaynak işlemi ile tutucuya tutturulan aparat ve tutucunun yakın görünümü. ....	117
Şekil 2.110. Farklı yükleme açılarında gerçekleştirilen CTST numunesi kırılma tokluğu testlerinden birer kesit, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° yükleme durumu.....	118
Şekil 2.111. Mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açılarında gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra elde edilen kopma yüklerinin uzamaya bağlı olarak değişim grafikleri. ....	120
Şekil 2.112. Farklı açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra CTST-numunelerinin kırılan yüzeylerinin (a) ön açıdan, (b) yan açıdan, (c) üstten genel görünümü.....	121



Şekil 2.113. Gerçekleştirilen mod-I/II/III da/dN testlerinden bir kesit görünümü. ....	124
Şekil 2.114. Farklı yüklemeye açılarındaki gerçekleştirilen da/dN testleri sonrasında kırılan numunelerin farklı açılardan görünüşleri, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15° ve mod-II/III=15°-45°-75°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45° ve mod-II/III=15°, 45° ve 75°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° ve mod-II/III=15°, 30° ve 45° yüklemeye açıları. ....	125
Şekil 2.115. Mod-I/II=45°, mod-I/III=45° ve mod-II/III=45° yüklemeye açısında gerçekleştirilen da/dN testi esnasında çatlakın numune ön yüzeyinde bulunan uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi. ....	127
Şekil 2.116. Üç boyutlu çatlak önünde silindirik koordinat sistemi ve gerilme bileşenleri, (Richard ve ark., 2012). ....	133
Şekil 2.117. CTS numuneleri için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açılarına göre değişim grafiği. ....	138
Şekil 2.118. CTS numuneleri için elde edilen çatlak sapma açıları ile kriterlerden elde edilen sapma açılarının, $K_{II}/K_I$ oranına göre değişim grafiği. ....	139
Şekil 2.119. T-numuneleri için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açılarına göre değişim grafiği. ....	142
Şekil 2.120. T-numuneleri için elde edilen çatlak sapma açıları ile kriterlerden elde edilen sapma açılarının, $K_{II}/K_I$ oranına göre değişim grafiği. ..	143
Şekil 2.121. CTT numunelerinde <i>çatlak ucu merkezi</i> için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açılarına göre değişim grafiği. ....	147
Şekil 2.122. CTT numunelerinde <i>çatlak ucu kenarı</i> için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açılarına göre değişim grafiği. ....	148
Şekil 2.123. CTST numunesinin, mod-I/II=15, mod-I/III=15° yüklemeye durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=15°, 45° ve 75°	

yüklemeye açılara göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı. ....	152
Şekil 2.124. CTST numunesinin, mod-I/II=45, mod-I/III=45° yüklemeye durumunda, kopma yüklerinin mod- II/III=15°, 45° ve 75° yüklemeye açılara göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı. ....	154
Şekil 2.125. CTST numunesinin mod-I/II=75, mod-I/III=75° yüklemeye durumunda, kopma yüklerinin mod- II/III=45°, 60° ve 75° yüklemeye açılara göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı. ....	155
Şekil 2.126. CTS numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açısına göre değişim grafiği.....	160
Şekil 2.127. T-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açısına göre değişim grafiği.....	162
Şekil 2.128. CTS numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut kriterler ve geliştirilen ikinci kriterden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açısına göre değişim grafiği. ....	163
Şekil 2.129. T-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut kriterler ve geliştirilen ikinci kriterden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açısına göre değişim grafiği. ....	163
Şekil 2.130. CTS numunesi için, deneysel çatlak sapma açıları ile mevcut kriterler ve geliştirilen kriterden elde edilen sapma açılarının $K_{II}/K_I$ oranına göre değişim grafiği. ....	166
Şekil 2.131. T-numunesi için elde edilen deneysel çatlak sapma açıları ile mevcut kriterler ve geliştirilen kriterden elde edilen sapma açılarının $K_{II}/K_I$ oranına göre değişim grafiği. ....	167
Şekil 2.132. Çatlak ilerleme başlangıç noktasının tespiti için, mod-I/III yüklemeye açısında CTT numunesi için gerçekleştirilen testten bir kesit. ....	168

Şekil 2.133. Çatlak başlangıcının tespiti için, mod-I/III yükleme açısında CTT numunesi için gerçekleştirilen test sonrası kırılan numunenin yüzey görünümü.....	169
Şekil 2.134. CTT numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği.....	172
Şekil 2.135. CTT numunesi kopma yüklerinin mevcut ve geliştirilen kriterler ile kıyaslanması, (a) mod-I/II=15, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75, mod-I/III=75°.....	173
Şekil 3.1. Düzlem dışı yönde eğik çatlak yerleştirilen CT numunesinin önden ve yandan görünümü.....	176
Şekil 3.2. Yük ve sınır şartları uygulanan numunenin sonlu eleman modeli, (a) modelin tamamı, (b) çatlak yüzeyinden sonraki üst bölümü.....	177
Şekil 3.3. "5." çatlak ilerleme adımı için oluşturulan modelde çatlak yüzeyinin önden görünümü.....	177
Şekil 3.4. Çatlak profilini çevreleyen tünel hacmin modellenmesinde gerçekleşen işlem adımları.....	179
Şekil 3.5. Modelin çatlak yüzeyi ile ayrıştırılarak çatlak profilinin tanımlanması.....	179
Şekil 3.6. Hexahedral elemanlar ile bölüntülenen tünel hacim.....	180
Şekil 3.7. Sonlu eleman modelinin perspektif ve çatlak ucu civarının yakın görünümü.....	180
Şekil 3.8. Analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF, K <sub>I</sub> , K <sub>II</sub> ve K <sub>III</sub> değerleri, (a) başlangıç çatlak profili, (b) 6. çatlak profili sonucu.....	182
Şekil 3.9. $\theta=30^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 9 adım çatlak ilerlemesi modellenerek gerçekleştirilen analizler sonrasında (a) numunenin çatlak ucunda oluşan K <sub>I</sub> dağılımının temsil edildiği yerler, (b) çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği.....	185
Şekil 3.10. $\theta=30^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 9 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma	

	analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a) $K_I$ , (b) $K_{II}$ , (c) $K_{III}$ dağılımı. ....	185
Şekil 3.11.	$\theta=45^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 11 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen analizler sonrasında (a) numunenin çatlak ucunda oluşan $K_I$ dağılımının temsil edildiği yerler, (b) çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği.....	187
Şekil 3.12.	$\theta=45^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 11 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a) $K_I$ , (b) $K_{II}$ , (c) $K_{III}$ dağılımı. ....	187
Şekil 3.13.	$\theta=60^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 10 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen analizler sonrasında (a) numunenin çatlak ucunda oluşan $K_I$ dağılımının temsil edildiği yerler, (b) çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği.....	189
Şekil 3.14.	$\theta=60^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 10 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a) $K_I$ , (b) $K_{II}$ , (c) $K_{III}$ dağılımı. ....	189
Şekil 3.15.	$\theta=30^\circ$ yükleme açısında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin (a) 11 kN ( $R=0,1$ ), (b) 8,8 kN ( $R=0,1$ ) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması. ....	191
Şekil 3.16.	$\theta=45^\circ$ yükleme açısında CTS numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin, 11,4kN ( $R=0,1$ ) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması. ....	193
Şekil 3.17.	$\theta=60^\circ$ yükleme açısında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin, 13,65 kN ( $R=0,1$ ) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması. ....	194

Şekil 3.18. Tüm çatlak profilleri için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrası elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> ve (c) K <sub>III</sub> .....	195
Şekil 3.19. "21." adım sonunda modellenen çatlak profilinin üst kısmının yarı model görünümü. ....	196
Şekil 3.20. "21." çatlak profilinin sonlu eleman modelinin farklı açılarda görüntüleri. ....	197
Şekil 3.21. Mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan yorulma çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü. ....	199
Şekil 3.22. Mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri. ....	199
Şekil 3.23. Mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin (a) yüzeysel, (b) çizgisel karşılaştırılması. ....	201
Şekil 3.24. Mod-I/III 60° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.....	202
Şekil 3.25. Mod-I/III 60° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri.....	203
Şekil 3.26. Mod-I/III 60° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin (a) yüzeysel, (b) çizgisel karşılaştırılması. ....	205
Şekil 3.27. Mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.....	206

Şekil 3.28. Mod-I/III 75° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri. ....	206
Şekil 3.29. Mod-I/III 75° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması. ....	208
Şekil 3.30. Çatlak ucu boyunca sıralanan (a) tetrahedral, (b) hexahedral elemanlar. ....	210
Şekil 3.31. Tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen bir analizden çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerlerinin dağılımı.....	211
Şekil 3.32. Çatlak ilerleme analizi sonrası tahmin edilen bir sonraki profilin ham veri koordinatları ve bu datalara eğri uydurulduktan sonra elde edilen yeni koordinatların (a) iki boyutlu, (b) üç boyutlu dağılımı.....	212
Şekil 3.33. Mod-I/III 45° yüklemeye açısı için, hexahedral ve tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen her iki analiz sonuçlarından elde edilen yüzeyler. ....	213
Şekil 3.34. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü. ....	214
Şekil 3.35. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri. ....	214
Şekil 3.36. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması.....	216

Şekil 3.37. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü. ....	216
Şekil 3.38. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri. ....	217
Şekil 3.39. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması. ....	218
Şekil 3.40. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü. ....	219
Şekil 3.41. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri. ....	220
Şekil 3.42. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması. ....	221
Şekil 4.1. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılacak olan ve iki adet kenar çatlağı barındıran plakanın geometrisi, ölçüleri ve çatlakların konumları. ....	224
Şekil 4.2. FCPAS ile yapılan çoğul çatlak ilerleme analizi sonucu elde edilen GŞF değerlerinin literatürdeki veriler ile kıyaslaması (değerler uzun olan çatlaktan alınmıştır). ....	226
Şekil 4.3. FCPAS ile yapılan çoğul çatlak ilerleme analizi sonucu elde çatlak profillerinin literatürdeki veriler ile karşılaştırılması. ....	226
Şekil 4.4. Düzlemsel olmayan çoğul çatlak ilerlemesinin oluştuğu plakanın ANSYS ile bölüntü oluşturulmuş hali. ....	227

Şekil 4.5.	Düzlemsel olmayan çoğul çatlak ilerlemesinin olduğu plakanın çekme yükü altında deforme olmuş hali. ....	227
Şekil 4.6.	Mod-I yüklemesi altında ön çatlak oluşturulmasının ardından belirli açılarda plakalar kesilerek çatlağın plaka kenarlarına açılı olarak yerleştirilmesinin sağlanması. ....	228
Şekil 4.7.	Yatayla 15°, 30° ve 45° açı yapan ön çatlağa sahip plakalara uygulanan dört nokta yorulmalı eğme test düzeneği ve oluşturulan çatlak profili boyutları. ....	229
Şekil 4.8.	Yatayla 15° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF ve bu değerlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri. ....	230
Şekil 4.9.	Yatayla 15° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi. ....	231
Şekil 4.10.	Yatayla 15° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması. ....	231
Şekil 4.11.	Yatayla 30° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması. ....	232
Şekil 4.12.	Yatayla 30° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi. ....	232
Şekil 4.13.	Yatayla 30° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması. ....	233
Şekil 4.14.	Yatayla 45° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması. ....	234
Şekil 4.15.	Yatayla 45° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi. ....	234
Şekil 4.16.	Yatayla 45° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması. ....	235
Şekil 4.17.	Farklı eğim açılarında ön çatağa sahip plakaların analizlerinden elde edilen GŞF değerleri kullanılarak, mevcut ve geliştirilen	



kriterlere göre yapılan ömür tahminleri, (a) $\theta=15^\circ$ , (b) $\theta=30^\circ$ , (c) $\theta=45^\circ$ çatlak açısı. ....	236
Şekil 4.18. Deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları. ....	238
Şekil 4.19. Gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen çatlak ucu boyunca (a) $K_I$ , (b) $K_{II}$ , (c) $K_{III}$ değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması. ....	239
Şekil 4.20. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması. ....	240
Şekil 4.21. Gerçekleştirilen 13 adım çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyleri. ....	241
Şekil 4.22. Gerçekleştirilen kritere göre elde edilen ömür verilerinin literatürden alınan veriler ile karşılaştırılması. ....	242
Şekil 4.23. Deney ve analizlerde kullanılan numune ve çatlak boyutları. ....	244
Şekil 4.24. Farklı ön-çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri. ....	244
Şekil 4.25. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı. ....	245
Şekil 4.26. Deneysel kullanımlar ve gerçekleştirilen deneyden bir kesit. ....	245
Şekil 4.27. Mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin, deneysel kopma yükleri ile karşılaştırılması. ....	247
Şekil 4.28. Deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları. ....	248
Şekil 4.29. Farklı ön-çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri. ....	249
Şekil 4.30. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı. ....	249
Şekil 4.31. Mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin, deneysel kopma yükleri ile karşılaştırılması. ....	250
Şekil 4.32. 17 kN aksenal yük ( $R=0,1$ ) ve 136 Nm ( $R=0,1$ ) burulma momenti etkisinde kırılan numune yüzeyinin üstten görünümü. ....	251

Şekil 4.33. MTS kriteri ve geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> , (d) Keş değerleri. ....	252
Şekil 4.34. MTS kriteri ve geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen çatlak yüzeyleri. ....	254
Şekil 4.35. Çatlak yüzeylerinin sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için uygulanan yöntem. ....	255
Şekil 4.36. Mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri. ....	256
Şekil 4.37. Mod-I/III 45° yükleme açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit. ....	258
Şekil 4.38. Mod-I/III 45° yükleme açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması. ....	259
Şekil 4.39. Mod-I/III 60° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri. ....	260
Şekil 4.40. Mod-I/III 60° yükleme açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit. ....	262
Şekil 4.41. Mod-I/III 60° yükleme açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması. ....	263
Şekil 4.42. Mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri. ....	264
Şekil 4.43. Mod-I/III 75° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit. ....	266

Şekil 4.44. Mod-I/III 75° yüklemeye açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması.....	268
Şekil 4.45. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri.....	269
Şekil 4.46. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklemeye açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.....	271
Şekil 4.47. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklemeye açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması.....	272
Şekil 4.48. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri.....	273
Şekil 4.49. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.....	274
Şekil 4.50. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması.....	276
Şekil 4.51. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) K <sub>I</sub> , (b) K <sub>II</sub> , (c) K <sub>III</sub> GŞF değerleri.....	277
Şekil 4.52. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.....	278

Şekil 4.53.	Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması. ....	280
Şekil 5.1.	CT ve CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden bir kesit. ....	282
Şekil 5.2.	TS hadde yönündeki CT numuneleri için gerçekleştirilen mod-I kırılma tokluğu testleri sonrası kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü. ....	283
Şekil 5.3.	TS hadde yönündeki CTS numuneleri için gerçekleştirilen mod-I/I kırılma tokluğu testleri sonrası kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü. ....	284
Şekil 5.4.	Mod I-II yüklemesi altında, LT ve TS hadde yönü için elde edilen kırılma yük değerlerinin açığa bağlı olarak karşılaştırılması. ....	285
Şekil 5.5.	TS hadde yönündeki CT numuneleri için gerçekleştirilen mod-I çatlak ilerleme testleri sonrası kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü. ....	286
Şekil 5.6.	TS ve LT hadde yönleri için elde edilen $\Delta K$ -da/dN eğrileri. ....	286
Şekil 5.7.	TS hadde yönündeki CTS numuneleri için gerçekleştirilen mod-I/II çatlak ilerleme testleri sonrası kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü. ....	288
Şekil 5.8.	TS ve LT hadde yönlerine sahip numunelerin karışık mod-I/II yükleme durumlarında, çatlak uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi (a) 30° (b) 45° (c) 60°. ....	289
Şekil 5.9.	Hadde yönlerine göre numunelerde çatlak yerleşimi. ....	290
Şekil 5.10.	Mod-I/III 45° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönleri için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması. ....	292
Şekil 5.11.	Mod-I/III 60° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönleri için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması. ....	294

- Şekil 5.12. Mod-I/III 75° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönleri için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması. .... 295
- Şekil 5.13. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması. .... 297
- Şekil 5.14. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması. .... 298
- Şekil 5.15. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması. .... 300

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Tez kapsamında gerçekleştirilen kırılma testlerinin özeti.....	12
Tablo 2.2.	Alüminyum ve çelik numunelerin çekme testi sonucu elde edilen akma dayanımı değerleri. ....	18
Tablo 2.3.	Çelik numunelere uygulanan sertlik testi sonucu elde edilen sertlik değerleri.....	18
Tablo 2.4.	Al 7075 T-651 malzemesinin kırılma tokluğu ölçümü test sonuçları ve minimum kalınlık hesabı. ....	23
Tablo 2.5.	Çelik malzemelerinin kırılma tokluğu ölçümü test sonuçları ve minimum kalınlık hesabı.....	24
Tablo 2.6.	Mod-I çatlak ilerleme testlerinden ve literatürden elde edilen "C" ve "n" malzeme sabitleri.....	30
Tablo 2.7.	$\theta = 0^\circ - 15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ - 90^\circ$ açılarda gerçekleştirilen analizlerin sonuçları. ....	40
Tablo 2.8.	$\theta = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ ve $90^\circ$ yükleme açılarında, 43.5, 45 ve 47 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucunda elde edilen $K_I$ , $K_{II}$ ve $K_{III}$ değerleri (Demir ve ark., 2016). ....	42
Tablo 2.9.	CTS numunesi için simülasyondan ölçülen birim şekil değiştirme değerleri ile deneyde strain gagelerden okunan birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması. ....	44
Tablo 2.10.	CTS numunesi kırılma tokluğu test sonuçları. ....	48
Tablo 2.11.	$\theta = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ ve $90^\circ$ yükleme açılarında, 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizlerinden elde edilen $K_I$ , $K_{II}$ ve $K_{III}$ değerleri. ....	56

Tablo 2.12. T-numunesi için simülasyondan ölçülen birim şekil değiştirme değerleri ile deneyde strain- gagelerden okunan birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması. ....	61
Tablo 2.13. T numune kırılma tokluğu test sonuçları.....	64
Tablo 2.14. Farklı temas (contact) tipleri için yapılan analizler.....	70
Tablo 2.15. Mod-I/III CTT numune için deneyde ölçülen strain-gage ortalama direnç ve birim şekil değişimi değerleri.....	78
Tablo 2.16. Kırılma tokluğu test matrisi.....	81
Tablo 2.17. Mod-I/III CTT Numunesi çatlak ilerleme test matrisi. ....	84
Tablo 2.18. Mod-I/II/III test ve analizleri için belirlenen yükleme açıları.....	103
Tablo 2.19. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu merkezi için elde edilen $K_I$ , $K_{II}$ ve $K_{III}$ değerleri. ....	106
Tablo 2.20. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için çatlak ucu arka kenarından elde edilen $K_I$ , $K_{II}$ ve $K_{III}$ değerleri. ....	108
Tablo 2.21. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için çatlak ucu ön kenarından elde edilen $K_I$ , $K_{II}$ ve $K_{III}$ değerleri. ....	110
Tablo 2.22. Simülasyondan elde edilen birim şekil değişimi değerleri ile deneyde ölçülen değerlerin karşılaştırılması (a) mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45°, (b) mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yükleme durumu.....	115
Tablo 2.23. CTST-numunesi kırılma tokluğu test sonuçları. ....	122
Tablo 2.24. $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$ yükleme açılarında CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti. ....	136
Tablo 2.25. CTS numuneleri için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF değerleri ve bu değerlere göre değişik kriterler kullanılarak hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri. ....	137
Tablo 2.26. CTS numuneleri için değişik kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.....	138
Tablo 2.27. CTS numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları.....	139

Tablo 2.28. $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve $75^\circ$ yükleme açılarında T-numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti. ....	140
Tablo 2.29. T-numuneleri için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.....	141
Tablo 2.30. $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve $75^\circ$ yükleme açılarında T-numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri. ....	141
Tablo 2.31. $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve $75^\circ$ yükleme açılarında T-numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları.....	143
Tablo 2.32. $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve $90^\circ$ yükleme açılarında CTT numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti. ....	144
Tablo 2.33. CTT numunelerinde <i>çatlak ucu merkezi</i> için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri. ....	145
Tablo 2.34. CTT numunelerinde <i>çatlak ucu kenarı</i> için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri. ....	145
Tablo 2.35. CTT numunelerinde <i>çatlak ucu merkezi</i> için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.....	146
Tablo 2.36. CTT numunelerinde <i>çatlak ucu kenarı</i> için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.....	147
Tablo 2.37. CTST numunesi kırılma tokluğu testleri ile ilgili test matrisi tablosu. ....	149
Tablo 2.38. CTST numunesi kırılma tokluğu test verileri ve FCPAS çözümleri..	150
Tablo 2.39. CTST numunesinin, Richard, Tanaka ve Pook kriterine göre elde edilen eşdeğer GŞF değerleri. ....	151
Tablo 2.40. CTST numunesinin kırılma tokluğu deneylerinden ve Richard, Tanaka ve Pook kriterlerinden elde edilen kopma yükü değerleri....	151



Tablo 2.41. CTS numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin katsayıları. ....	159
Tablo 2.42. Geliştirilen kritere göre CTS numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF ile hesaplanan kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. ....	159
Tablo 2.43. Geliştirilen kriterin (1) ve T-numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF değerlerini kullanılarak hesaplanan kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. ....	161
Tablo 2.44. CTS ve T-numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin katsayıları. ....	162
Tablo 2.45. CTS ve T-numune verileri kullanılarak geliştirilen çatlak sapma açısı kriterinin katsayıları. ....	164
Tablo 2.46. Geliştirilen kritere ve mevcut kriterlere göre CTS numunesi için elde edilen çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. ....	165
Tablo 2.47. Geliştirilen kritere ve mevcut kriterlere göre T-numunesi için elde edilen çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. ....	165
Tablo 2.48. Mod-I/III ve mod-I/II/III test verilerini kullanılarak geliştirilen eşdeğer gerilme şiddet faktörü kriterinin katsayıları. ....	170
Tablo 2.49. Geliştirilen üç boyutlu kritere göre CTT numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF ile kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. ....	171
Tablo 4.1. Üç boyutlu mevcut ve geliştirilen kriterlere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri. ....	246
Tablo 4.2. Üç boyutlu mevcut ve geliştirilen kriterlere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri. ....	250
Tablo 5.1. TS hadde yönündeki CTS numunesi mod-I/II kırılma tokluğu test sonuçları. ....	284
Tablo 5.2. LT ve TS hadde yönleri için Paris-Erdoğan malzeme sabitleri. ....	287

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesi, karışık mod kırılma, eşdeğer gerilme şiddet faktörü, yorulma çatlak ilerlemesi.

Makine parçaları ve mühendislik yapıları malzemeye, geometriye, çevresel koşullara, yük ve sınır şartlarına bağlı olarak, pek çok alanda, çatlak veya kırılma problemleri ile karşılaşmaktadır. Bazı kritik yapılarda ise, bu problemler çok büyük bir sorun haline gelebilmektedir. Yapıda bulunan bu çatlaklar, belirli bir boyuta kadar yapının içerisinde kalabilmekte veya bazen faciaya yol açan bir ani kırılma ile ciddi maddi kayıplara, hatta bazı hallerde can kayıplarına da neden olabilmektedirler. Yapının veya makine parçalarının, yapıda var olan çatlaklar ile fonksiyonunu devam ettirmesinin güvenli olup olmadığı ve eğer güvenli ise, hasarlı yapının geri kalan ömrünün tespiti için kırılma parametrelerinin hassas ve doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, iki ve üç boyutlu karışık modlu yüklere maruz çatlak içeren yapı elemanlarının, çatlak ilerleme yüzeyleri ve ömürlerinin doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesi için, deneysel analiz, yöntem ve kırılma kriterleri geliştirilmiştir. Bu kapsamda, literatürde benzerleri bulunan numuneler ve yeni tasarlanan numune ve test sistemleri ile iki ve üç boyutlu karışık modlu çatlak ilerleme analiz ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yeni önerilen numune ve test sistemlerinin doğrulama çalışmaları gerçekleştirilerek, tüm testler için elde edilen veriler mevcut kriterler ile karşılaştırılarak, kırılma/kopma yükü, çatlak ilerleme ömrü ve çatlak ilerleme yüzey profilini doğru bir şekilde tahmin edebilen, yeni iki ve üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme kriterleri geliştirilmiştir. Son olarak, hadde yönünün kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme davranışına olan etkisi araştırılmış ve farklı hadde yönleri için özellikle düşük yükleme açılarında yaklaşık 5 kata varan ömür farklılıkları elde edilerek, hadde yönünün çatlak ilerleme davranışında önemli bir etkisinin olduğu gösterilmiştir.

# **NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND DEVELOPMENT OF THREE DIMENSIONAL MIXED-MODE FRACTURE CRITERIA**

## **SUMMARY**

Keywords: Finite element method, non-planar crack growth, mixed-mode fracture, equivalent stress intensity factor, fatigue crack growth.

Machine parts and engineering structures encounter with cracks or fracture problems in many areas depending on material, geometry, environmental conditions, loading and boundary conditions. In some critical structures, these problems may become a huge problem. These cracks can remain in the structure until a certain size or sometimes with a sudden fracture may cause serious financial losses that led to disaster and even in some cases may cause a loss of life. The structure or machine parts must be determined whether it is safe to resume the function with existing cracks and, if safe, fracture parameters must be calculate accurately for assessment of remaining life of a damaged structure.

In this study, to predict crack propagation surfaces and life of structures containing cracks under two and three-dimensional mixed-mode loading accurately and reliably, experimental analyses, experimental method and fracture criteria are developed. In this context, two and three-dimensional mixed-mode crack propagation analyses and experiments are performed with specimens and test systems that some of them are exist in the literature and the others are designed for this study. Validation studies are performed for new proposed specimen and test systems. The data obtained from all analyses and experiments are compared with existing criteria and new two and three-dimensional fracture and crack propagation criteria which are predict fracture/braking load, crack propagation life/surface accurately are developed. Finally, the effect of rolling direction on fracture toughness and crack propagation behavior is investigated and especially under low loading conditions, high differences are obtained for different rolling directions up to about five times. The results show that the rolling direction has a significant effect on crack growth behavior.

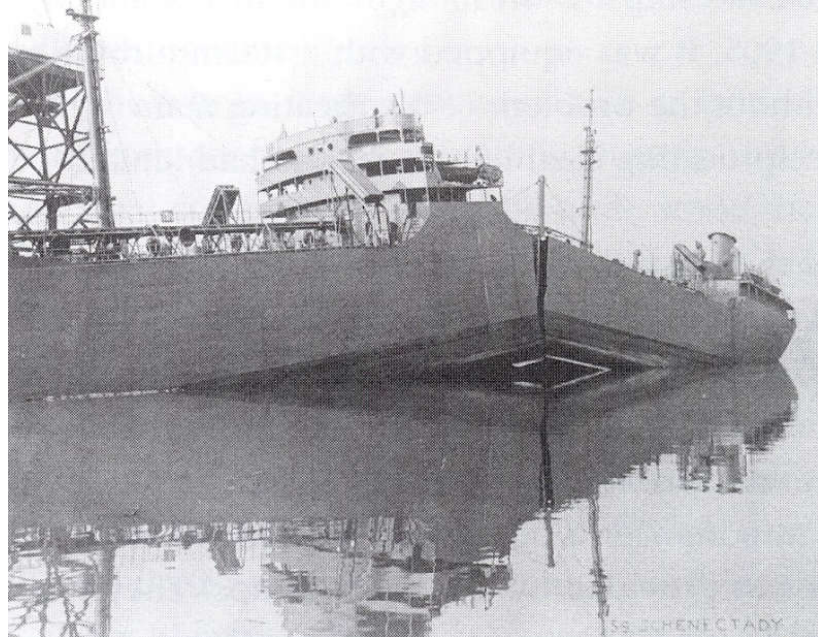
# **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

## **1.1. Kırılma Mekanikinin Önemi ve Tarihçesi**

Mühendislik yapıları her ne kadar dikkatli ve hassas bir şekilde tasarlanarak kusursuz üretilmeye çalışılsa da, üretim esnasında veya üretimden sonra kullanım sırasında oluşabilen çatlak vb. kusurlar içerebilmektedir. Çevrimsel yüklere maruz yapı elemanlarında bu çatlak vb. kusurlar yüklerin etkisi ile zamanla büyümekte ve çatlaklar ilerleyerek ani kırılma şeklinde hasarlara sebep olabilmektedir. Yapıya etkiyebilecek maksimum yükler dikkate alınarak emniyetli olarak yapının taşıyabileceği en uygun malzeme seçimi, tasarım esnasında belirlenmesine rağmen, yapıda bulunan bu kusurlar çevrimsel yüklerin etkisinde çok düşük yüklerde bile büyüyerek yapı veya makine elemanının bütünlüğünü tehdit edebilmektedir. Kırılma mekaniği, mekaniğin temel prensiplerini kullanarak, yapıda bulunan çatlağın, yüklerin etkisiyle ne kadar ve hangi hızda ilerleyeceğini ve ne zaman kritik boyuta ulaşarak elemanın hasara uğrayacağını tahmin etmede yararlanılan bir bilim dalıdır. Beklenmeyen ani hasarların oluşması sonucu mal ve can kayıpları oluşabilir. Ayrıca, kırılma mekaniği yatırım maliyetlerinin yüksek olduğu enerji, ulaştırma, savunma ve havacılık ve uzay teknolojileri gibi, ülkeler için kritik öneme sahip olan bu alanlar için de büyük önem arz etmektedir. Özellikle gelişmiş ülkeler tarafından bu alanlara yapılan harcamalar ve bu harcamalara devlet bütçelerinden ayrılan pay en üst seviyelerdedir. Yatırım maliyetlerinin yüksek olduğu bu alanlarda, kullanılan ekipmanlar da hem mali açıdan hem de malzeme güvenilirliği açısından önem kazanmakta ve bu da, geçmişte olduğu gibi, günümüzde ve gelecek için de kırılma mekaniğini odak konusu yapmaktadır.

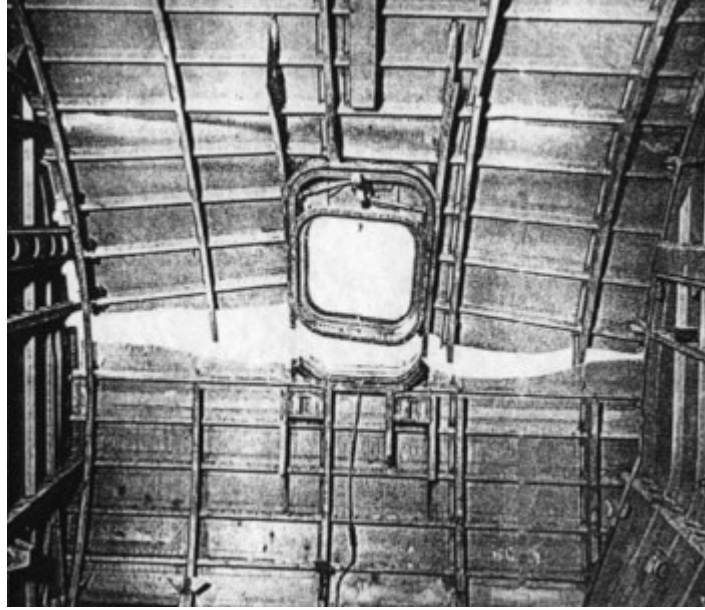
Kırılma mekaniği, tarihsel gelişimi yakın geçmişe dayanan, katı cisimler mekaniğinin bir alt dalıdır. Literatürdeki yaygın görüşe göre, kırılma mekaniğinin

başlangıcının, Griffith'in (1920; 1924) kırılma teorisi üzerine yaptığı çalışmalar ile başladığı belirtilmektedir. Fakat o yıllarda bu konulara yeterli ilgi ve önem verilmemiştir. İkinci Dünya Savaşı sırasında Liberty türü birçok gemi, ani kırılma sonucunda korkunç hasarlara uğramış ve yapılan incelemeler sonrası bunların sebeplerinin önemli bir bölümünün, imalat esnasında uzman olmayan elemanlar tarafından yapılan düşük kalitedeki kaynak sonucu, yapıda oluşan çatlak benzeri boşluklardan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Şekil 1.1.'de, o dönemde hasara uğrayan gemilerden bir tanesi olan "SS Schenectady" adındaki tanker gemisinin ortadan ikiye ayrılmış görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.1. SS Schenectady adındaki tanker gemisinin ani kırılma sonucu ortadan ikiye ayrılarak hasara uğramış görünümü (Parker, 1957).

Şekil 1.2.'de ise, 1950'lerin başlarında üretilen ve dünyanın ilk ticari jet uçaklarından olan "de Havilland Comet" isimli uçağın kare şeklindeki penceresinin köşesinde oluşan çatlakın sebep olduğu ani kırılma sonucu oluşan hasarın görünümü verilmiştir. 1940 ve 1950'li yıllarda gemi ve uçaklarda ani ve beklenmeyen kırılmalar sonucu ciddi kazaların ortaya çıkması, kırılma mekaniğine olan ilgiyi yoğunlaştırmıştır. Griffith'in 1920'li yıllarda ortaya koyduğu kırılma teorilerini, Irwin (1957; 1958) 1950'lerin sonlarına doğru geliştirerek, gerçek mühendislik problemlerine uygulanabilir hale getirmiştir.



Şekil 1.2. "de Havilland Comet" isimli uçağın kare şeklindeki penceresinin köşesinde oluşan çatlakın sebep olduğu ani kırılma sonucu oluşan hasarın görünümü (<http://www.fracturemechanics.org/history.html>).

Irwin'in çalışmalarının, lineer elastik kırılma mekaniğinin (LEFM) gelişimi üzerine önemli katkıları olmuştur. LEFM'nin genellikle gevrek malzemeler için doğru çözümler ürettiği ancak çatlak ucunda meydana gelen büyük ölçekteki plastik değişimlerden dolayı sünek malzemelere uygulanabilir olmadığı 1960'larda yapılan farklı çalışmalarla tespit edilmiştir (Dugdale, 1960; Wells, 1961). Rice (1968), lineer olmayan malzeme davranışlarını karakterize etmek için, J-integrali olarak bilinen çözümü geliştirerek kırılma mekaniği çalışma alanını genişletmiştir.

Kırılma mekaniğinde kullanılan nümerik metotlar son yıllarda önemli gelişmeler göstermiş ve her geçen gün gelişen teknolojiyle bilgisayarların kapasitelerindeki artış da problemlerin çözümlerini kolaylaştırarak, kırılma mekaniği alanındaki gelişmelerde önemli bir hız artışı sağlamıştır.

## 1.2. Üç Boyutlu Kırılma Analizlerinin Önemi

Mühendislik yapıları ve makine parçalarında, üretim esnasında yapılan hatalardan veya üretim sonrası servis halinde iken çevresel faktörlerden ya da yükleme koşullarından kaynaklanan çatlaklar oluşabilmektedir. Yapının veya makinenin,

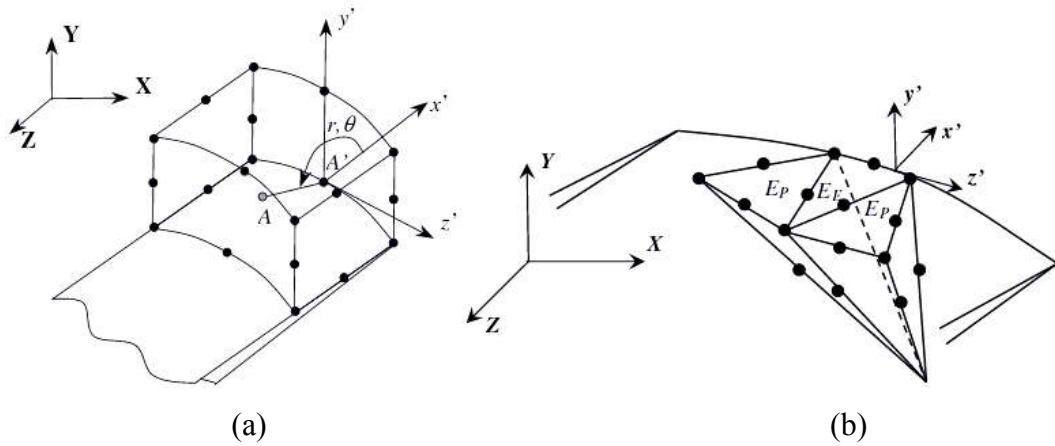
yapıda var olan çatlaklar ile fonksiyonunu devam ettirmesinin güvenli olup olmadığı ve eğer güvenli ise, hasarlı yapının geri kalan ömrünün tespiti için kırılma parametrelerinin hassas ve doğru bir şekilde hesaplanması gerekir.

Mühendislik yapıları ve makine parçalarında karşılaşılan çatlak ve kırılma problemlerinin sebeplerinden biri, yapıların karmaşık yükler altında yorulmaya maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak basit mod-I yüklemesi altında malzemelerin çatlak ilerleme davranışının incelenmesi üzerine olmuştur. Ancak mühendislik malzemeleri, çalışma koşulları bakımından mod-II ve mod-III yükleme tiplerinin de olduğu, karışık mod olarak adlandırılan yüklere de maruz kalabilmektedirler. Üç boyutlu karışık mod kırılma problemlerinde çatlak, geometri, yükleme ve sınır şartlarına bağlı olarak düz, eğri, düzlemsel veya düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyebildiği için, düzlemsel olmayan çatlak ilerleme olgusunun üç boyutlu modelleme ve analizi karmaşık ve zordur. Bu yüzden, çatlaklı lineer elastik bir yapı analizinin amacı ne olursa olsun, mekanik ömür değerlendirmesi için, üç boyutlu gerilme şiddet faktörünün doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada, zenginleştirilmiş sonlu elemanlar tekniği ve Ayhan'ın (Ayhan, 1999; Ayhan and Nied, 1998; 2002) yüksek lisans ve doktora çalışmaları boyunca geliştirmiş olduğu sonlu eleman temelli bağımsız kırılma analiz programı olan FRAC3D, kırılma ve çatlak ilerleme analizleri için kullanılmış ve programın detayları bir sonraki bölümde kısaca açıklanmıştır.

### **1.3. FCPAS (Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi)**

FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System – Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi), üç boyutlu problemlerde kırılma ve çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirebilen, sonlu eleman temelli bağımsız FRAC3D programını ve diğer alt programları içeren bir yazılımdır. FRAC3D programı, çatlak ucu boyunca zenginleştirilmiş elemanlar kullanarak, çatlak bölgesinde özel bölüntü ihtiyacına ve analiz sonrası çok uzun zaman gerektiren son (post) işleme gerek duymadan, gerilme şiddet faktörlerinin ( $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$ ) verimli ve doğru bir biçimde hesaplanmasını sağlamaktadır.

Çatlak içeren sonlu eleman modelinde, çatlak ucuna değen elemanlar zenginleştirilmiş elemanlar olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.3.'te üç boyutlu uzayda konumlandırılmış bir çatlağın ucuna değen 20- ve 10-düğüm noktalı zenginleştirilmiş elemanlar temsili olarak gösterilmektedir. Şekil 1.3.b'de yer alan  $E_E$  isimli eleman çatlak ucunda bir kenara sahip,  $E_P$  isimli elemanlar ise çatlak ucunda bir noktaya sahip zenginleştirilmiş elemanlardır.



Şekil 1.3. Çatlak ucuna değen zenginleştirilmiş elemanlar (a) 20-düğüm noktalı eleman, (b) 10-düğüm noktalı eleman (Uslu ve ark., 2014).

Çatlak ucu, bu şekilde çatlak ucu ile nokta veya kenar paylaşımında bulunan elemanlar ile tamamen çevrilidir. Şekil fonksiyonlarını ve düğüm noktası yer değişimlerini içeren geleneksel sonlu eleman formülasyonuna ilave olarak bu elemanlar çatlak ucunda yer alan gerilme şiddet faktörlerini de bilinmeyen olarak içerirler. Zenginleştirilmiş bir elemanda  $\xi$ ,  $\eta$  ve  $\rho$  lokal koordinatlarında bir integrasyon noktası için,  $u$ ,  $v$  ve  $w$  deplasmanları aşağıda verilen eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}
 u(\xi, \eta, \rho) = & \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) u_j + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( f_u(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) f_{uj} \right) \left( \sum_{i=1}^{nip} N_i(\Gamma) K_i^I \right) \\
 & + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( g_u(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) g_{uj} \right) \left( \sum_{i=1}^{nip} N_i(\Gamma) K_{II}^I \right) \\
 & + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( h_u(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) h_{uj} \right) \left( \sum_{i=1}^{nip} N_i(\Gamma) K_{III}^I \right)
 \end{aligned} \quad (1.1)$$



$$\begin{aligned}
v(\xi, \eta, \rho) = & \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) v_j + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( f_v(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) f_{vj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_I^i \right) \\
& + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( g_v(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) g_{vj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{II}^i \right) \\
& + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( h_v(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) h_{vj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{III}^i \right)
\end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned}
w(\xi, \eta, \rho) = & \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) w_j + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( f_w(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) f_{wj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_I^i \right) \\
& + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( g_w(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) g_{wj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{II}^i \right) \\
& + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( h_w(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) h_{wj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{III}^i \right)
\end{aligned} \quad (1.3)$$

(1.1)-(1.3) nolu denklemlerde yer alan değişkenlerden,  $N_j$  ile gösterilen  $\xi$ ,  $\eta$  ve  $\rho$ , lokal koordinatları için eleman şekil fonksiyonlarını ve  $Z_0$ , 0 ve 1 arasında değişkenlik gösteren sıfırlama fonksiyonunu temsil etmektedir.  $f_u$ ,  $g_u$ ,  $h_u$ ,  $f_v$ ,  $g_v$ ,  $h_v$ ,  $f_w$ ,  $g_w$  ve  $h_w$  ise asimptotik çatlak ucu yer değiştirme ifadelerinde analitik olarak bilinen fonksiyonlardan elde edilirler ve lokal koordinat sisteminden global koordinat sistemine transfer edilen mod-I, mod-II ve mod-III deplasman bileşenlerini temsil etmektedirler.  $m$ , eleman tipine göre 10 veya 20 değerini almaktadır.  $K_I^i$ ,  $K_{II}^i$  ve  $K_{III}^i$ , herhangi bir  $i$ 'nci çatlak önünde bulunan her bir düğüm noktası için bilinmeyen gerilme şiddet faktörlerini ve  $\sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{I,II,III}^i$  ifadesi ise çatlak önüne değen kenar elemanlarının gerilme şiddet faktörlerinin değişimini temsil etmektedir. Lokal izoparametrik koordinatı ifade eden  $\Gamma$ , -1 ile 1 arasında değişen değerler almaktadır. Eleman formülasyon ve integrasyonu ile ilgili daha detaylı bilgi, Ayhan (1999) ve Ayhan ve Nied'in (2002) yapmış oldukları çalışmalardan elde edilebilir.

Zenginleştirilmiş elemanların rijitlik matrisinin hesaplanması, yukarıda verilen denklemlerin türevlerini içermektedir. Öncelikle modeldeki tüm elemanlar için eleman rijitlik matrisleri hesaplanır. Düğüm noktalarının deplasmanlarını ve ek bir işlem gerekmeksizin çatlak önü düğüm noktalarının gerilme şiddet faktörlerini aynı anda elde etmek için hesaplanan rijitlik matrisleri çözüm fazına dâhil edilirler.

#### 1.4. Kırılma ve Çatlak İlerleme Problemleri ile İlgili Literatür Çalışmaları Özeti

Bu bölümde, sahada karşılaşılan kırılma ve çatlak ilerleme problemleri ile ilgili genel bir özet verildikten sonra, karışık modlu yükleme altında kırılma ve çatlak ilerlemesi için literatürde geliştirilen iki ve üç boyutlu çatlak ilerleme kriterleri ve gerçekleştirilen deneysel ve nümerik çalışmalar ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Kırılma mekaniği ve uygulamaları, ileri teknoloji ürünler üreten gelişmiş ülkelerde, bilim ve teknoloji düzeyinin gelişmesinde öncü rol oynayan enerji, savunma, havacılık ve uzay teknolojileri gibi ülkeler için kritik öneme sahip olan alanlarda, yaygın olarak çalışılmaktadır. Örneğin, uçak gövdelerinde, helikopter ve uçak motor parçalarında kırılma ve çatlak ilerleme analizleri tasarım aşamasında dahi kullanılmaktadır. Havacılık alanında literatürde karşılaşılan çoğu saha problemlerinin, askeri ve yolcu uçaklarının gövdelerinde, gaz türbin motorlarında ve türbin kanatlarında (Larsen ve ark., 1996; Nicholas ve Zuiker, 1996; Cowles, 1996; Salam ve ark., 2002; Yee ve Sidhu, 2005; Zhuang ve ark., 2007; Molent ve Barter, 2007; 2010; Jones ve ark., 2008; Zhuang ve Molent, 2010; Molent ve ark., 2011; Haile ve ark., 2012; Jones ve Tamboli, 2013) oluşan çatlak ve kırılma problemleri olduğu görülmektedir. Enerji alanında karşılaşılan en yaygın saha problemlerinden birkaçı, reaktör basınç kazanlarında (Liaw ve ark., 1997; Sriharsha ve ark., 1999; Seifert ve Ritter, 2008; Huang ve ark., 2008; Ritter ve Seifert 2008; Bousquet ve ark., 2012), enerji sektöründe önemli bir yeri olan türbinlerde, türbin disklerinin birleşme noktalarında ve disklerin kanat köklerinde (Padula ve ark., 1999; Shlyannikov ve ark., 2001; Pang ve Reed, 2003; Jung ve Schnell, 2008; Isobe ve Nogami, 2009; Natsume ve ark., 2010; Prasad ve ark., 2012; Hu ve ark., 2012; Gagnon ve ark., 2013) meydana gelen çatlak ve kırılma problemleridir. Ulaştırma alanlarında karşılaşılan saha problemleri ise, demiryolu tekerlekleri, rayları ve akslarında (Desimone ve Beretta, 2006; Beretta ve ark., 2011; Nicholson ve Davis, 2012; Peng ve ark., 2012a; 2012b; 2013;) oluşan çatlak ve kırılma problemleridir.

İki boyutlu kırılma problemlerinde, çatlak ya düz bir şekilde ya da bir eğri şeklinde ilerleme göstermektedir. Üç boyutlu çatlak problemlerinde ise, geometri, yükleme ve

sınır şartlarına bağılı olarak düz, eğri, düzlemsel veya düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyebilmektedir. Bu yüzden kırılma davranışı, hem çatlak yüzeyinin eğriliğine hem de çatlak önünün eğriliğine bağılı olarak üç boyutlu çatlak ilerlemesiyle ilişkilendirilmelidir. Çatlağın ilerlemesinde birbirini etkileyen ve tetikleyen farklı faktörler olduğundan dolayı, düzlem dışı üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerlemesi, anlaşılması ve yorumlaması güç olan bir kırılma durumudur.

Son yıllarda karışık modlu çatlak ilerleme deneyleri de ağırlık kazanmaya başlamış, karışık modlu yükler altında farklı malzeme grupları test edilmiş ve farklı çatlak ilerleme modelleri (teorileri) geliştirilmiştir. Literatürde bu teoriler, düzlem içi mod-I/II kırılma problemlerini kapsayan, iki boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme kriterleri ve mod-I/III, mod-II/III ve mod-I/II/III problemlerini kapsayan, üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme kriterleri olarak ikiye ayrılmıştır. Bu kriterlerin bir kısmı enerji, bir kısmı ise gerilme yaklaşımını kullanarak geliştirilmiştir. Bunun dışında ampirik olarak geliştirilen kriterler de mevcuttur.

Enerji veya gerilme yaklaşımları ile geliştirilen mevcut iki boyutlu kriterler, maksimum teğetsel gerilme (Erdoğan ve Sih, 1963), maksimum enerji salınım oranı (Hussain ve Pu, 1974; Nuismer, 1975), minimum birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu (Sih ve Macdonald, 1974) ve maksimum teğetsel birim şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu (Koo ve Choy, 1991) kriterleri olarak sıralanabilir. Ampirik olarak geliştirilen iki boyutlu kriterler ise, Tanaka (1974) kriteri, Richard (1985; 1987) kriteri ve Pook (1989) kriterleridir.

Literatürde mevcut üç boyutlu kırılma kriterleri, Sih ve Macdonald'ın önerdiği, minimum birim şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu (1974) kriteri, Irwin (1957) kriteri, Tanaka (1974) kriteri, Pook (1980; 1985) kriteri, Schöllmann (2001; 2002) kriteri, Richard (Richard ve ark., 2001) kriteri ve Kikuchi (2012) kriteri olarak sıralanabilir. Richard'ın (2003) yapmış olduğu bir çalışmada, iki ve üç boyutlu karışık mod kriterleri karşılaştırıldığında, iki boyutlu kriterler arasından Erdoğan ve Sih kriteri ve Richard kriterinin, üç boyutlu kriterler arasından ise Schöllmann kriteri

ve Richard kriterinin çatlak ilerleme profilini tanımlayan en uygun kriterler olduğunu belirtmiştir.

Karışık modlu çatlak ilerlemesi ile ilgili literatürdeki sınırlı sayıdaki çalışma arasında, Richard ve ekibinin hem iki boyutlu hem de üç boyutlu karışık mod çatlak ilerlemesi ile ilgili birçok çalışma yaptığı gözlenmektedir (Sander ve Richard, 2003; 2005; 2006; Richard ve ark., 2003; 2005; 2008; 2013; 2014; Richard ve Sander, 2011). CTS (Compact Tension Shearing) numunesi kullanarak farklı açılarda yükleme yapmışlar ve elde ettiği sonuçlara göre iki ve üç boyutlu kriterler geliştirmişlerdir. Zhao ve Guo'da (2012), Richard ve ekibinin üzerinde çalıştığı CTS numunesi ile benzer fakat farklı boyutlarda CTS numunesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, CTS numune tipi ile ilgili çalışmalar da gerçekleştirilerek mevcut kriterler değerlendirilmiş, yeni bir numune geliştirerek bu numune için de kırılma ve çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve yukarıda bahsedilen numune tipleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Son yıllarda nümerik teknikler kullanılarak üç boyutlu çatlak ilerleme simülasyonları ve kırılma analizleri için özelleştirilmiş araç ve yöntem geliştirmek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu konudaki ilk çalışmalar sınır elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizler (Mi ve Aliabadi, 1994; Riddell ve ark., 1997) olmasına rağmen, çalışmaların çoğu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizlere odaklanmıştır. FRANC3D (Carter ve ark., 2000; Barlow ve Chandra, 2005), ZENCRACK (Hou ve ark., 2001; Zentech, 2008), ADAPCRACK3D (Schollmann ve ark., 2003), BEASY<sup>TM</sup> (2016) bu yöntemleri kullanarak üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme analizlerini yapabilen programlardır. FRANC3D sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir araştırma programıdır. ZENCRACK ticari bir programdır ve yine ticari bir sonlu eleman programı olan ABAQUS ile çalışmaktadır. Gerilme yoğunluk faktörlerini ve çatlak ilerleme miktarlarını hesaplamak için şekil değiştirme enerjisi bırakma oranı ve düğüm noktaları yer değiştirmeleri gibi değişik bilgileri kullanır. ADAPCRACK3D sonlu elemanlar metodunu kullanarak karmaşık yükler altında üç boyutlu geometrilerin yorulma çatlak ilerleme tahminini yapabilen bir analiz programıdır. BEASY<sup>TM</sup> ise

ticari programdır ve sınır elemanlar kullanarak üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme analizlerini gerçekleştirmektedir. Zenginleştirilmiş sonlu elemanlar yöntemi de, çatlak önü yakınında özel ağ yapısı gerektirmemesi ve sonlu eleman çözümü sonrası son (post) işleme ihtiyaç duyulmaması nedeniyle üç boyutlu hassas ve etkili kırılma analizleri gerçekleştirmek için cazip bir yöntem olmuştur. Literatürde bu metodu, genişletilmiş sonlu elemanlar (X-FEM) ve zenginleştirilmiş sonlu elemanlar olarak iki ayrı formda görmek mümkündür. Termo-elastik kırılma problemlerini ve üç boyutlu çatlak ilerlemesi için çoklu-grid yöntemini içeren, X-FEM metodu kullanılarak gerçekleştirilmiş çok sayıda başarılı uygulama bulunmaktadır (Moes ve ark., 2002; Bordas ve Moran, 2006; Oliver ve ark., 2006; Duflot, 2008; Rannou ve ark., 2009). X-FEM metodunda çatlak ilerleme modelinin yeniden bölüntülenmesine gerek kalmamakta veya bu en aza indirgenmektedir. Zenginleştirilmiş sonlu elemanlar metodu da çatlak civarında özel grid veya ağ gerektirmeyen bir metottur. Zenginleştirilmiş sonlu elemanlar metodu diğer nümerik yöntemler ve bunların uygulamaları kadar yaygın olmamasına rağmen, üç boyutlu kırılma problemleriyle ilgili olarak yapılan deneysel çalışmalar da literatürde yer bulmuş (Hyde ve Warrior, 1993; Lan ve ark., 2007; Zhang ve ark., 2009; Rannou ve ark., 2010) ve Ayhan tarafından karışık modda kırılma (Ayhan, 2004; 2007a), ara yüzey çatlakları (Ayhan ve ark., 2006) ve fonksiyonel aşamalı malzemeler (Ayhan, 2007b; 2009) gibi çeşitli üç boyutlu problemlere başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

## **BÖLÜM 2. ÜÇ BOYUTLU KARIŞIK MODLU YÜKLEME ALTINDA ÇATLAK İLERLEME DENEY KABİLİYETİ GELİŞTİRİLMESİ**

Bu bölümün amacı, genel üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin doğru bir şekilde modellenebilmesi için karışık modlu çatlak ilerleme konularında farklı numune ve tutucu modelleri kullanarak farklı karışık mod yükleme durumları için deney kabiliyeti geliştirmektir. Bu kapsamda, literatürde bulunan mevcut empirik modeller, farklı numune tipleri (CT (compact tension), CTS (compact tension and shearing), CTT (compact tension and tearing), CTST (compact tension, shearing and tearing) ve T numune) ve yükleme şartları için (mod-I, mod-I/II, mod-I/III, mod-II/III ve mod-I/II/III) gerçekleştirilen deneylerdeki ilerleyen ve düzlemsel olmayan çatlak yüzeyini ve çatlak ilerleme ömrünü hangi doğruluk ölçüsünde tahmin ettiği değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek, literatürde mevcut modeller ile karşılaştırılmış ve yeni/iyileştirilmiş empirik çatlak ilerleme modelleri geliştirilmiştir.

Bu bölümün yazımında, 113M407 numaralı, "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi-Aşama 2" isimli, TÜBİTAK destekli araştırma projesinin gelişme ve sonuç raporlarından (Ayhan, 2014; 2015; 2016a; 2016b) yararlanılmıştır.

### **2.1. Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Planlanması ve Malzeme Karakterizasyonu**





Karışık modlu çatlak ilerleme ve kırılma tokluğu testleri için çelik ve alüminyum alaşımlı malzeme olarak iki ayrı malzeme seçimi yapılmıştır.

Alüminyum alaşımlı malzeme olarak uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan 7075-T651 kodlu alüminyum alaşımlı malzeme ve çelik olarak ise St-1040

kodlu karbon çeliği seçilmiştir. Malzeme seçimlerinde yükleme sonucunda mümkün mertebede lineer elastik kırılma mekaniği (Linear elastic fracture mechanics- LEFM) sınırları içerisinde kalan, plastik bölgenin minimum olduğu ve aynı zamanda endüstride yaygın olarak kullanılan ve piyasadan kolay temin edilebilen malzemeler seçilmiştir. Özellikle farklı açılarda karışık modlu yüklemelerde elde edilen eşdeğer gerilme şiddet faktörü değerinin kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerine ulaşması için gerekli olan yük artmakta ve oluşan bu yüklere karşı malzemenin akma dayanımının yüksek olması gerekmektedir. Malzeme seçiminde bu durumlar göz önünde bulundurularak gerekli değerlendirmeler ve sonrasında sonlu elemanlar programı ile simülasyonlar yapılarak kritik yük ve gerilme şiddet faktörü değerleri öngörülerek malzemelerin uygunluğuna karar verilmiştir.


Tez kapsamında planlanan ve sonrasında gerçekleştirilen tüm testlerin özeti Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Tez kapsamında gerçekleştirilen kırılma testlerinin özeti.

Yükleme Tipi	Numune Tipi	Malzeme	Hadde Yönü	Kalınlık (mm)	Gerçekleştirilen Kırılma Tokluğu Test Sayısı	Gerçekleştirilen da-dN Test Sayısı	Toplam Test Sayısı
Mod I		A1 7075	LT	25	5	4	9
		St BASE		12.5	3	-	3
		St HT(QT)		12.5	3	-	3
		St NAQT		12.5	3	-	3
		A1 7075	TS	25	3	4	7
Mod I/II		A1 7075	LT	10	15	17	32
		A1 7075	TS	10	14	15	29
		T	A1 7075	LT	25	15	8
Mod III	CTT / CTST						
Mod II/III			A1 7075	LT	25	10	6
	12.5				6	3	9
Mod II/III		A1 7075	LT	25	5	3	8
				12.5	5	3	8
Mod I/II/III		A1 7075	LT	25	18	21	39
<b>GERÇEKLEŞTİRİLEN TOPLAM TEST SAYISI</b>							<b>201</b>

Yukarıdaki testlerde, malzemenin üretiminden kaynaklı olan değişkenlikler nedeniyle test sonuçlarını etkileyebilecek faktörlerin etkisini minimize etmek için, farklı kalınlıklarda, aynı üretimden çıkan plakalar toplu halde temin edilmiştir.

Karışık modlu çatlak ilerleme ve kırılma tokluğu testleri için temin edilen 30 mm, 70 mm ve 90 mm kalınlıktaki LT hadde yönünde haddelenmiş olan 7075-T651 alüminyum malzemeler için, malzemelerin temin edildiği firmadan kimyasal ve mekanik özellikler ile ilgili sertifika belgeleri alınmış ve ayrıca yerel bir firmaya da bazı numuneler götürülerek kimyasal içeriği teyit edilmiştir. 30 mm, 70 mm ve 90 mm kalınlıktaki malzemeler için elde edilen içerik test sonuçları Şekil 2.1, 2.2 ve 2.3'te sırasıyla verilmiştir. Test sonuçlarından da görüldüğü gibi testlerde kullanılacak olan Al 7075-T651 alüminyum malzemelerinin alaşım miktarları, literatürde 7075-T651 malzemesi için tanımlanan aralıktadır.

Certified Inspection Report						Cert Number	Page	
Sales Order Number		Customer P/O		Cert Creation Date		Cert Print Date		
1198100	Line No. 6.1	ALC214090 Line NO:6		01-MAY-14		01-MAY-14		
Quantity Shipped	Date Shipped		Item Description					
			BARE, 7075-T651, ROLLED PLATE BARE					
Inspection Category	Item No.		HTGE STANDARD BI-LAY TOLS, KITS_GREEN					
MILL CERTS	A221049132R04		SAWED, MILL FINISH, NOSE					
Delivery Number	Customer Account Number		30.0 MMT TK [+1.200/-1.200] 1.1811 INH TK					
5179727	102878		1520.0 MMT WD [+7.000/-0] 59.8423 INH WD					
Customer Part No			3020.0 MMT LN [+9.000/-0] 118.898 INH LN					
			B 11 23 V5					
			MAX GROSS WEIGHT 1000.0 KG/M 2205.0 LB					
			---SPEC 1: ANSI H35.2(M) TOL (GE);2009					
			SPEC 2: ASTM B209M 7075 T651:10					
<b>Header Notes</b>								
This single document represents the combined Certificate of Conformity(CoC) & Inspection Certificate and complies with EN 10204 type 3.1.								
The site is approved to BS EN9100:2009 & ISO9001:2008 (FM12976 - BS) and ISO 14001:2004 (EMS70033 - BS). Please check the notes section on this CoC for the specific customer approvals relevant to this order.								
Email: sales.KIT@alcoa.com								
Material Safety Data Sheets available at www.alcoa.com								
Refer to our Sales Conditions as per original order acknowledgment for product liability statement								
<b>Legal Statement</b>				<b>Signed for and on behalf of Alcoa Manufacturing (GB) Limited trading as Alcoa Europe Flat Rolled Products:</b>				
We hereby certify that, unless otherwise indicated, the material covered by this report has been manufactured, inspected, and tested in accordance with, and has been found to meet, the applicable requirements described herein, including any specifications forming a part of the description and that samples representative of the material meet the composition. Also, note that mercury is not a normal contaminant in aluminum alloys and neither is nor any of its compounds are used in the manufacture of our product. This certification is not to be reproduced in partial form without prior written approval of our Quality Assurance Dept.				Electronic signature of approver Barry Martin, Quality Engineer				
<b>Inspection Stamp</b>								
								
<b>Quantities per Lot / Packages</b>								
Package Number	Lot/Slab	Mult Number	Number Of Plates	Weight in KG/M				
				Gross	Net			
BS5473036	1439701/8F3381B	--	1	437	397			
TOTAL	for Packages	--	1	437	397			
<b>Composition Results</b>								
Cast Number	Si PCT	Fe PCT	Cu PCT	Mn PCT	Mg PCT	Cr PCT	Zn PCT	Ti PCT
8F3381B	0.08	0.17	1.7	0.08	2.5	0.23	5.7	0.03

(a)

Şekil 2.1. 30x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın (a) kimyasal, (b) mekanik özellikleri.



Certified Inspection Report							
Sales Order Number				Customer P/O		Cert Number	Page
1198100				ALC214090 Line NO:6		58977	22
Line No. 61						Cert Creation Date	Cert Print Date
						01-MAY-14	01-MAY-14
Composition Results							
Cast Number				Others Total PCT			
SF3381B				0.00			
Stretching - Test Results							
Test Type				Stretch %			
UOM				PCT			
Temper							
Lot				Min		Max	
T651				1439701		2.2	
Tensile Properties Test							
Test Results							
Test Type				UTS		Elongation %	0.2% Proof Stress
UOM				MPA		PCT	MPA
Temper							
Lot				Results		Results	Results
T651				1439701		T651.LT.A.C.3W	5
				598.6		12.4*	525.8
Cert Notes							
ALUMINIUM ALLOY PLATE							
Package Number : HTGE							
* Fracture outside centre half of gauge length.							
Material : ASTM B209M 7075 T651, Revision 10							
Inspection : ANS1 H35.2(M) TOL (GE), Revision 2009							
Heat Treatment : AMS 2772, Revision							
E.F. Heat Treatment of Aluminium Alloy Raw Materials							
Test Method : ASTM B 557, Revision 10, Standard Test Methods of Tension Testing W							
Fought and Cast Aluminium and Magnesium Alloy Products							
SFR.LOT NUMBER 184141086F - ORACLE LOT NUMBER 1439701							

(b)

Şekil 2.1. 30x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın (a) kimyasal, (b) mekanik özellikleri. (Devamı)

INSPECTION CERTIFICATE													
Contact/Order: ALE 214024						Date: 30.01.2014							
Material : ALUMINIUM PLATES													
Alloy : EN-AW-7075													
Dimensions : 70096290 70 x 1520 x 3020 Temper: T651													
According to : EN 485-515-573													
MECHANICAL PROPERTIES													
Specified			Rm		Rp0.2		Elongation%		Hardness				
			Mpa		Mpa		50 mm		HB				
Lot/Batch			min		min		min		min				
			max		max		max		max				
Specified			405		420		4		147				
Measured			542		476		10		155				
Lot/Batch			70096290		275175		918		542		476		
Case			523111290										
Net Weight (kg)													
CHEMICAL COMPOSITION (%)													
Batch		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
523111290		0,18	0,39	1,42	0,088	2,45	0,19	0,007	5,68	0,046	0,011	0,017	REST
min				1,20		2,10	0,18		5,10				REST
max		0,40	0,50	2,00	0,30	2,90	0,28	0,05	6,10	0,20	0,050	0,050	
Remarks								Other- Each Max:0,05			Other Total Max:0,15		

Şekil 2.2. 70x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri.

Produkt / product				Bedingungen / terms							
Form / form: Plate, stretched Werkstoff / material: EN AW 7075 Zustand / temper: T651 Dim. / dim.: [mm] 90,00x1520,0x3020,0				Technische Lieferbedingungen / techn. spec: EN 485-2: 2008 EN 485-3: 2003 EN 573-3: 2003  Sondervorschrift / special terms:							
Alt-Pos. ord.-item.	BNr/Los/Teillos Lot/No./Part	Guss Nr. cast no.	Werkstoff material	Kollo packno.	Gewicht netto weight net	Sck. pcs.					
05	14242/01/00	01/0058150/3	EN AW 7075	6724520007	1179 kg	1					
05	14242/01/00	01/0058150/3	EN AW 7075	6724520008	1180 kg	1					
Chemische Zusammensetzung ([%] Gewichtsanteile) / Chemical composition ([%] weight proportion (OES))											
Quers Nr. / cast no.	material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb, Sn	Others ELEM.
01/0058150/3	EN AW 7075	-	-	1,2	-	2,1	0,18	5,1	-	-	-
	spec. min	-	-	1,2	-	2,1	0,18	5,1	-	-	-
	spec. max	0,40	0,50	2,0	0,30	2,9	0,28	6,1	0,20	0,25	0,05
	actual	0,13	0,14	1,5	0,06	2,6	0,16	5,7	0,05	0,08	0,03
	spec. min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	spec. max	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	actual	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zugprüfung LT / tensile test LT											
BNr/Los	Zustand	Richtung	Tests	ReH	Rp0,2	A5					
Lot/No.	temper	direction		[MPa]	[MPa]	[%]					
			spec. min	490	390	4					
			spec. max	-	-	-					
14242/01	T651	LT	2	from	524	441	9				
14242/01	T651	LT		to	527	445	10				

Şekil 2.3. 90x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri.

St-1040 çeliği için de yine aynı şekilde hem malzemenin temin edildiği yere hem de bağımsız yerel bir firmaya spektral analiz testi yaptırılmış ve sonuçları Şekil 2.4 ve 2.5'te verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde alaşım miktarlarının St-1045 çeliğinin özelliklerine daha yakın olduğu görülmüştür.



numunenin kalınlığı daraltılarak düşürülebilmekte ancak formülde görüldüğü gibi malzemenin akma dayanımı bunu sınırlandırmaktadır. Bu yüzden St-1040 çeliğine uygulanan ısıtma işlemleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve Rayes'in (2006) yapmış olduğu ısıtma işlemi referans alınarak çelik numunelere ısıtma işlemi uygulanmıştır. Çelik numuneler 850°C östenitleme sıcaklığında 1 saat süreyle tutulduktan sonra hızlı bir şekilde su verilerek soğuyana kadar suda karıştırarak sıcaklığın atılması sağlanmıştır. Daha sonra numuneler fırında 450°C sıcaklığa yeniden ısıtılarak 2 saat süreyle temperlenmiştir. Son olarak havada soğutma işlemiyle ısıtma işlemi sonlandırılmıştır. Isıtma işlemi sonrası numunelerin sertleşmesi sonucu talaşlı işlenmesi zor olacağı için ısıtma işlemi öncesi numuneler talaşlı işlenerek son ürün haline getirilmiş ve sonrasında ısıtma ve su verme işlemlerine tabi tutulmuştur. Ancak çelik numunelerde çentiğin ağız kısmında ısıtma işleminden dolayı bir miktar daralma olduğu gözlenmiş ve ısıtma işleminin numunelerde bir miktar bası gerilmesi oluşturabileceği düşünülerek bunun etkisini incelemek için bazı numunelere de su verme ve ısıtma işleminden sonra çentik açılmıştır. Çelik numuneler kodlanırken, ısıtma işlemi görmemiş numuneler "Base", ısıtma işlemi görmüş numuneler "HT-QT" (Heat Treated-Ouenced and Tempered) ve su verme-temperleme sonrası çentik açılan numuneler "NAQT" (Notched After Ouencing and Tempering) şeklinde kodlanmıştır.

Alüminyum ve ısıtma işlemi görmüş ve görmemiş olan çelik malzemelerinden çekme numuneleri hazırlanarak (Şekil 2.6) Bursa Teknik Üniversitesi'nde bulunan 200 kN kapasiteli çekme cihazında çekme testi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tablo halinde Tablo 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.6. Çekme testi sonrası alüminyum ve çelik malzemelerinin görünüşü.

Tablo 2.2. Alüminyum ve çelik numunelerin çekme testi sonucu elde edilen akma dayanımı değerleri.

Numune ismi	Akma Dayanımı (MPa)
Al	570
St-1040-Base	430
St-1040-HT	742

Çelik numunelere ayrıca sertlik testi gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 2.3.'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Çelik numunelere uygulanan sertlik testi sonucu elde edilen sertlik değerleri.

Numune ismi	Vickers	Brinell	Rockwell
St-1040-Base	224	-	20
	215	203	
St-1040-NAQT	-	688	56
	602	572	
	634	602	
	-	626	
St-1040-HT-QT	378	-	38
	378	-	
	386	602	

## 2.2. Mod-I Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri

Yapılan testlerin uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilmesi için kırılma testleri, *E399-12* (Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{IC}$  of Metallic Materials, 2013) ve çatlak ilerleme testleri ise *E647-13a* (Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 2014) no.lu ASTM standartları incelenerek kontrol listeleri hazırlanmış, numunelerin hazırlanması ve testlerin uygulanması bu kontrol listelerine göre gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.1. Mod-I kırılma tokluğu testleri

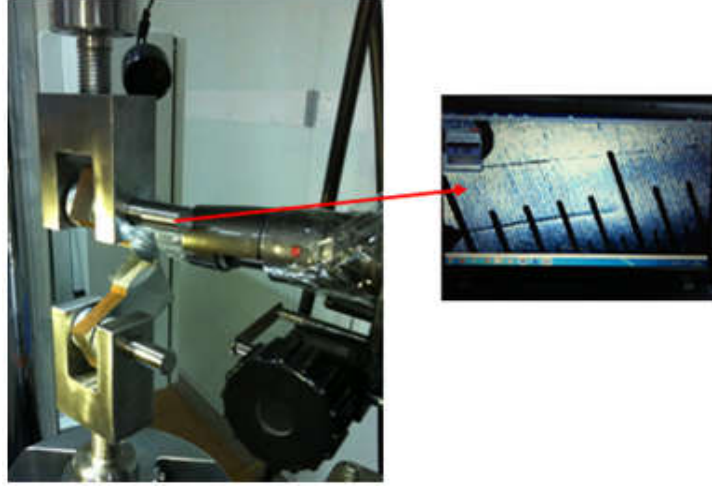
St-1040 karbon çeliği ve 7075-T651 alüminyum alaşımlı malzemeler plakalar halinde temin edildikten sonra, yukarıda belirtilen standartlara uygun olarak numuneler işlenmiştir. Kırılma tokluğu testinin düzlem şekil değiştirme (plane strain) sınırları içerisinde kalması için standartta yer alan minimum kalınlık hesabı ( $B \geq 2,5 * (K_{IC} / \sigma_Y)^2$ ) dikkate alınarak numune kalınlıkları belirlenmiştir. Numunelerde yorulma ön çatlaklarının oluşturulması için küçük bir yorulma cihazı tasarlanarak imal edilmiş ve kırılma tokluğu testleri öncesinde numunelerin bir kısmına yorulma ön çatlakları bazı başlangıç testleri için bu cihazda oluşturulmuştur. İmal edilen yorulma cihazı Şekil 2.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Yorulma ön çatlakının oluşturulması için imal edilen yorulma cihazı.

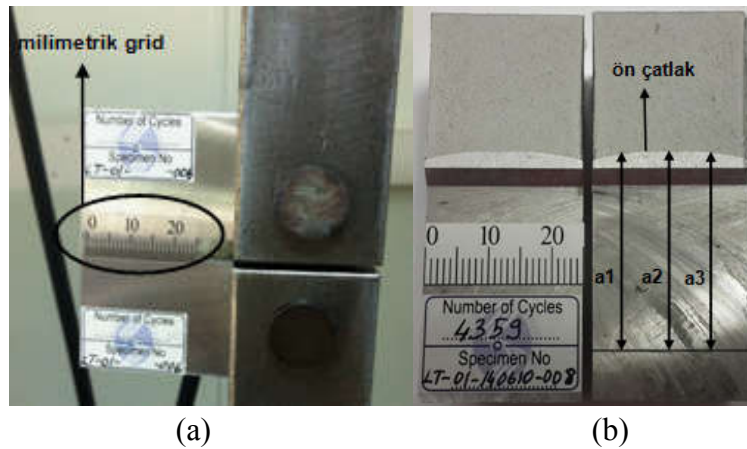
Oluşturulacak olan ön çatlakın uzunluğunu tespit edebilmek için numunenin önüne kamera yerleştirilmektedir. Kameranın yeterli büyütme ve çözünürlük oranı

ayarlanarak bilgisayara entegre edilmekte ve bu sayede çatlakların ilerlemesi hassas bir şekilde izlenmektedir (Şekil 2.8). Her bir yüklemdeki çevrim sayısının tespit edilmesi için cihaza bir sayaç entegre edilmiştir. Çatlak istenen boyuta ulaştığı zaman cihaz durdurularak kaç çevrim sonrasında çatlak bu boyuta ulaştığı belirlenerek ön çatlak oluşturma işlemi tamamlanmaktadır.



Şekil 2.8. Test esnasında ön çatlak oluşumunu görüntülemek için kullanılan yüksek çözünürlüklü kamera.

Şekil 2.9.a'da gösterildiği gibi çatlak uzunluğunu hassas olarak belirleyebilmek için şeffaf milimetrik gridler çatlak başlangıcının olduğu bölgeye yerleştirilmektedir. Ayrıca numunelerin birbirine karışmasını önlemek için etiketler hazırlanarak numune yüzeyine yapıştırılmaktadır (Şekil 2.9.b). Etiketlerde numune ön çatlaklarının kaç çevrimde oluşturulduğu ve numunenin numarası yer almaktadır.



Şekil 2.9. (a) Çekme cihazına bağlanan CT numunesi ve üzerine yapıştırılan milimetrik grid, (b) Temsili çatlak derinlik değerleri,  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$ .



Mod-I kırılma tokluğu testlerinden önce her bir numuneye 1,3 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Alüminyum ve çelik numunelerde ön çatlak oluşturulması için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

ASTM E399-12 standardında, ön çatlak oluşturulurken " $K_{max} \leq 0,8K_Q$ " olması gerektiği belirtilmiştir. Alüminyum ve çelik malzemesi için ön çatlak yük aralığı şu şekilde belirlenmiştir. AL 7075 T-651 malzemesinin literatürde mevcut kırılma tokluğu değeri referans alınarak, bu değer yarısına ( $K_{Ic}/2$ ) karşılık gelen kritik yük değeri hesaplanarak yük aralığı belirlenmektedir. St-1040 çeliği için de aynı hesaplamalar yapılmıştır. Isıl işlem görmüş numunelerde ise  $K_{Ic}$  en alt sınır değerlerde tahmin edilerek yük aralığı tespit edilmiştir.

Ön çatlak oluşturulduktan sonra kırılma tokluğu testlerinin bir kısmı Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Laboratuvarı'nda bulunan Zwick marka 50 kN kapasiteli çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.10). Numuneye 5 N'luk bir ön yükleme uygulandıktan sonra saniyede 500 N artan bir yük uygulanarak yük kontrollü bir şekilde numune yüklenmektedir. Yükleme hızı standartta belirtilen sınırlar ( $0,55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}} \geq \Delta K/\Delta t \geq 2,75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$ ) dikkate alınarak belirlenmiştir. Numune yükleme sonucu koştuktan sonra oluşan kuvvet-uzama grafiğinin tipine göre maksimum kritik yük ( $P_Q$ ) belirlenmektedir.

Test sonrasında kırılan numune yüzeyinden Şekil 2.9.b'de gösterilen  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$  çatlak derinlik değerleri ölçülerek ortalama ön çatak uzunluğu belirlenmektedir. Kırılma tokluğu ölçümü için gerekli olan ölçümler alındıktan sonra standartta yer alan ve aşağıda (2.1) no.lu denklemde gösterilen formülasyon (ASTM E399-12, 2013) kullanılarak numunelerin kırılma tokluğu hesaplanmaktadır.

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{B B_N} \sqrt{W}} \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[ 0,866 + 4,64 \frac{a}{W} - 13,32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (2.1)$$





Şekil 2.10. Zwick marka 50 kN kapasiteli çekme cihazı.

### 2.2.2. Alüminyum numunelerin mod-I kırılma tokluğu test sonuçları

Alüminyum numunelerin kırılma tokluğu ölçümü için 5 adet numune seçilerek kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.11.'de test edilen numunelerin kırıldıktan sonraki genel perspektif ve üst görüşleri verilmiştir.



Şekil 2.11. Kırılma tokluğu testi sonucunda alüminyum malzemelerin perspektif görünüşü.

Kırılma tokluğu test sonuçları Tablo 2.4.'te verilmiştir. 5 adet numune için gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri sonrasında, kırılma tokluğu değeri ortalama  $29,11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  olarak hesaplanmıştır. Literatür verileri ile mukayese edildiğinde test sonuçlarının tutarlı olduğu görülmektedir.

Tablo 2.4. Al 7075 T-651 malzemesinin kırılma tokluğu ölçümü test sonuçları ve minimum kalınlık hesabı.

<b>KIRILMA TOKLUĞU ÖLÇÜMÜ TEST SONUÇLARI ve MİNİMUM KALINLIK HESABI</b>									
Numune No	Malzeme	Hadde Yönü	W (mm)	t (mm)	P <sup>Q</sup> (kN)	a <sub>avg</sub> (mm)	Minimum kalınlık (mm)	K <sup>Q</sup> (Mpa m <sup>1/2</sup> )	K <sub>IC</sub> (Mpa m <sup>1/2</sup> )
LT-140603-01	AL 7075	LT	50	25	15,20	26,83	≥ 6,53	29,14	
LT-140603-08	AL 7075	LT	50	25	15,36	25,51	≥ 5,78	27,40	*28-31
LT-140610-03	AL 7075	LT	50	25	15,28	26,26	≥ 6,29	28,59	**28,6
LT-140611-04	AL 7075	LT	50	25	15,65	26,43	≥ 6,75	29,62	
LT-140611-06	AL 7075	LT	50	25	17,00	25,75	≥ 7,29	30,79	
<b>ORTALAMA</b>								<b>29,11</b>	

\* Hertzberg, 1996.

\*\*[https://www.alcoa.com/mill\\_products/catalog/pdf/alloy7075techsheet.pdf](https://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7075techsheet.pdf).

Tabloda görüldüğü gibi numuneler 25 mm kalınlıkta üretilerek test edilmiştir. Çekme testi sonucu elde edilen akma dayanımı ve kırılma tokluğu testi sonucu elde edilen kırılma tokluğu değerlerine göre yapılan minimum kalınlık hesabına göre, 25 mm kalınlığın ASTM E399-12 standardında belirtilen kriterlere uygun olduğu görülmektedir.

### 2.2.3. Çelik numunelerin mod-I kırılma tokluğu test sonuçları

4 adet "HT-QT" kodlu ısıl işlem görmüş, 3 adet "NAQT" kodlu su verme işleminden sonra çentik açılmış ve 3 adet "BASE" kodlu ısıl işlem görmemiş çelik numunelere kırılma tokluğu testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.12.'de test sonrasında kırılan çelik numunelerin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 2.12. Kırılma tokluğu testi sonucunda çelik malzemelerin perspektif görünümü.

St-1040 çeliği için sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilen simülasyonlarda özellikle farklı açılarda karışık modlu yüklemelerde elde edilen eşdeğer gerilme şiddet faktörü değerinin, kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerine ulaşması için gerekli olan yük, alüminyum alaşımlı malzemeye göre oldukça yüksek değerlerde olduğu için çelik numuneler 12,5 mm kalınlıkta üretilerek test edilmiştir. Alüminyum malzemelerde olduğu gibi çelik numuneler için de kırılma testleri ve sonrası için uygulanan işlem ve gerçekleştirilen hesaplamalar aynıdır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.5.'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Çelik malzemelerinin kırılma tokluğu ölçümü test sonuçları ve minimum kalınlık hesabı.

KIRILMA TOKLUĞU ÖLÇÜMÜ TEST SONUÇLARI ve MİNİMUM KALINLIK HESABI									
Numune No	Malzeme	$\sigma_Y$ (Mpa)	W (mm)	t (mm)	$P^Q$ (kN)	$a_{avg}$ (mm)	$K^Q$ (Mpa m <sup>1/2</sup> )	Minimum kalınlık (mm)	ORTALAMA $K_{IC}$ (Mpa m <sup>1/2</sup> )
TRY-150814-04	St 1040 /BASE)	430	50	12,5	26,25	25,02	90,81	≥ 111,50	84,14
TRY-150814-06	St 1040 /BASE)	430	50	12,6	22,80	25,42	80,13	≥ 86,81	
TRY-150814-07	St 1040 /BASE)	430	50	12,8	23,89	25,22	81,48	≥ 89,77	
TRY-150814-01	St 1040 /HT(QT))	742	50	12,5	35,85	25,23	125,64	≥ 71,68	130,68
TRY-150814-03	St 1040 /HT(QT))	742	50	12,5	39,00	25,06	134,88	≥ 82,60	
TRY-150814-02	St 1040 /HT(QT))	742	50	12,5	38,57	24,42	128,33	≥ 74,78	
TRY-150814-08	St 1040 /HT(QT))	742	50	12,4	35,79	25,53	128,84	≥ 75,37	
TRY-220814-03	St 1040 /NAQT	742	50	12,6	36,85	25,02	126,50	≥ 72,66	115,97
TRY-220814-02	St 1040 /NAQT	742	50	12,5	35,47	24,81	121,12	≥ 66,61	
TRY-220814-01	St 1040 /NAQT	742	50	12,5	28,97	25,03	100,28	≥ 45,66	

Testler sonucu elde edilen akma dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerine göre yapılan minimum kalınlık hesabında, ASTM E399-12 standardına göre kırılma tokluğu ölçümü yapabilmek için olması gereken minimum kalınlık değerleri çok yüksek çıkmaktadır. Bu kalınlık değerlerinde testlerin gerçekleştirilmesi, hem temin edilebilirlik ve işlenebilirlik, hem ekonomik açıdan, hem de uygulanabilirlik açısından uygun değildir. Svoboda (1982) tarafından yayınlanan bir raporda da benzer bir durumdan bahsedilmektedir. Kırılma tokluğu ölçümünde çelikler için gereken minimum kalınlık değerlerinin çok yüksek olduğunu ve bu kalınlıklarda bu testlerin gerçekleştirilmesinin ekonomik olmayacağından bahsedilmektedir. Sonuç olarak çelikler için gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri, yukarıda bahsedilen hususlardan dolayı standartta olması gereken koşulları sağlamadığı için geçerli değildir. Çelikler için elde edilen bu olumsuz sonuçlardan dolayı bundan sonraki testlere sadece Al 7075 -T651 malzemesi ile devam edilmesine karar verilmiştir.

#### **2.2.4. Mod-I çatlak ilerleme testleri ve sonuçları**

Mod-I çatlak ilerleme testleri, Bursa Teknik Üniversitesi'nde (BTÜ) Shimadzu 100 kN kapasiteli eksenel yorulma cihazında (Şekil 2.13) gerçekleştirilmiştir.



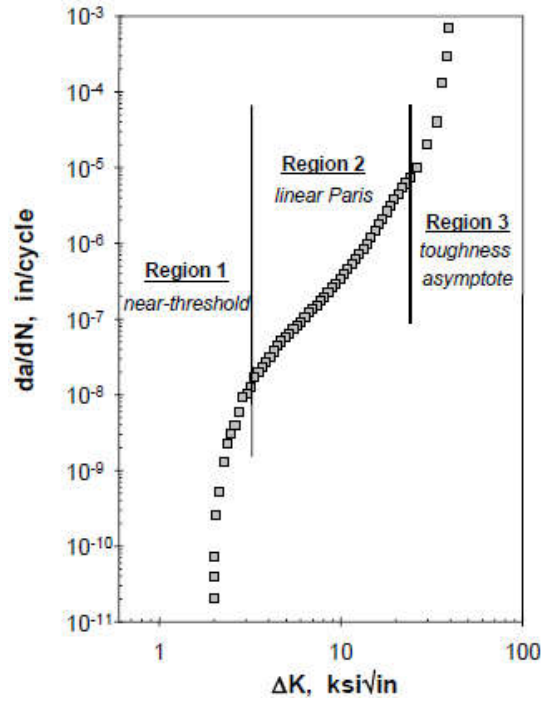
Şekil 2.13. Shimadzu 100 kN kapasiteli eksenel yorulma cihazı.

Mod-I çatlak ilerleme testlerini standartlara uygun olarak gerçekleştirmek için ASTM E647-13a standardı incelenerek kontrol listeleri oluşturulmuş ve testler bu standarda uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Mod-I çatlak ilerleme testlerinden önce her bir numuneye 2,5 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Ön çatlak uzunluğu standartta yer alan, ön çatlak uzunluğu  $\geq 0,1*B$  (B:kalınlık) şartına göre 2,5 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca ön çatlak oluşumu için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı, yine standartta yer alan;

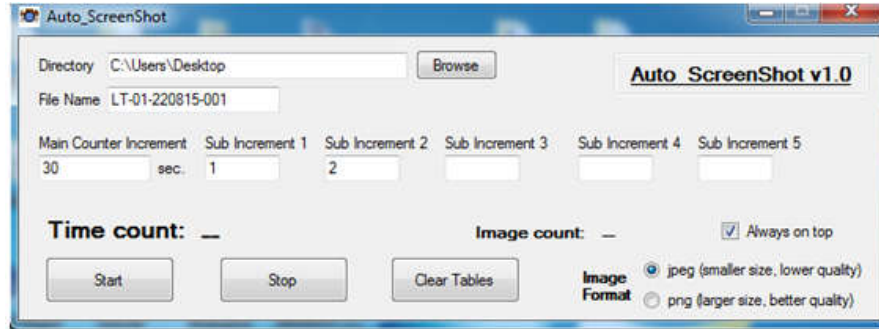
$$(K_{\max})_{\text{son ön çatlak}} \leq (K_{\max})_{\text{başlangıç testi}}$$

şartına göre belirlenmiştir. Testlerde kullanılan Al 7075 no.lu alüminyum malzeme literatürde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Burada amaçlanan, bilinen bir malzeme için  $da/dN$  grafiği elde etmek değildir. Mod-I çatlak ilerleme testlerinin gerçekleştirilmesindeki amaç, karışık modlu yüklemeler için "C" ve "n" malzeme sabitlerini elde etmek ve mod-I  $da/dN$  grafiğinden elde edilen dataları literatür verileri ile kıyaslayarak aynı zamanda deneylerde kullanılan malzemeyi ve deney prosedürünü doğrulamaktır. Bu yüzden Şekil 2.14.'te temsili  $da/dN$  grafiğinde yer alan ve Paris-Erdoğan bölgesi adı verilen 2. lineer bölge için deney dataları elde ederek ve testlerde sadece bu bölgeye odaklanarak testler için daha az zaman harcanması düşünülmüştür.



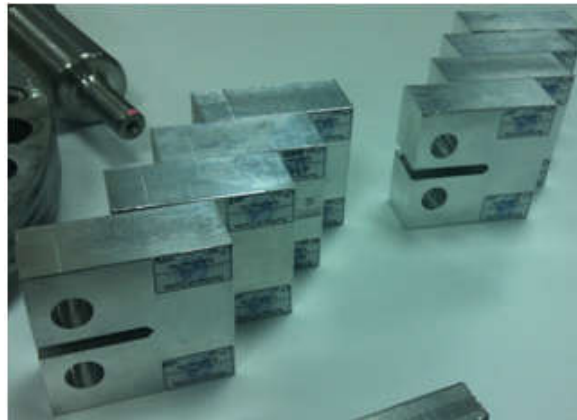
Şekil 2.14. Çatlak ilerleme davranışının üç bölgesini gösteren temsili yorulmalı çatlak ilerleme ömür grafiği.

Literatürde yer alan yorulmalı çatlak ilerleme ömür grafikleri incelendiğinde Al 7075 T-651 malzemesi için 2. lineer bölgeyi temsil eden  $\Delta K$  aralığının 10-20MPa $\sqrt{m}$  arasında olduğu görülmektedir. Bu yüzden yukarıdaki formülasyonda belirtilen "( $K_{max}$ ) başlangıç testi" değerini 10 MPa $\sqrt{m}$  alarak, ön çatlak oluşturma testi esnasında ön çatlak uzunluğu 2,5 mm iken, olması gereken maksimum "K" değeri 10 olacak şekilde yük aralığı belirlenmiştir. Ayrıca tez kapsamında gerçekleştirilen tüm karışık mod çatlak ilerleme testlerinde R-oranı ( $K_{min}/K_{max}$ ) 0,1 alınmıştır. Ön çatlak oluşturulduktan sonra çatlak ilerleme testi için yine aynı yük aralığı girilerek testler gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme testi sırasında, çatlağın uzunluğunu tespit edebilmek için numunenin önüne kamera yerleştirilmektedir. Kameranın yeterli büyütme ve çözünürlük oranı ayarlanarak bilgisayara entegre edilmekte ve bu sayede çatlağın ilerlemesi hassas bir şekilde izlenmektedir. Yine ikinci bir kamera cihazdaki çevrim sayısının gösterildiği bölgeye odaklanarak bilgisayara entegre edilmekte ve her bir çatlak ilerlemesinde gerçekleşen çevrim sayısı ve çatlak ilerleme miktarı eş zamanlı olarak bilgisayarda görüntülenebilmektedir. Deney esnasında kameralardan alınan görüntüler otomatik ekran görüntüsü alma yazılımı ile istenen klasöre istenen saniye aralıklarında otomatik olarak kaydedilmektedir. Şekil 2.15.'te, yazılımın arayüzü gösterilmektedir.



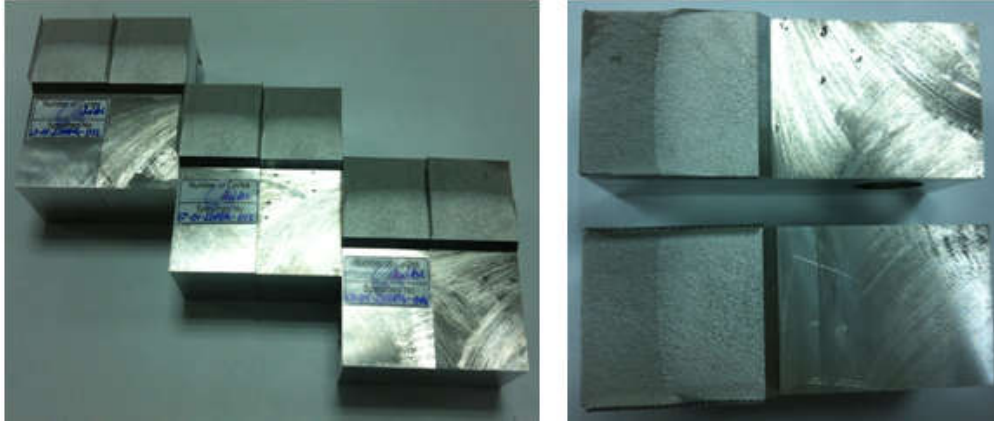
Şekil 2.15. Otomatikleştirilmiş ekran görüntüsü alma program ara yüzü.

Şekil 2.16.'da mod-I çatlak ilerleme testi için hazırlanan numunelerin perspektif görünüşü verilmektedir. 4 adet Al 7075 T-651 alüminyum alaşımlı numune mod-I çatlak ilerleme testine tabi tutulmuştur.



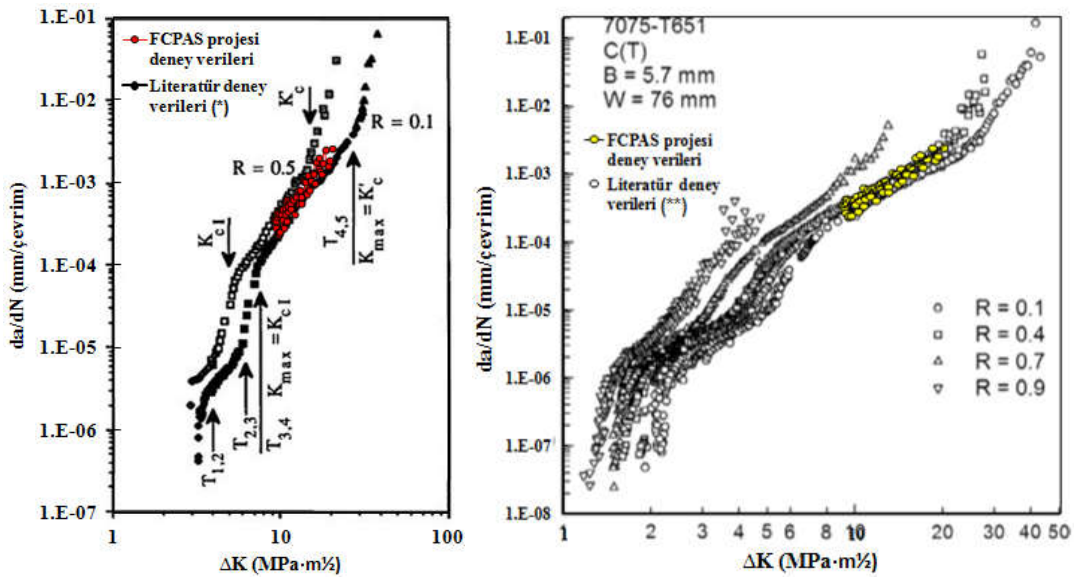
Şekil 2.16. Mod-I çatlak ilerleme testi için hazırlanan numunelerin perspektif görünümü.

Test başlangıcında, çevrim yükü, numune geometrik bilgileri, R ( $K_{min}/K_{max}$ ) oranı gibi değerler ve test sırasında alınan çatlak uzunluğu ve çevrim sayısı ölçümleri, standartta yer alan empirik formüller kullanılarak,  $da/dN$  ve  $\Delta K$  değerleri hesaplanmaktadır. Mod-I çatlak ilerleme testi sonrasında numunelerin kırık yüzeylerinin görünüşleri Şekil 2.17.'de verilmiştir.



Şekil 2.17. Mod-I çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numunelerin yüzey görüntüleri.

Gerçekleştirilen 4 adet mod-I çatlak ilerleme testleri sonrasında, sonuçları literatür verileri ile karşılaştırmak için deneylerden elde edilen  $da/dN-\Delta K$  grafiği ile literatürden alınan grafikler üst üste çakıştırılarak Şekil 2.18.'de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, literatür verilerine oldukça yakın değerler, tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerden elde edilmiş olup, veriler istenen aralıktadır.



\*Reuter ve ark. 1995, \*\*Newman ve ark., 2014.

Şekil 2.18. Deneyler sonucu elde edilen  $da/dN-\Delta K$  grafiğinin literatür verileri ile karşılaştırılması.

R ( $K_{min}/K_{max}$ ) oranı 0,1 alınarak gerçekleştirilen mod-I çatlak ilerleme testlerinin sonrasında, yorulma çatlak ilerleme denklemlerinden biri olan Paris-Erdoğan denklemi (2.2) kullanılarak "C" ve "n" malzeme sabitleri elde edilmiştir. Şekilde, 2.



lineer bölgede yer alan data'lara eğri uydurulmakta ve eğrinin eğimi "n" değerini, düşey eksen kestiği nokta ise "C" katsayısını vermektedir. Literatürde yer alan çalışmalardan elde edilen malzeme sabitleri ile deney verileri tablo halinde verilmiştir (Tablo 2.6).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (2.2)$$

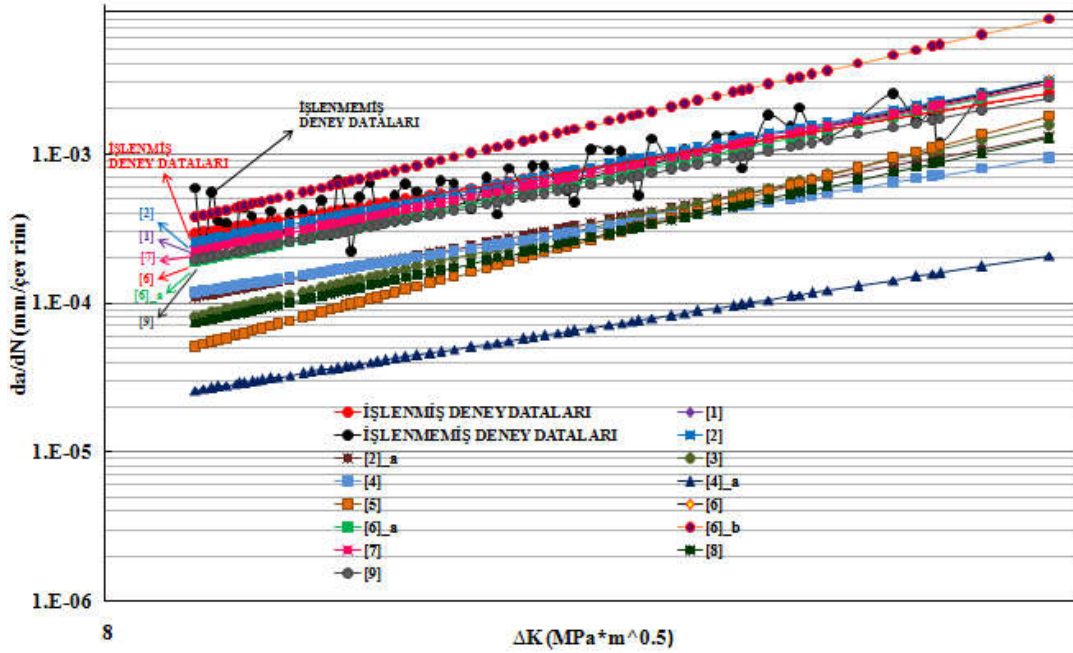
Literatürdeki bazı çalışmalarda "C" ve "n" malzeme sabitlerinin hangi R oranı kullanılarak elde edildiği belirtilmediği için bu kısımlar boş bırakılmıştır.

Tablo 2.6. Mod-I çatlak ilerleme testlerinden ve literatürden elde edilen "C" ve "n" malzeme sabitleri.

KAYNAK	Malzeme	R oranı	C (mm/(cycle*(Mpa√m) <sup>n</sup> )	n
İşlenmiş Deney Verileri	Al-7075-T651	0,1	1,4619100E-06	2,4392
[1] Sander, 2015	Al-7075-T651	0,1	4,5064635E-07	2,8850
[2] Forman ve ark., 2005	Al-7075-T651	-	5,8524040E-07	2,8000
[2]_a	Al-7075-T651	-	2,5381940E-07	2,7910
[3] Zhao, 2008	Al-7075-T651	-	6,0000000E-08	3,3200
[4] Xiang ve ark., 2009	Al-7075-T6	0	7,2965000E-07	2,3398
[4]_a	Al-7075-T6	-1	1,6170000E-07	2,3398
[5] Kirkpatrick, 1990	Al-7075-T6	-	8,6000000E-09	4,0000
[6] Misak ve ark., 2013	Al-7075-T6	0	2,2800000E-07	3,1100
[6]_a	Al-7075-T6	1	2,2800000E-07	3,0900
[6]_b	Al-7075-T6	1,5	2,1300000E-07	3,4400
[7] Kim ve Shim, 1998	Al-7075-T6	-	4,0823000E-07	2,9024
[8] Xiaoping ve ark., 2008	Al-7075-T6	-	6,8500000E-08	3,2100
[9] Abelkis ve Potter, 1979	Al-7075-T6	-	4,2780000E-07	2,8160

Tablo 2.6. incelendiğinde deneyler sonrası elde edilen "C" değerinin diğerlerine oranla daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Ancak Denklem (2.2)'de görüldüğü gibi, "C" ve "n" değerlerinin her ikisi de göz önünde bulundurularak çatlak ilerleme oranı değerlendirilmelidir. Bu yüzden testler sırasında alınan çatlak uzunluğu (*a*) ve çevrim sayısı ölçümleri (*N*) kullanılarak literatürden alınan "C" ve "n" değerlerinin her biri için *da/dN-ΔK* değişim grafiği elde edilmiş ve Şekil 2.19.'da

verilmiştir. "İşlenmemiş deney dataları" isimli eğri, Paris-Erdoğan denklemi kullanılmadan, deneylerden alınan çatlak uzunluğu ve çevrim sayısı ölçümleri ile standart CT numunesi için ASTM E-399 standardında yer alan ve (2.1) no.lu denklemde verilen,  $\Delta K$  empirik formülü kullanılarak elde edilmiştir. "İşlenmiş deney dataları" isimli eğri ile diğer referans eğrileri ise Tablo 2.6.'da yer alan "C" ve "n" değerleri kullanılarak çizdirilmiştir.



Şekil 2.19. Farklı "C" ve "n" değerleri için çizdirilen da/dN- $\Delta K$  grafiklerinin karşılaştırılması.

Yukarıda da bahsedildiği gibi literatürden alınan malzeme sabitlerinin bir kısmının hangi R oranına ait olduğu belirtilmediği için Şekil 2.19.'da yer alan eğrilerin bir kısmı farklılık göstermektedir. Ancak deney datalarını, Tablo 2.6.'da yer alan özellikle R oranı 0,1 ve malzeme türü Al-7075-T651 olan literatür datası (Sander, 2015) ile kıyasladığımız zaman eğrilerin birebir örtüştüğü görülmektedir.

Sonuç olarak mod-I çatlak ilerleme test sonuçlarına göre elde edilen "C" ve "n" değerlerinin, literatür verileri ile doğrulaması yapılarak, bundan sonraki karışık modlu çatlak ilerleme deneylerinde elde edilen bu değerlerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

### 2.3. Mod-I/II Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri

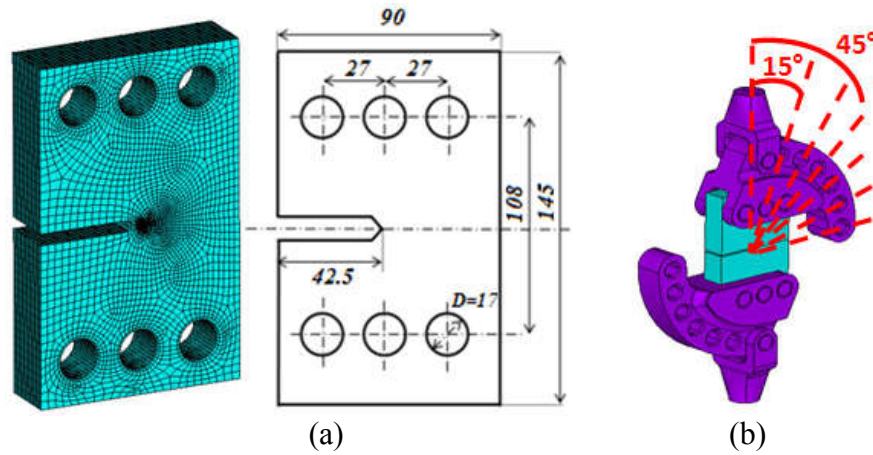
Literatürde karışık modlu yükler altında çatlak ilerleme davranışının tahmini üzerine geliştirilen iki boyutlu çeşitli kriterler mevcuttur. Bu kriterler, Bölüm 2.6.1.'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Erdoğan ve Sih kriteri (1963), Richard kriteri (1985; 1987), Nuismer kriteri (1975) ve Amestoy kriteri (1980) temel iki boyutlu karışık mod kriterleri olarak sıralanabilir. Yapılan bir çalışmada (Richard ve ark., 2004) iki boyutlu karışık mod kriterleri karşılaştırıldığında, iki boyutlu kriterler arasından Erdoğan ve Sih kriteri (1963) ve Richard kriteri (1985; 1987) çatlak ilerleme profilini tanımlayan en uygun kriterler olarak belirtilmiştir.

Karışık modlu çatlak ilerlemesi ilgili literatürdeki sınırlı sayıda çalışma arasında Richard ve ekibinin hem iki boyutlu hem de üç boyutlu karışık mod çatlak ilerlemesi ile ilgili çok sayıda çalışma yaptığı gözlenmektedir (Rikards ve ark., 1998; Wang ve ark., 1999; Richard ve Sander, 2003; 2011; Buchholz ve ark., 2004; Sander ve Richard, 2003; 2005; 2006; Richard ve ark., 2005; 2008; 2013; 2014; Schöllmann ve ark., 2003; Fulland ve ark., 2008; Steigemann ve ark., 2010; Leuders ve ark., 2013). Gerçekleştirdiği çalışmaların birçoğunda CTS (compact tension shear) numunesi kullanarak farklı açılarda yükleme yapmış ve elde ettiği sonuçlara göre iki ve üç boyutlu kriterler geliştirmiştir. Zhao ve Guo (2012)'de Richard ve ekibinin üzerinde çalıştığı CTS numunesi ile benzer fakat farklı boyutlarda CTS numunesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Mod-I/II kırılma ve çatlak ilerleme testleri kapsamında boyutları, kalınlıkları, tutucuları, belirli bir yükleme açısında elde edilen  $K_{II}/K_I$  oranları birbirinden farklı olan iki ayrı numune ele alınarak detaylı kırılma ve çatlak ilerleme analiz ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerden birincisi literatürden seçilen Richard ve ekibinin geliştirmiş olduğu CTS numunesidir. Diğer numune ise tez kapsamında geliştirilen, birim yük başına en yüksek gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerini ( $K_{maks}/P_{birim}$ ) elde etmeyi ve malzemeden tasarruf sağlayarak daha küçük numune boyutlarında daha yüksek GŞF değerlerini elde etmeyi amaçlayan, şeklinden dolayı bu ismi alan T-numunesidir.

### 2.3.1. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi tasarım ve kırılma analizleri

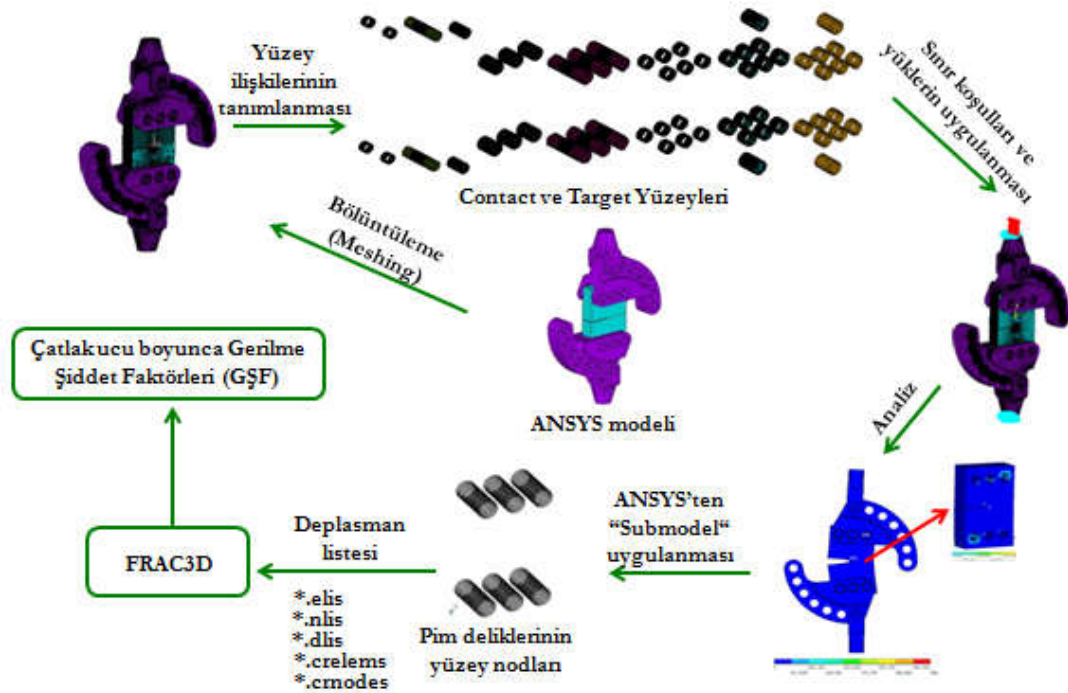
Richard ve ekibinin karışık modlu çatlak ilerlemesiyle ilgili yapmış olduğu çalışmalar (Sander ve Richard, 2005; 2006) referans alınarak Şekil 2.20.a'da ölçüleri verilen karışık modlu yüklemelerde kullanılan CTS numunesi modellenmiş ve buna uygun değişik açılarda ( $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ-90^\circ$ ) yükleme yapabilecek tutucu tasarlanmıştır (Şekil 2.20.b).



Şekil 2.20. Karışık modlu yüklemeler için modellenen (a) CTS numunesi ve (b) test konfigürasyonu.

Deneysel çalışmalar gerçekleştirilmeden önce ANSYS (2009) sonlu elemanlar programı kullanılarak değişik açılardaki ( $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ-90^\circ$ ) yükleme durumları için gerilme analizleri yapılmıştır. Deneyi bire bir simüle etmek için analizler, tutucu ile pim ve pimler ile numune arasındaki temas yüzeyleri (contact) ANSYS programına tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme analiz programı, FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System) çözücüsü FRAC3D kullanılarak çatlak ucu boyunca GŞF değerleri hesaplanarak, bu değerlerin kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerine ulaşması için gereken yükler ve bu yüklerde tutucu, pim ve numunedeki oluşması beklenen gerilmeler belirlenmiştir. ANSYS'te gerçekleştirilen analiz sonrasında numune deliklerinin yüzeylerindeki düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler sub-modeling yöntemiyle programdan alınarak FRAC3D programına deplasman yükü olarak girilmekte, ayrıca numune modelinin eleman ve düğüm noktası listeleri ve çatlak ucu boyunca

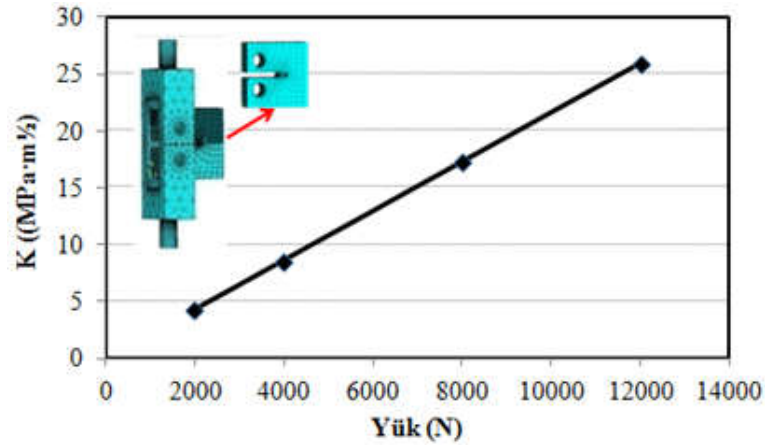
sıralanmış eleman ve düğüm noktası listeleri FRAC3D programına girilerek çatlak ucu boyunca GŞF değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 2.21.'de prosedürün özeti görsel olarak verilmiştir.



Şekil 2.21. ANSYS ve FCPAS programında gerçekleştirilen CTS numunesi analizlerinin proses şeması.

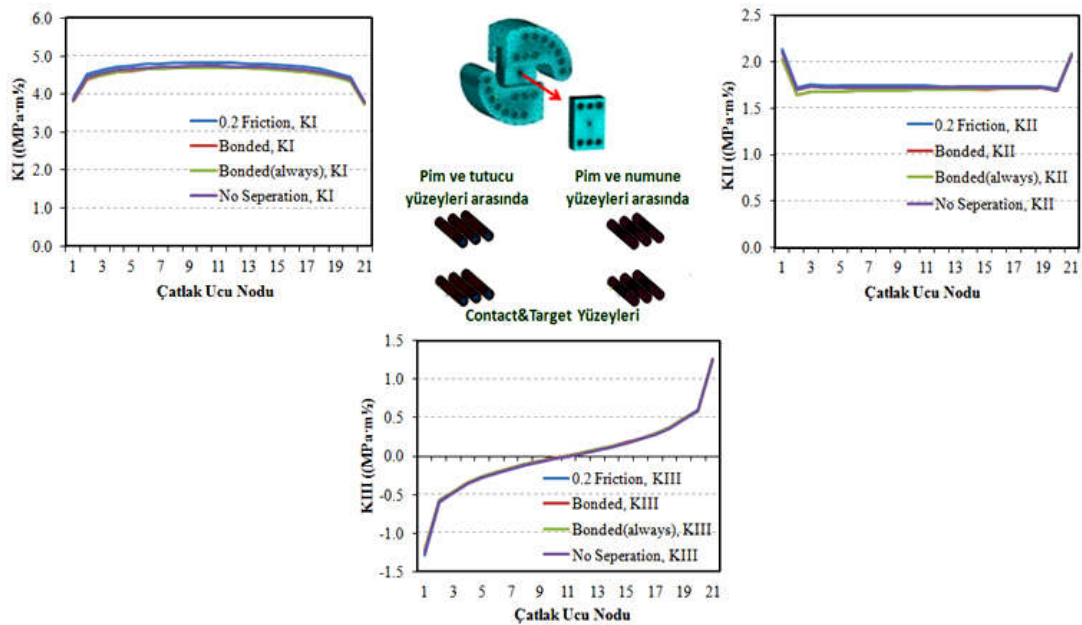
Yukarıda proses şeması verilen CTS numunesi için kırılma analizleri gerçekleştirilmeden önce sonlu elemanlar programında temas yüzeyleri için tanımlanan temas (contact) tipinin, yük ve sınır koşullarının, analizler sonrasında elde edilen GŞF değerleri üzerine etkisini belirlemek için bazı hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, analizlerde uygulanan yükün değişimi ile elde edilen GŞF değerlerinin değişiminin, beklendiği gibi lineer olup olmadığının kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, mod-I yüklemesi altında standart CT numunesine farklı yükler uygulanarak (2, 4, 8, 12 kN) kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Yüke bağlı olarak GŞF değişim grafiği Şekil 2.22.'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yükün artışıyla GŞF değerlerinin de lineer olarak arttığı gözlenmektedir.



Şekil 2.22. Lineer yük artışına bağlı olarak GŞF değerlerinin lineer değişimi.

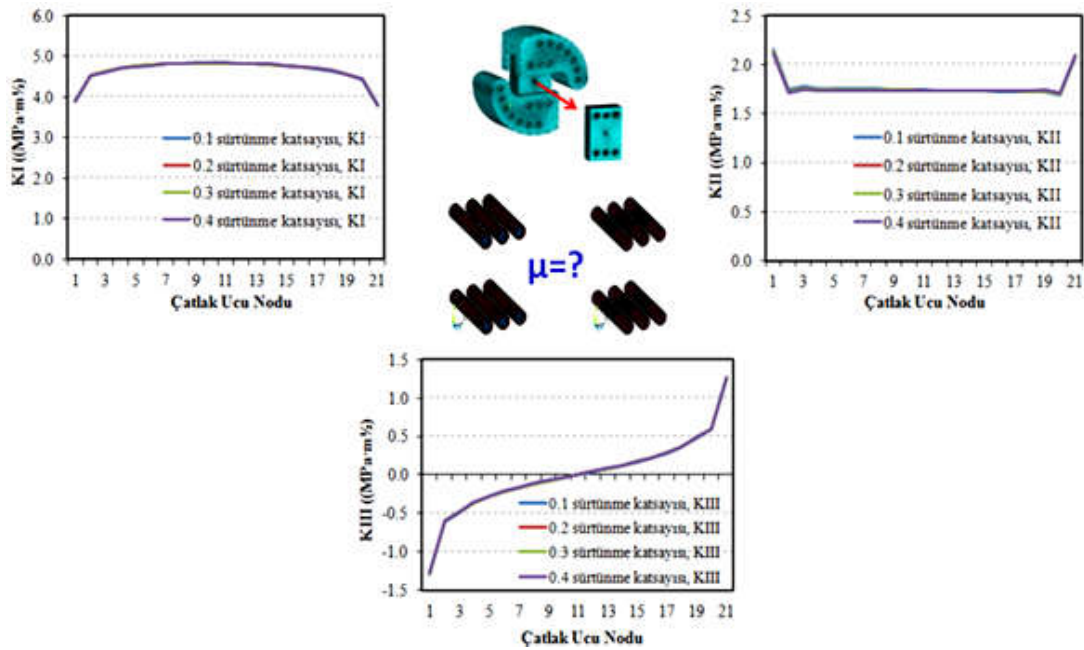
ANSYS'te yüzeyler arasında temas ilişkisi tanımlanarak gerçekleştirilen analizlerde, temas yüzeyleri arasında tanımlanan temas tipinin GŞF ( $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$ ) değerleri üzerine etkisi ayrı bir çalışma olarak incelenmiş olup, sonuçlar Şekil 2.23.'te verilmiştir. Farklı temas tipleri (standart, bonded, bonded (always) ve no separation) tanımlanarak yapılan analizlerde, temas tipinin hesaplanan GŞF değerleri üzerinde pek etkisinin olmadığı görülmüştür.



Şekil 2.23. Temas tipinin çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri üzerine etkisi.

Son olarak yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının GŞF değerleri üzerine etkisini belirlemek için "standart (frictional)" temas tipinin olduğu durum ele alınarak, farklı

sürtünme katsayı değerleri (0,1-0,2-0,3-0,4) için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında elde edilen GŞF değerleri Şekil 2.24.'te verilmiştir. Temas tipinde olduğu gibi sürtünme katsayısının da GŞF değerleri üzerinde önemli ölçüde bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

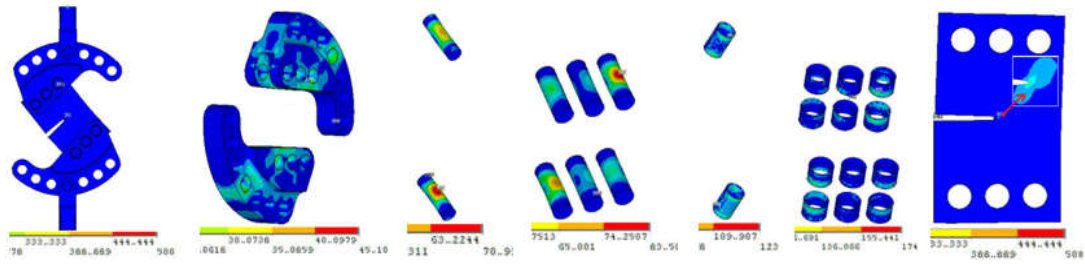


Şekil 2.24. Sürtünme katsayısının çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri üzerine etkisi.

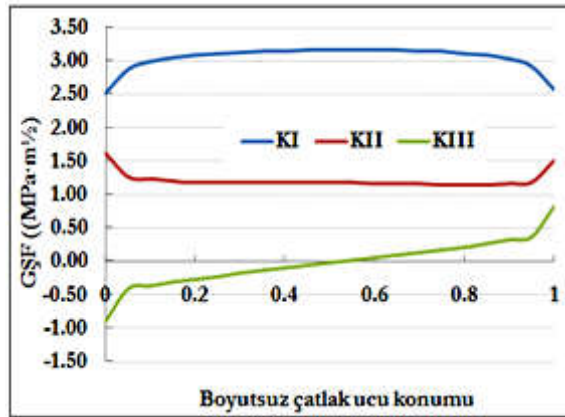
Deneysel mod-I/II kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme testleri gerçekleştirilmeden önce testler bire bir simüle edilerek pimlere, tutuculara ve numuneye gelen yükler belirlenerek, kritik olan bölgelere göre tutucu modeli üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Tutucunun pim deliklerinin olduğu bölgedeki zorlanmayı bir miktar düşürmek için, pim deliklerinin olduğu yerlerde burç kullanılmasına karar verilmiştir. Deneyler esnasında beklenmeyen zorlanma ve yüzeylerde aşınma gibi durumların oluşması halinde deforme olan burçların kolay bir şekilde değiştirilebilmesi düşünülmüştür. ANSYS'te yapılan gerilme analizlerinde en üst ve en alt kısımda yer alan çene ile üst ve alt pim arasında, üst ve alt kısımda yer alan pimler ile üst ve alt kısımda yer alan burçlar arasında, ara pimler ile numune ve tutucu arasında ve burçlar ile numune tutucu ve çene arasındaki temas yüzeyleri için temas ilişkisi (contact) tanımlanmıştır. ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak, değişik açılardaki ( $\theta=0^{\circ}-15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-60^{\circ}-75^{\circ}-90^{\circ}$ ) yükleme durumları için Şekil 2.20.'de boyutları ve tasarımı verilen numune ve tutucu kullanılarak ve



numune kalınlığı 25 mm alınarak gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.25.'te,  $\theta=45^\circ$  yüklemesi açısı için gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası aparatlarda oluşan gerilmeler verilmiştir. Şekil 2.26.'da ise, bu yüklemesi durumu için gerçekleştirilen kırılma analizi sonrası, FRAC3D yardımıyla çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerlerinin dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.25.  $\theta=45^\circ$ , 10 kN yüklemesi durumunda burç, pim, tutucular ve numunede oluşan gerilmelerin dağılımı.



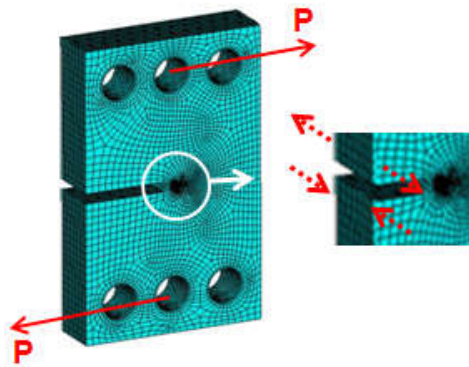
Şekil 2.26.  $\theta=45^\circ$ , 10 kN yüklemesi durumunda çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri.

Şekil 2.26.'da görüldüğü gibi, yüklemesi durumu mod-I/II olmasına rağmen kırılma analizi sonucunda çatlak ucu boyunca  $K_{III}$  değeri de elde edilmiştir.  $K_{III}$  GŞF değerinin oluşma sebebinin şu şekilde olduğu düşünülmektedir.  $90^\circ$  lik yüklemesi durumu (mod-II yüklemesi) ele alındığında, numune üzerinde çatlak yüzeyinin üst kısmı yüklemesinin etkisiyle basma yüküne, çatlak yüzeyinin altında kalan kısım ise ters açıda yüklemesinden dolayı çekme yüküne maruz kalmaktadır. Poisson oranının etkisinden dolayı, basma yüküne bağlı olarak numunenin üst kısmının kalınlığında bir miktar artış olurken, çekme yükünün etkisiyle numunenin alt kısmının kalınlığında bir miktar azalma meydana gelecektir. Kalınlıkta meydana gelen bu artış

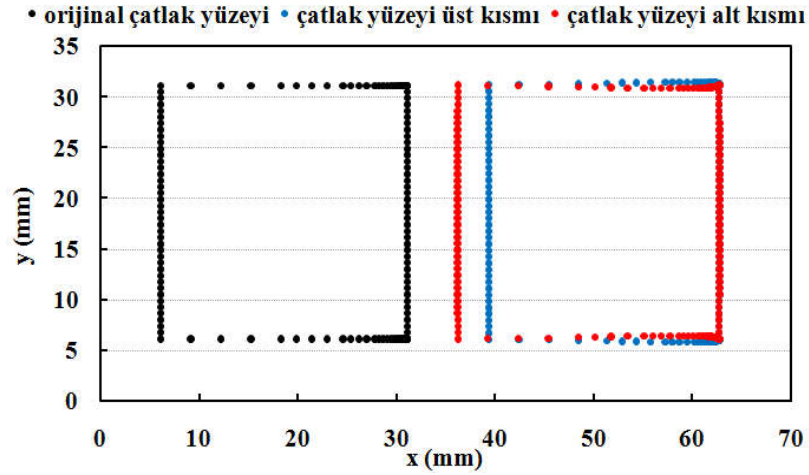


ve azalıştan kaynaklanan alt ve üst yüzeylerin etkileşiminden dolayı,  $K_{III}$  etkisinin oluştuğu gözlemlenmektedir. Grafiklerde  $K_{III}$  GŞF değerinin negatiften pozitif doğru yönelmesinin sebebi, yukarıda bahsedilen basma ve çekme yüklerinin etkisiyle çatlak ucunun yarısında pozitif  $K_{III}$  modü oluşurken, diğer yarısında negatif  $K_{III}$  modü oluşmasından kaynaklanmaktadır ve çatlak ucu orta noktasında bu yüzden  $K_{III}$  sıfır değerini almaktadır. Buchholz ve arkadaşları da (2001; 2004) yapmış oldukları karışık mod-I/II problem analizlerinde çatlak ucu boyunca mod-III etkisi gözlemlenmiş ve bunun nedeninin Poisson oranı etkisinden kaynaklanabileceğini çalışmalarında belirtmişlerdir.

$K_{III}$  GŞF etkisini görselleştirmek için, ANSYS'te  $\theta=90^\circ$  lik yükleme durumu için (Şekil 2.27) yapılan analiz sonrası çatlak yüzeylerini oluşturan sınır düğüm noktalarındaki deplasmanlar belli bir katsayı oranında artırılarak, sınır düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler grafiksel olarak gösterilmiştir (Şekil 2.28).  $K_{III}$  etkisinin CTS analizlerinde kullanılan tutucu, pim veya temas yüzeyleri için tanımlanan yüzey ilişkisinden kaynaklanabileceği ihtimalini ortadan kaldırmak için, Şekil 2.27.'de görüldüğü gibi numunede yer alan orta deliklere zıt yönlü kuvvetler uygulayarak kırılma analizi gerçekleştirilmiştir. Mod-II etkisinin baskın olduğu karışık mod-I/II problemlerinde, önemli ölçüde  $K_{III}$  gerilme şiddet faktörü de elde edilmektedir.

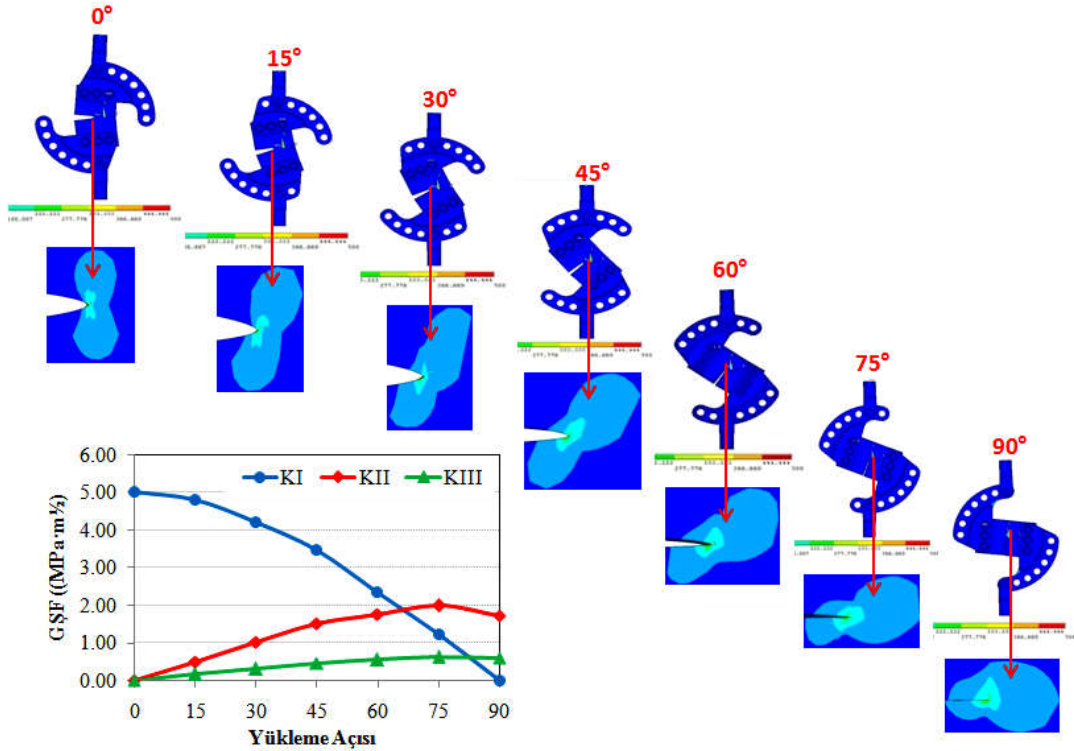


Şekil 2.27.  $\theta=90^\circ$  lik yükleme durumunu temsil etmek için numuneye uygulanan yüklerin gösterimi.



Şekil 2.28.  $\theta=90^\circ$  lik yüklem durumunda K11 etkisinin görsel olarak gösterilmesi – yüklem öncesi ve sonrası çatlak yüzeylerinin üst görünüşü.

Şekil 2.29.'da tüm açılar için gerçekleştirilen gerilme analizleri sonrasında aparatların tamamında ve numunenin çatlak ucu bölgesinde oluşan gerilme dağılımları ve kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan GŞF değerlerinin dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 2.29. Farklı yüklem açıları için gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizleri sonrasında çatlak ucunda oluşan gerilme ve GŞF dağılımları.

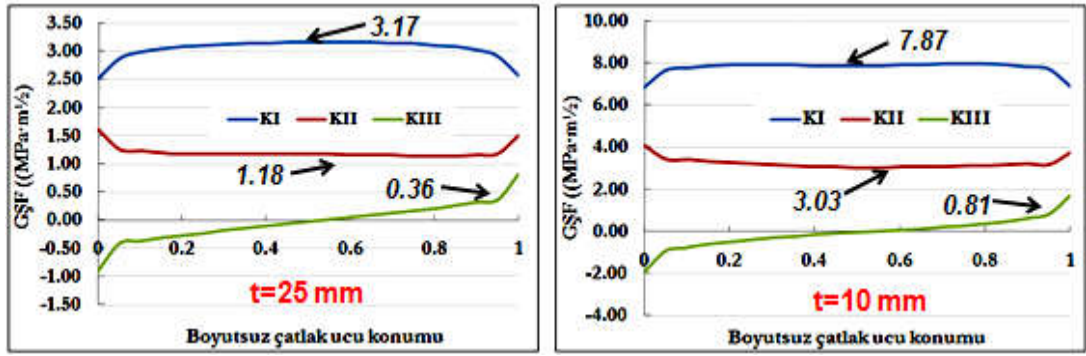
Yapılan gerilme analizleri ve sonrasında çatlak ucu boyunca hesaplanan  $K_I$  ve  $K_{II}$  GŞF değerleri sonrasında, Richard ve ekibinin empirik olarak geliştirmiş olduğu (Richard, 1985; 1987) ve aşağıda formülü verilen eşitlik ile (Denklem 2.3), her bir açılı yükleme durumu için eşdeğer GŞF değeri hesaplanarak Tablo 2.7.'de verilmiştir.

$$K_{eş} = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 5,366 \cdot K_{II}^2} = K_{IC} \quad (2.3)$$

Tablo 2.7.  $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ-90^\circ$  açılarda gerçekleştirilen analizlerin sonuçları.

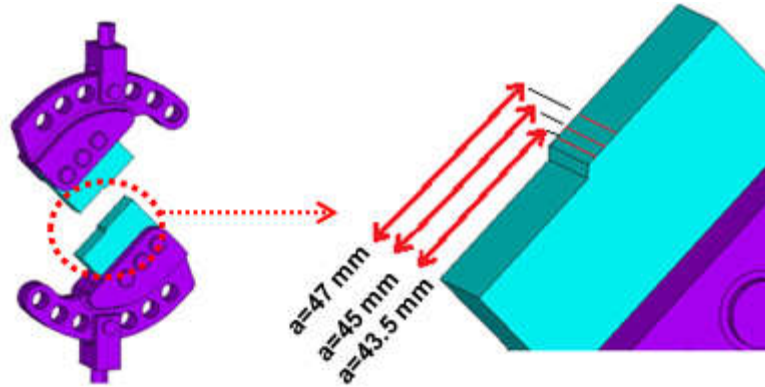
P=10 kN, $K_{IC}=29 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (7075T6 Al), $u=0,33$ , $t=25\text{mm}$														
( $^\circ$ )	TUTUCU				ÜST ve ALT PİM		ARA PİMLER		NUMUNE					
	(MPa $\sqrt{\text{m}}$ )				(N)		(MPa)		(MPa)		(MPa)			
$\theta_L$	$K_I$	$K_2$	$K_2/K_1$	$K_{GŞ}$	$P^{crit}$	$\sigma_{eqv}^{max}$	$\sigma_{eqv}^{max} \cdot (K_{IC}/K_V)$	$\sigma_{eqv}^{max}$	$\sigma_{eqv}^{max} \cdot (K_{IC}/K_V)$	$\sigma_{eqv}^{max}$	$\sigma_{eqv}^{max} \cdot (K_{IC}/K_V)$	$\sigma_{eqv}^{max}$	$\sigma_{eqv}^{max} \cdot (K_{IC}/K_V)$	
0	9,13	0,00	0,00	9,13	31763	27,25	86,75	71,43	227,38	32,43	103,23	40	127,33	
15	4,60	0,46	0,01	4,66	62250	27,11	168,71	71,34	443,96	50,41	313,71	40	248,93	
30	3,91	0,82	0,21	4,13	70244	35,26	247,59	71,07	499,04	69,27	486,40	40	280,87	
45	3,17	1,18	0,37	3,68	78850	45,11	355,49	70,92	558,88	83,50	658,02	50	394,02	
60	2,20	1,48	0,67	3,14	92452	51,56	476,19	70,60	652,04	91,04	840,82	50	461,78	
75	1,10	1,67	1,52	2,56	113240	62,75	710,84	71,16	806,11	92,92	1052,61	55	623,05	
90	0,00	1,73	$\infty$	2,00	144729	105,13	1524,39	73,08	1059,66	89,36	1295,72	55	797,50	

Al 7075 T-651 malzemesi için kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değeri  $29 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  alınarak hesaplanan  $K_V$  eşdeğer gerilme şiddet faktörü değerlerinin  $K_{IC}$  değerine ulaşması için gerekli olan kritik yük değeri ( $P^{crit}$ ) belirlenerek tabloda verilmiştir. Özellikle  $\theta=60^\circ-75^\circ-90^\circ$  lik açılarda kritik yük değeri  $t=25 \text{ mm}$  kalınlık durumunda oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu yüzden CTS numunesinin kırılma deneyleri için numune kalınlığı  $10 \text{ mm}$  olacak şekilde CTS numuneleri üretilmiştir. Simülasyonlar  $25 \text{ mm}$  kalınlıktaki CTS numuneleri için gerçekleştirildiği için, herhangi bir açı değerinde o numuneyi kırmak için gerekli olan kritik yük değerinin  $2/5$ 'i alınarak  $10 \text{ mm}$  kalınlık için gerekli olan yük hesaplanmaktadır. Şekil 2.30.'da  $t=25$  ve  $10 \text{ mm}$  kalınlıktaki CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerlerinin dağılımı verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi değerler arasında elde edilen oran  $2,5$  olacak şekilde GŞF değerleri elde edilmiş ve yukarıda bahsedilen yaklaşımın doğruluğu analiz sonucunda da görülmüştür.



Şekil 2.30.  $\theta=45^\circ$  yükleme durumunda,  $t=25$  ve  $10$  mm kalınlıktaki CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma analiz sonuçları.

Kırılma deneyleri sonrasında, deney başlangıcında oluşturulan ön çatlakın net ölçüsü, kırık numune yüzeyi üzerinden belirlenmektedir. Oluşturulan ön çatlak uzunluğu ve buna bağlı olarak toplam çatlak uzunluğu her numunede aynı olmayıp, bu uzunluk değerleri arasında  $\pm 1$  mm fark oluşabilmektedir. Bu yüzden, tüm yükleme açılarında  $45$  mm ön çatlak uzunluğu için gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizleri,  $43.5$  mm ve  $47$  mm ön çatlak uzunlukları için de (Şekil 2.31) gerçekleştirilmiş ve elde edilen GŞF değerleri Tablo 2.8.'de verilmiştir.



Şekil 2.31. Farklı ön çatlak uzunluklarının analiz modelinde gösterimi.

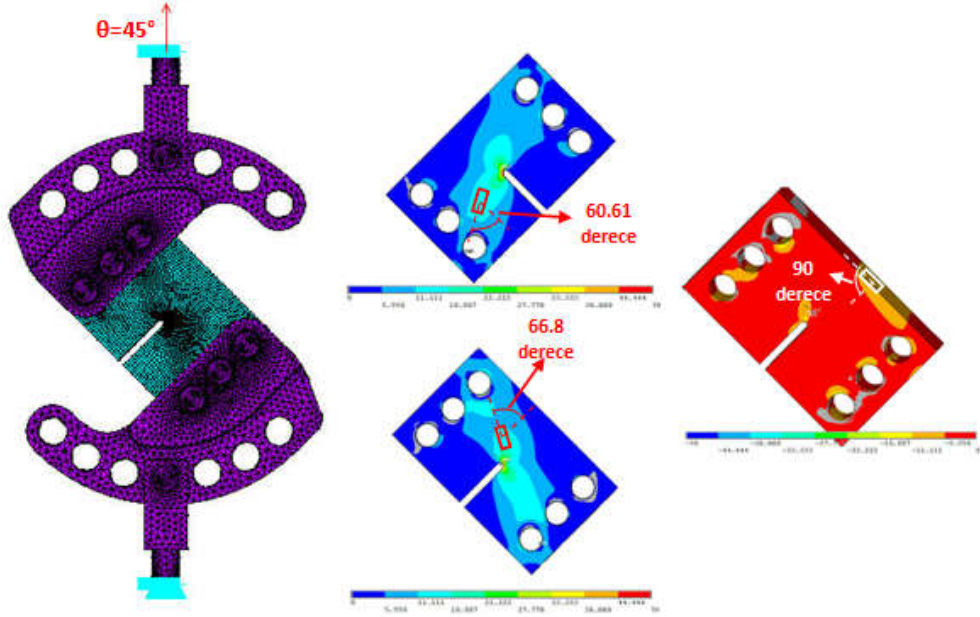
Böylece, kırılan numunenin yüzeyinden okunan ön çatlak uzunluk değerine karşılık gelen GŞF değeri, interpolasyon yöntemiyle hesaplanmaktadır. Tabloda verilen  $K_I$  ve  $K_{II}$  değerleri çatlak ucu merkezi için,  $K_{III}$  değeri ise çatlak ucu kenarı için elde edilen değerlerdir. Çatlak ucu merkezinde tüm yükleme açılarında  $K_{III}$  değeri  $0$  olduğu için kenar değerler verilmiştir.

Tablo 2.8.  $\theta=0, 15, 30, 45, 60, 75$  ve  $90^\circ$  yüklemeye açılarında, 43,5, 45 ve 47 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucunda elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri (Demir ve ark., 2016).

Yüklemeye açısı ( $^\circ$ )	43,5 mm çatlak uzunluğu			45 mm çatlak uzunluğu			47 mm çatlak uzunluğu		
	Çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değeri, ( $\Delta\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )								
	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$ (Kenar Değeri)	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$ (Kenar Değeri)	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$ (Kenar Değeri)
0	8,78	0,00	0,00	9,13	0,00	0,00	9,59	0,00	0,00
15	4,37	0,32	0,11	4,60	0,46	0,16	5,13	0,43	0,18
30	3,91	0,65	0,22	3,91	0,82	0,24	4,59	0,94	0,33
45	3,16	0,94	0,35	3,17	1,18	0,36	3,74	1,35	0,45
60	2,23	1,15	0,40	2,20	1,48	0,50	2,63	1,72	0,57
75	1,05	1,30	0,46	1,10	1,67	0,51	1,31	1,94	0,63
90	-	-	-	0,00	1,73	0,55	-	-	-

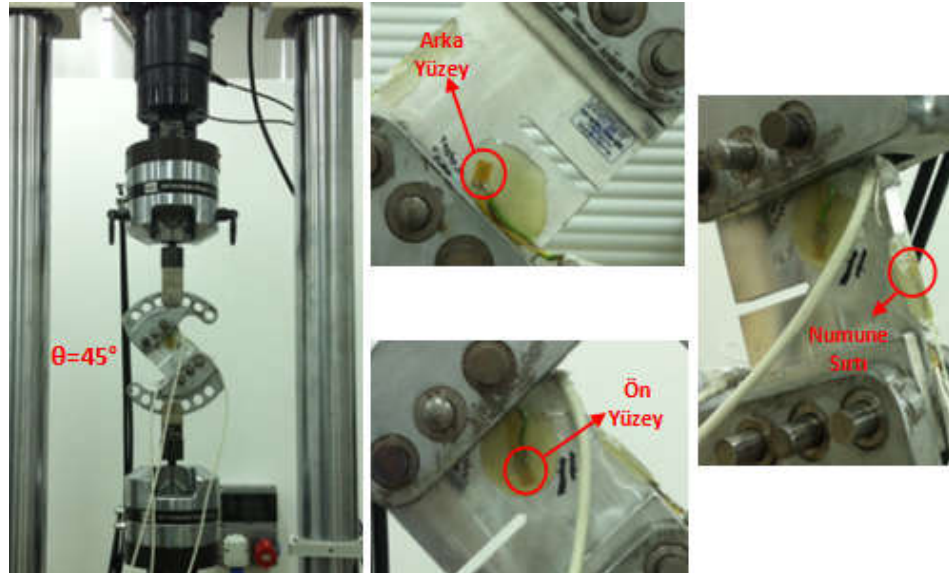
### 2.3.2. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi strain-gage doğrulama çalışması

Mod-I/II yüklemesinde kırılma tokluğu değerinin elde edilmesinde belirli bir standart ve standart bir numune olmadığı için, ön çatlaksız CTS numunesi ile strain-gage uygulaması gerçekleştirilerek simülasyon sonuçlarının deney sonuçlarını karşılayıp karşılamadığı ile ilgili doğrulama çalışması yapılmıştır. Öncelikle ön çatlaksız 25 mm kalınlıktaki CTS numunesi ile tutucu, burç ve pimler kullanılarak daha önceki simülasyonlarda olduğu gibi modelleme, bölüntüleme (meshleme), yüzey ilişkisi tanımlama gibi işlemler birebir uygulanarak,  $45^\circ$  yüklemeye açısında 10 kN yüklemeye gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrası numunede oluşan asal gerilmeler ve yönleri belirlenerek, strain-gagelerin yerleştirileceği yer ve açılar belirlenmiştir (Şekil 2.32). Daha sonra bu noktadaki düğüm noktalarının belirlenen açıdaki birim şekil değiştirme miktarları deney verileri ile kıyaslanmıştır. Numunenin ön yüzüne, arka yüzüne ve sırtına olmak üzere numuneye 3 adet strain-gage yerleştirilmesi uygun görülmüştür.



Şekil 2.32.  $\theta=45^\circ$  yükleme açısı ve 10 kN yükleme durumu için strain-gagelerin yerleştirileceği bölgeler.

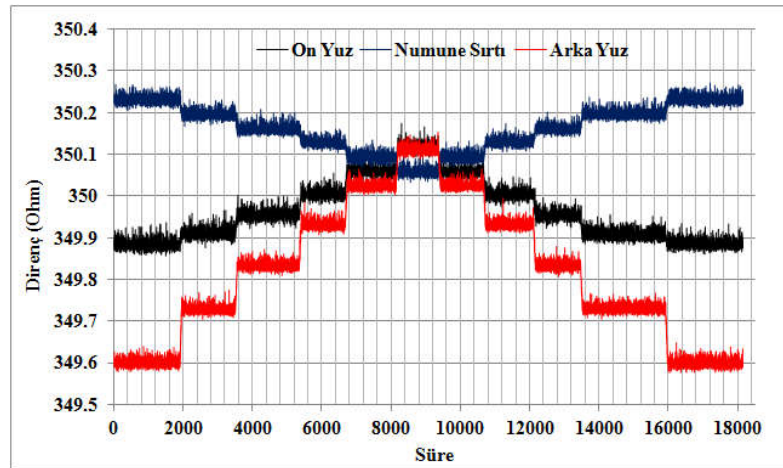
Şekil 2.33.'te gösterildiği gibi, gerilme analizi sonucu, yerleri ve yerleştirileceği açıları belirlenen strain-gageler numuneye yapıştırılarak,  $45^\circ$  açıda mod-I/II yüklemesi yapılmıştır. Deney esnasında yükleme 0'dan başlayarak ikişer kN artışla 10 kN yüke çıkarılmış, daha sonra ikişer kN azaltılarak yüksüz konuma getirilmiştir.



Şekil 2.33.  $\theta=45^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü.



Deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 2.34.'te verilmiştir. Bu şekilde hem yüklemeler arasında birim şekil değiştirmelerin lineer değişip değişmediği kontrol edilmekte hem de bu birim şekil değiştirme miktarları simülasyon sonucu ile mukayese edilerek her bir yük aralığındaki % fark hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.34. Richard numunesi için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği.

Tablo 2.9.'da yüksüz durumdan 10 kN yüke kadar artış esnasındaki her bir yük farkına karşılık gelen birim şekil değiştirme değerleri ölçülerek, simülasyondan elde edilen birim şekil değiştirme değerleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Simülasyon 10 kN yükte gerçekleştirildiği için, deneyde 0-10 kN arası elde edilen birim şekil değiştirme değeri referans alınarak karşılaştırma yapılmış ve hesaplanan % fark değeri son satırda verilmiştir.

Tablo 2.9. CTS numunesi için simülasyondan ölçülen birim şekil değiştirme değerleri ile deneyde strain gagelerden okunan birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması.

	Ön Yüz	% Fark	Numune Sırtı	% Fark	Arka Yüz	% Fark
0-2 kN yüklemeye $\epsilon$	0,000165	-69,75	-0,000228	-14,22	0,000815	61,97
0-4 kN yüklemeye $\epsilon$	0,000224	-58,89	-0,000224	-15,65	0,000744	47,78
0-6 kN yüklemeye $\epsilon$	0,000257	-52,73	-0,000218	-17,77	0,000704	39,83
0-8 kN yüklemeye $\epsilon$	0,000277	-49,06	-0,000219	-17,45	0,000677	34,58
0-10kN yüklemeye $\epsilon$	0,000299	-45,16	-0,000220	-16,98	0,000654	29,97
	Ön Yüz	% Fark	Numune Sırtı	% Fark	Arka Yüz	% Fark
10 kN yüklemeye $\epsilon$ (ANSYS çözümü)	0,000545	-45,16	-0,000266	-16,98	0,000503	29,97

Numune ön yüzeyine yerleştirilen strain-gage'nin çentik ucuna yakın bir konumda olması ve bu bölgede nispeten daha yüksek gerilme gradyanları olmasından dolayı numune ön yüzeyi için güvenilir datalar alınamamıştır. Elde edilen asal gerilmelerin dağılımı bu nokta için incelendiğinde, çentik ucuna çok yakın bir bölgede olmasından dolayı yüksek gerilme gradyanı geçişinin olduğu anlaşılmaktadır. Bundan dolayı bu bölgede hassas bir doğrulama yapmak zorlaşmaktadır. Numune sırtı için elde edilen simülasyon ( $\epsilon=0.00022$ ) ve deney ( $\epsilon=0.00027$ ) dataları değerlendirildiğinde, yaklaşık %17'lik bir fark tespit edilmiştir. 10 kN yükleme sonucu çentiksiz numunede oluşan 1/1000 hassasiyetinde birim şekil değiştirme değerleri dikkate alındığında bu hata oranının kabul edilebilir mertebelerde olduğu görülmektedir.

### **2.3.3. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi kırılma tokluğu testleri**

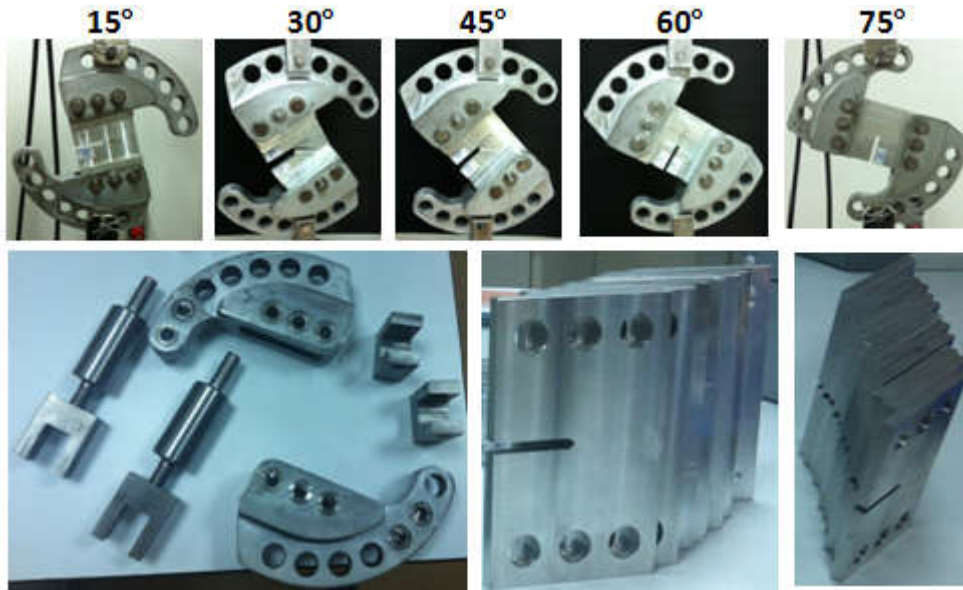
Mod-I/II CTS numunesi kırılma tokluğu testleri, Bursa Teknik Üniversitesi'nde (BTÜ) Schimadzu 200 kN kapasiteli eksenel çekme cihazında (Şekil 2.35) gerçekleştirilmiştir.





Şekil 2.35. Shimadzu 200 kN kapasiteli eksenel çekme cihazı.

Mod-I/II kırılma tokluğu testlerinden önce her bir numuneye 2,5 mm'lik ön çatlak, eksenel yorulma cihazı kullanılarak oluşturulmuştur. Ön çatlak oluşumu için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı, mod-I kırılma tokluğu testlerinde (Bölüm 2.2.1) ön çatlak oluşumu için izlenen yöntemle göre ASTM standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Ön çatlak oluşumu tamamlandıktan sonra yükleme hızı, yine standartlarda belirlenen yükleme hızı aralıklarında kalacak şekilde belirlenen yükleme açısında, numune kopuncaya kadar yüklenerek kırılma testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.36.'da kırılma testleri için kullanılan aparat ve numuneler ile farklı açılardaki yükleme durumlarında gerçekleştirilen deneylerden kesit görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.36. CTS numunesi mod-I/II kırılma tokluğu testleri için kullanılan ekipmanların ve gerçekleştirilen deneylerin genel görünümü.

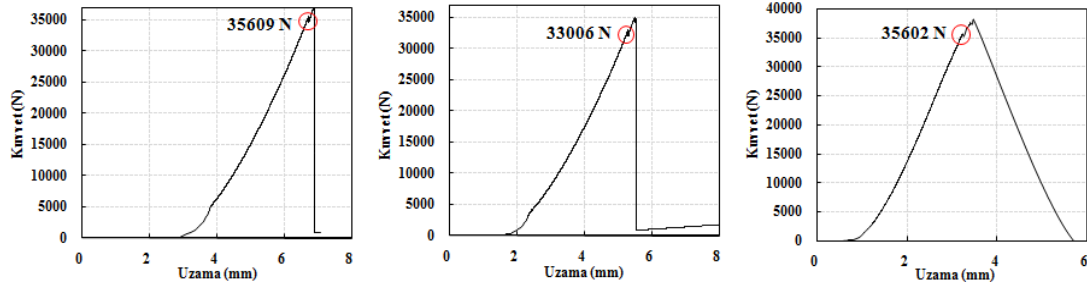
Şekil 2.37.'de ise, deney sonrası kırılan numunelerin perspektif görüntüleri verilmiştir. Aynı yükleme açlarına tabi tutulan numunelerde çatlakın ilerleme açısı incelendiğinde birbirini tekrar eden yüzeylerin olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 2.37. Farklı açılarda kırılan numune yüzeylerinin perspektif görünümü.

Testler sonrasında cihazdan alınan kuvvet-uzama dataları Excel programı yardımıyla çizdirilerek, eğrinin eğilimine göre standartta belirtilen kriterlere uyularak kopma yükleri tespit edilmiştir. Şekil 2.38.'de,  $\theta=45^\circ$  yükleme açısı için gerçekleştirilen 3 adet deneyden elde edilen kuvvet uzama grafikleri temsili olarak verilmiştir. Kopma

yüzeylerinde olduğu gibi deneylerden elde edilen kopma yükleri de birbirini tekrar eder niteliktedir. Tüm numuneler için kopma yükleri ve çatlak sapma açıları belirlenerek Tablo 2.10.'da verilmiştir.



Şekil 2.38. Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrasında  $\theta=45^\circ$  yükleme açısı için elde edilen kuvvet-uzama eğrileri.

Tablo 2.10. CTS numunesi kırılma tokluğu test sonuçları.

Numune No	Yükleme Açısı ( $^\circ$ )	Kalınlık (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	DENEYSEL	
				Kopma Yüğü (kN)	Çatlak Sapma Açısı ( $^\circ$ )
CTS-01	0	10,00	46,50	11,38	0,0
CTS-02	15	10,07	46,07	26,11	-12,4
CTS-03	15	10,06	45,96	26,68	-12,6
CTS-04	30	9,60	45,08	27,52	-21,1
CTS-05	30	10,10	44,94	28,59	-20,7
CTS-06	30	10,20	45,03	29,57	-20,2
CTS-07	45	10,13	44,95	35,61	-31,2
CTS-08	45	10,17	44,75	33,01	-31,7
CTS-09	45	10,13	45,40	35,60	-38,5
CTS-10	60	10,16	44,93	46,25	-43,1
CTS-11	60	10,15	45,22	46,90	-43,6
CTS-12	60	10,18	45,20	45,71	-
CTS-13	75	10,10	46,38	62,73	-61,5
CTS-14	75	10,14	45,24	68,07	-59,5

### 2.3.4. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi çatlak ilerleme testleri

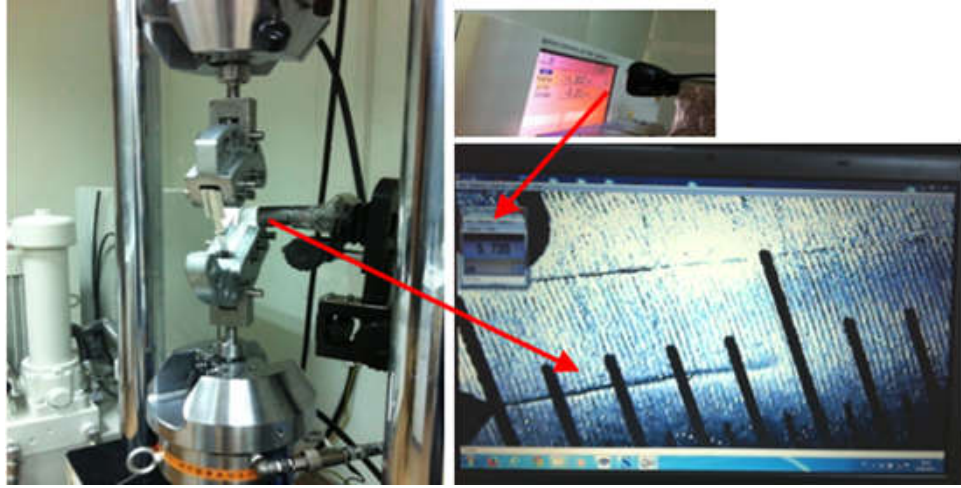
Mod-I/II CTS numunesi çatlak ilerleme testlerinin bir kısmı, Bursa Teknik Üniversitesi'nde (BTÜ) Schimadzu 100 kN kapasiteli aksenal yorulma cihazında, bir

kısmı da Sakarya Üniversitesi'nde MTS 100 kN-1100 Nm kapasiteli aksel/torsiyonel yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir.  $\theta=30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında üçer adet olmak üzere toplam 12 adet numune için mod-I/II çatlak ilerleme testi gerçekleştirilmiştir.

Mod-I/II çatlak ilerleme testlerinden önce her bir numuneye 2,5 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Ön çatlak uzunluğu standartta yer alan; ön çatlak uzunluğu  $\geq 0,1*B$  (B:kalınlık) şartına göre 2,5 mm olarak belirlenmiştir. Ön çatlak oluşumu için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı mod-I çatlak ilerleme testlerinde (Bölüm 2.2.1) ön çatlak oluşumu için izlenen yöntemle göre ASTM standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Mod-I/II çatlak ilerleme testi için yorulma ön çatlağı mod-I açılma modunda, CTS numunesinin sadece solundaki alt ve üst deliğine yükleme yapılarak, açılma modunda düzlemsel ön çatlak oluşturulmuştur. Simülasyonlarda, CTS numunesinin sadece sol deliklerinden yükleme yapılarak, gerçekleştirilen kırılma analizlerine göre yorulma ön çatlağı oluşturmak için, başlangıç test yükü 3,99 kN olarak belirlenmiştir. Her açı değeri için yorulma ön çatlağı oluşturulduktan sonra çatlak ilerleme testleri için yük aralıkları belirlenerek mod-I/II tesleri gerçekleştirilmiştir. Mod-I/II çatlak ilerleme testleri için yük aralıkları aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

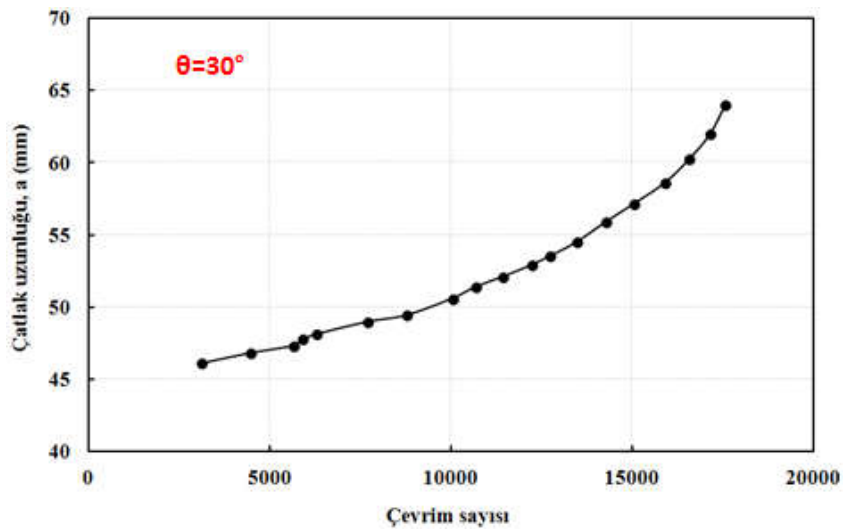
Numune kalınlığının 25 mm olduğu durum için 10 kN yüklemeye gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen  $K_I$  ve  $K_{II}$  değerlerinden, Richard kriterine göre eş değer gerilme şiddet faktörü ( $K_v$ ) değeri hesaplanmıştır. Çatlak ilerleme testlerinde lineer Paris-Erdoğan bölgesinde veriler elde etmek için başlangıç  $K_v$  değeri belirlenerek, simülasyon sonuçlarından elde edilen  $K_v$  değerinin başlangıç  $K_v$  değerine ulaşması için ne kadar yükün gerekli olduğu tespit edilmiştir. Mod-I/II çatlak ilerleme deneyleri için başlangıç  $K_v$  değeri 12 olarak belirlenmiştir. 10 mm kalınlık için istenen  $K_v$  değeri 12 ise bu değer 25 mm için  $12/2,5=4,8$  olmaktadır. Hangi açıda test gerçekleştirilecek ise o açı için 25 mm kalınlıkta analizi yapılan modelden elde edilen  $K_v$  değerinin 4,8 olması için gereken yükü tespit ederek çalışma yükü belirlenmiş olmaktadır. Yük aralığı belirleme işleminden sonra test esnasında çatlak ilerleme adımları ve çevrim sayısının takibi gibi işlemler mod-I

çatlak ilerleme testinde yapılan işlemlerle aynıdır. Çatlak ilerleme testi sırasında, çatlağın uzunluğunu tespit edebilmek için numunenin önüne kamera yerleştirilerek bilgisayara entegre edilmekte ve bu sayede çatlağın ilerlemesi ve gerçekleşen çevrim sayısı hassas bir şekilde görüntülenmekte ve istenen saniye aralıklarında bilgisayara otomatik olarak kaydedilmektedir (Şekil 2.39).



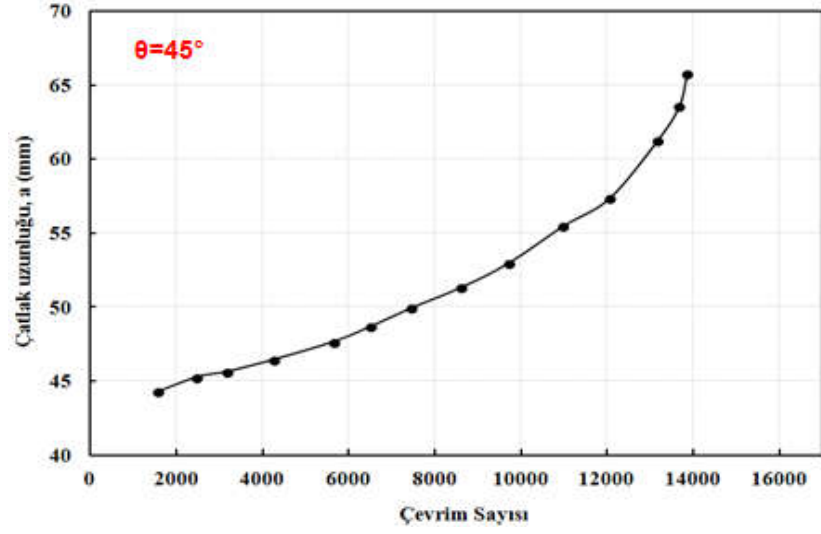
Şekil 2.39. Çatlak ilerleme testinden bir görünüm.

Mod-I/II çatlak ilerleme testlerinin ardından bilgisayara kaydedilen görüntülere göre çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunlukları tespit edilmiş ve  $\theta=30^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $60^\circ$  yükleme açıları için elde edilen grafikler Şekil 2.40.'da verilmiştir.

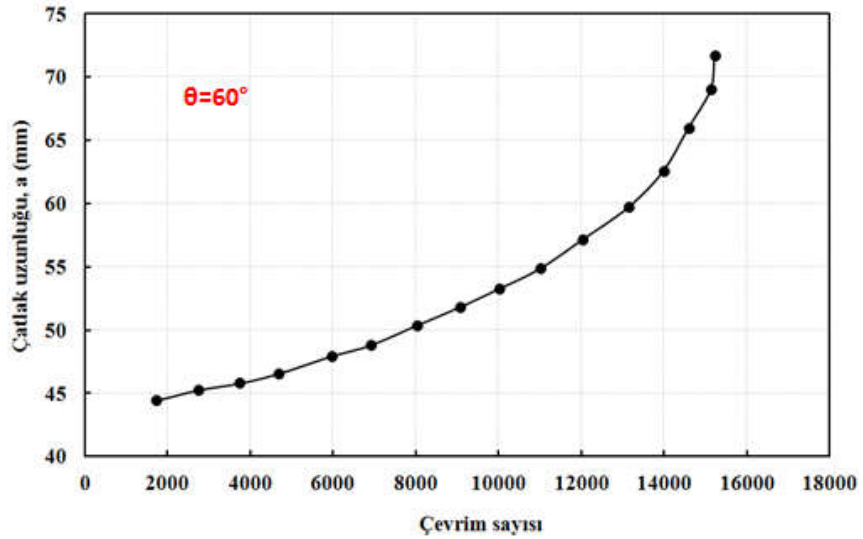


(a)

Şekil 2.40. Çevrim sayısına göre çatlak uzunluk değerlerinin değişimi, (a)  $\theta=30^\circ$ , (b)  $\theta=45^\circ$  ve (c)  $\theta=60^\circ$ .



(b)

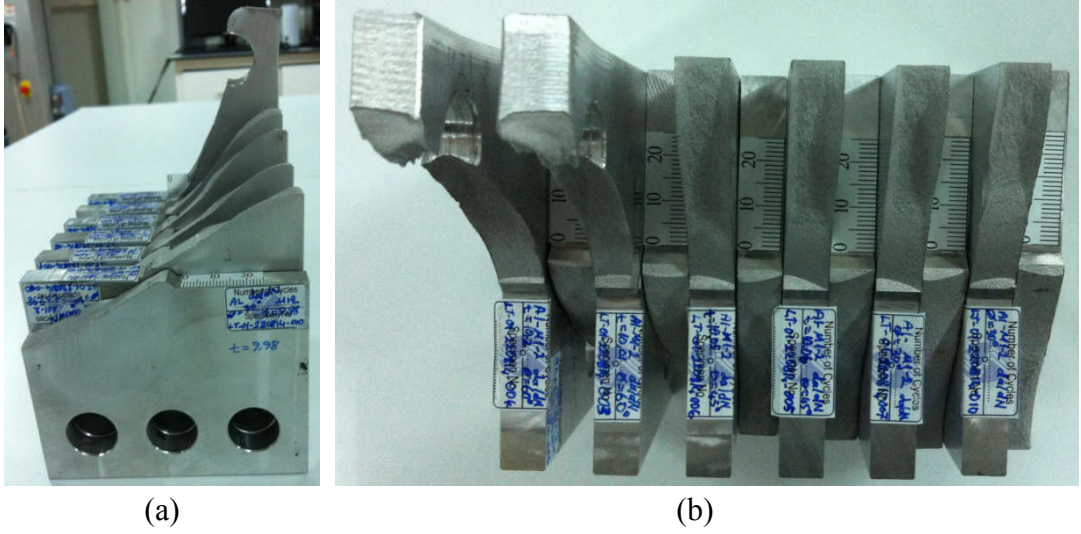


(c)

Şekil 2.40. Çevrim sayısına göre çatlak uzunluk değerlerinin değişimi, (a)  $\theta=30^\circ$ , (b)  $\theta=45^\circ$  ve (c)  $\theta=60^\circ$ . (Devamı)

Şekil 2.41.'de, deney sonucu numunelerin kırılan yüzeylerinin perspektif ve üst görüşleri verilmiştir. Kırılan yüzeyler incelendiğinde, kırılma tokluğu testinde elde edilen yüzeyler gibi birbirini tekrar eden tutarlı ve beklenen çatlak yüzey eğilimlerinin olduğu görülmektedir.

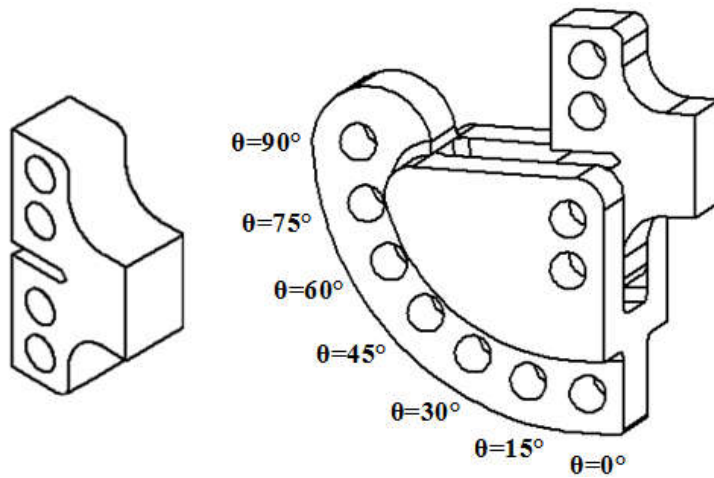




Şekil 2.41. Deney sonucu numunelerin kırılan yüzeylerinin perspektif ve üst görünüşleri sırasıyla verilmiştir.

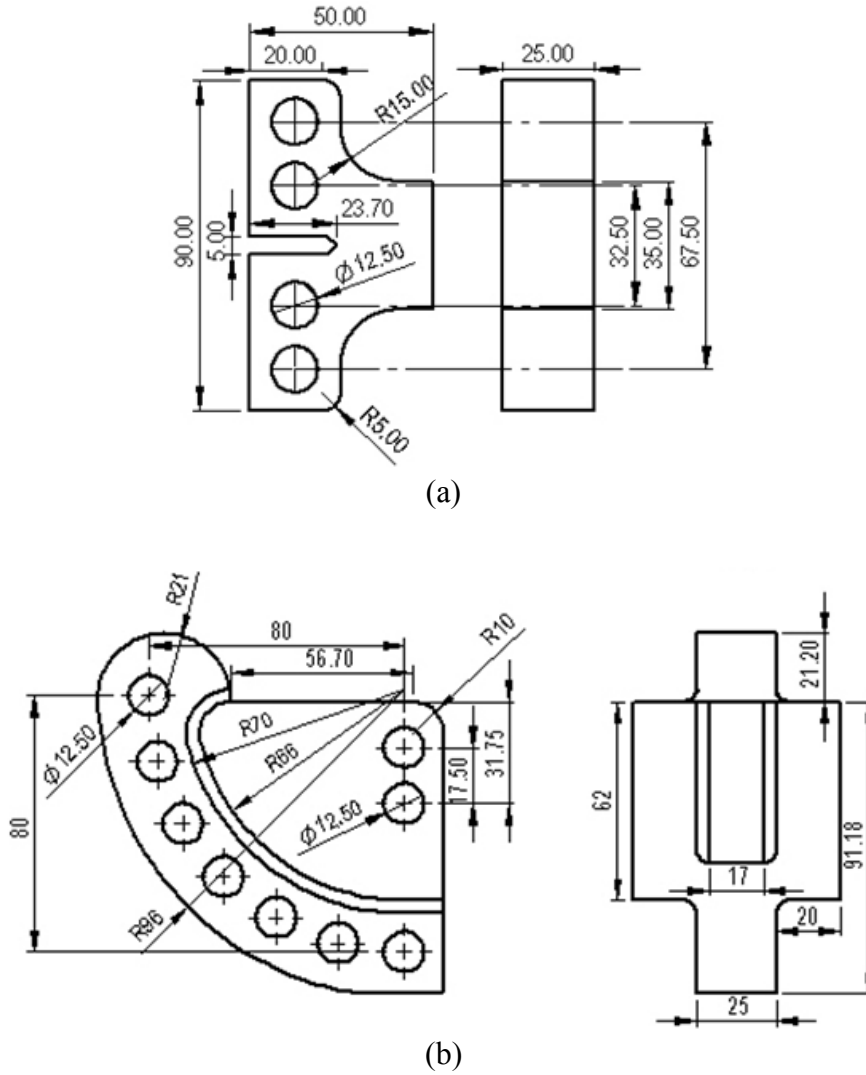
### 2.3.5. Mod-I/II T-numunesi (yeni numune) tasarım ve kırılma analizleri

CTS numunesi ile yapılan deneysel ve analiz çalışmaları sonrasında, birim yük başına en yüksek gerilme şiddet faktörü değerini ( $K_{maks}/P_{birim}$ ) elde etmeyi ve malzemeden tasarruf sağlayarak daha küçük numune boyutlarında daha yüksek GŞF değerlerini elde etmeyi amaçlayan yeni bir numune ve buna uygun tutucu tasarlanmıştır (Şekil 2.42). Burada amaçlanan, deneylerde kullanılan numune boyutlarını küçültürken malzemeden tasarruf sağlamak ve daha küçük numune boyutlarında daha yüksek GŞF değerleri elde etmektir.



Şekil 2.42. Tasarlanan yeni numune ve uygun tutucu modeli.

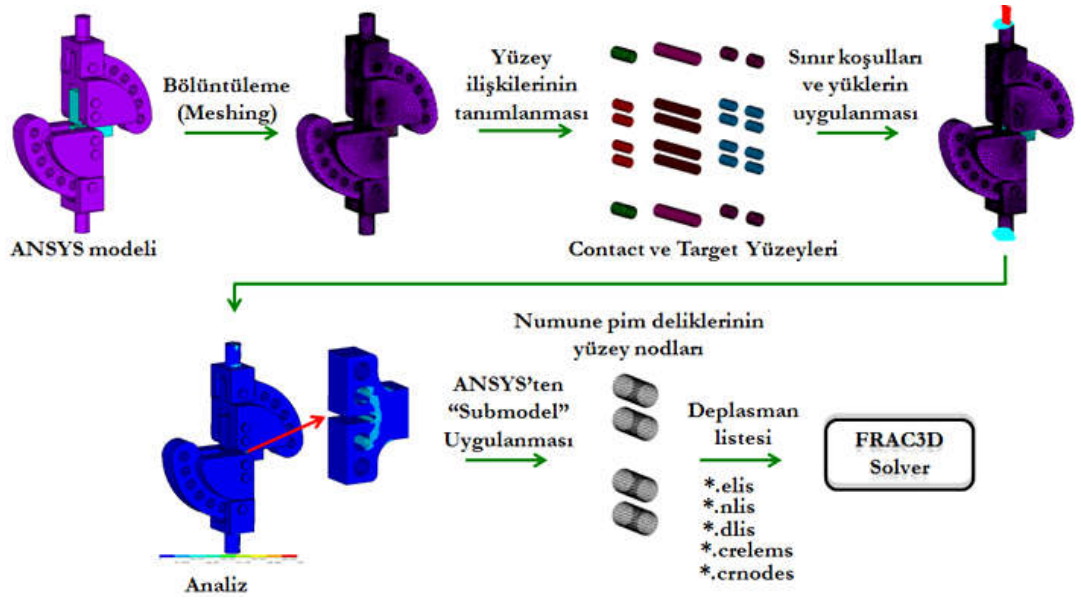
Numune ile ilgili yapılan ön tasarım, gerilme ve kırılma analiz çalışmaları sonrasında numune ve tutucunun nihai boyutlarına karar verilmiş ve Şekil 2.43.'te numune ve tutucunun belirlenen ölçüleri verilmiştir.



Şekil 2.43. Detaylı ölçüleri verilen (a) numune ve (b) tutucu modeli.

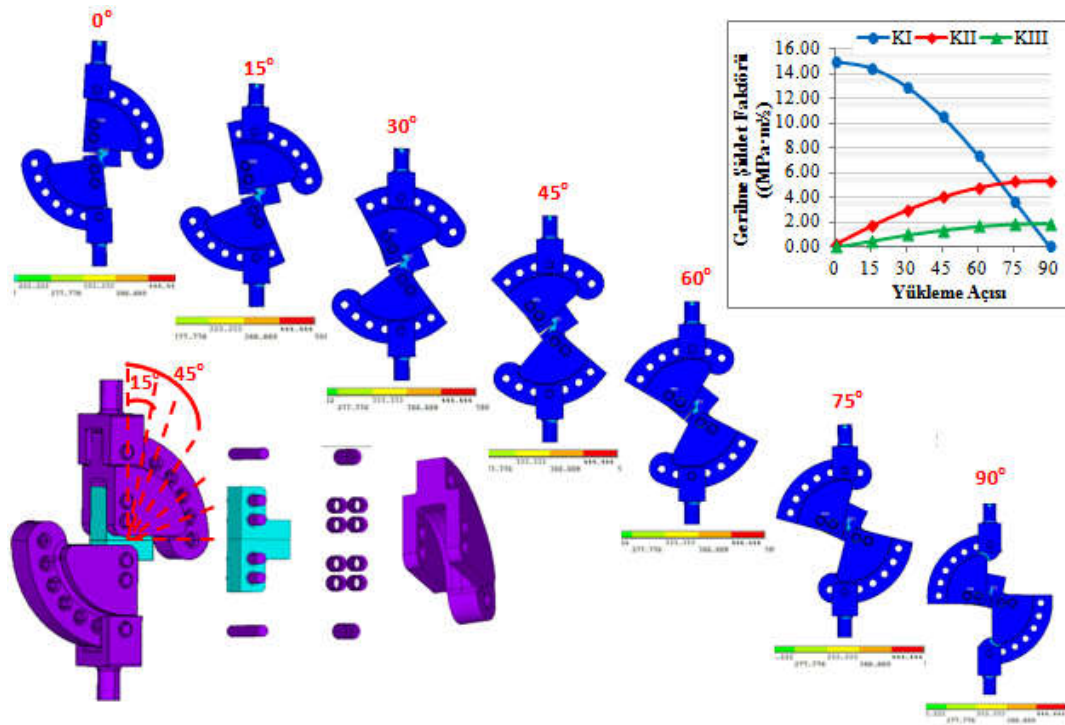
CTS numunesinde olduğu gibi T-numunesi için de farklı yükleme açılarında gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneyi birebir simüle etmek için analizler, tutucu ile pim ve pimler ile numune arasındaki temas yüzeylerine ilişki (contact) ANSYS programına tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Analiz prosedüründe izlenen yöntem CTS numunesi için gerçekleştirilen işlem adımları ile aynıdır. Bölüm 2.3.1.'de gerçekleştirilen analiz işlem adımlarından detaylı bir şekilde bahsedilmiş ve Şekil 2.44.'te analiz adımları özet olarak verilmiştir.





Şekil 2.44. ANSYS ve FRANC3D programında gerçekleştirilen T-numune analizlerinin proses şeması.

CTS numunesinde olduğu gibi, T-numunesi için de farklı yükleme açılarında gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.45.'te tüm açılar için gerçekleştirilen gerilme analizleri sonrasında aparatların tamamında ve numunenin çatlak ucu bölgesinde oluşan gerilme dağılımları ve kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan GŞF değerlerinin dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 2.45. T-numunesi için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GSF değerlerinin dağılımları.

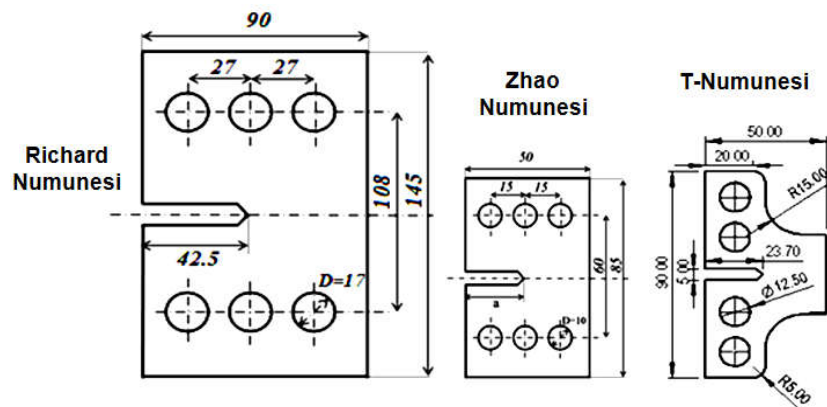
Çatlak, derinlik yönünde daha hızlı ilerlediği için ve çatlakın sadece yüzeyden ilerlemesi kamera yardımıyla takip edilebildiği için, mod-I/II kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme deneylerinden önce oluşturulan ön çatlak uzunluğu her numunede aynı olmayıp az da olsa farklılıklar olmaktadır. Bu durum gerilme şiddet faktörü değerlerini etkilediği için, çatlak uzunluğu 25 mm için gerçekleştirilen kırılma analizleri CTS numunelerinde olduğu gibi 0, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90° yüklem açılarında, 26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için de gerçekleştirilerek çatlak ucu merkezi için elde edilen  $K_{I1}$ ,  $K_{II1}$  ve çatlak ucu kenarı için elde edilen  $K_{I11}$  değerleri Tablo 2.11.'de verilmiştir.

Tablo 2.11.  $\theta=0, 15, 30, 45, 60, 75$  ve  $90^\circ$  yüklem açılarında, 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizlerinden elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri.

Yüklem Açısı ( $^\circ$ )	Çatlak Uzunluğu								
	25 mm			26 mm			27 mm		
	$K_I$	$K_{II}$	* $K_{III}$	$K_I$	$K_{II}$	* $K_{III}$	$K_I$	$K_{II}$	* $K_{III}$
0	13,80	0,00	0,00	14,15	0,00	0,00	-	-	-
15	13,27	1,04	0,36	13,96	1,01	0,43	14,26	1,08	0,49
30	11,93	1,87	0,68	12,64	1,81	0,76	12,90	1,96	0,82
45	9,76	2,56	0,94	10,42	2,48	1,01	10,62	2,69	1,07
60	6,88	3,08	1,13	7,46	2,99	1,19	7,59	3,25	1,25
75	3,50	3,39	1,26	3,73	3,66	1,26	4,04	3,58	1,36
90	-0,12	3,45	1,28	-	-	-	-	-	-

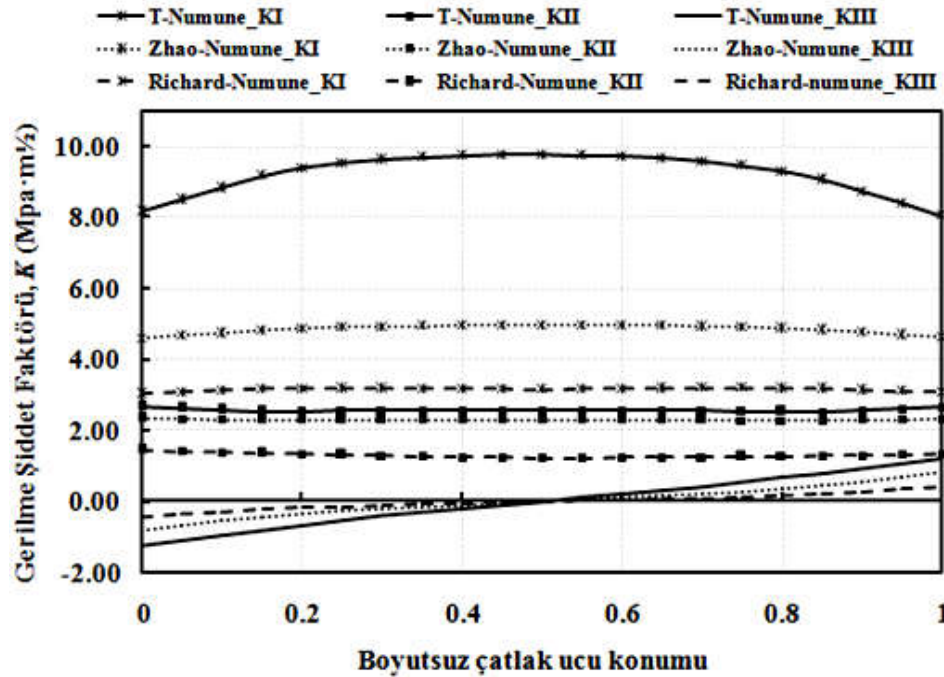
\* $K_{III}$  değerleri, çatlak ucu kenarı için elde edilmiştir.

T-numunesinin mod-I/II testleri için uygunluğunu belirlemek için farklı boyutlara sahip numuneler ile GŞF değerleri ve kopma yükleri açısından karşılaştırma analizleri gerçekleştirilmiştir. Richard'ın (1984) geliştirmiş olduğu, analiz ve deney sonuçlarının bir önceki bölümde verildiği CTS (Richard) numunesi ve Zhao ve Guo'nun (2012) geliştirmiş olduğu daha düşük boyutlara sahip CTS numunesi, karşılaştırma analizlerinde kullanılmıştır. Şekil 2.46.'da boyutsal karşılaştırma yapmak için numune resimleri ölçekli bir şekilde sıralanarak numunelerin geometrik ölçüleri verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi T-numunesi diğer numunelere oranla daha az malzeme hacmine sahiptir.



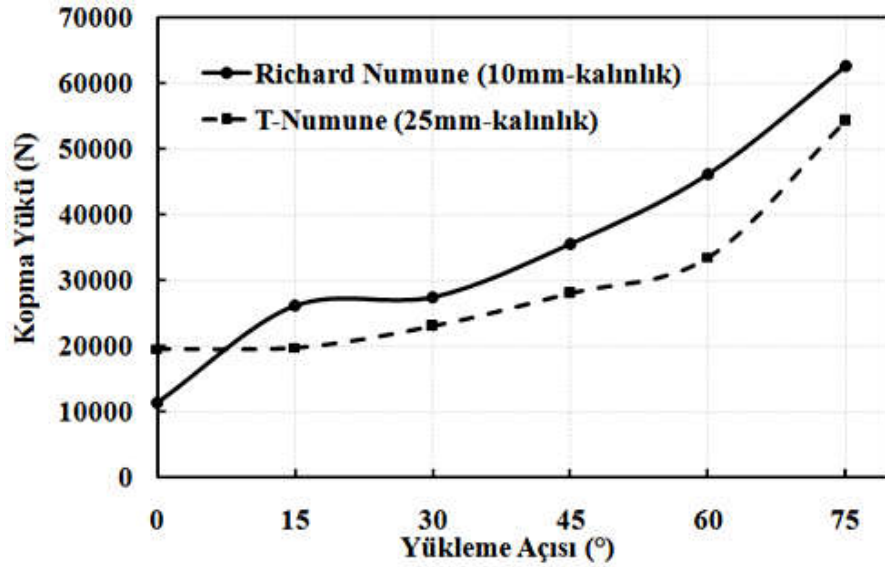
Şekil 2.46. Karşılaştırma analizlerinde kullanılan numunelerin detaylı ölçüleri.

Her üç numune de 25 mm kalınlıkta modellenerek ve buna uygun tutucular tasarlanarak,  $\theta=45^\circ$  yükleme açısında, 10kN yük uygulanarak gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Kırılma analizi sonrasında elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri Şekil 2.47.'de verilmiştir.



Şekil 2.47. Kırılma analizleri sonrası her üç numune için elde edilen GŞF değerleri.

Şekilden de görüldüğü üzere, her üç kırılma modu için de en yüksek değerler T-numunesi için elde edilmiştir. Bu sonuç malzeme tasarımında amaçlanan, birim yük başına en yüksek gerilme şiddet faktörü değerini ( $K_{maks}/P_{birim}$ ) elde etme hedefinin gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca ilerleyen bölümlerde sonuçları verilecek olan T-numunesinde (25 mm) farklı yükleme açıları için gerçekleştirilen kırılma deneylerinden elde edilen kopma yükleri, 10 mm kalınlıktaki CTS (Richard) numunesi için elde edilen kopma yükleri ile kıyaslanarak Şekil 2.48.'de verilmiştir.



Şekil 2.48. CTS-10 mm (Richard) ve T-25 mm kalınlık ve farklı yüklenme açıları için gerçekleştirilen kırılma deneylerinden elde edilen kopma yükü değerleri.

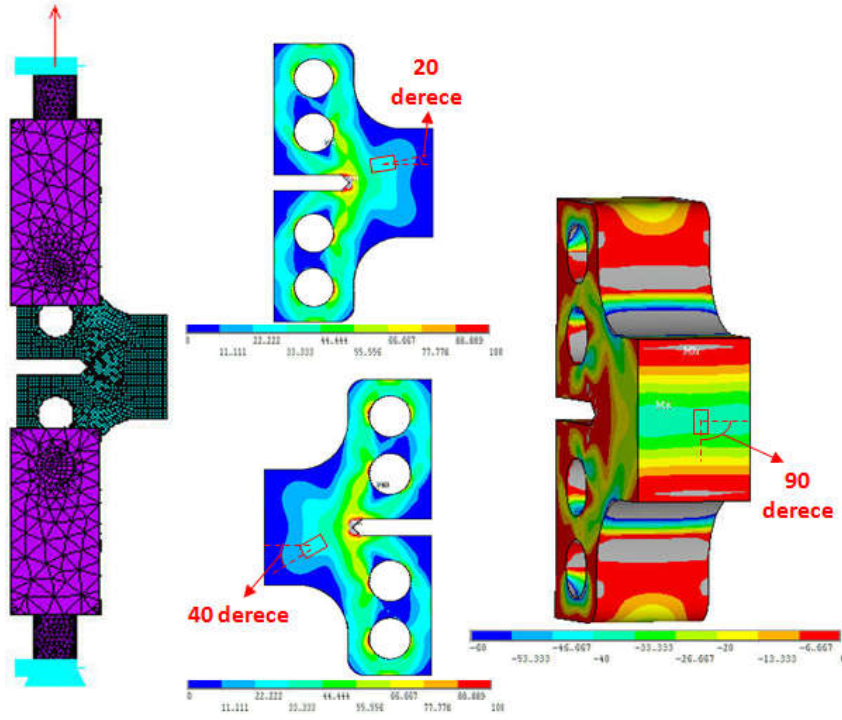
2,5 kat daha yüksek kalınlığa sahip olmasına rağmen,  $\theta=0^\circ$  hariç tüm yüklenme açılarında T-numunesi için daha düşük kopma yükleri elde edilmiştir. Karşılaştırma aynı kalınlık durumu ele alınarak yapıldığında, CTS numunesi için elde edilen kopma yükleri 2,5 kat artacağı için, T-numunesinin kopma yükleri açısından yüksek avantaj sağladığı görülmektedir.

### 2.3.6. Mod-I/II T-numunesi strain-gage doğrulama çalışması

Sonuçları bir sonraki bölümde verilen T-numunesine, öncelikle mod-I yüklemeye kırılma tokluğu testi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda numunenin kopma yükü 19,6 kN, aynı kalınlık durumu için gerçekleştirilen simülasyon sonucunda ise kopma yükü 21 kN elde edilmiştir. Yaklaşık %7 oranında bir sapma ile mod-I yüklemesinde gerçekleştirilen FCPAS çözümünün, deney sonuçlarını karşılamakta olduğu ve böylece T-numunesi için de düzlem birim şekil değiştirme (plane strain) durumunun sağlandığı görülmüştür.

Simülasyon sonuçlarının deney sonuçlarını karşılayıp karşılamadığını tespit etmek amacıyla, ön çatlaksız T-numunesi ile strain-gage uygulaması gerçekleştirilerek, T-numunesi ile ilgili ikinci bir doğrulama çalışması yapılmıştır.

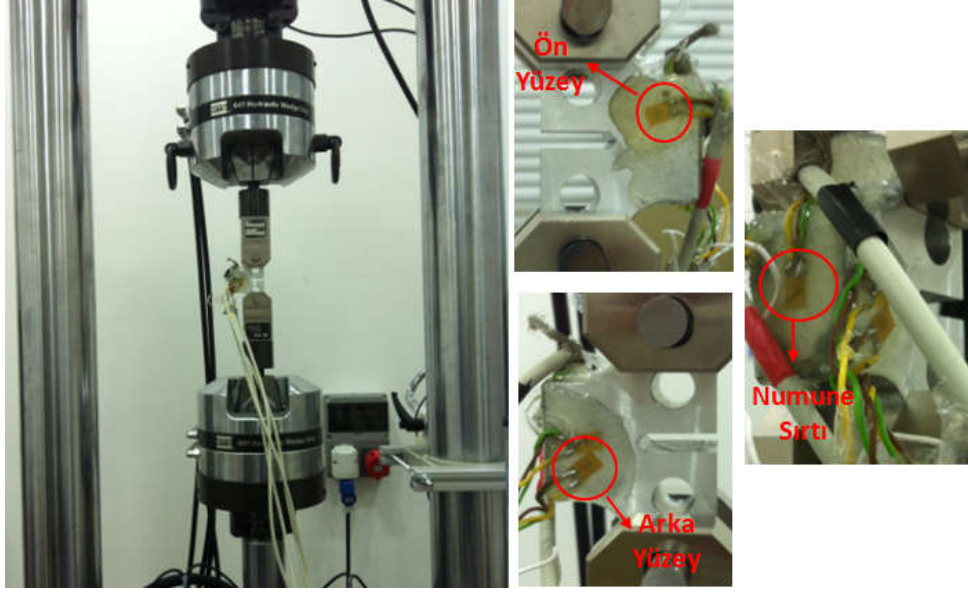
Şekil 2.49.'da görünen strain-gage'lerin yerleşim konumları, başlangıçta 45° lik mod-I/II yükleme durumuna göre analiz edilerek belirlenmiş ve numune üzerine yapıştırılmıştır. Ancak deney gerçekleştirileceği zaman, numune üzerindeki strain-gage ve kablolarının stabil olmasını sağlamak için strain gage üzerine dökülen reçineli yapıştırıcıların katman oluşturmasından dolayı numune tutucunun kanalına giremediği için, strain-gage uygulamasının mod-I yüklemesi altında gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Mod-I yüklemesi için ön çatlaksız T-numunesi tekrar analiz edilmiş ve Şekil 2.49.'da verilmiştir.



Şekil 2.49. Mod-I yüklemeye 10 kN yüklemeye gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numunede oluşan asal gerilmeler ve strain-gagelerin yerleştirildiği yerler.

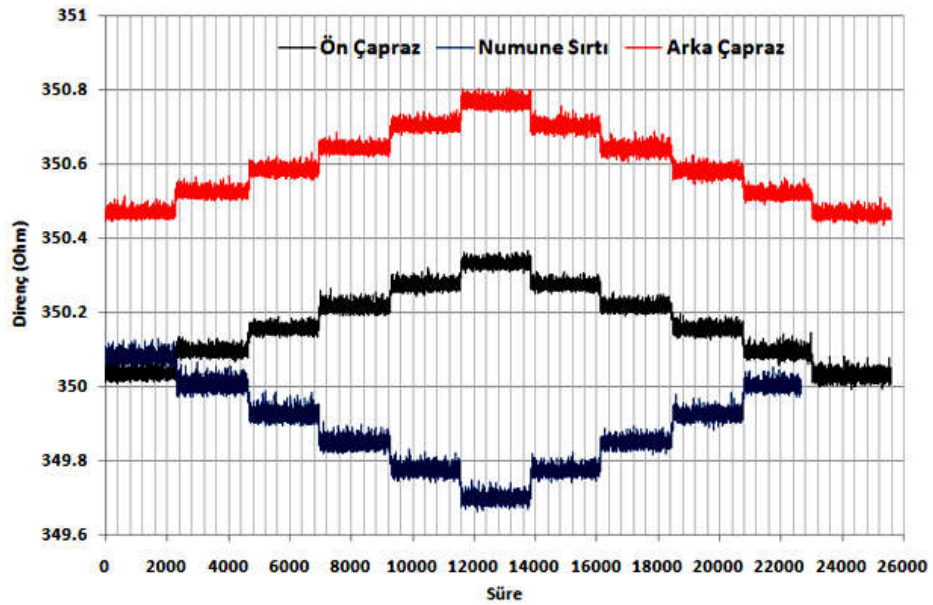
Numunenin 4 noktasına strain-gage yerleştirilmiş, ancak çentik ucu yakınındaki strain-gage üzerinde sorun olduğu için veri alınamamış ve bu yüzden test sonuçlarına dahil edilmemiştir. Şekil 2.50.'de deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü verilmiştir. Deneyde, CTS numunesinde olduğu gibi, yüksüz durumdan ikişer kN artırılarak 10 kN yüke çıkılmış, daha sonra ikişer kN azaltılarak yüksüz konuma getirilmiştir.





Şekil 2.50. Mod-I yüklemesi altında 10 kN yüke kadar değişen yüklerde gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü.

Deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 2.51.'de verilmiştir. Direnç değerlerinin değişiminin lineer bir şekilde değişim gösterdiği şekilden görülmektedir.



Şekil 2.51. T-numunesi için gerçekleştirilen deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği.

Tablo 2.12.'de, T-numunesi için her bir yük farkına karşılık gelen birim şekil değiştirme değerleri ölçülerek, simülasyondan elde edilen birim şekil değiştirme

(strain) değerleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Tabloda son satırda yer alan 0-10 kN arası birim şekil değiştirme değeri referans alınarak numune ön yüzeyi için yapılan karşılaştırma değerlendirildiğinde, yaklaşık %1 hata oranı ile simülasyon ve deney sonuçlarının birebir örtüştüğü görülmektedir. Numune sırtı ve ön yüzey için de genel eğilimin %3 ila %5 mertebelerinde elde edilerek, gerçekleştirilen simülasyonların her üç strain-gage ile doğrulaması yapılmıştır.

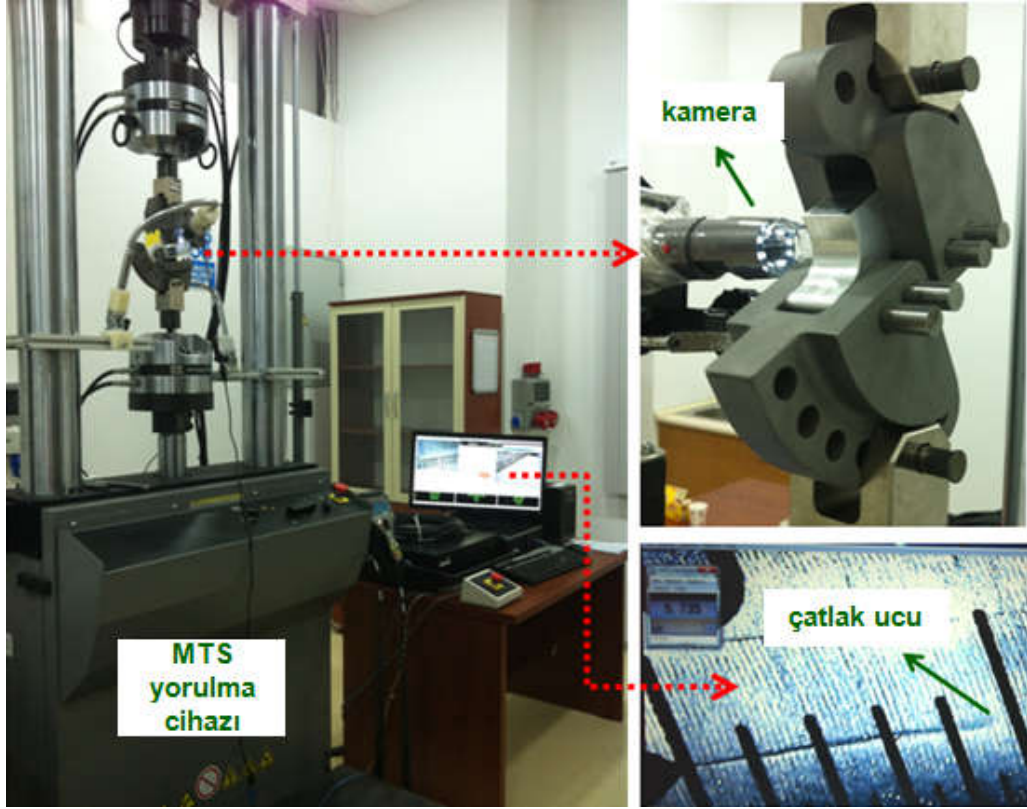
Tablo 2.12. T-numunesi için simülasyondan ölçülen birim şekil değiştirme değerleri ile deneyde strain-gagelerden okunan birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması.

	Ön Çapraz	% Fark	Numune Sırtı	% Fark	Arka Çapraz	% Fark
0-2 kN yüklemde $\epsilon$	0,000386	0,84	-0,000487	2,72	0,000351	-9,77
0-4 kN yüklemde $\epsilon$	0,000384	0,34	-0,000499	5,10	0,000369	-5,39
0-6 kN yüklemde $\epsilon$	0,000386	0,86	-0,000494	4,21	0,000368	-5,43
0-8 kN yüklemde $\epsilon$	0,000382	-0,12	-0,000489	3,00	0,000375	-3,79
0-10 kN yüklemde	0,000379	-0,91	-0,000487	2,54	0,000380	-2,54
	Ön Çapraz	% Fark	Numune Sırtı	% Fark	Arka Çapraz	% Fark
10 kN yüklemde $\epsilon$ (ANSYS çözümü)	0,000383	-0,91	-0,000474	2,54	0,000390	-2,54

### 2.3.7. Mod-I/II T-numunesi kırılma tokluğu testleri

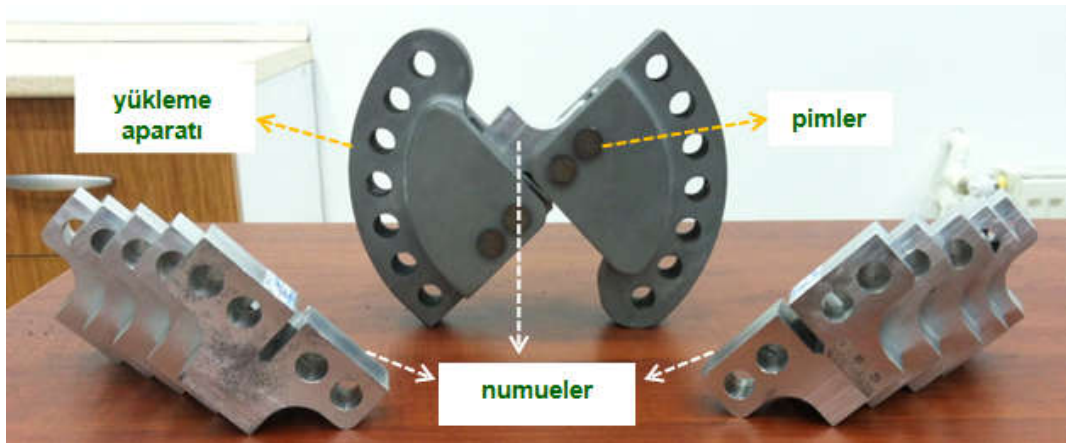
T-numune mod-I/II kırılma tokluğu deneyleri, Sakarya Üniversitesi'nde bulunan MTS eksenel-torsiyonel yorulma cihazında (Şekil 2.52) gerçekleştirilmiştir.





Şekil 2.52. T-numune kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kullanılan cihaz ve test sisteminin genel görünümü.

T-numuneleri ve bu numune ölçülerine uygun olarak üretilen, karışık modlu yükleme yapabilmesi için belirli açılarda yükleme delikleri bulunan T-numune tutucusunun genel bir görünümü Şekil 2.53.'te verilmiştir.

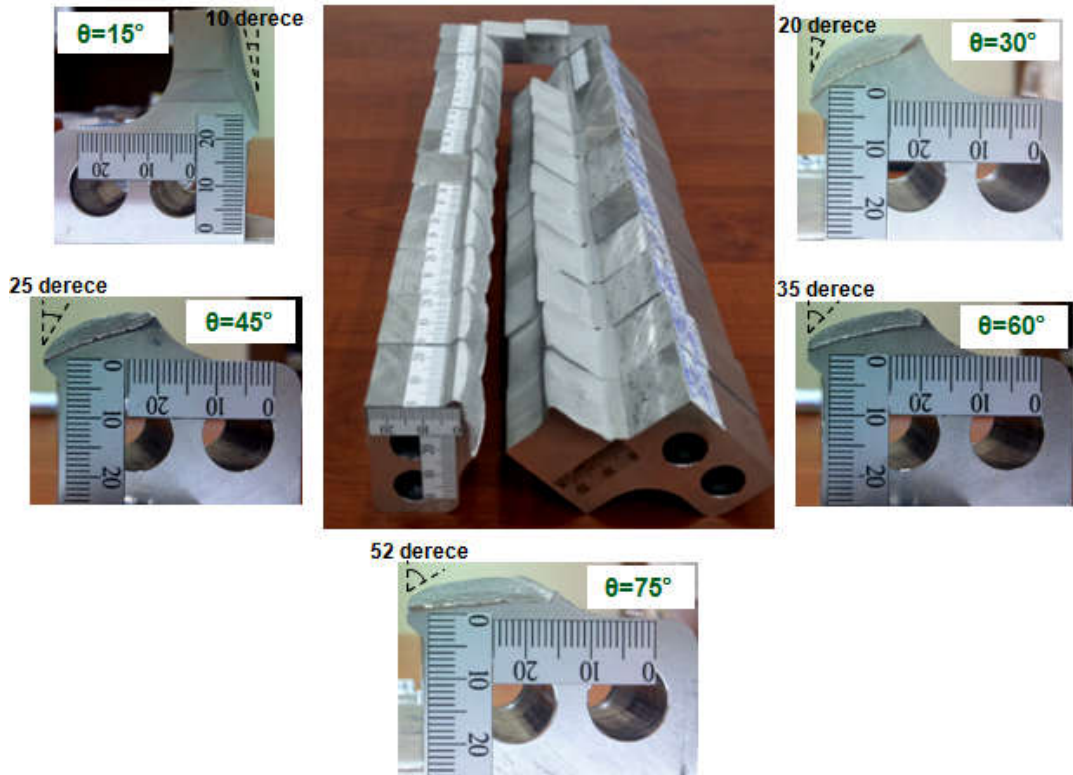


Şekil 2.53. T-numune kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kullanılan numune ve tutucuların genel görünümü.

T-numunesi mod-I/II kırılma tokluğu testlerinden önce yorulma cihazı kullanılarak, her bir numunede 1,3 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Ön çatlak oluşumu için

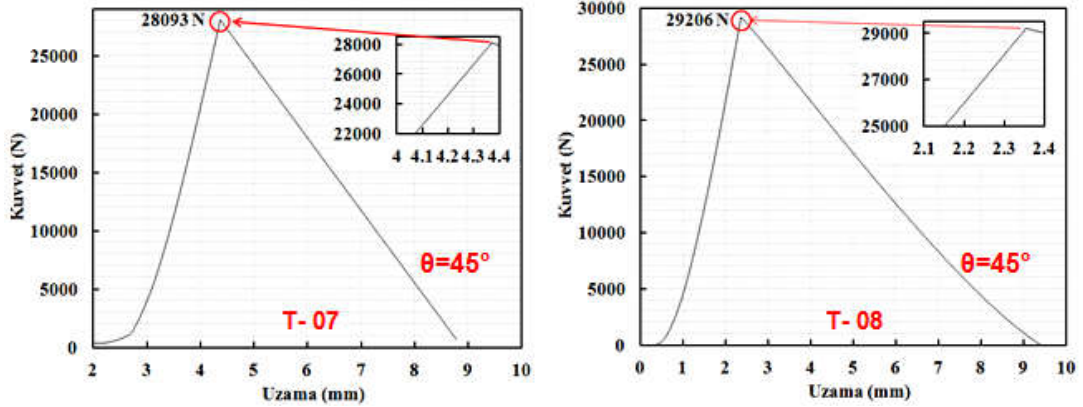
uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı, Bölüm 2.2.1.'de detaylı olarak bahsedilmiş olup burada tekrar edilmemiştir. T-numunesi hesaplamalarında CTS numunelerinden farklı olarak, T-numunesi için gerçekleştirilen simülasyonlar ve deneylerin her ikisinde de numunelerin kalınlığı 25 mm olduğu için, CTS numunelerinde olduğu gibi hesaplamalarda ayrıca bir kalınlık dönüşümü yapılmamıştır. R-oranı ( $K_{min}/K_{max}$ ) T-numunesi deneylerinde de 0,1 alınmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonların sonrasında herhangi bir açı değeri için kritik yük farklı kriterlere göre belirlenmiş ve kriterler ile ilgili karşılaştırmalar Bölüm 2.6.3.2.'de detaylı olarak verilmiştir.

Kırılma tokluğu deneylerinde,  $\theta=0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında ikişer adet olmak üzere toplam 12 adet numune kullanılarak mod-I/II kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.54.'te kırılma tokluğu testleri sonrası kırılan numunelerin yüzey görünüşleri farklı açılar için verilmiştir.



Şekil 2.54. Farklı açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra T-numunelerinin genel görünümü ve oluşan çatlak sapma açıları.

Testler sonrasında cihazdan alınan kuvvet-uzama dataları Excel programı yardımıyla çizdirilerek eğrinin eğilimine göre standartta belirtilen kriterlere uyularak kopma yükleri tespit edilmiştir. Şekil 2.55.'te,  $\theta=45^\circ$  yükleme açısı için gerçekleştirilen 2 adet deneyden elde edilen kuvvet uzama grafikleri temsili olarak verilmiştir. Tüm numuneler için kopma yükleri ve çatlak sapma açıları belirlenerek Tablo 2.10.'da verilmiştir.



Şekil 2.55. Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrasında  $\theta=45^\circ$  yükleme açısı için elde edilen kuvvet-uzama eğrileri.

Tablo 2.13. T numune kırılma tokluğu test sonuçları.

Numune No	Yükleme Açısı ( $^\circ$ )	Kalınlık (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	DENEYSEL	
				Kopma Yüğü (kN)	Çatlak Sapma Açısı ( $^\circ$ )
T-01	0	24,87	26,03	19,60	0,0
T-02	0	25,00	27,57	18,82	0,0
T-03	15	25,00	26,93	19,80	-11,4
T-04	15	24,98	26,34	19,70	-11,1
T-05	30	24,98	26,21	23,07	-18,2
T-06	30	25,00	26,90	20,64	-19,8
T-07	45	25,00	25,24	28,09	-27,2
T-08	45	25,01	25,46	29,21	-26,9
T-09	60	24,96	27,13	33,59	-37,6
T-10	60	25,00	26,58	34,76	-42,4
T-11	75	25,03	26,89	54,31	-55,9
T-12	75	24,96	26,70	55,04	-62,0

CTS ve T-numunelerinin kırılma tokluğu deneylerinden elde edilen kopma yükleri ve çatlak sapma açılarının mevcut iki boyutlu çatlak ilerleme kriterleri ile karşılaştırılarak mevcut kriter ve deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapılarak Bölüm 2.6.3.'te detaylı bir şekilde verilmiştir.

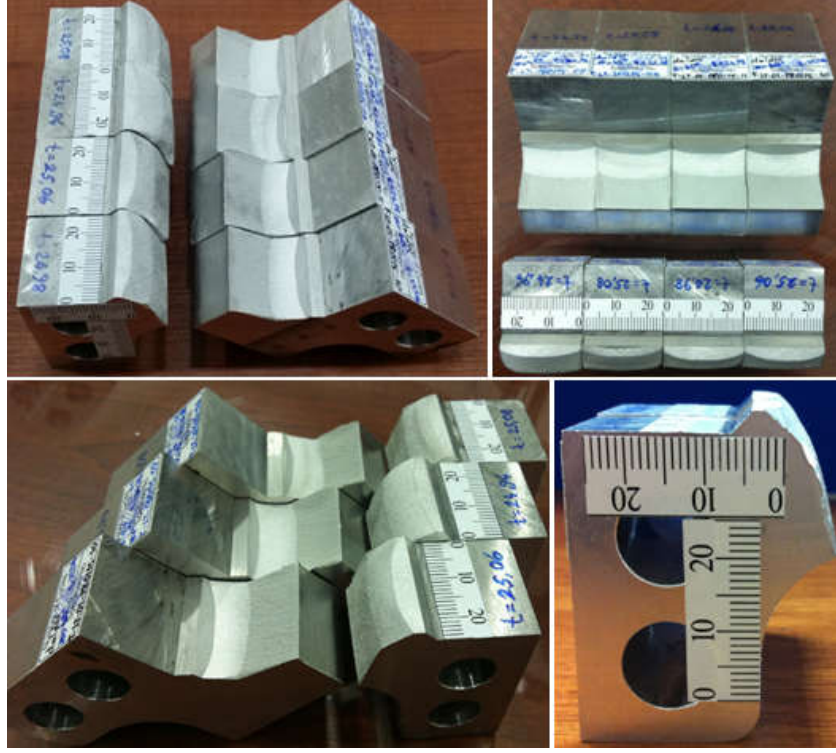
### **2.3.8. Mod-I/II T-numunesi çatlak ilerleme testleri**

T-numune mod-I/II çatlak ilerleme testleri, Sakarya Üniversitesi'nde bulunan MTS yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler,  $\theta=45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında ikişer adet olmak üzere toplam 6 adet numune için gerçekleştirilmiştir.

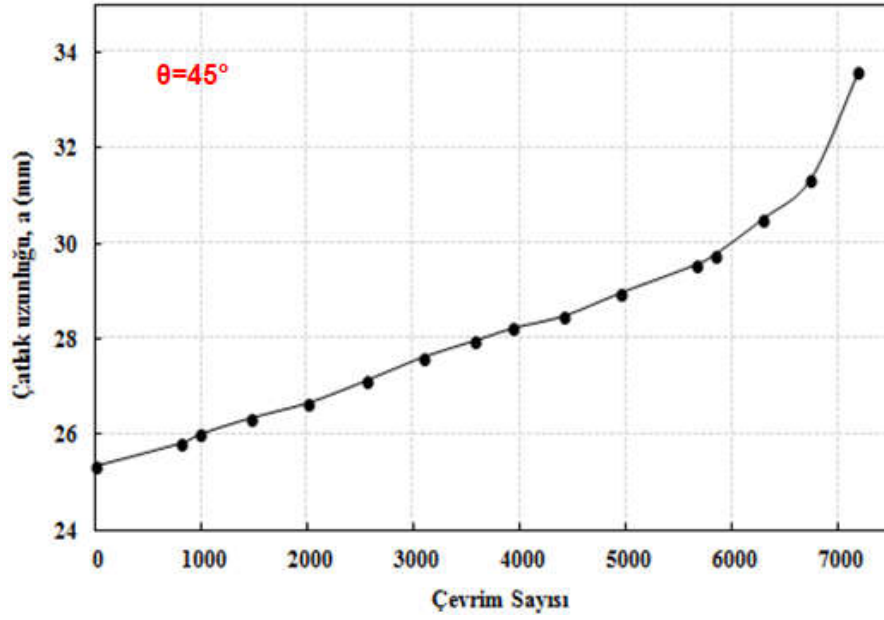
Mod-I/II çatlak ilerleme testlerinden önce her bir numuneye 1,3 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Ön çatlak oluşumu için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı, standartta yer alan;  $(K_{max})_{son}$  ön çatlak  $\leq (K_{max})_{başlangıç}$  testi limitine göre belirlenmiştir. Yorulma ön çatlağı ve mod-I/II çatlak ilerleme testleri için gerekli yük aralıkları, CTS mod-I/II çatlak ilerleme testlerinde bahsedilen yöntemle göre belirlenerek gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.56.'da, gerçekleştirilen çatlak ilerleme deneyleri sonrasında numunelerin kırılan yüzeylerinin genel görünümleri verilmiştir.

Çatlak ilerleme testi esnasında bilgisayara kaydedilen çatlak ilerleme ve çevrim sayısının olduğu görüntülerden dijital ölçer yardımıyla çatlak uzunlukları ölçülerek, o anki çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluğu belirlenmektedir. Şekil 2.57.'de,  $\theta=45^\circ$  yükleme açısı için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi için çevrim boyunca çatlak uzunluğunun değişimi verilmiştir.



Şekil 2.56. T-numune çatlak ilerleme deneyleri sonrasında numunelerin kırılan yüzeylerinin genel görünüşleri.



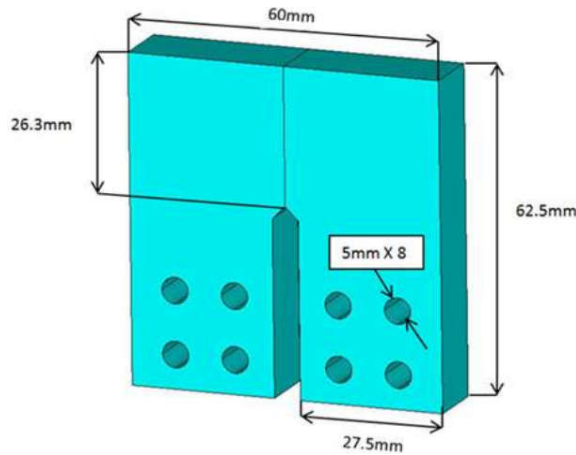
Şekil 2.57.  $\theta=45^\circ$  yükleme açısında çevrim sayısına göre çatlak uzunluk değerlerinin değişimi.

## 2.4. Mod-I/III Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri (Bozkurt, 2016)

Bu bölümde, gerçekleştirilen mod-I/III karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme analiz ve testlerinin detayları ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak verilmiştir. Mod-I/III kırılma analizleri, 113M407 no.lu TÜBİTAK projesi (Ayhan, 2014; 2015; 2016a; 2016b) kapsamında, lisansüstü tez çalışması olarak Bozkurt (2016) tarafından gerçekleştirilmiş olup tezi basım aşamasındadır. Konu bütünlüğünün sağlanması açısından, lisansüstü tezinde yer alan bazı resim ve sonuçlar bu bölümde de verilmiştir.

### 2.4.1. Mod-I/III CTT numune ve tutucusu

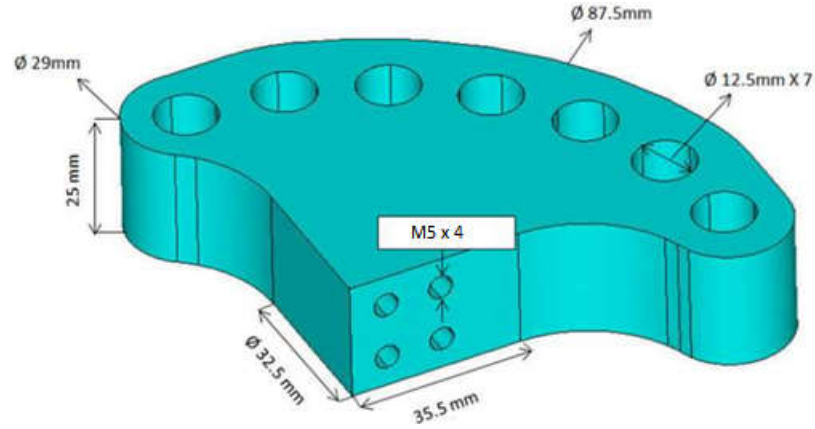
Mod-I/III kırılma ve çatlak ilerleme testleri yapılmadan önce deneylerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için literatürde bulunan mod-I/III numunesinin (Wei, 2011) düzlemsel yüzey geometrisi esas alınmış ancak diğer testlerle de tutarlılık sağlanması açısından standart CT numunesinin boyutları kullanılmıştır. Numune üzerine açılan 8 adet civata deliği kullanılarak mod-III (yırtılma) yüklemesi sağlanmıştır. Üzerinde civata deliği bulunan bu numune CTT (Compact Tension Tear) numunesi olarak adlandırılmıştır. Şekil 2.58.'de numunenin detaylı görünüşü verilmiştir. Analizler 12,5 mm, 20 mm ve 25 mm kalınlıklarındaki CTT numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.58. Mod-I/III CTT numunesi ve boyutları.



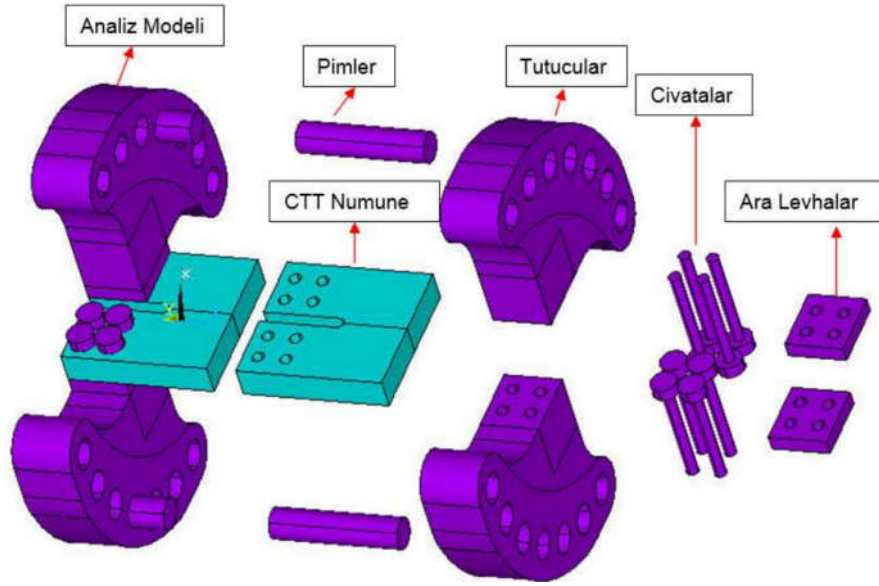
CTT numune tutucusu 25 mm kalınlığa sahip numuneler için tasarlanmıştır. Daha düşük kalınlığa sahip numuneler için ise ara plakalar kullanılarak aynı tutucu ile deneyler yapılabilmektedir. Bu sayede tek bir tutucu ile farklı kalınlıktaki numuneler test edilebilmektedir. CTT numune tutucusu 7 farklı açıda ( $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  ve  $90^\circ$ ) yüklemeye yapabilmek için tasarlanmıştır. Bu tutucunun  $0^\circ$  pim deliğinden yüklenmesi sadece mod-I,  $90^\circ$  pim deliğinden yüklemesi ise numune üzerinde sadece mod-III yüklemesinin oluşmasını sağlamaktadır. Ara açılarda ise mod-I ve mod-III yüklemeleri aynı anda farklı oranlarda uygulanmaktadır. Şekil 2.59.'da CTT numune tutucusunun detaylı ölçüleri ve resmi verilmiştir.



Şekil 2.59. Mod-I/III CTT numune tutucusu.

#### 2.4.2. Mod-I/III CTT numunesi analiz prosedürü

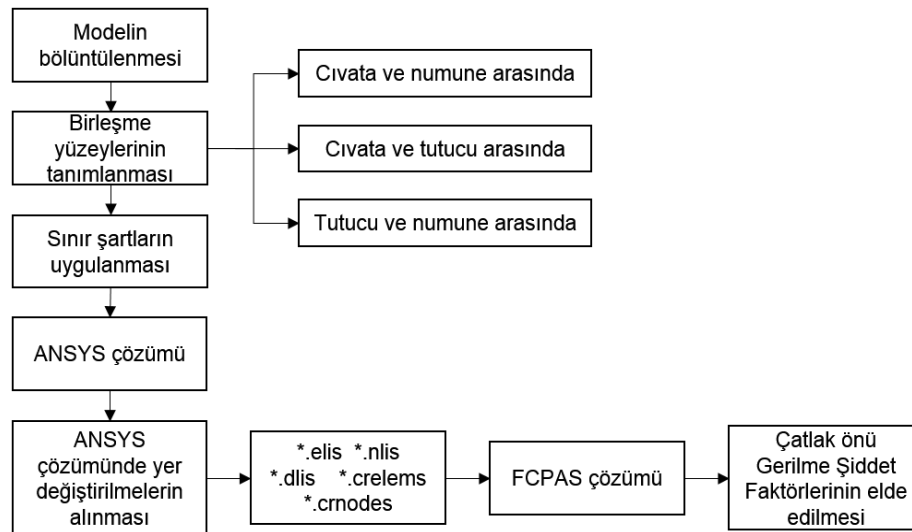
Şekil 2.60.'da analiz modelinin tüm öğelerinin bulunduğu bir detay resim verilmiştir. Bu detay resim 12,5 mm et kalınlığına sahip CTT deney numunesinin  $45^\circ$  açıyla yüklemeye maruz kaldığı analizden alınmış bir şablondur.



Şekil 2.60. Mod-I/III analiz modeli detayı.

Deneysel çalışmalar gerçekleştirilmeden önce ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak değişik açılardaki ( $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ ) yükleme durumları için 10 kN yükte gerilme analizleri yapılmıştır. Deneyi birebir simüle etmek için analizlerde, civata başı ile CTT numune, civata ile ara levha (12,5 mm ve 20 mm et kalınlığına sahip CTT numunesi analizlerinde), civata ile CTT numune, civata ile tutucu, tutucu ile pim ve CTT numune ile tutucu arasındaki temas yüzeyleri (contact) ANSYS programında tanımlanmıştır. Daha sonra, alt-modelleme (sub-modeling) yaklaşımı ile üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme analiz programı, FCPAS'in (Fracture and Crack Propagation Analysis System) çözücüsü FRAC3D kullanılarak çatlak ucu boyunca GŞF değerleri hesaplanmıştır. Eşdeğer gerilme şiddet faktörü ( $K_{eş}$ ) değerinin kırılma tokluğu değerine ulaşması için gereken yükler ve bu yüklerde tutucu, pim, civata, ara levha ve numune de oluşması beklenen gerilmeler belirlenmiştir. ANSYS'te gerçekleştirilen analiz sonrasında numune deliklerinin yüzeyleri ile numune ön ve arka yüzeylerindeki düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler sub-modeling yöntemiyle programdan alınarak FRAC3D programına deplasman yükü olarak girilmekte, ayrıca numune modelinin eleman ve düğüm listeleri ve çatlak ucu boyunca sıralanmış eleman ve düğüm listeleri FRAC3D programına girilerek çatlak ucu boyunca GŞF değerleri bu şekilde hesaplanmaktadır. Şekil 2.61.'de, yukarıda tarif edilen analiz prosedürü akış şeması şeklinde verilmektedir.





Şekil 2.61. Mod-I/III analiz prosedürü.

Şekil 2.61.'de tanımlanan analizler, temas tipinin, cıvata ve pimlerin varlığının, yapılan analizlerde GŞF değerlerine olan etkisini incelemek amacıyla farklı durumlarda tekrarlanmış ve birbirleriyle mukayese edilmiştir. Analiz edilen durumlar Tablo 2.14.'te verilmiştir. Tablodaki her bir madde ayrıntılı olarak alt başlıklar halinde incelenmiştir.

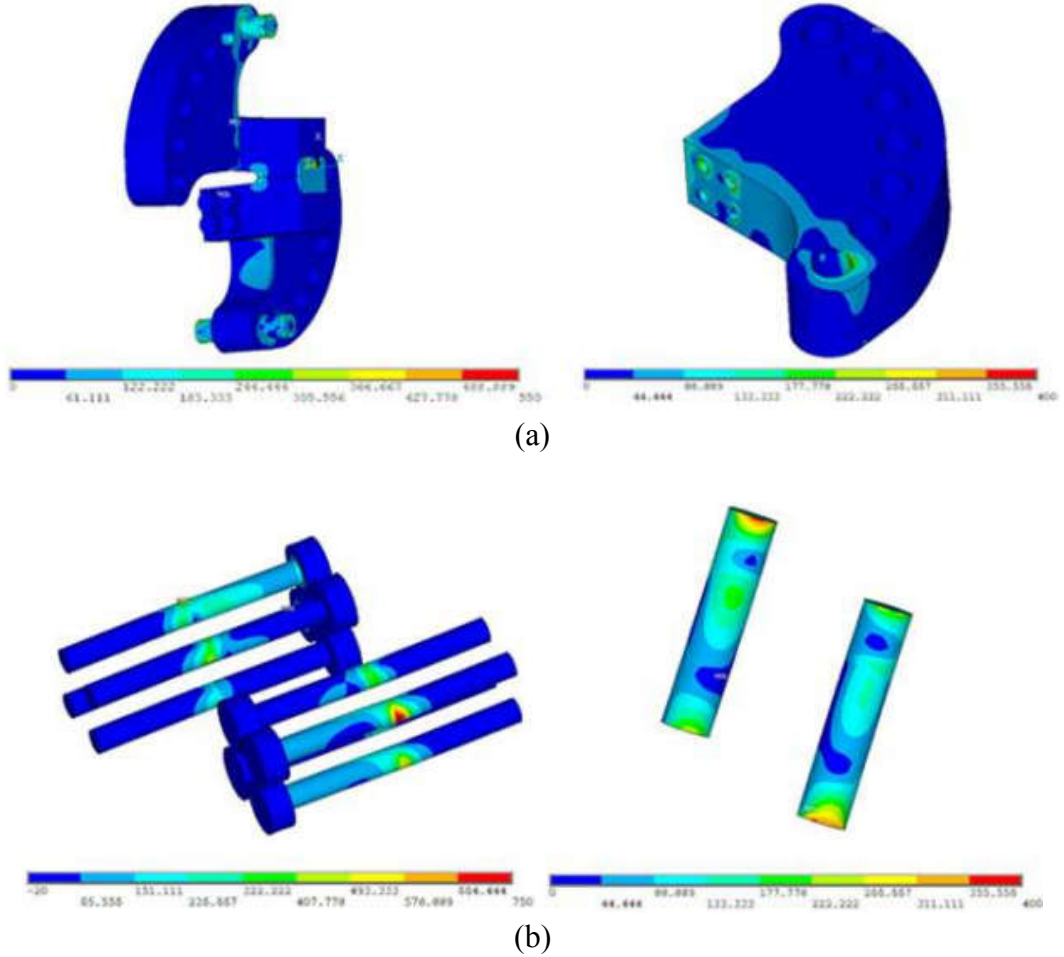
Tablo 2.14. Farklı temas (contact) tipleri için yapılan analizler.

	Tekrar Edilen Analizler
1	Standart – bonded always kontak tipi kullanılarak yapılan analizler
2	Sadece bonded always kontak tipi kullanılarak yapılan analizler
3	Sadece pimplere standart kontak tipi kullanılarak yapılan analizler
4	Kontakt kullanmadan yapılan analizler
5	Strain gage ölçümleri için yapılan analizler
6	26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için yapılan analizler

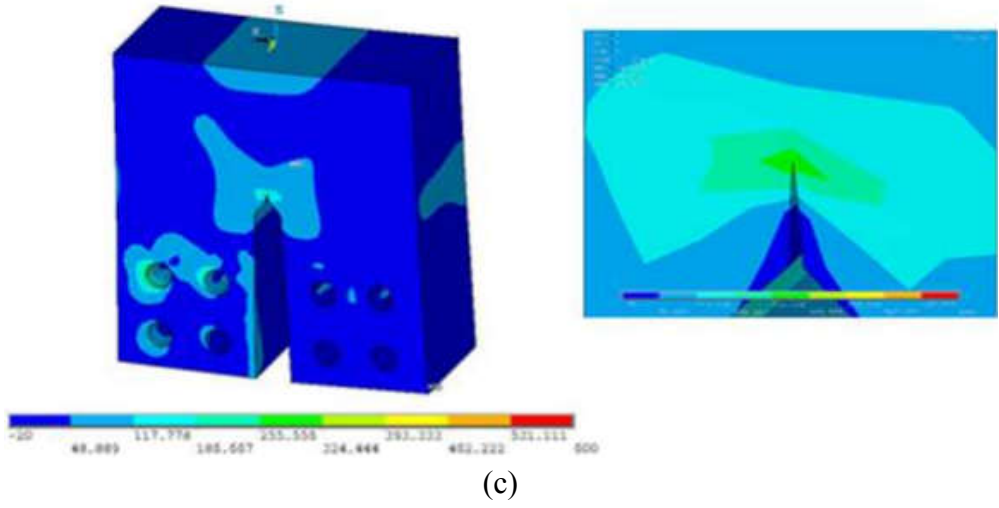
#### 2.4.3. Mod-I/III CTT numunesi gerilme analizleri

25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, 10 kN yükleme altında 7 farklı açı için (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) analizleri yapılan modeldeki tüm parçaların (CTT numune, CTT numune tutucusu, cıvatalar ve pimler) Von-Misses gerilme analizi sonuçları Şekil 2.62. – Şekil 2.64.'te verilmiştir. Gerilme analizlerinden de görüldüğü

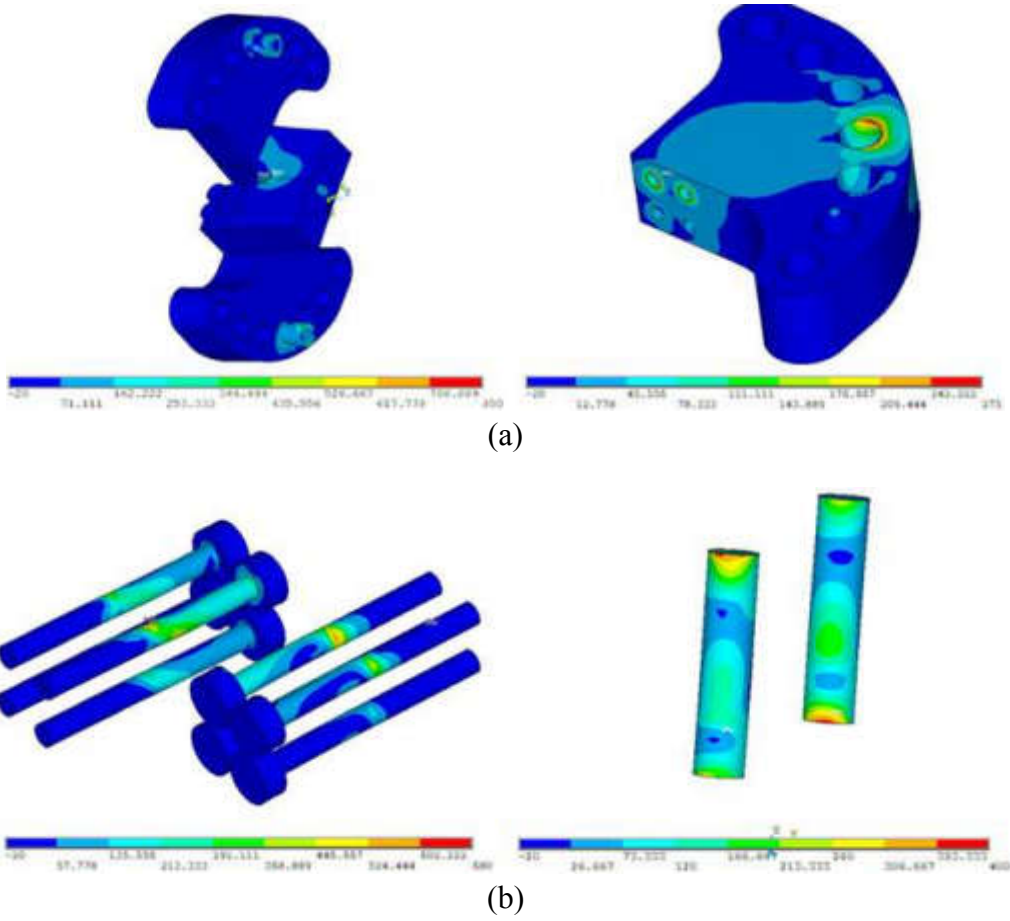
gibi, yükleme açısı  $0^\circ$  den  $90^\circ$  ye değiştikçe CTT numunesi ve cıvatalarda gerilme artışı gözlenmektedir. Pimlerde ve CTT numune tutucularında ise bu gerilme değişimi oldukça küçüktür. Bu gerilme değerleri göz önüne alındığında CTT numunesi için Al 7075-T651, tutucular için 4140 çeliği ve pimler için de HSS çeliğinin kullanılması uygun görülmüştür. CTT numunesinin 25 mm, 20 mm ve 12,5 mm et kalınlığına sahip tüm analizleri için gerilme dağılımlarındaki değişim birbirine çok yakın değerler izlediği için sadece 25 mm et kalınlığına sahip CTT numunesinin bulunduğu modeldeki tüm parçaların bazı yükleme açıları için Von-Misses gerilmeleri aşağıda verilmiştir.



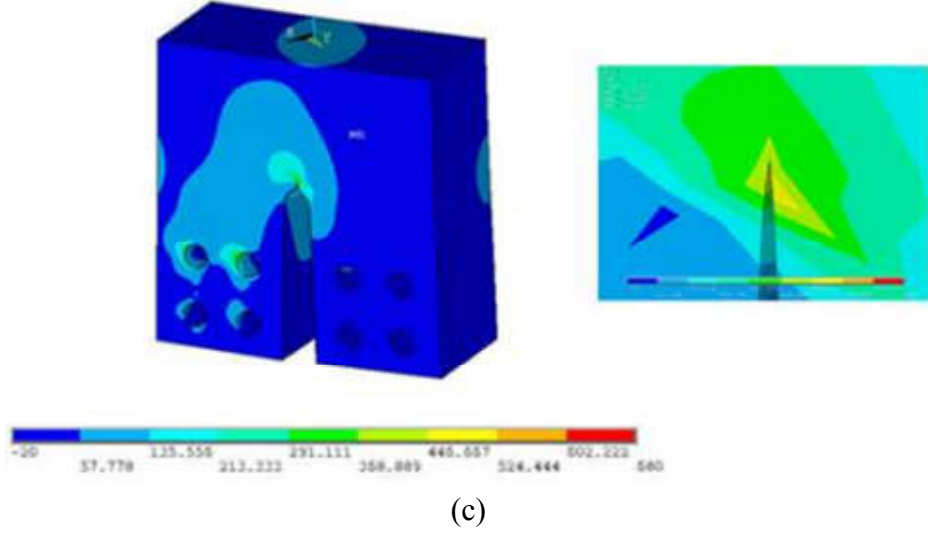
şekil 2.62. 25 mm et kalınlığı ve 0 derece yükleme durumu için (a) tutucuda, (b) cıvatalarda, (c) numunede oluşan gerilme analizi sonuçları.



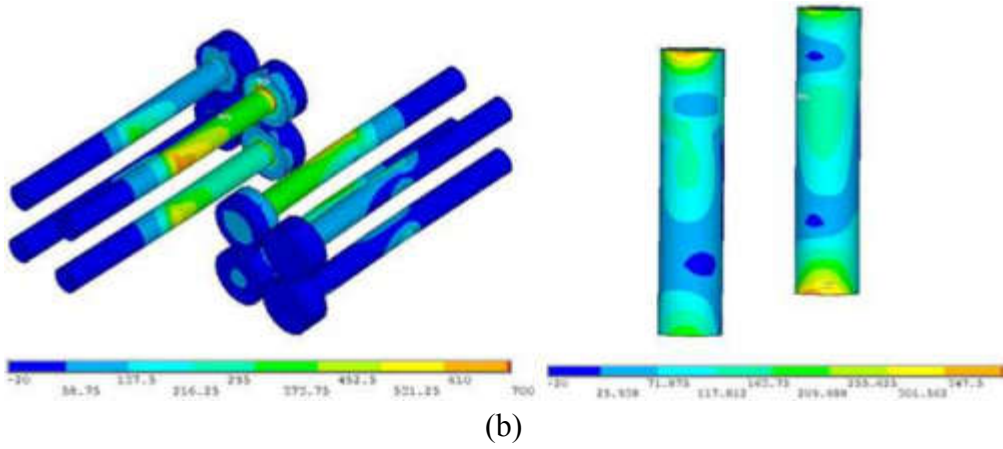
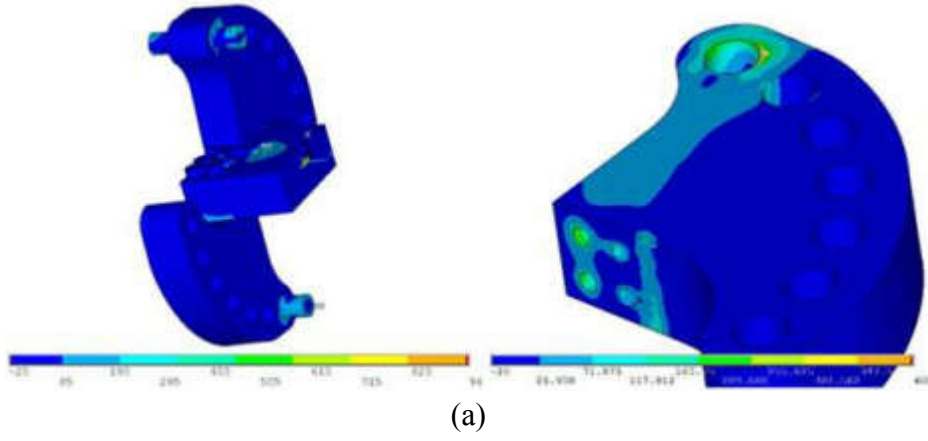
Şekil 2.62. 25 mm et kalınlığı ve 0 derece yükleme durumu için (a) tutucuda, (b) cıvatalarda, (c) numunede oluşan gerilme analizi sonuçları. (Devamı)



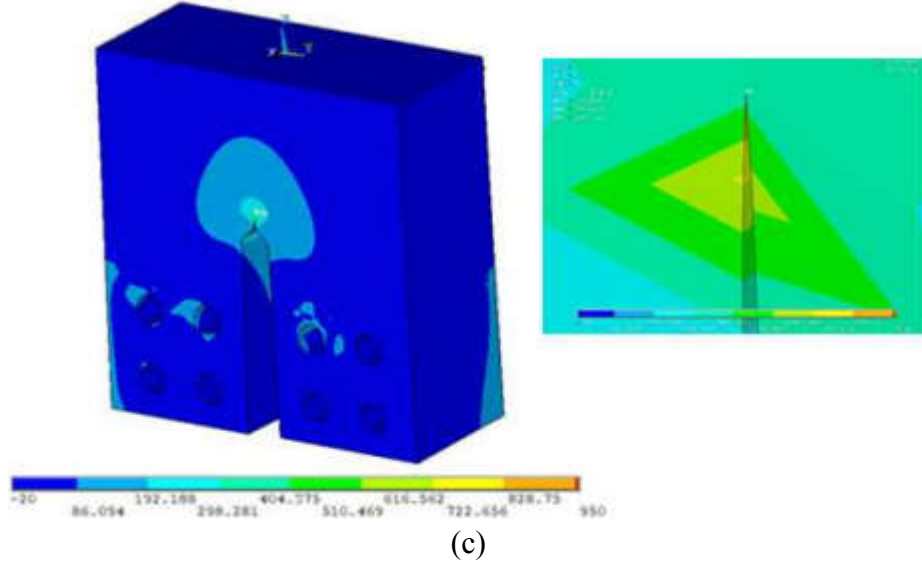
Şekil 2.63. 25 mm et kalınlığı ve 45 derece yükleme durumu için (a) tutucuda, (b) cıvatalarda, (c) numunede oluşan gerilme analizi sonuçları.



Şekil 2.63. 25 mm et kalınlığı ve 45 derece yükleme durumu için (a) tutucuda, (b) cıvatalarda, (c) numunede oluşan gerilme analizi sonuçları. (Devamı)



Şekil 2.64. 25 mm et kalınlığı ve 90 derece yükleme durumu için (a) tutucuda, (b) cıvatalarda, (c) numunede oluşan gerilme analizi sonuçları.

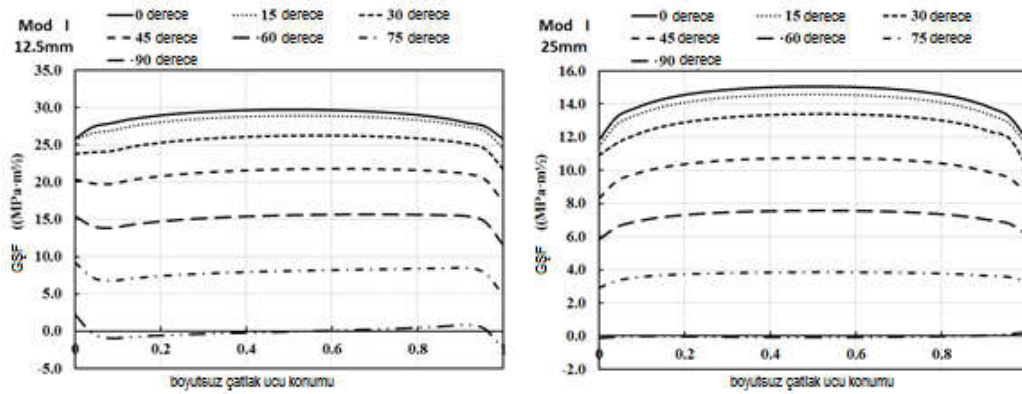


Şekil 2.64. 25 mm et kalınlığı ve 90 derece yükleme durumu için (a) tutucuda, (b) cıvatalarda, (c) numunede oluşan gerilme analizi sonuçları. (Devamı)

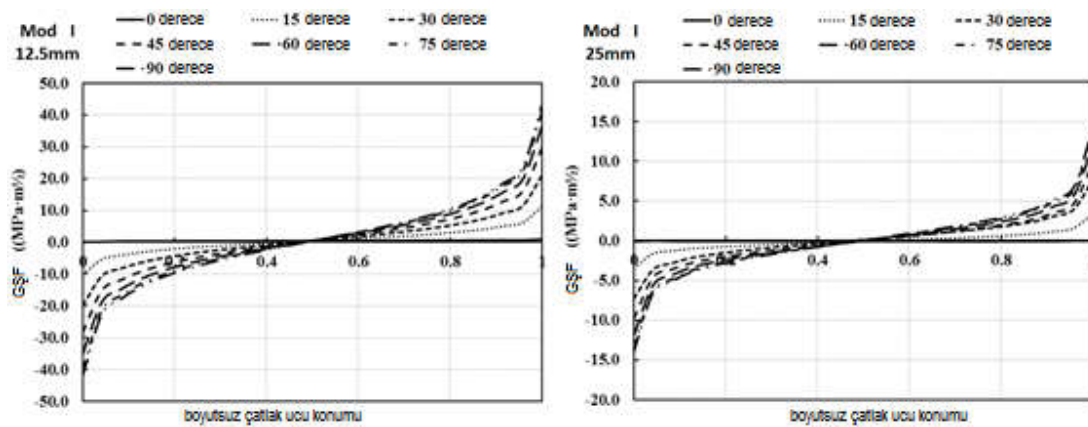
#### 2.4.4. Mod-I/III CTT numunesi kırılma analizleri

FCPAS ile kırılma analizi yapılan CTT numunesinin 7 farklı açı ve  $t=25$  mm,  $t=20$  mm ve  $t=12,5$  mm et kalınlıkları için elde edilen GŞF değerleri Şekil 2.65. – Şekil 2.67.'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere yükleme açısı arttıkça, verilen bir çatlak uzunluğu için mod-I GŞF değeri azalmakta, mod-II ve mod-III GŞF değerleri ise artmaktadır.

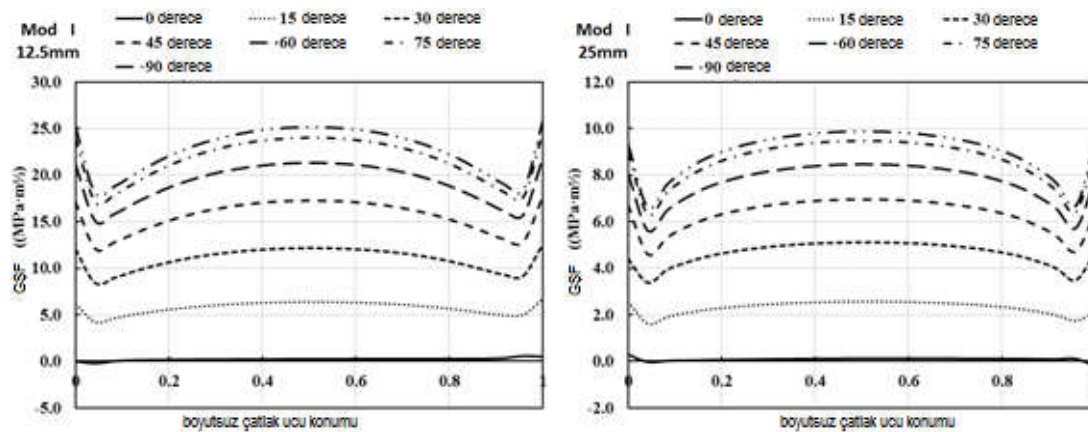
0, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 derecede uygulanan 10 kN'luk çekme kuvvetleri için, 12,5 mm et kalınlığından 25 mm et kalınlığına çıkıldığında ise  $K_I$  GŞF değerinde yaklaşık 2 kat,  $K_{II}$  GŞF değerinde yaklaşık 2,9 kat,  $K_{III}$  GŞF değerinde ise yaklaşık 2,5 kat azalma gözlenmiştir. Özellikle 12,5 mm ve 25 mm et kalınlıklarındaki  $K_I$  GŞF değerleri kıyaslandığında et kalınlığındaki 2 kat artışın,  $K_I$  GŞF değerinde %1 gibi kabul edilebilir bir farkla 2 kat azalmaya sebep oluşu yapılan analizlerin doğruluğunu desteklemektedir.



Şekil 2.65. Farklı yüklemeye açıları için elde edilen  $K_{I1}$  gerilme şiddet faktörü değerleri.



Şekil 2.66. Farklı yüklemeye açıların için elde edilen  $K_{II1}$  gerilme şiddet faktörü değerleri.



Şekil 2.67. Farklı yüklemeye açıları için elde edilen  $K_{III1}$  gerilme şiddet faktörü değerleri.

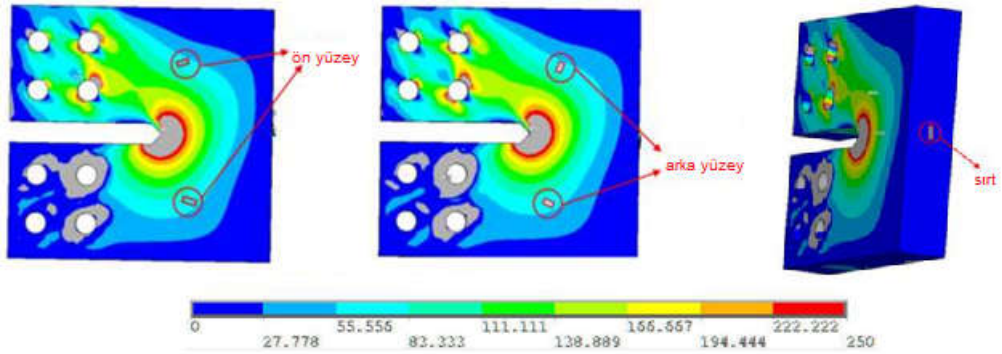
Farklı yüklemeye açıları için elde edilen GŞF değerleri incelendiğinde, mod-III yüklemeye açısı arttıkça  $K_{III1}$  gerilme şiddet faktörü değerinin arttığı,  $K_{I1}$  GŞF değerinin azaldığı ve  $K_{II1}$  GŞF değerinin çatlak ucu boyunca sabit kaldığı görülmektedir. Basit mod-III yüklemeye durumunda ise  $K_{I1}$  sıfır değerini almaktadır.



Mod-III yükleme açısı arttıkça, mod-II GŞF değeri artmakta ve çatlak ucu boyunca lineer olarak negatiften pozitif bir değere değişmektedir. Bunun nedeni, mod-III yüklemesi altında çatlak yüzeylerinin çatlak ucu orta noktası etrafında birbirlerine ters yönlü dönme deformasyonu eğiliminde olmalarıdır. Mod-III yükleme açısı arttıkça, mod-III GŞF değeri artmakta ve çatlak ucu boyunca yaklaşık sabit kalmaktadır.

#### 2.4.5. Mod-I/III CTT numunesi strain-gage doğrulama çalışması

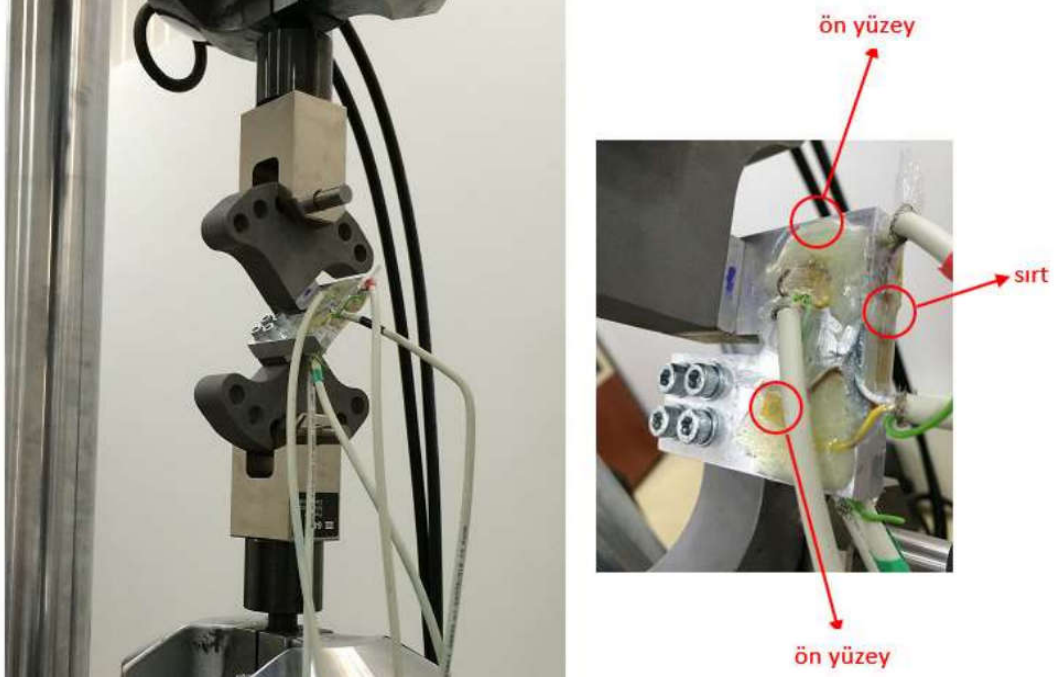
Analiz sonuçları ile deney sonuçlarını karşılaştırmak için ön çatlaksız mod-I/III CTT numunesi ile strain-gage uygulaması gerçekleştirilerek bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.68.'de görünen strain-gage'lerin yerleşim konumları, 45° lik mod-I/III yükleme durumunda elde edilen asal gerilme yönlerine göre belirlenmiş ve numune üzerine yapıştırılmıştır. Numunenin 5 noktasına strain-gage yerleştirilmiştir. Şekil 2.69.'da deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü verilmiştir. Deney numunesinde, 0'dan başlayarak birer kN artırılarak 6 kN yüke çıkılmış, daha sonra birer kN azaltılarak yüksüz konuma getirilmiştir.



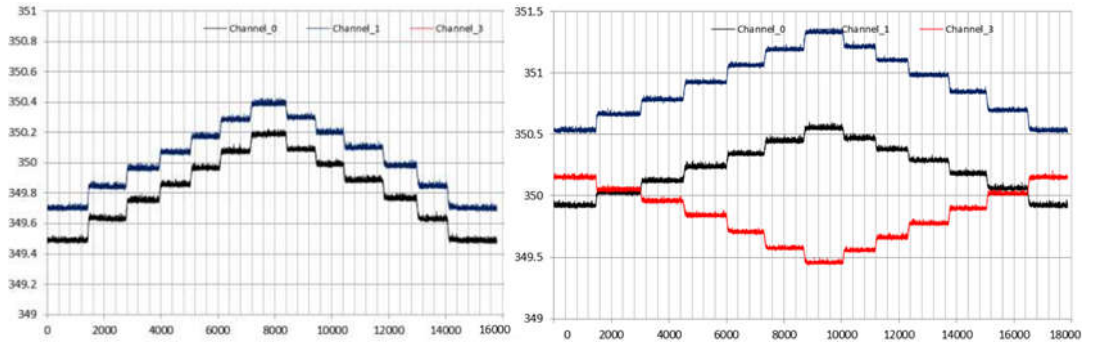
Şekil 2.68. Mod-I/III 45°, 6 kN yüklemesinde gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numunede oluşan gerilmeler ve strain-gagelerin yerleştirildiği yerler.

Strain-gage verilerinin alındığı veri toplama cihazı dört kanallı olduğundan dolayı test değerleri aynı şartlarda iki aşamada alınmıştır. İlk testte arka yüzeydeki strain-gage değerleri alınmıştır. İlk aşamada yapılan deney esnasında strain-gagelerden

ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 2.70.'de verilmiştir. İkinci aşamada numune ön yüzeyi ve sırtındaki birim şekil değişimi değerleri alınmıştır. Şekil 2.71.'den direnç değerlerinin lineer bir şekilde değişim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 2.69. 45° mod-I/III yüklemesi altında 6 kN'ye kadar değişen yüklerde gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numune üzerine yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü.



Şekil 2.70. Mod-I/III CTT numune için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana (yüke) bağlı değişim grafiği.

Tablo 2.15.'te CTT numunesi için her bir yük farkına karşılık gelen birim şekil değişim değerleri ölçülerek simülasyondan elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Tablodan görüldüğü gibi, arka yüzey 0-6 kN arasındaki yüklemelerde hata oranları incelendiğinde, minimum %12, maksimum %45 mertebelerinde değişen bir hata



oranı elde edilmiştir. Numune sırtı ve ön yüzey için de genel eğilimin ise ön yüzeyde yaklaşık %30, numune sırtında ise yaklaşık %7 mertebelerinde olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen simülasyonlar her üç strain-gage ile de doğrulanmıştır.

Tablo 2.15. Mod-I/III CTT numune için deneyde ölçülen strain-gage ortalama direnç ve birim şekil değişimi değerleri.

	Arka yüz 1	Fark %	Arka yüz 2	Fark %
0-1 kN yüklemeye $\epsilon$	0,001865876	77,39834964	0,00186851	38,2339858
0-2 kN yüklemeye $\epsilon$	0,001728691	64,35550062	0,00172484	27,60533285
0-3kN yüklemeye $\epsilon$	0,00160815	52,89507957	0,00161658	19,59572606
0-4kN yüklemeye $\epsilon$	0,001563359	48,63652417	0,00155077	14,72737985
0-5kN yüklemeye $\epsilon$	0,001539689	46,3861362	0,00153594	13,63054055
0-6kN yüklemeye $\epsilon$	0,001532517	45,70424312	0,00151398	12,00570955
	Arka yüz 1	Fark %	Arka yüz 2	Fark %
6 kN yüklemeye $\epsilon$ (ANSYS çözümü)	1,0518E-03	45,70	1,3517E-03	12,01

	Ön yüz 1	Fark %	Ön yüz 2	Fark %	Sırt	Fark %
0-1 kN yüklemeye $\epsilon$	0,00138274	30,74323868	0,00170724	30,52280581	-0,001317728	-7,638039957
0-2 kN yüklemeye $\epsilon$	0,001324245	25,21226909	0,00163541	25,03106811	-0,001262057	-11,54014901
0-3kN yüklemeye $\epsilon$	0,001382237	30,69565835	0,00170794	30,57663076	-0,001361174	-4,592871474
0-4kN yüklemeye $\epsilon$	0,001378794	30,37006464	0,00173684	32,786154	-0,001460275	2,353353318
0-5kN yüklemeye $\epsilon$	0,001383208	30,78746733	0,00172576	31,93901791	-0,001516174	6,271404284
0-6kN yüklemeye $\epsilon$	0,001380165	30,49969918	0,00174953	33,75605971	-0,001523119	6,758191376
	Ön yüz 1	Fark %	Ön yüz 2	Fark %	Sırt	Fark %
6 kN yüklemeye $\epsilon$ (ANSYS çözümü)	1,0576E-03	30,50	1,3080E-03	33,76	-1,4267E-03	6,758191376

#### 2.4.6. Mod-I/III kırılma ve çatlak ilerleme test sonuçları

Mod-I/III testlerinde kullanılmak üzere 12,5 ve 25 mm kalınlıklarda CTT numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 2.71.'de, 12,5 mm kalınlıktaki CTT numunesine ait bir görüntü verilmiştir. Numunenin tasarımında literatürde bulunan standart CT test numunesinin ölçü ve oranlarından yola çıkılmıştır. Mod-I/III testlerinde numuneye kayma yükü uygulanacağı için tutucu ve numune arasında cıvatalı bağlantı tipi kullanılmıştır. Bu şekilde cıvata dişleri numuneye verilen mod-III yırtılma yükünü bire bir numuneye uygulamaktadır. Şekilde görülen dört cıvata deliğinin merkezi ile çentik ucu arasındaki mesafe 23,7 mm olarak ayarlanmıştır. Bu mesafe, standart CT numunesinde de aynıdır.



Şekil 2.71. 12,5 mm kalınlıktaki mod-I/III CTT numunesi.

Mod-I/III CTT deney numunesi için değişik açılarda ( $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  ve  $90^\circ$ ) yükleme yapabilen tutucu, üzerinde değişiklik yapılmaksızın mod-II/III testlerinde de kullanılmıştır. Tutucu, üzerindeki pim delikleri yardımı ile yorulma cihazına bağlanmaktadır. Numuneye farklı açılarda yükleme yapmak için farklı açılara göre ayarlanmış pim delikleri kullanılmaktadır. Her açıda tutucuya uygulanan yük, numunenin orta düzlem ekseninden geçecek şekilde tasarlanmıştır. Tutucu ve üzerindeki farklı açılardaki pim delikleri Şekil 2.72.'de verilmiştir.



Şekil 2.72. Mod-I/III CTT numune tutucusu.

Deneylere başlamadan önce her bir numunenin boyutları kumpas ile kontrol edilmekte ve numunenin üzerine iki adet etiket yapıştırılmaktadır. Etiket üzerine numune ismi yazılmaktadır. Numune adlandırması için kullanılan sistematik şu şekildedir; test türü-malzeme hadde yönü-yükleme açısı-deney tarihi-deney numarası (örn. M-I-III LT-01 90° 15052015\_01).

Mod-I/III kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme testlerinden önce aksenal yük uygulanarak yorulma cihazında her bir numunede 1,3 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Ön çatlak uzunluğunun belirlenmesinde numune üzerine yapıştırılmış olan ölçek etiketi ve kameralar kullanılmıştır. Daha sonra deney verilerinin işlenmesi için ön çatlak uzunluğu numune üzerinden detaylı olarak alınmaktadır.

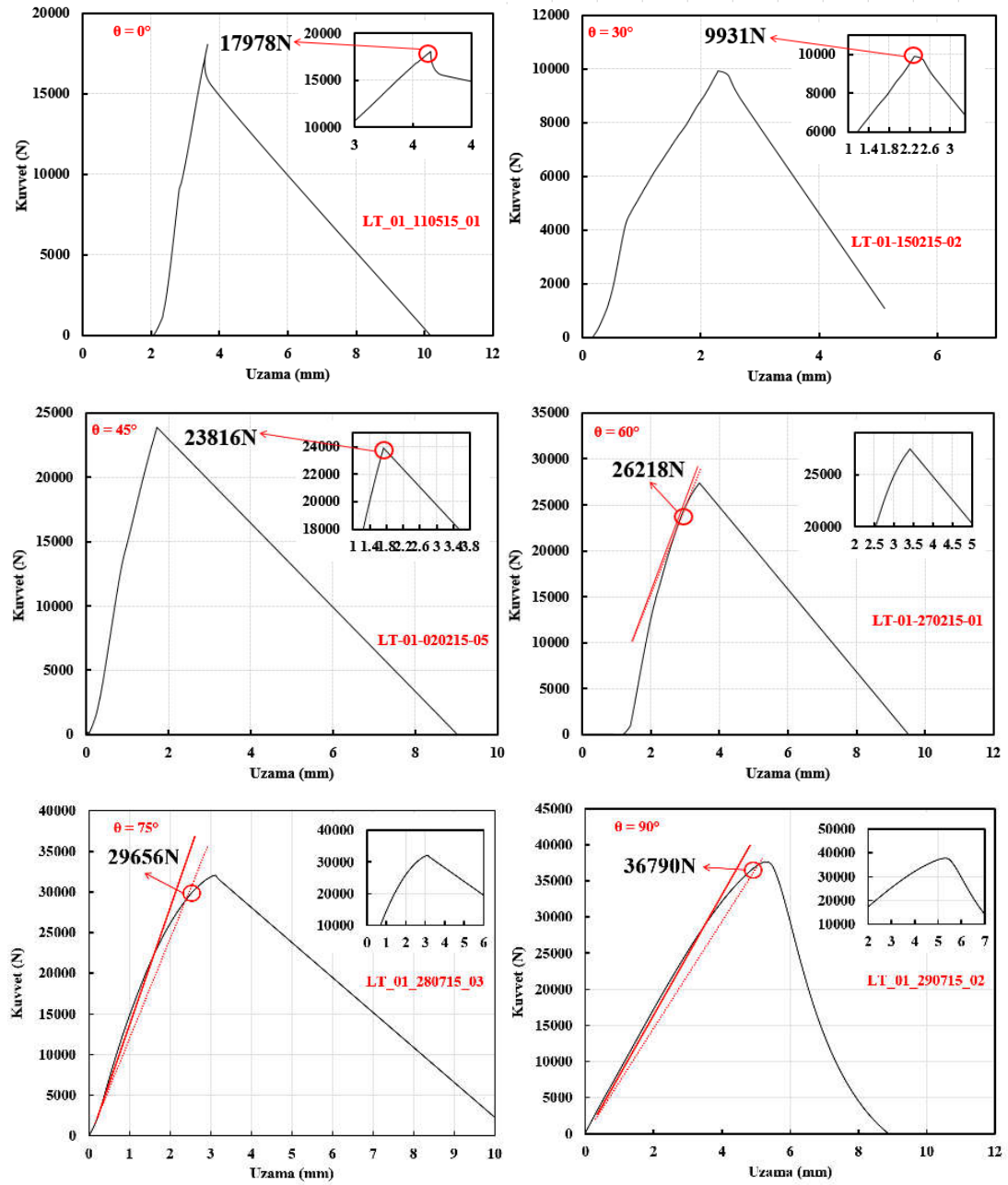
Testlerin tüm aşamaları ASTM E399-12 standardına uygun bir şekilde yapılmıştır. Buna göre yorulma ön çatlağı oluşturulurken istenen limitler arasında kalabilmek için, maksimum K değeri kırılma tokluğu "K<sub>IC</sub>" değerinin yarısını geçmeyecek şekilde yük aralığı belirlenmiştir. R-oranı ( $K_{min}/K_{max}$ ) 0,1 alınmıştır.

Tablo 2.16.'da, gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinin sonuçları verilmiştir.

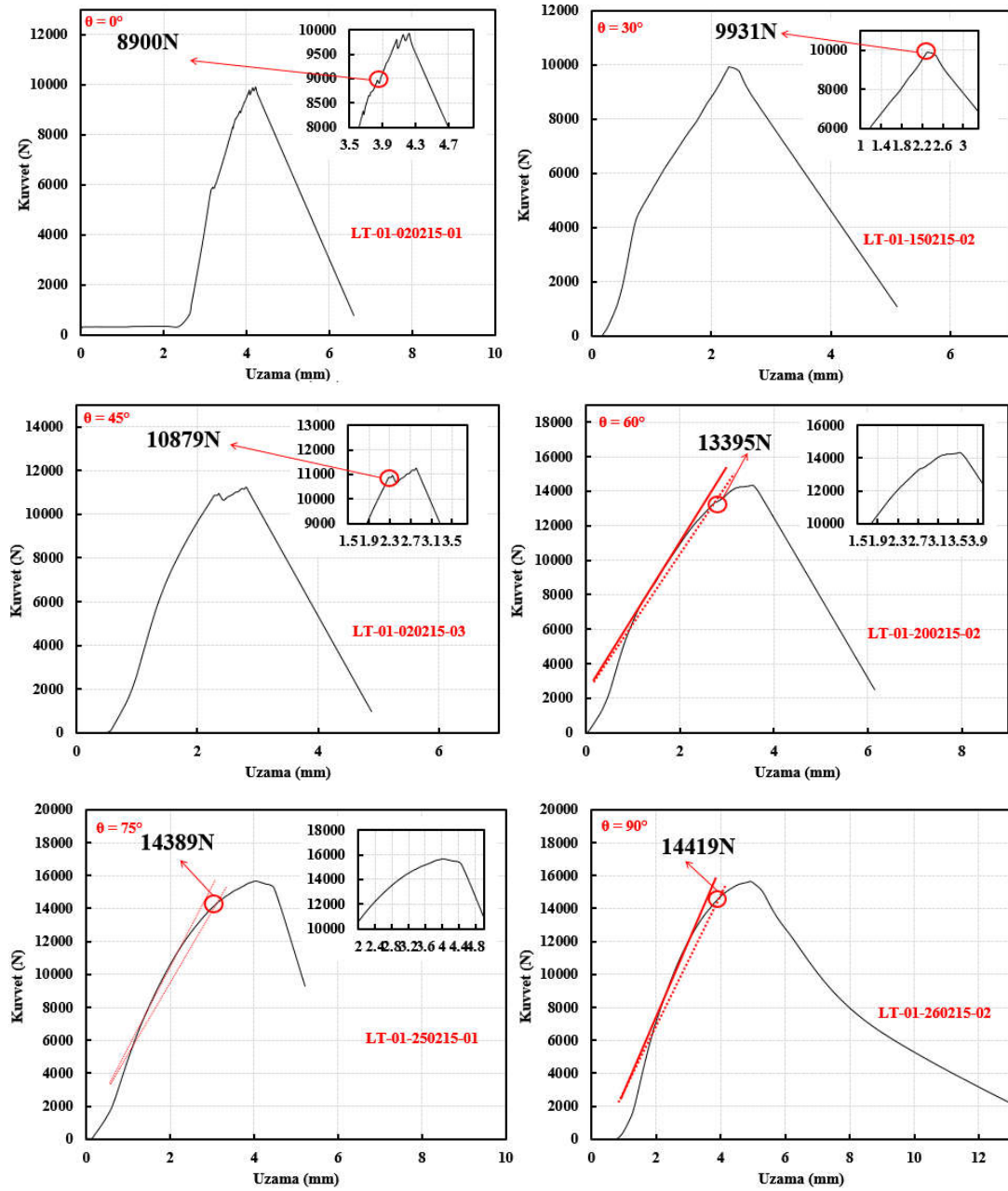
Tablo 2.16. Kırılma tokluğu test matrisi.

Numune İsmi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	Ön Çatlak Uzunluğu (mm)	Yükleme Hızı (kN/sn)	Kopma Yüğü (N)
M_I-III_LT_01_29.01.15_01	12,5	0°	24,23	1,7	9480
M_I-III_LT_01_29.01.15_02	12,5	0°	25,62	0,35	9950
M_I-III_LT_01_02.02.15_01	12,5	0°	25,90	0,35	9920
M_I-III_LT_01_24.02.15_03	12,5	15°	25,87	0,45	9343
M_I-III_LT_01_15.02.15_02	12,5	30°	25,92	0,35	9931
M_I-III_LT_01_16.02.15_02	12,5	30°	26,17	0,35	9913
M_I-III_LT_01_02.02.15_02	12,5	45°	25,67	0,35	12280
M_I-III_LT_01_02.02.15_03	12,5	45°	25,66	0,35	11860
M_I-III_LT_01_20.02.15_02	12,5	60°	25,59	0,4	13395
M_I-III_LT_01_22.02.15_01	12,5	60°	25,45	0,4	13251
M_I-III_LT_01_25.02.15_01	12,5	75°	25,00	0,45	14389
M_I-III_LT_01_15.06.15_01	12,5	75°	25,98	0,45	11553
M_I-III_LT_01_15.06.15_02	12,5	75°	26,32	0,45	13534
M_I-III_LT_01_26.02.15_02	12,5	90°	25,35	0,5	14419
M_I-III_LT_01_15.06.15_03	12,5	90°	25,71	0,5	13617
M_I-III_LT_01_18.06.15_01	12,5	90°	26,43	0,5	13534
M_I-III_LT_01_11.05.15_01	25	0°	26,19	0,6	17978
M_I-III_LT_01_28.07.15_01	25	15°	26,59	0,7	16930
M_I-III_LT_01_27.02.15_04	25	30°	26,09	0,7	20715
M_I-III_LT_01_27.02.15_05	25	30°	26,49	0,7	19686
M_I-III_LT_01_28.07.15_02	25	45°	26,29	0,7	21990
M_I-III_LT_01_30.07.15_01	25	45°	27,08	0,7	21756
M_I-III_LT_01_02.02.15_04	25	45°	26,76	0,7	23440
M_I-III_LT_01_02.02.15_05	25	45°	26,60	0,7	23890
M_I-III_LT_01_27.02.15_06	25	60°	26,36	0,8	27988
M_I-III_LT_01_27.02.15_01	25	60°	26,47	0,8	26218
M_I-III_LT_01_28.07.15_03	25	75°	27,09	0,7	32060
M_I-III_LT_01_18.05.15_01	25	75°	25,93	0,6	30905
M_I-III_LT_01_03.06.15_01	25	75°	26,21	0,7	32480
M_I-III_LT_01_29.07.15_01	25	90°	26,12	0,8	40689
M_I-III_LT_01_29.07.15_02	25	90°	26,88	0,8	37673

Şekil 2.73 ve 2.74.'te ise, 25 mm ve 12,5 mm kalınlıklarındaki numuneler üzerinde yapılan mod-I/III kırılma tokluğu testleri için kuvvet-uzama grafikleri ve okunan kopma yükleri gösterilmektedir.



Şekil 2.73. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kuvvet-uzama grafikleri ( $t = 25\text{mm}$ ).



Şekil 2.74. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kuvvet-uzama grafikleri ( $t = 12,5\text{mm}$ ).

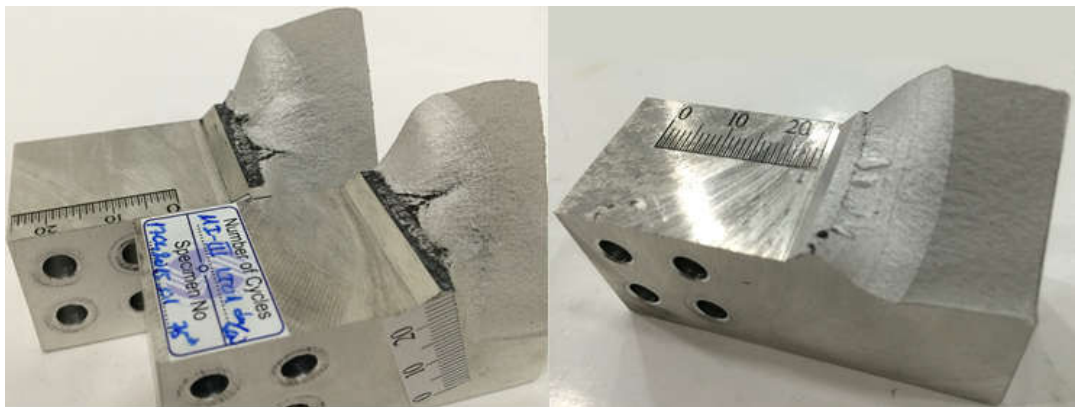
Tablo 2.17.'de, değişik mod-I/III yükleme açıları ile yapılan yorulma testlerine ait yük ve çevrim sayısı bilgileri verilmektedir.



Tablo 2.17. Mod-I/III CTT Numunesi çatlak ilerleme test matrisi.

Numune İsmi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	Yükleme Miktarı (kN)	Çevrim Sayısı
M_I-III_LT_01_23.02.15_02	12,5	30	4	54501
M_I-III_LT_01_24.02.15_02	12,5	30	4	16226
M_I-III_LT_01_16.02.15_01	12,5	30	5	8140
M_I-III_LT_01_16.02.15_03	12,5	30	5	11099
M_I-III_LT_01_04.02.15_01	12,5	45	4	21870
M_I-III_LT_01_05.02.15_02	12,5	45	4	37132
M_I-III_LT_01_06.02.15_01	12,5	45	5	11675
M_I-III_LT_01_15.02.15_01	12,5	45	5	9951
M_I-III_LT_01_17.02.15_01	12,5	60	5	40661
M_I-III_LT_01_20.02.15_01	12,5	60	5	21466
M_I-III_LT_01_25.02.15_02	12,5	75	5,8	73261
M_I-III_LT_01_26.02.15_01	12,5	90	7	28435
M_I-III_LT_01_23.07.15_01	12,5	90	6,5	35045
M_I-III_LT_01_27.02.15_03	25	30	10	6739
M_I-III_LT_01_04.03.15_01	25	30	10	5326
M_I-III_LT_01_09.02.15_01	25	45	8	28660
M_I-III_LT_01_11.02.15_01	25	45	8	23680
M_I-III_LT_01_27.02.15_02	25	60	10	20427
M_I-III_LT_01_05.03.15_01	25	60	10	18754
M_I-III_LT_01_17.04.15_01	25	75	10	66760
M_I-III_LT_01_14.05.15_01	25	75	12	22837
M_I-III_LT_01_09.07.15_01	25	90	13	36936

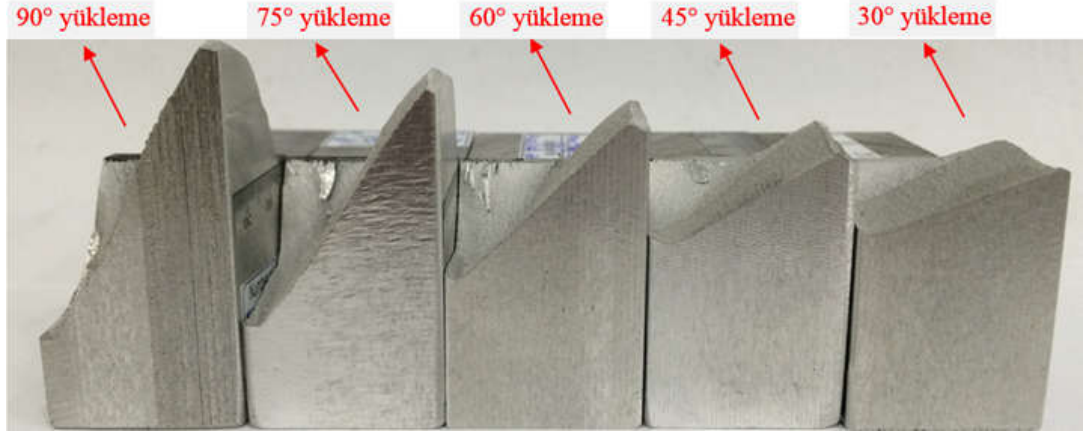
Testler sonrasında kırılma yüzeylerinin fotoğrafları alınmıştır. Şekil 2.75.'te, farklı yüklemeye açıları ile yapılan yorulma testleri sonrasında elde edilen kırılma yüzeylerinin perspektif görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.75. Farklı açılarda yapılan da/dN testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri.

Şekil 2.76.'da ise deneyi yapılan tüm yüklemeye açıları için da/dN testleri sonucunda elde edilen kopma yüzeylerinin sırt görüntüleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü

üzere yükleme açısı arttıkça mod-III etkisi daha fazla ortaya çıkmakta ve elde edilen kırılma yüzeyinin açısı da artmaktadır. Numune yüzeyleri dikkatli bir şekilde incelendiğinde çatlak ilerleme ve ani kırılma bölgeleri oldukça net görülebilmektedir. Kırılan yüzeyler incelendiğinde, kırılma tokluğu testinde elde edilen yüzeyler gibi birbirini tekrar eden tutarlı ve beklenen eğilimlerin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 2.76. Farklı açılarda yapılan da/dN testleri kırılma yüzeyleri (sırt görünüşü).

Tez kapsamında mod-I/III durumu için gerçekleştirilen kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kullanılan numunelerin toplu görüntüsü Şekil 2.77.'de verilmiştir. Yükleme açısının değişimi ile kırılma yüzeyleri arasındaki ilişki bu şekilde de açıkça görülmektedir.





Şekil 2.77. Mod-I/III ve mod-II/III testlerinde kullanılan tüm numuneler (üst görünüş).

## 2.5. Mod-I/II/III Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri

İki boyutlu kırılma problemlerinde, çatlak ya düz bir şekilde ya da bir eğri şeklinde ilerleme göstermektedir. Üç boyutlu kırılma problemlerinde ise, geometri, yükleme ve sınır şartlarına bağlı olarak çatlak düzlemsel veya düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyebilmektedir. Bu yüzden kırılma davranışı, hem çatlak yüzeyinin eğriliğine hem de çatlak önünün eğriliğine bağlı olarak üç boyutlu çatlak ilerlemesiyle ilişkilendirilmelidir. Düzlemsel olmayan üç boyutlu çatlak ilerleme modelleme ve simülasyonunun hassas olarak gerçekleştirilmesi birkaç parametreye bağlıdır. Bu parametrelerin en önemlilerinden biri çatlak ucu boyunca karışık modlu gerilme şiddet faktörlerinin doğru bir şekilde hesaplanmasıdır. Çatlaklı lineer elastik bir yapı analizinin amacı ne olursa olsun, mekanik ömür değerlendirmesi için üç boyutlu gerilme şiddet faktörünün doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Çatlak ilerlemesinin tahmininde bir diğer önemli parametre ise seçilen çatlak ilerleme kriteridir. Seçilen kritere göre çatlak yön ve doğrultusunun tespiti ve kriterde

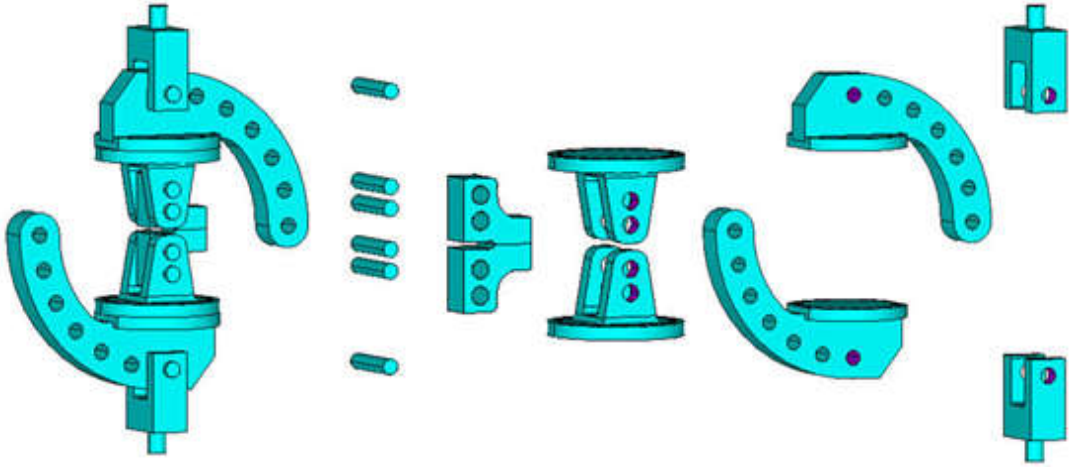
kullanılan malzeme özellikleri çatlak ilerleme prosedürünün tamamını etkilemektedir. Bu yüzden üç kırılma modunun da etkili olduğu karışık mod-I/II/III yükleme durumunun doğru ve bilinçli değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Karışık mod-I/II kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinde, yükleme durumu mod-I/II olmasına rağmen kırılma analiz sonuçlarında çatlak ucu boyunca  $K_{III}$  GŞF değerleri de elde edilmiş ve bunun Poisson oranının etkisinden kaynaklandığı ve bu nedenle çatlak ucu boyunca yükleme tipine bağlı olarak negatiften pozitive veya pozitiften negatife doğru lineer olarak değişen, orta noktada sıfır değerini alan simetrik bir  $K_{III}$  eğiliminin olduğu belirtilmişti. Yani çatlak ucu kenarlarında aynı fakat merkezde  $K_{III}$  sıfır değerini almaktadır. Literatürde karışık mod-I/II problemleri ile ilgili çok sayıda çalışma yer almasına rağmen, Buchholz ve arkadaşlarının (2001; 2004) yaptığı çalışma dışında  $K_{III}$  GŞF değerinin gözlemlenmesi ve sebebi ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Üç kırılma modunun da etkili olduğu karışık mod-I/II/III yükleme durumunda ise hem Poisson oranı etkisiyle oluşan  $K_{III}$  GŞF değerleri hem de karışık mod-I/II/III yüklemesinden gelen mod-III nedeniyle oluşan  $K_{III}$  GŞF değerleri olacağı için çatlak ucunun iki kenarı ve merkezi olmak üzere her üç noktada elde edilen  $K_{III}$  GŞF değerleri farklı olmakta ve çatlak ucu merkezine göre simetrik olmayan bir  $K_{III}$  GŞF dağılımı elde edilmektedir. Bu yüzden karışık mod-I/II/III yükleme durumunda hesaplanan  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri ve bu değerlere göre belirlenen eş değer GŞF değerlerinin çatlak ucunun hangi noktasına göre belirlenmesi gerektiği, kırılma anında çatlağın ani ilerlemesinin çatlağın merkezinden mi yoksa kenarlarından mı başladığının tespit edilmesi çok önemlidir.

Bu kapsamda mod-I/II/III kırılma ve çatlak ilerleme testleri için, yukarıda bahsedilen önemli hususların dikkate alındığı yeni bir mod-I/II/III tutucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ilk olarak, mod-I/II/III tutucu ve numunesi için gerçekleştirilen farklı tasarım ve analiz sonuçları, tutucunun nihai boyutlarına karar verilmeden önce geçirdiği tasarım aşamaları ve tasarımı tamamlanan tutucunun üretilerek gerçekleştirilen mod-I/II/III kırılma ve çatlak ilerleme testleri verilmiştir.

## 2.5.1. Farklı mod-I/II/III numune tutucusu tasarım ve analizleri

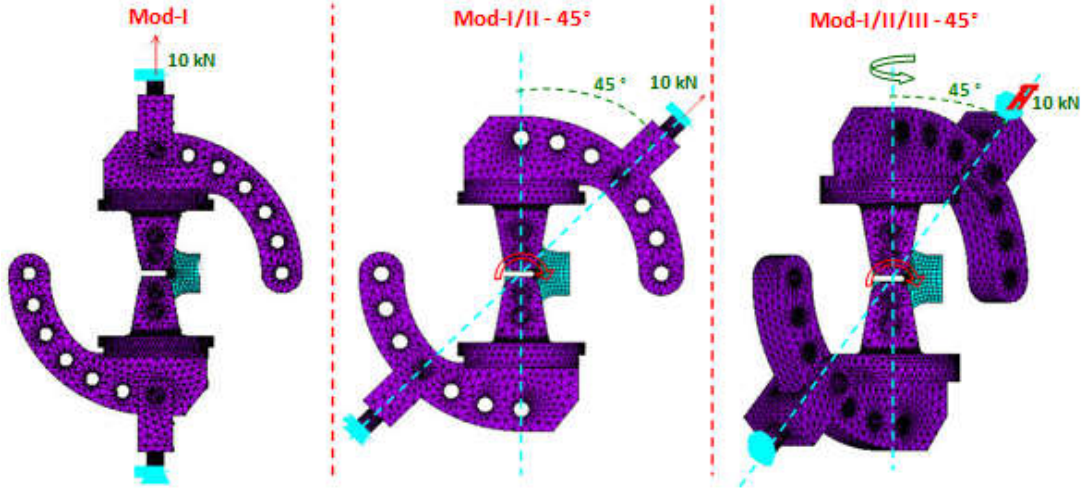
### 2.5.1.1. T-numunesi için geliştirilen tutucu tasarım ve analizleri

Mod-I/II/III kırılma ve çatlak ilerleme testleri için ilk olarak, mod-I/II testleri için önerilen T-numunesine uygun bir mod-I/II/III tutucu tasarlanarak (Şekil 2.78) bazı yükleme açıları için ön tasarım ve gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bir önceki mod-I/II tutucusundan farklı olarak bu tutucunun mod-I/II yüklemesi ile birlikte mod-III yüklemesi de yapabilmesi için düşey yönde açılı dönmeyi sağlayabilecek ve tutucuya civatalar ile monte edilebilecek şekilde ayrı bir aparat tasarlanmıştır.

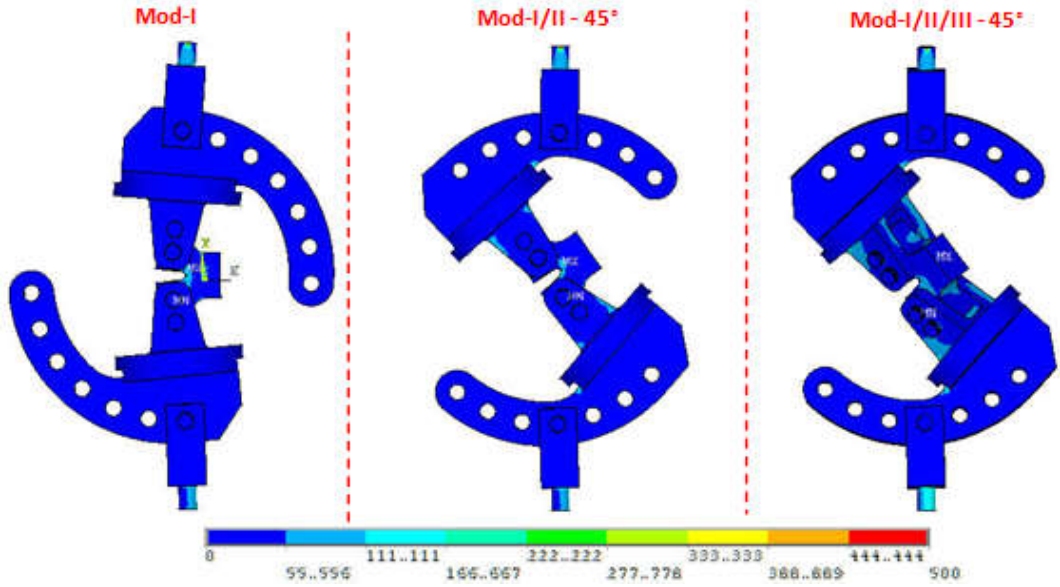


Şekil 2.78. Mod-I/II/III yüklemesi için tasarlanan T-numune tutucusu ve aparatları.

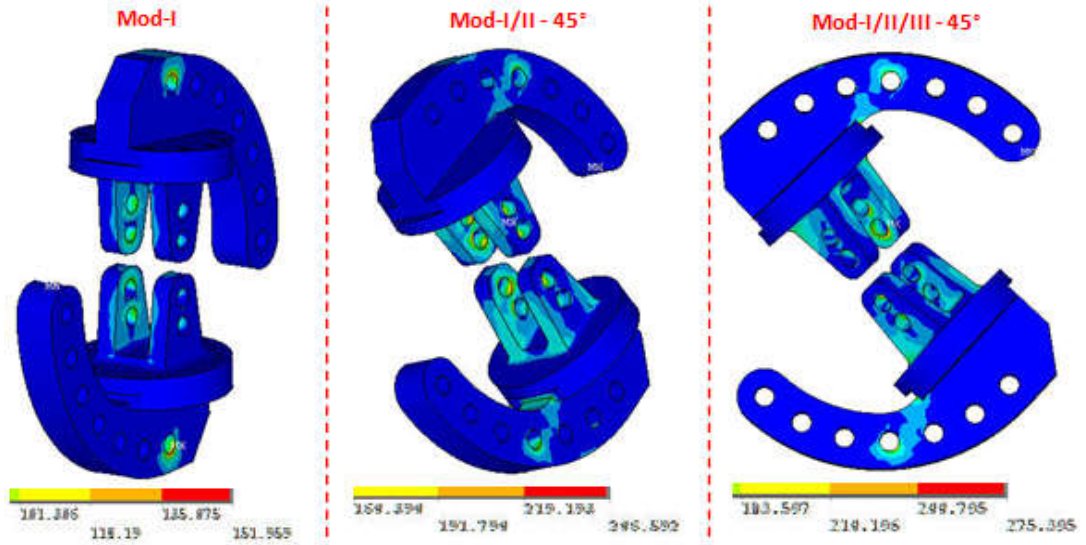
Tasarlanan yeni mod-I/II/III tutucusuna mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° yükleme açılarında ön gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz detayları ve sonuçları sırasıyla Şekil 2.79 - 2.84.'te verilmiştir.



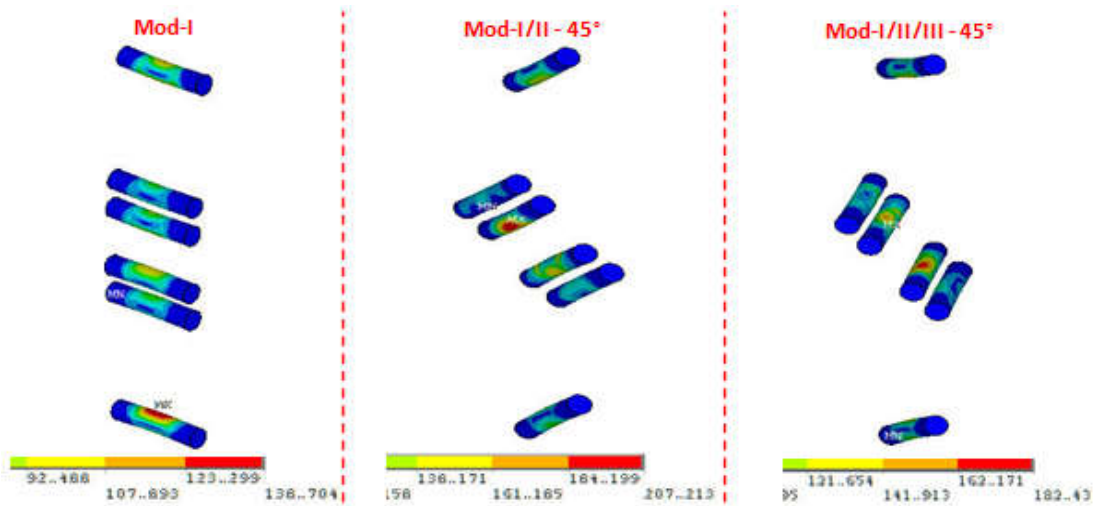
Şekil 2.79. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarının kırılma analizleri için hazırlanan sonlu eleman modelleri.



Şekil 2.80. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında tutucu, numune ve pimde oluşan gerilme dağılımının genel görünümü.

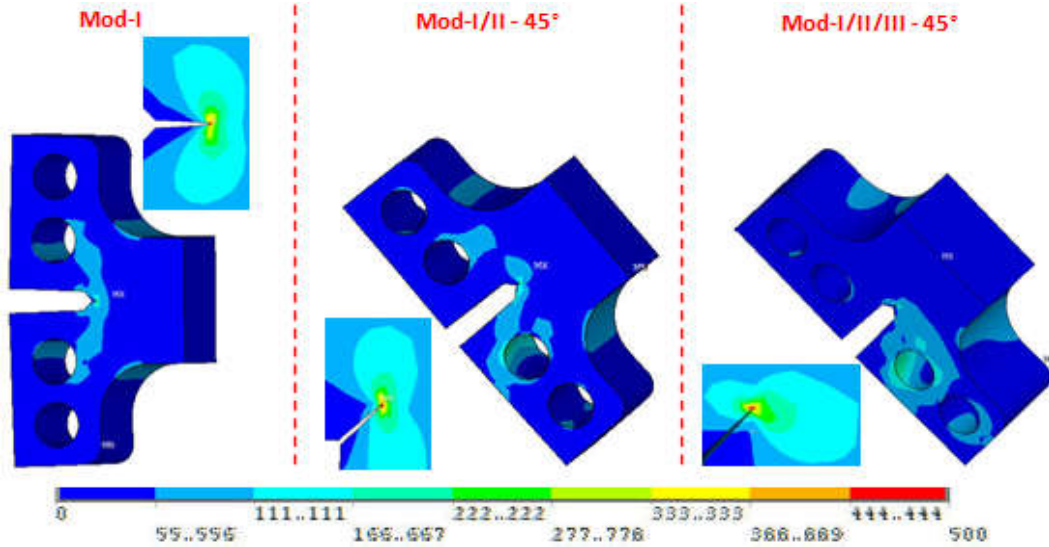


Şekil 2.81. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında tutucularda oluşan gerilme dağılımları.

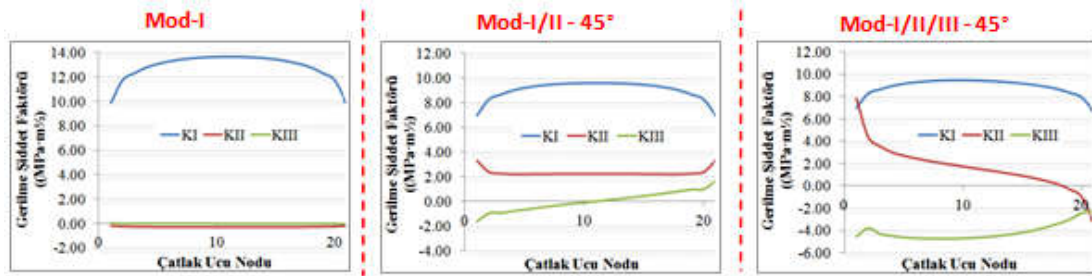


Şekil 2.82. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında pimlerde oluşan gerilme dağılımları.





Şekil 2.83. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında numunelerde oluşan gerilme dağılımları.



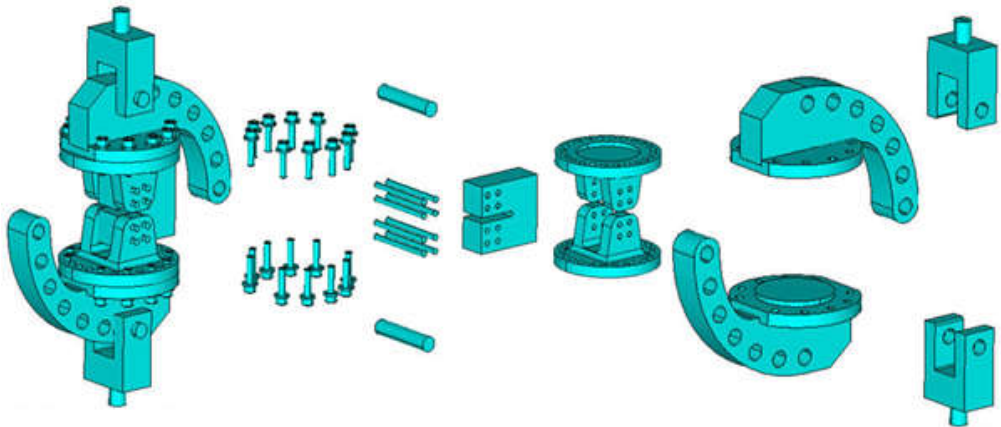
Şekil 2.84. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme çatlak ucunda elde edilen GSŞ değerlerinin dağılımı.

Tutucu, pim ve numunelerde oluşan gerilmeler incelendiğinde, bazı bölgelerde belirgin gerilme yığılmalarının olduğu gözlenmiştir. Özellikle yüksek mod-II ve mod-III kırılma modlarının oluşacağı yükleme açılarında, tutucunun zarar görebileceği ve gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde iyileştirme çalışmalarının yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Ancak, mod-I/III kırılma ve çatlak ilerleme testlerinin gerçekleştirildiği, mod-I kırılma tokluğu testlerinde kullanılan standart CT numunesine yakın boyutlara sahip olan CTT numunesine uygun bir tutucu tasarlanmasına ve mod-I/II/III kırılma ve çatlak ilerleme testlerinin bu numune ile gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Tutucu mod-I/II/III yüklemesi yapabilecek özellikle tasarlanacağı için, bu deneylerde kullanılacak olan numunelere CTST (compact tension shearing and tearing) numunesi adı verilmiştir.

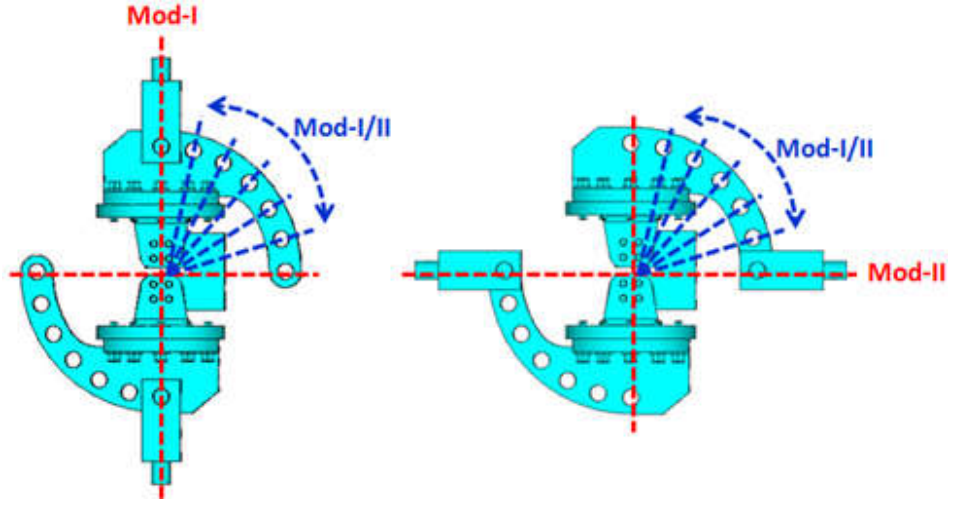
### 2.5.1.2. CTST (compact tension shearing and tearing) numunesi için geliştirilen tutucu ön tasarım ve analizleri

Karışık mod-I/II/III yükleme durumunun doğru ve bilinçli değerlendirilmesi ve çatlak ilerleme test sonuçlarının mod-I/III test sonuçları (kopma yükleri, kırılma yüzeyleri vb.) ile birlikte değerlendirilerek gerçekleştirilen testlerin şu ana kadar yapılan testlerle tutarlı olması amacıyla, mod-I/II/III testlerinde mod-I/III testlerinde kullanılan numunenin aynısının kullanılmasına karar verilmiştir. Mod-I/III çatlak ilerleme testlerinde kullanılan CTT numunesine uygun olarak farklı CTST tutucu konfigürasyonları tasarlanmış ve farklı yükleme açıları için önce gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilerek optimum tutucu tasarımı hedeflenmiştir.

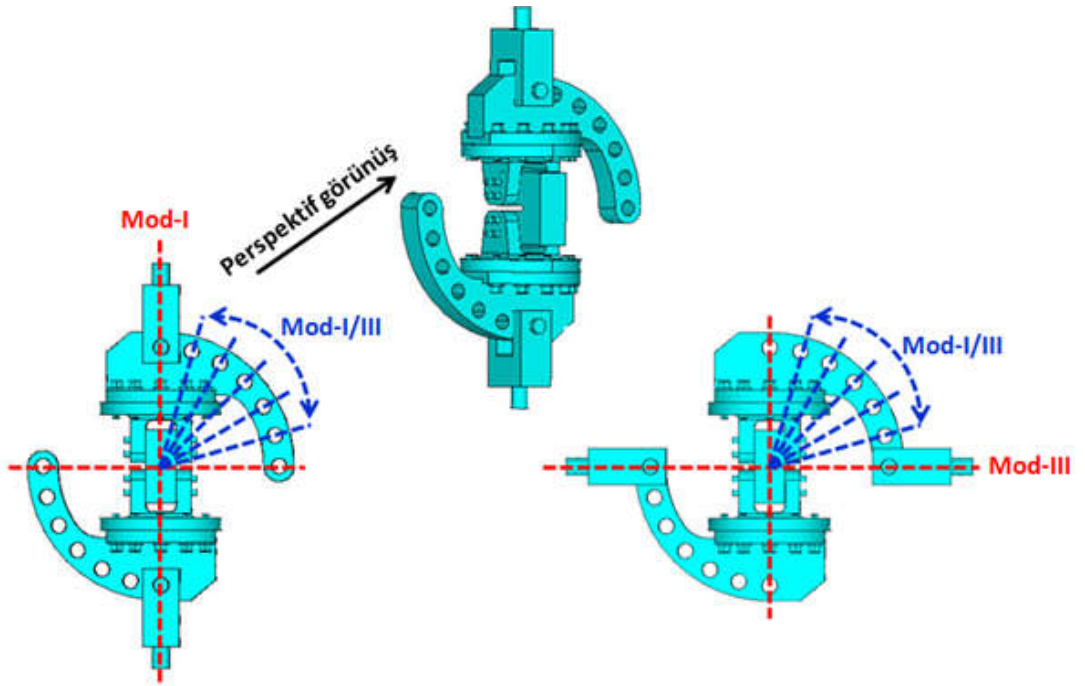
Tasarım çalışmalarında ilk olarak T-numunesi için tasarlanan mod-I/II/III tutucusuna benzer şekilde CTST numunesine uygun bir mod-I/II/III tutucusu tasarlanmıştır (Şekil 2.85). Tutucunun mod-I/II yüklemesi ile birlikte mod-III yüklemesi de yapabilmesi için düşey eksen etrafında açılı dönmeyi sağlayabilecek ve tutucuya civatalar ile monte edilebilecek şekilde ayrı bir aparat düşünülmüştür. Şekil 2.86.'da uygulanabilecek yükleme açıları görsel olarak verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi her iki eksen etrafında 15'er derecelik aralıklarla yükleme uygulanacak şekilde tutucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mod-I/II ve mod-I/III yükleme durumunun her ikisi de mod-I tutucusunun karışık mod (mixed-mode) tutucusunun yükleme deliklerine açılı olarak yüklenmesi ile oluşturulduğu için, bu yükleme durumlarının açı değerleri tüm mod-I/II/III analizlerinde birbirine eşit olmaktadır.



Şekil 2.85. Mod-I/II/III yüklemesi yapabilen CTST numune tutucusu ve aparatları.



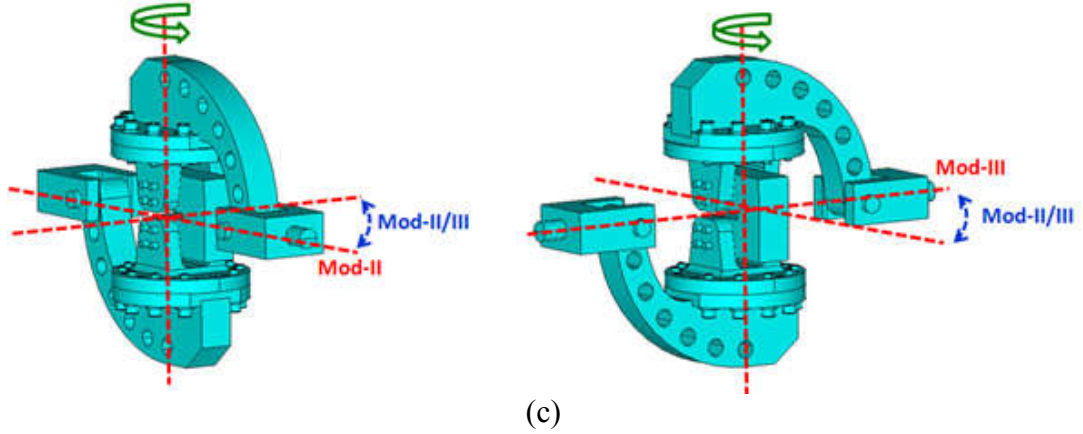
(a)



(b)

Şekil 2.86. 15 derecelik aralıklarla uygulanabilen yükleme tiplerinin gösterimi, (a) mod-I/II, (b) mod-I/III, (c) mod-II/III yükleme durumları.

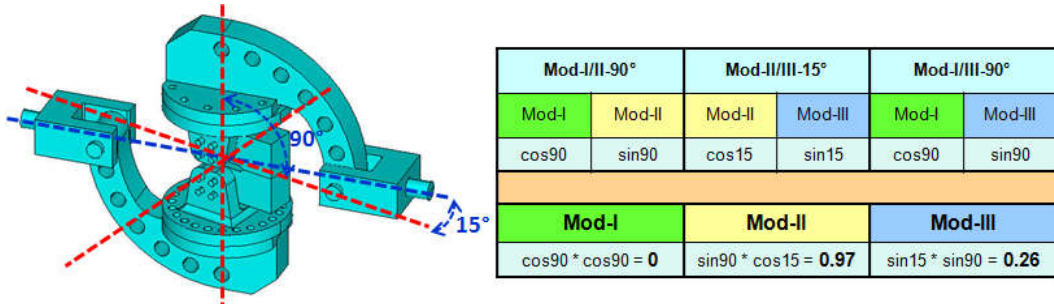




Şekil 2.86. 15 derecelik aralıklarla uygulanabilen yükleme tiplerinin gösterimi, (a) mod-I/II, (b) mod-I/III, (c) mod-II/III yükleme durumları. (Devamı)

Tasarlanan tutucu ve aparatların uygunluğunun kontrol edilmesi için farklı yükleme açılarında gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilerek civata, pim, tutucu ve aparatlardaki kritik bölgeler tespit edilmeye çalışılmıştır. Herhangi bir yükleme açısında kırılma modlarının birbirlerine göre etkinliğinin kıyaslanması amacıyla özel bir yöntem kullanılmış ve aşağıda bazı yükleme durumları için verilen örneklerle kısaca açıklanmıştır.

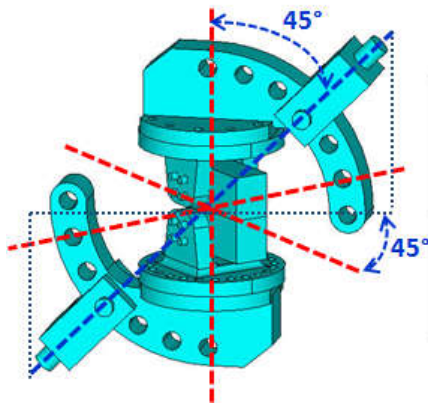
Şekil 2.87.'de, mod-I/II-90°, mod-I/III-90° ve mod-II/III-15° yükleme durumu verilmiştir.



Şekil 2.87. Mod-I/II-90°, mod-I/III-90° ve mod-II/III-15° yükleme durumu ve bunun etkisinde oluşacak kırılma modlarının birbirlerine göre etkinliği.

Şeklin sağ tarafında verilen tabloda da görüldüğü gibi üç boyutlu yükleme durumu mod-I/II, mod-II/III ve mod-I/III yüklemesi olarak ayrı ayrı ele alınarak incelenmekte ve yükleme tipleri bileşenlerine ayrılmaktadır. Daha sonra aynı türdeki modların katsayı değerleri birbiri ile çarpılarak kırılma modlarının birbirlerine göre

etkinliğini temsil eden katsayılar elde edilmektedir. Bu katsayılar modların gerçek değerleri olmayıp sadece modlar arasında kıyaslama yapmak için kullanılmaktadır. Örnekte verilen yükleme durumu için mod-I yükleme tipinin oluşmayacağı ve mod-II yükleme tipinin mod-III yükleme tipine göre çok daha baskın olacağı tabloda görülmektedir. Şekil 2.88.'de ise, mod-I/II-45°, mod-I/III-45° ve mod-II/III-45° yükleme durumu verilmiştir. Şekilde yer alan tabloda görüldüğü gibi bu yükleme durumu için her üç kırılma modunun da mevcut ve eşit oranda olacağı görülmektedir.



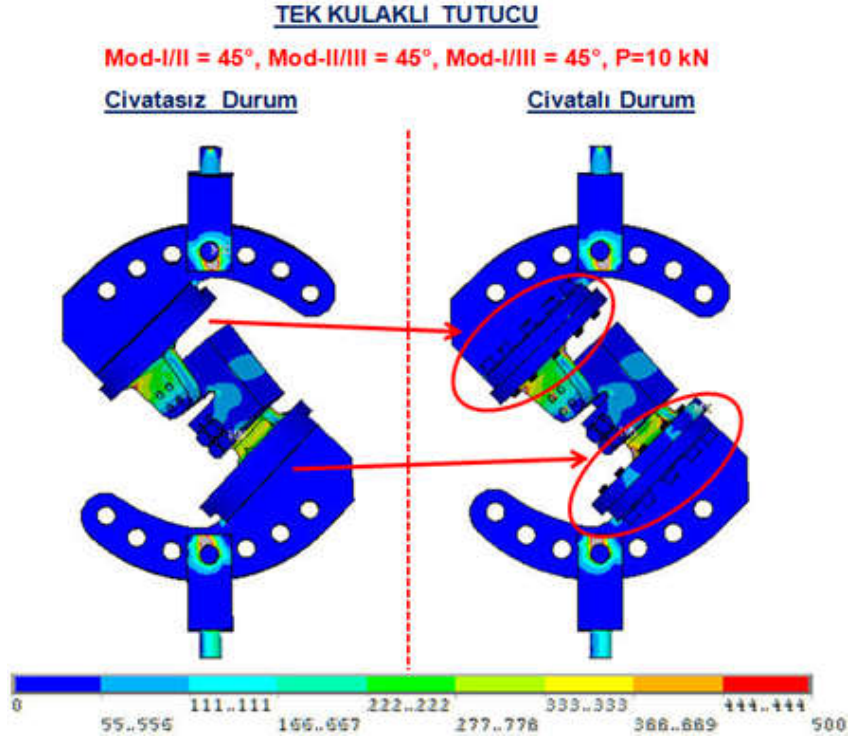
Mod-I/II-45°		Mod-II/III-45°		Mod-I/III-45°	
Mod-I	Mod-II	Mod-II	Mod-III	Mod-I	Mod-III
cos45	sin45	cos45	sin45	cos45	sin45
<b>Mod-I</b>		<b>Mod-II</b>		<b>Mod-III</b>	
cos45 * cos45 = 0.5		sin45 * cos45 = 0.5		sin45 * sin45 = 0.5	

Şekil 2.88. Mod-I/II-45°, mod-I/III-45° ve mod-II/III-45° yükleme durumu ve bunun etkisinde oluşacak kırılma modlarının birbirlerine göre etkinliği.

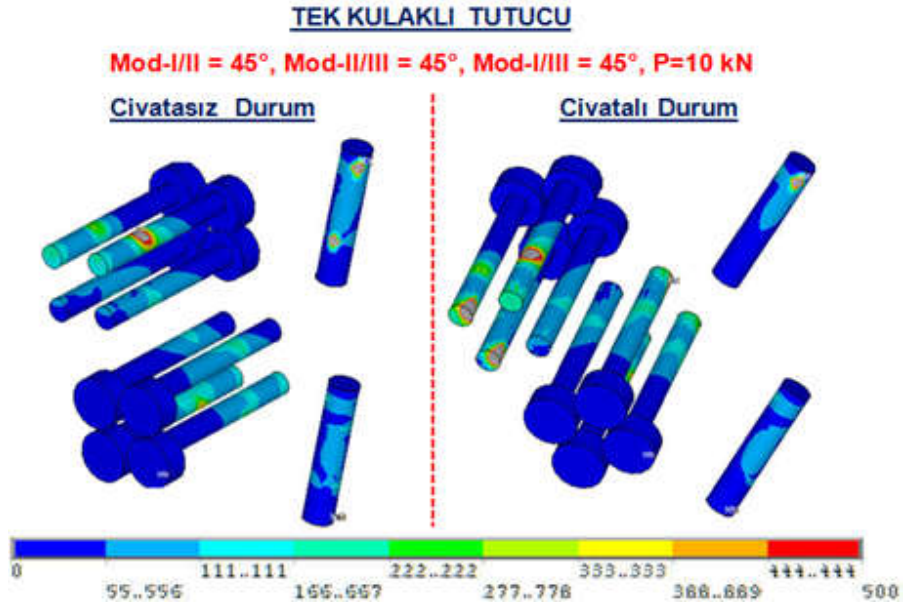
Mevcut tutucu için belirlenen kritik yükleme açılarında gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizleri sonucunda tutucu tasarımında değişiklik yapılmasına karar verilmiştir. Bölümün başında bahsedildiği gibi, karışık mod-I/II/III yükleme durumunda hem Poisson oranı etkisi nedeniyle hem de mod-III yüklemesi nedeniyle çatlak ucu boyunca her noktada farklı  $K_{III}$  GŞF değerleri elde edilmektedir. Test konfigürasyonunun analizinden elde edilen GŞF değerleri ve bu değerlere bağlı olarak hesaplanan eş değer GŞF değerleri, kopma yükü ve çatlak ilerleme açısı ve profilinin tahmininde kritik öneme sahip olduğu için, deneylerde kullanılan numune kadar, tutucu ve test konfigürasyonu da büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle çift kulaklı olarak tasarlanan tutucuda değişikliğe gidilerek numune ile kulak arasında tam bir temas sağlanarak istenen mod-III yüklemesinin numuneye tam olarak verilmesi için tutucu tek kulak olarak tasarlanmıştır. Çift kulaklı olarak üretilecek tutucuda, numunenin kulakların arasına rahat girebilmesi için belirli bir tolerans verilerek üretilmesi gerektiği için, test esnasında numune ve kulaklar arasındaki bir

miktar boşluktan ve mod-I yüklemesinden dolayı mod-III yüklemesi numuneye tam olarak iletilmeyecektir. Bu durum, simülasyon sonuçları ile deney sonuçları arasında tutarsızlıklara neden olacaktır.

Numunenin tutucu kulağının yüzeyine 4 adet cıvata ile tutturulması sağlanmış ve mod-III yükü, tutucu kulağından numuneye iletilecek şekilde tutucu tasarlanmıştır. Böylece cıvatalar mod-III yükünden dolayı çekme yüküne maruz kalmamakta, sadece mod-I ve mod-II yüklemesinin etkisinde kesme yüküne maruz kalmaktadır. Farklı yüklenme açıları için gerçekleştirilen bir önceki gerilme analiz sonuçlarına göre mod-I/II yüklenme açısının verildiği tutucunun boyutu ve kalınlığı bir miktar daha artırılmıştır. Yeniden tasarlanan tutucu için de yukarıda gösterilen yüklenme açılarında gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ancak aşağıda sadece mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yüklenme açısının sonuçları temsili olarak verilmiştir. Ayrıca şu ana kadar sonuçları gösterilen analizlerde, analizlerin daha kısa sürmesi için tutucuda bulunan cıvatalar kaldırılarak (böylece toplam eleman sayısı ciddi derecede azalmaktadır) tutucu yekpare olarak modellenmiştir. Cıvatalı ve cıvatasız modellerden elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın olduğu için cıvatasız model tercih edilmiştir. Aşağıda mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yüklenme durumunda cıvatalı ve cıvatasız tek kulaklı model kullanılarak gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizlerinin sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 2.89. ve Şekil 2.90.'da, cıvatalı ve cıvatasız konfigürasyonlarda ve pimlerde oluşan gerilme dağılımları sırasıyla verilmiştir. Her iki konfigürasyon için de benzer gerilme dağılımlarının olduğu gözlemlenmektedir.



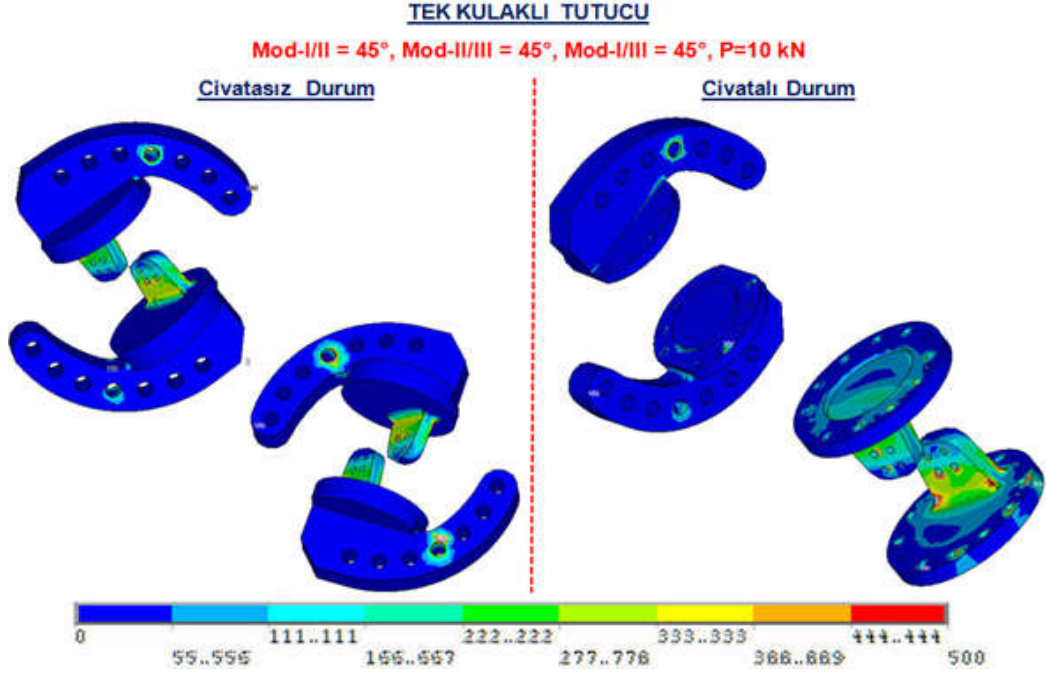
Şekil 2.89. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda civatalı ve civatasız konfigürasyonlarda oluşan gerilme dağılımları.



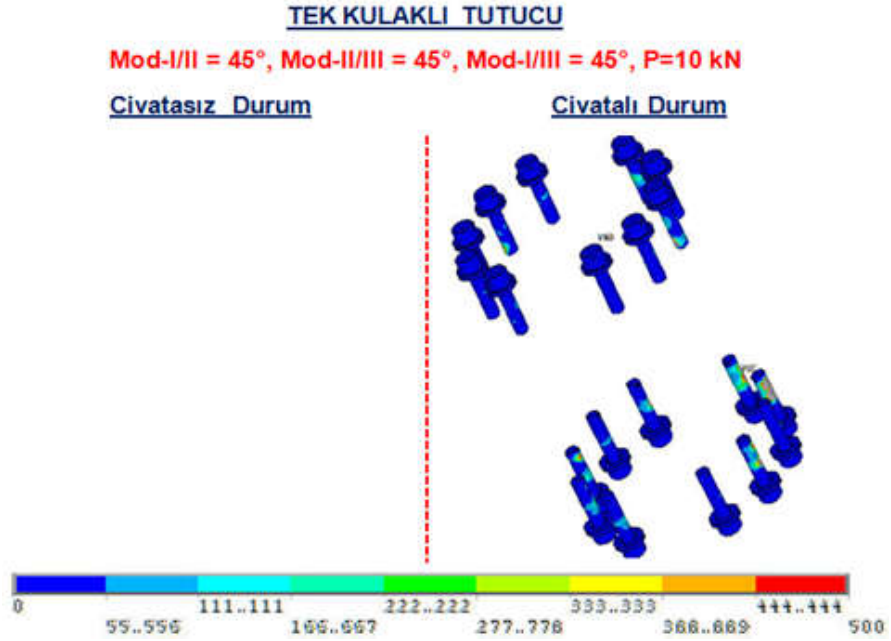
Şekil 2.90. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda pim ve civatalarda oluşan gerilme dağılımları.

Şekil 2.91.'de tutucularda oluşan gerilme dağılımları verilmiştir. Her iki tutucunun da kulak kısımlarında yüksek derecede gerilme değerleri (yaklaşık 400 MPa) gözlemlenmektedir. Bu yüzden tutucunun kulak kısmı için tasarımda iyileştirmelerin

yapılması gerekmektedir. Şekil 2.92.'de ise tutucuda kullanılan civatalarda oluşan gerilme dağılımları verilmiştir.

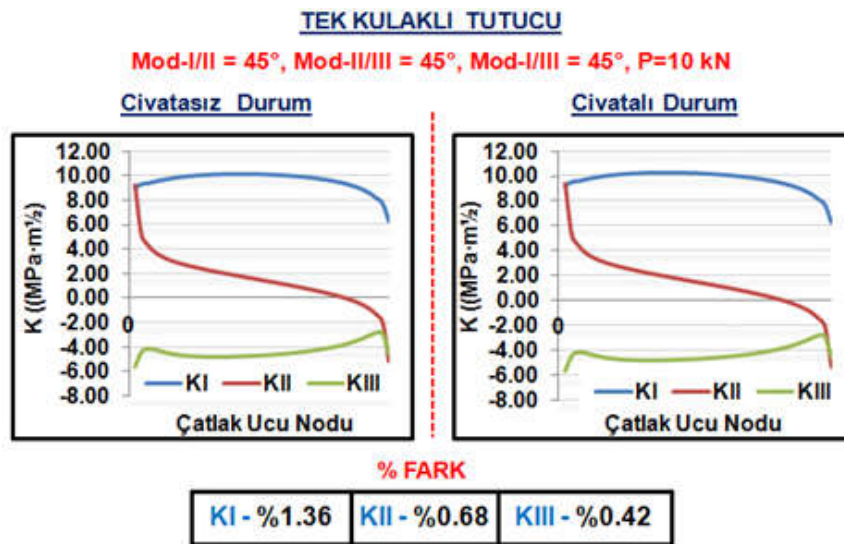


Şekil 2.91. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda tutucularda oluşan gerilme dağılımları.



Şekil 2.92. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda tutucu civatalarında oluşan gerilme dağılımları.

Her iki model için çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 2.93.'te verilmiştir. Elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri arasındaki farkların %1 mertebelerinde olduğu görüldüğü için, bundan sonra gerçekleştirilen mod-I/II/III analizlerinde tutucular ile numune arasındaki bağlantıyı sağlayan civatalar hariç diğer civatalar kaldırılarak, tutucular yekpare olarak modellenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi  $K_{III}$  GŞF değeri çatlak ucu boyunca simetrik olmayan bir dağılım sergilemektedir. Ayrıca, beklendiği üzere,  $K_{II}$  GŞF değeri de mod-I/III analiz sonuçlarında olduğu gibi çatlak ucu merkezinde sıfır değerini almamaktadır. Mod-I/III analizlerinde, mod-III yüklemesinden dolayı oluşan eğilme etkisi (bending effect) nedeniyle, çatlak ucunun bir kenarı bası yüküne diğer kenarı ise çeki yüküne maruz kaldığı için, yükleme eksenine bağlı olarak negatiften pozitif veya pozitiften negatife lineer olarak değişen ve çatlak ucu merkezinde sıfır değerini alan bir  $K_{II}$  eğilimi çatlak ucu boyunca görülmektedir. Mod-I/II/III analizlerinde ise hem mod-III yüklemesinden, hem de mod-I/II/III yüklemesinden gelen mod-II etkisinden dolayı  $K_{II}$  GŞF değerleri, yine yükleme eksenine bağlı olarak negatiften pozitif veya pozitiften negatife lineer olarak değişen bir davranış sergilemekte, ancak çatlak ucu merkezinde sıfır değerini almamaktadır.

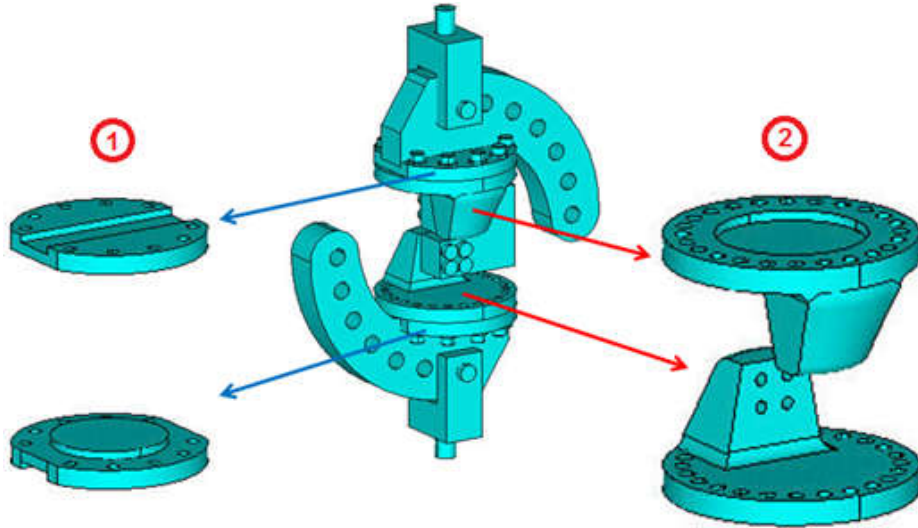


Şekil 2.93. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri.

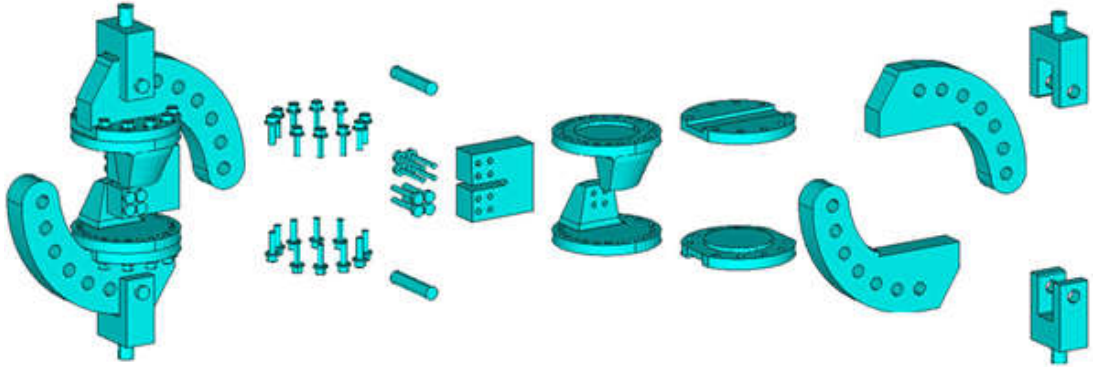


### 2.5.2. Mod-I/II/III CTST (compact tension shearing and tearing) numunesi tasarım ve kırılma analizleri

Farklı açılarda gerçekleştirilen analiz sonuçları doğrultusunda, istenen mod-III yüklemesinin numuneye tam olarak verilmesi için yukarıda da belirtildiği gibi tutucunun tek kulak olarak tasarlanmasına karar verilmiştir. Ancak kulak kısmında yüksek gerilme yığılmaları olduğu için Şekil 2.94.'te verilen 2 no.lu kulak modelinde görüldüğü gibi kulak kalınlığı artırılarak kısmi konik bir şekil kazandırılmıştır. Kulak diplerine de belli bir yuvarlatma verilerek geçiş sağlanmıştır. Mod-I/II yüklemesini sağlayan tutucu ile 1 no.lu model arasında bağlantının sağlanması için, 1 no.lu modele kanal açılarak tutucu yerleştirilmiş ve kenar kısım boyunca kaynak yapılarak yekpare olması sağlanmıştır. Ayrıca 1 no.lu modelin kanal kısmına iki adet cıvata deliği açılarak, cıvata ile ilave bir bağlantı yapılmıştır. Tutucu kalınlığı artırılmış ve tutucunun yuvarlatma kısmı bir miktar daha genişletilerek bu bölgede de kalınlık artışının olması sağlanmıştır. Şekil 2.95.'te, nihai konfigürasyonu oluşturan tüm parça ve modellerin perspektif görünümü verilmiştir.

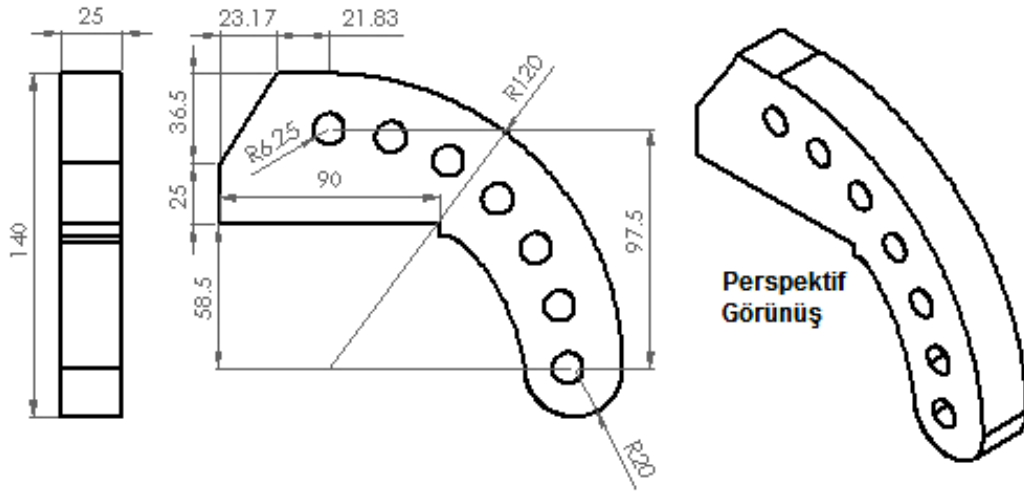


Şekil 2.94. Mod-I/II/III tutucusu için tasarımı tamamlanan nihai konfigürasyon.



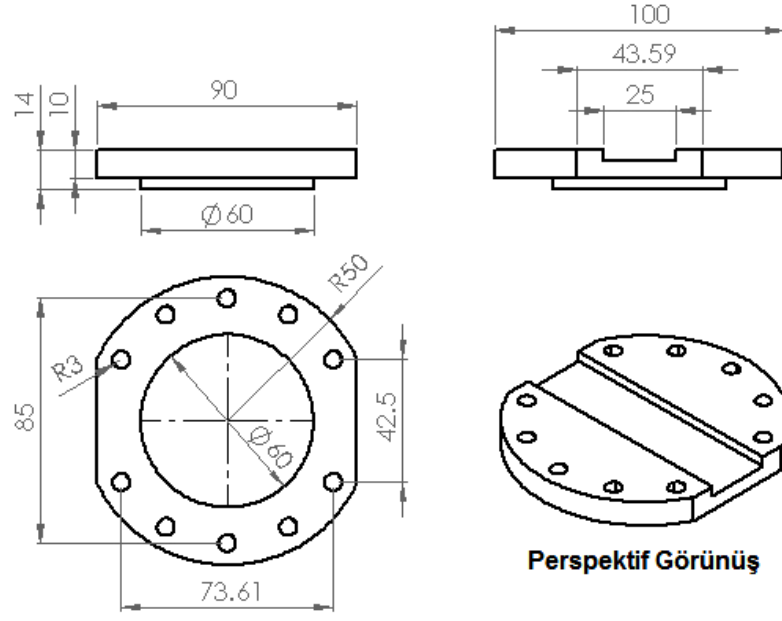
Şekil 2.95. Nihai mod-I/II/III konfigürasyonunu oluşturan parça ve modellerin perspektif görünümü.

Şekil 2.96.'da mod-I/II açılı yüklemeyi sağlayan tutucu modelinin, Şekil 2.97.'de tutucu ile kulak arasındaki bağlantıyı sağlayan bağlantı elemanının, Şekil 2.98.'de ise kulak olarak isimlendirdiğimiz mod-II/III yüklemesinin verilmesini sağlayan modelin detaylı boyutları ve perspektif görünümü verilmiştir. Son olarak numunenin detaylı boyutları ile perspektif görünümü Şekil 2.99.'da verilmiştir.

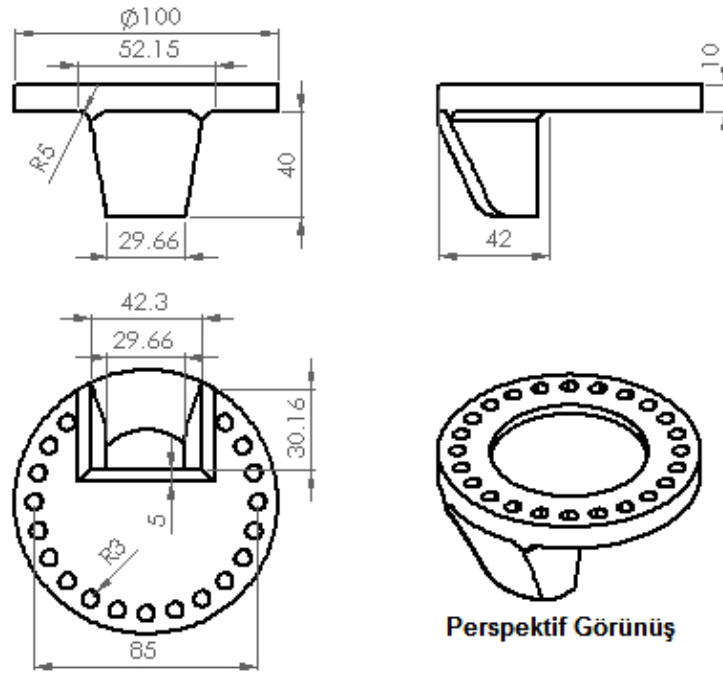


Şekil 2.96. Mod-I/II açılı yüklemeyi sağlayan tutucu modelinin detaylı boyutları ve perspektif görünümü.

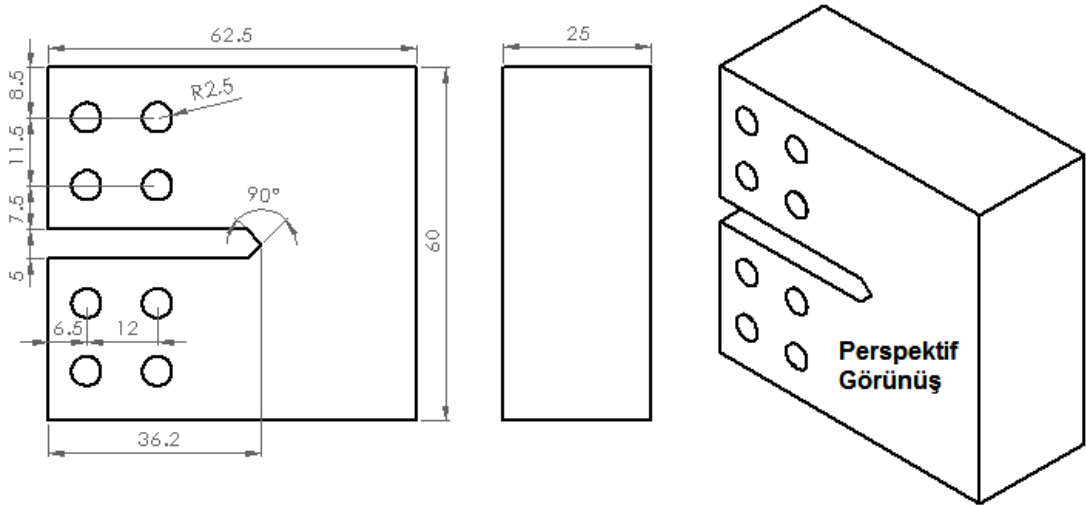




Şekil 2.97. Tutucu ile kulak arasındaki bağlantıyı sağlayan bağlantı elemanının ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü.



Şekil 2.98. Mod-II/III yüklemesinin verilmesini sağlayan modelin ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü.



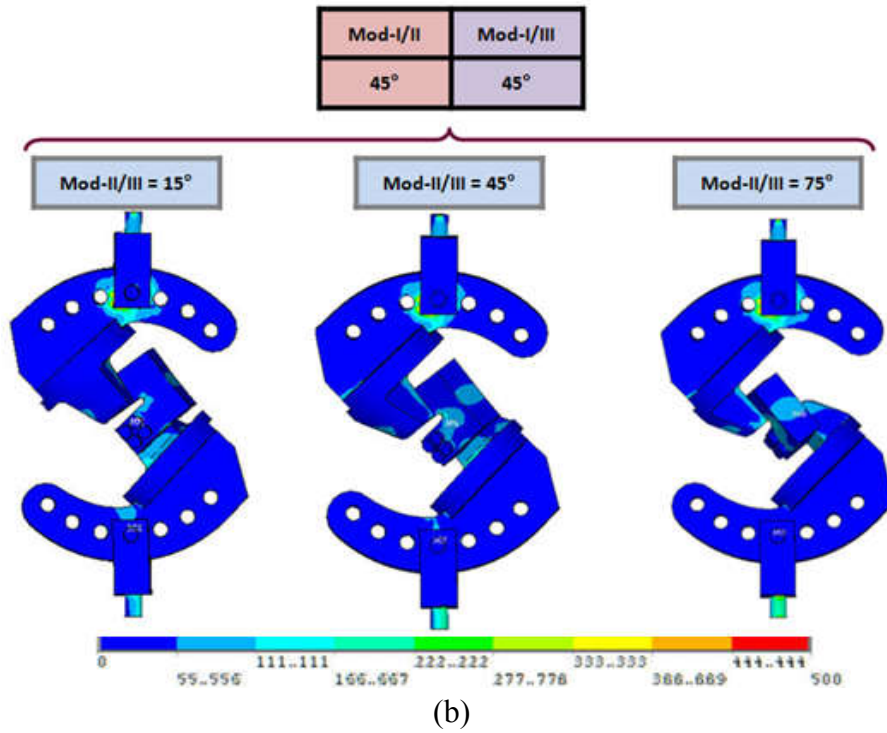
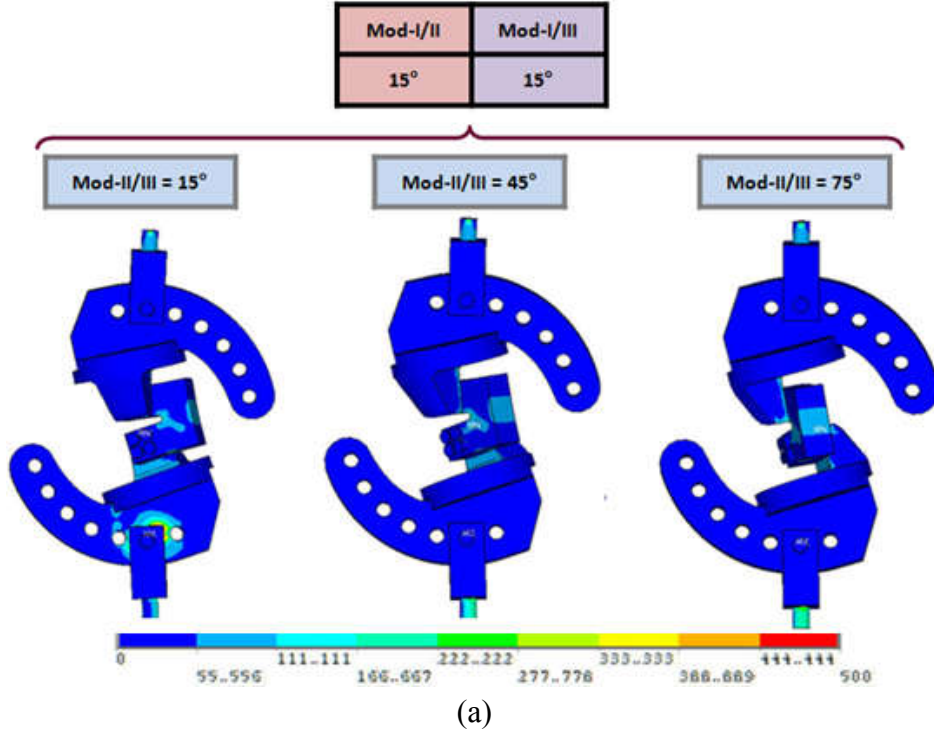
Şekil 2.99. Mod-I/II/III-CTST numunesinin ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü.

Nihai konfigürasyon tasarımı tamamlandıktan sonra mod-I/II/III testlerinin geniş bir perspektifte değerlendirilmesi için, her üç kırılma modunun da etkisinin ayrı ayrı incelenebileceği farklı yükleme açıları belirlenerek test matrisi Tablo 2.18.'de verilmiştir. Toplam 9 adet yükleme açısı belirlenmiş ve deney öncesi her bir yükleme açısı için kırılma ve gerilme analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar aşağıda verilmiştir.

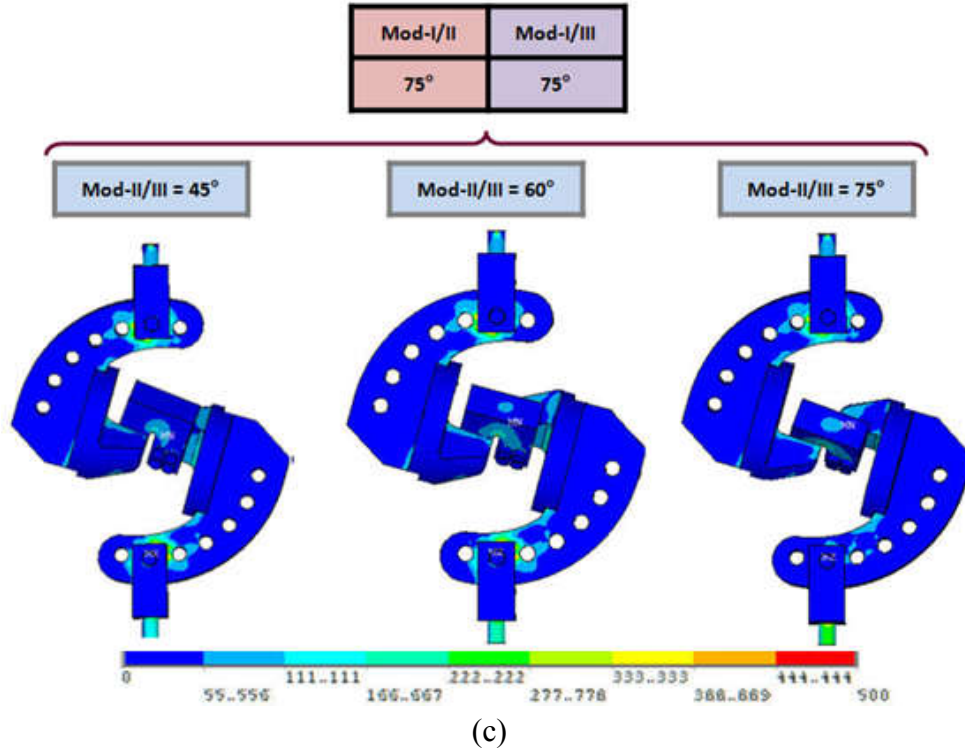
Tablo 2.18. Mod-I/II/III test ve analizleri için belirlenen yükleme açıları.

Mod-I/II	Mod-I/III	Mod-II/III
15°	15°	15°
		45°
		75°
45°	45°	15°
		45°
		75°
75°	75°	45°
		60°
		75°

Şekil 2.100.'de yukarıdaki tabloda verilen test matrisine göre gerçekleştirilen gerilme analizleri sonrası sistemde oluşan gerilme dağılımları verilmiştir. Tutucu, pim, civata ve numunelerde oluşan gerilme dağılımları ayrı ayrı incelenerek tutucu ve aparatların kırılma ve çatlak ilerleme deneyleri için uygun olduğuna karar verilerek ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 2.100. CTST-numune için gerçekleştirilen gerilme analizleri sonrası test sisteminde oluşan gerilme dağılımları, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° yükleme durumu.

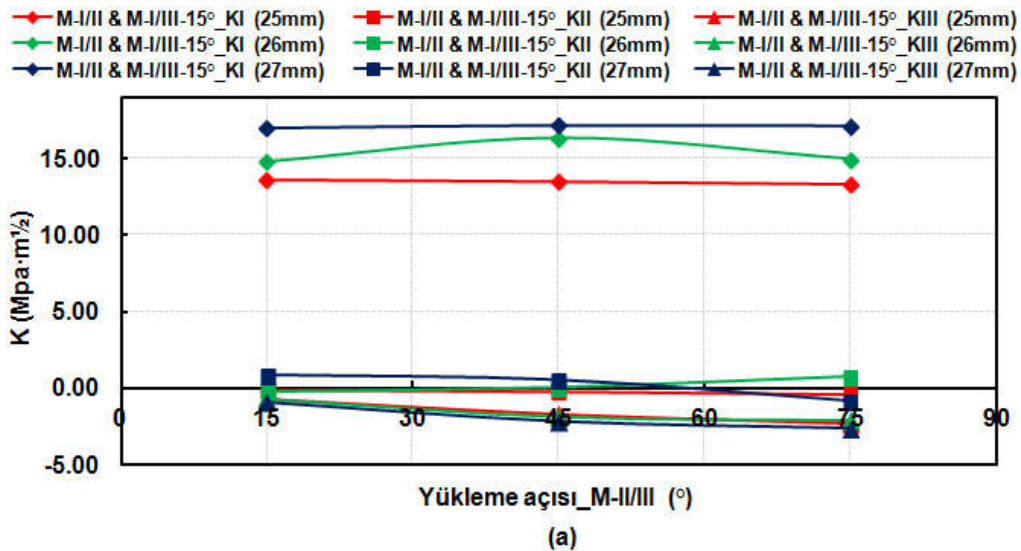


Şekil 2.100. CTST-numune için gerçekleştirilen gerilme analizleri sonrası test sisteminde oluşan gerilme dağılımları, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° yükleme durumu. (Devamı)

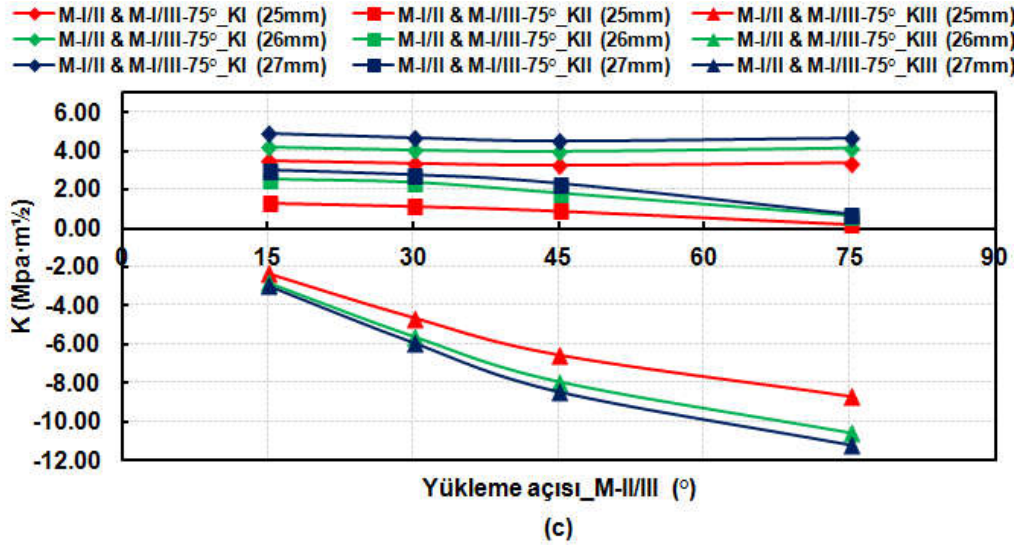
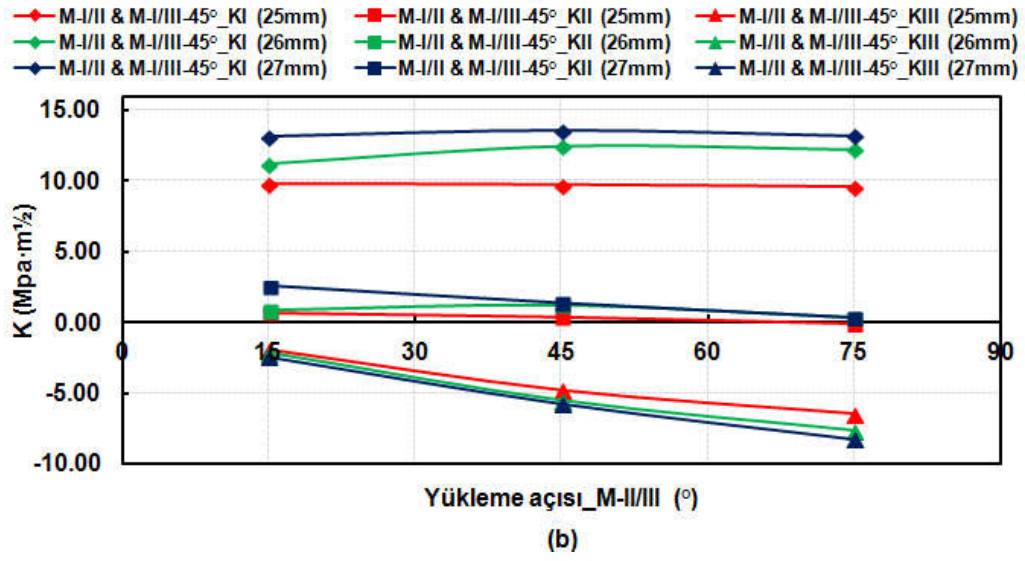
Ön çatlak uzunluğu her numunede az da olsa farklı olabildiği için mod-I/II analizlerinde olduğu gibi, çatlak uzunluğu 25 mm için gerçekleştirilen kırılma analizleri, 0, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90° yükleme açılarında 26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için de gerçekleştirilmiştir. Çatlak ucu merkezi, arka kenarı ve ön kenarı için elde edilen  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri değişkenlik gösterdiği için, bu üç nokta için elde edilen GŞF değerleri ve bunların çatlak ucu boyunca dağılımı ayrı tablo ve şekiller halinde verilmiştir. Tablo 2.19.'da çatlak ucu merkezi için elde edilen GŞF değerleri ve Şekil 2.101.'de ise GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı görülmektedir.

Tablo 2.19. Farklı yüklemeye açılarındaki 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu merkezi için elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri.

		Çatlak Uzunluğu										
		25 mm			26 mm			27 mm				
Yüklemeye Açısı (°)		Gerilme Şiddet Faktörü ( $MPa \cdot m^{1/2}$ ) - (Çatlak Ucu Merkezi)										
M-I/II&M-I/III	M-II/III	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$		
15	15	13,59	-0,11	-0,69	14,87	-0,16	-0,67	17,05	0,87	-0,87		
	45	13,50	-0,22	-1,67	16,34	0,10	-1,82	17,19	0,56	-2,14		
	75	13,37	-0,39	-2,27	15,05	0,75	-2,06	17,17	-0,79	-2,60		
45	15	9,86	0,67	-1,90	11,23	0,89	-2,12	13,22	2,56	-2,41		
	45	9,80	0,39	-4,75	12,50	1,26	-5,48	13,60	1,38	-5,74		
	75	9,66	-0,09	-6,40	12,25	0,35	-7,62	13,24	0,37	-8,26		
75	45	3,27	0,89	-6,53	3,99	1,81	-7,91	4,56	2,32	-8,42		
	60	3,38	0,56	-7,40	4,25	1,28	-9,07	4,64	1,53	-9,50		
	75	3,38	0,22	-8,66	4,16	0,63	-10,56	4,68	0,73	-11,17		



Şekil 2.101. Farklı yüklemeye açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu merkezinden elde edilen GSF değerlerinin çatlak ucu boyuna değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75°.



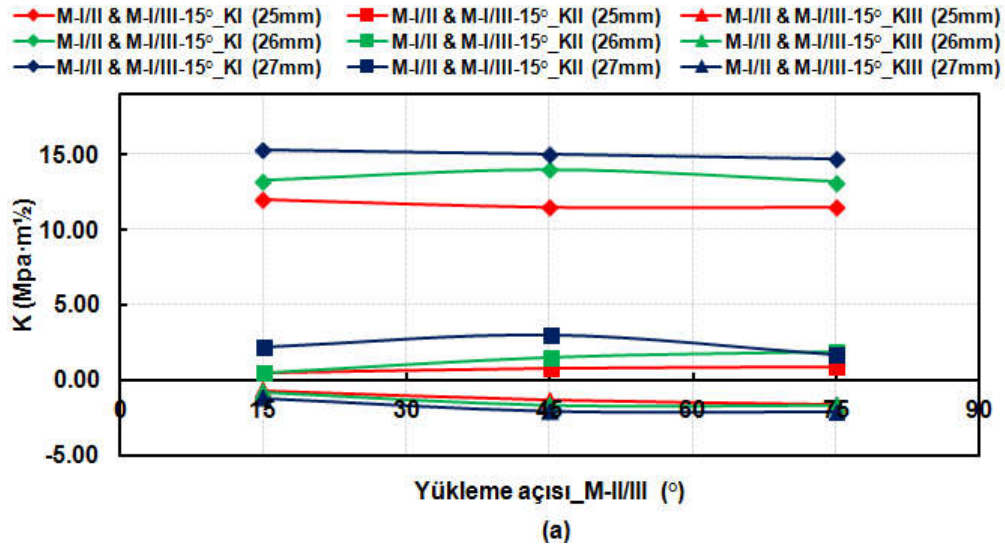
Şekil 2.101. Farklı yükleme açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu merkezinden elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75°. (Devamı)

Şekilde GŞF dağılımları incelendiğinde analiz sonuçlarından beklenen eğilimlerin elde edildiği görülmektedir. Çatlak uzunluğu arttıkça beklendiği gibi  $K_I$  değerinde artış gözlemlenmektedir. Mod-I/II ve mod-I/III yükleme açısı sabit tutulup mod-II/III yükleme açısı arttıkça  $K_I$  sabit kalırken,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  artan-azalan bir eğilim göstermektedir.

Çatlak ucu arka kenarından elde edilen GŞF değerleri ve bu değerlerin çatlak ucu boyunca dağılımı Tablo 2.20. ve Şekil 2.102.'de sırasıyla verilmiştir.

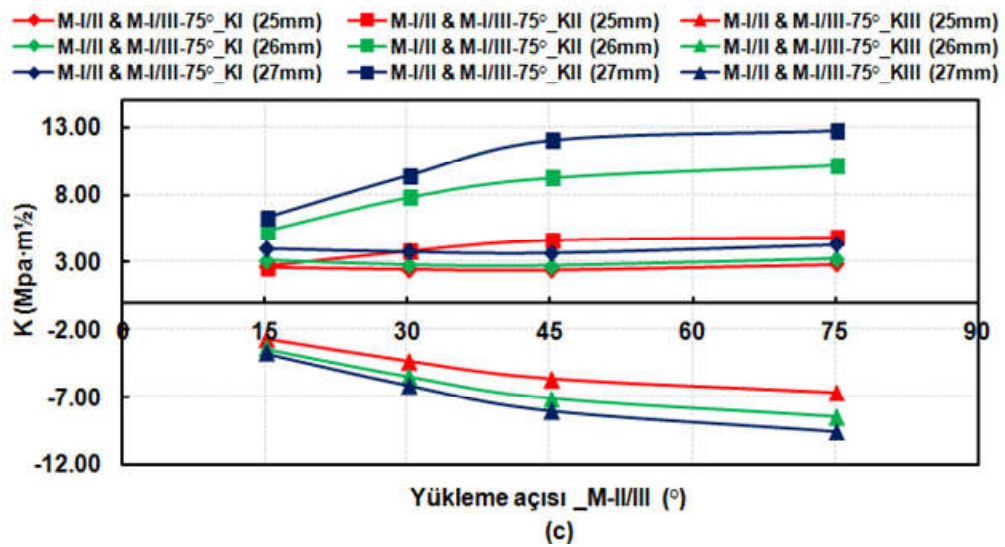
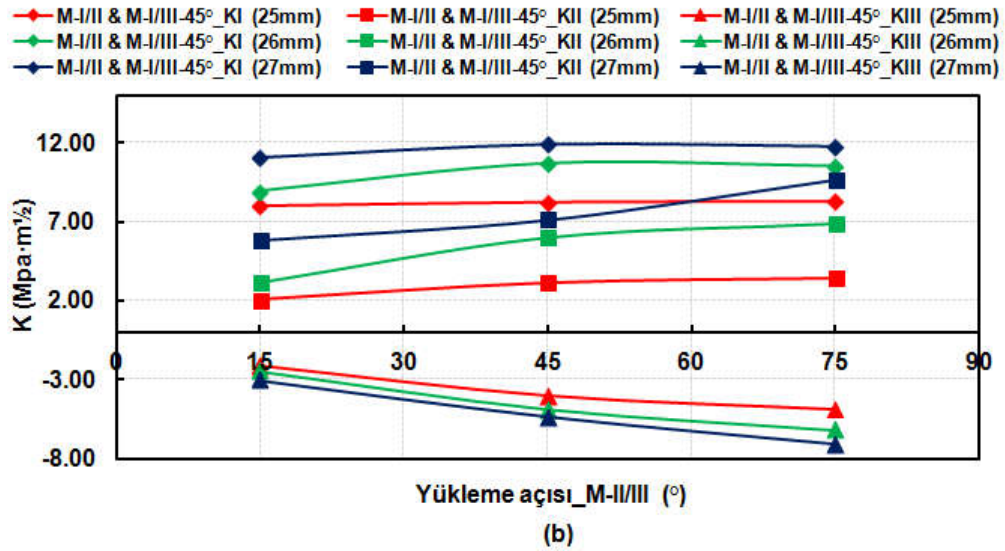
Tablo 2.20. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için çatlak ucu arka kenarından elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri.

		Çatlak Uzunluğu									
		25 mm			26 mm			27 mm			
		Gerilme Şiddet Faktörü ( $MPa \cdot m^{1/2}$ ) - (Çatlak Ucu Arka Kenarı)									
Yükleme Açısı (°)											
M-I/II&M-I/III	M-II/III	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$	
	15	12,00	0,47	-0,67	13,28	0,48	-0,76	15,28	2,22	-1,16	
15	15	45	11,52	0,79	-1,28	14,04	1,51	-1,66	15,01	3,01	-2,03
	75	11,53	0,90	-1,59	13,19	1,88	-1,66	14,70	1,71	-2,08	
	15	7,98	2,05	-2,11	8,95	3,15	-2,46	11,05	5,83	-3,04	
45	45	45	8,21	3,16	-3,97	10,68	6,02	-4,85	11,90	7,10	-5,36
	75	8,26	3,46	-4,83	10,51	6,91	-6,17	11,77	9,62	-7,12	
	45	2,41	4,63	-5,57	2,82	9,24	-7,09	3,74	12,06	-7,99	
75	75	60	2,98	4,81	-6,01	3,70	10,41	-7,77	4,16	12,23	-8,59
	75	2,85	4,86	-6,60	3,30	10,18	-8,47	4,32	12,77	-9,53	



Şekil 2.102. Farklı yükleme açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu arka kenarından elde edilen GSF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75°.





Şekil 2.102. Farklı yüklemeye açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu arka kenarından elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75°. (Devamı)

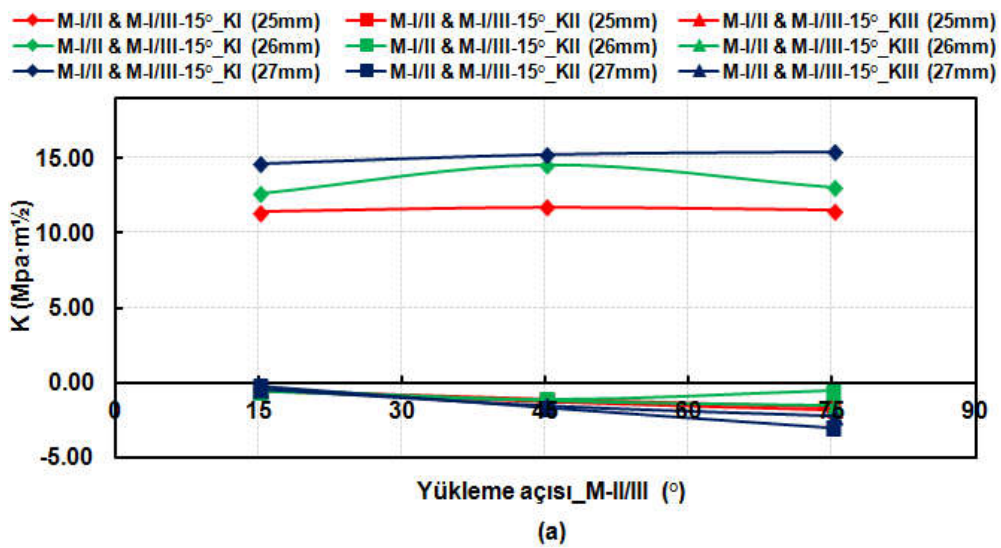
Son olarak, Tablo 2.21.'de çatlak ucu ön kenarından elde edilen GŞF değerleri ve Şekil 2.103.'te ise GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı verilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin sonuçları değerlendirildiğinde, tutarlı sonuçların elde edildiği ve belirlenen yüklemeye açıları bakımından, genel üç boyutlu yüklemeye durumunu geniş bir perspektifte değerlendirilebilecek şekilde test matrisinin oluşturulduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarını ve test konfigürasyonunu



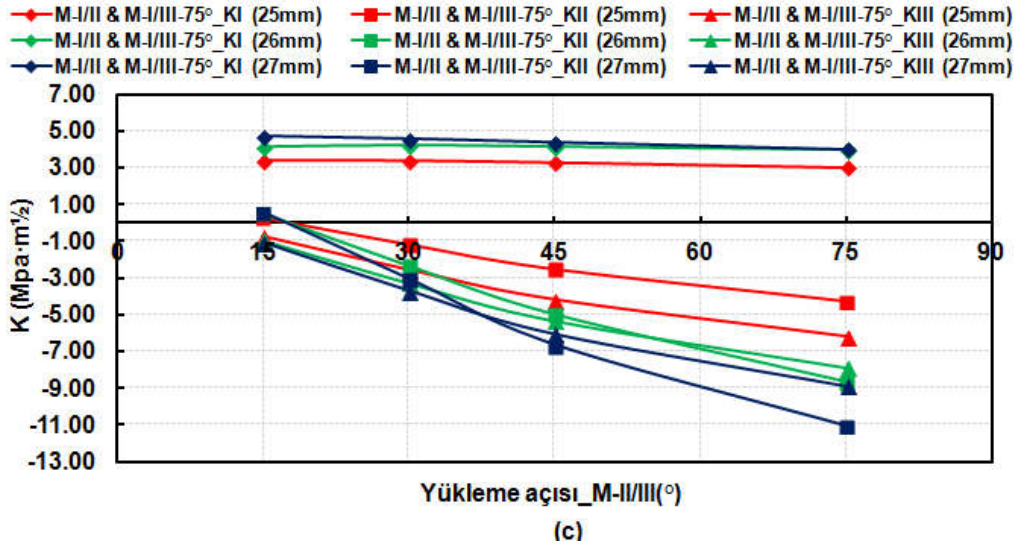
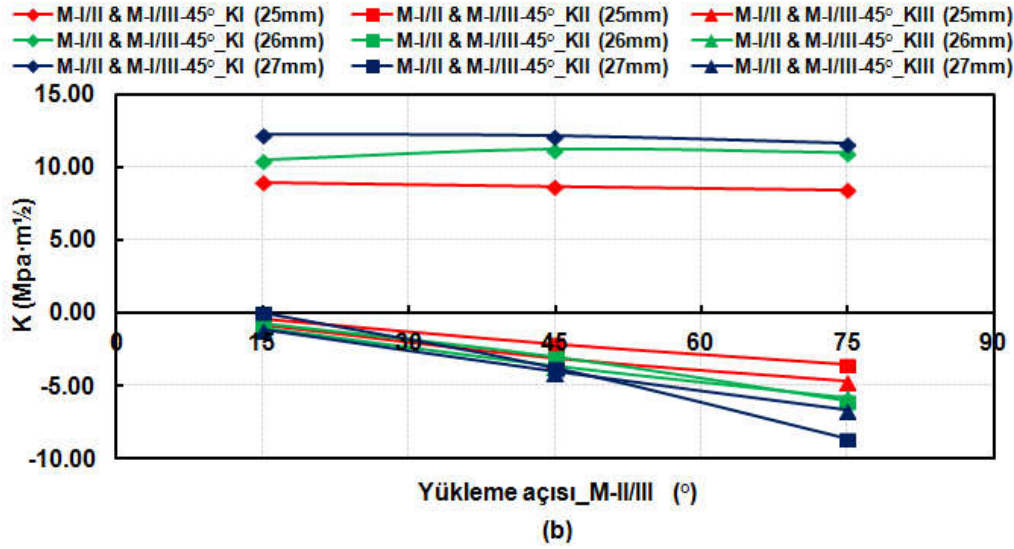
doğrulamak için CTST numunesi için de strain-gage doğrulama çalışması gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde verilmiştir.

Tablo 2.21. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için çatlak ucu ön kenarından elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri.

			Çatlak Uzunluğu								
			25 mm			26 mm			27 mm		
Yükleme Açısı (°)			Gerilme Şiddet Faktörü ( $MPa \cdot m^{1/2}$ ) - (Çatlak Ucu Ön Kenarı)								
			M-I/II&M-I/III	M-II/III	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$	$K_I$
15	15	15	11,40	-0,54	-0,49	12,66	-0,60	-0,40	14,65	-0,24	-0,47
		45	11,76	-1,09	-1,25	14,53	-1,10	-1,22	15,24	-1,70	-1,56
		75	11,54	-1,60	-1,82	13,07	-0,56	-1,57	15,41	-3,08	-2,23
45	45	15	9,00	-0,36	-0,87	10,52	-0,77	-1,07	12,22	-0,01	-1,13
		45	8,70	-2,10	-3,14	11,22	-3,04	-3,63	12,13	-3,79	-4,01
		75	8,43	-3,51	-4,71	10,98	-6,05	-5,78	11,63	-8,66	-6,65
75	75	45	3,26	-2,52	-4,16	4,18	-4,97	-5,32	4,40	-6,62	-6,04
		60	2,87	-3,54	-5,14	3,72	-7,51	-6,63	4,03	-8,79	-7,36
		75	3,01	-4,28	-6,18	4,04	-8,68	-7,89	4,04	-11,04	-8,88



Şekil 2.103. Farklı yükleme açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu ön kenarından elde edilen GSF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75°.

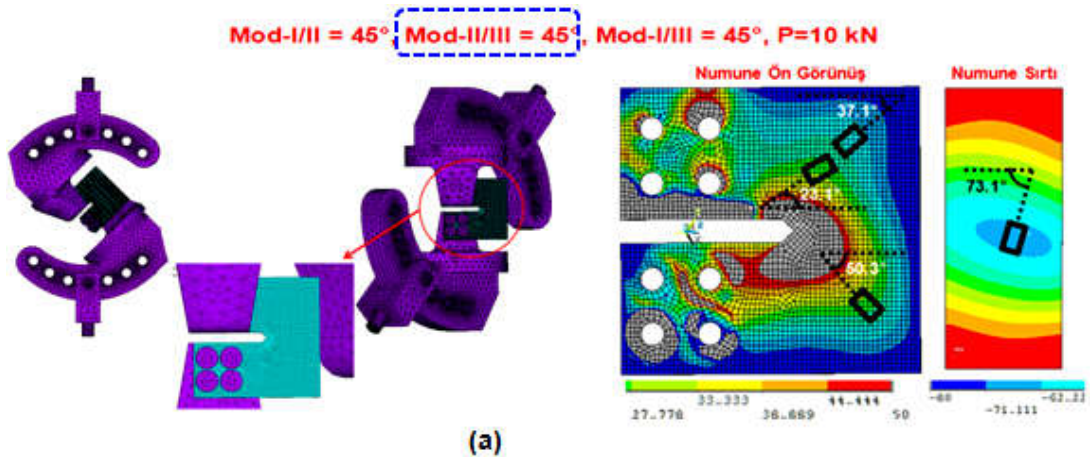


Şekil 2.103. Farklı yüklemeye açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu ön kenarından elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75°. (Devamı)

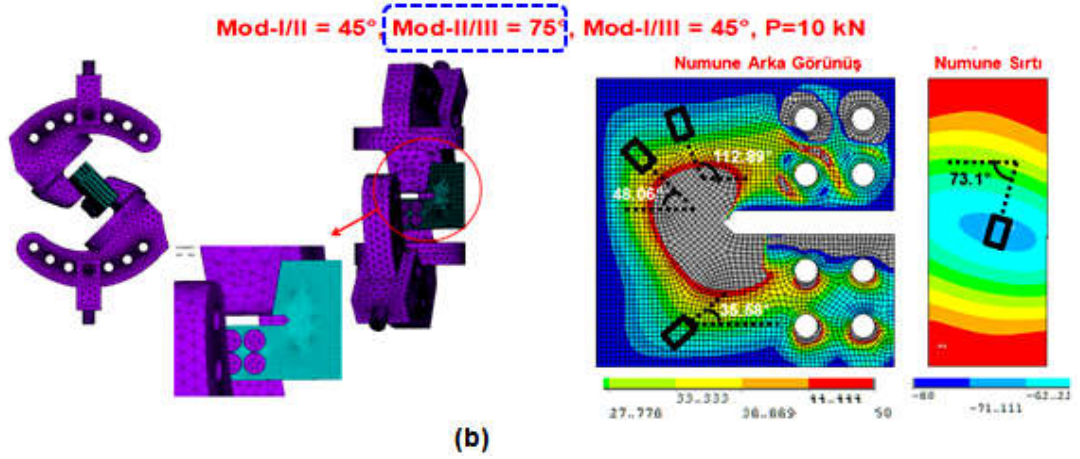
### 2.5.3. Mod-I/II/III CTST numunesi strain-gage doğrulama çalışması

Bu bölümde, ön çatlaksız CTST numunesi ile strain-gage uygulaması gerçekleştirilerek simülasyon sonuçlarının deney sonuçlarını karşılayıp karşılamadığı ile ilgili doğrulama çalışması yapılmıştır. Mod-I/II/III yüklemesinde yüklemeye kombinasyonu geniş bir yelpazede olduğu için 2 adet yüklemeye açısı belirlenerek bu

yüklemeye açıları için strain-gage doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yüklemeye açıları, "mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45°" ve mod-III etkisi 30° daha artırılarak "mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45°" yüklemeye durumlarıdır. Öncelikle ön çatlaksız 25 mm kalınlıktaki CTST numunesi ile tutucu, pim ve civatalar kullanılarak daha önceki simülasyonlarda olduğu gibi modelleme, bölüntüleme (meshleme), yüzey ilişkisi (contact) tanımlama gibi işlemler birebir uygulanarak, belirlenen yüklemeye açılarında 10 kN yüklemeye gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrası numunede oluşan asal gerilmeler ve yönleri belirlenerek strain-gagelerin yerleştirileceği yer ve açıları belirlenmiştir. Gerilme analizi öncesinde bölüntülenmiş (meshlenmiş) konfigürasyonların farklı açılarından görünümü ve belirlenen strain-gagelerin yerleştirileceği yer ve açıları Şekil 2.104.'te verilmiştir. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yüklemeye durumu için numunenin ön yüzeyine 3, sırtına 1 adet ve mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=75° yüklemeye durumu için numunenin arka yüzeyine 3 adet olmak üzere numuneye toplam 7 adet strain-gage yerleştirilmiştir.

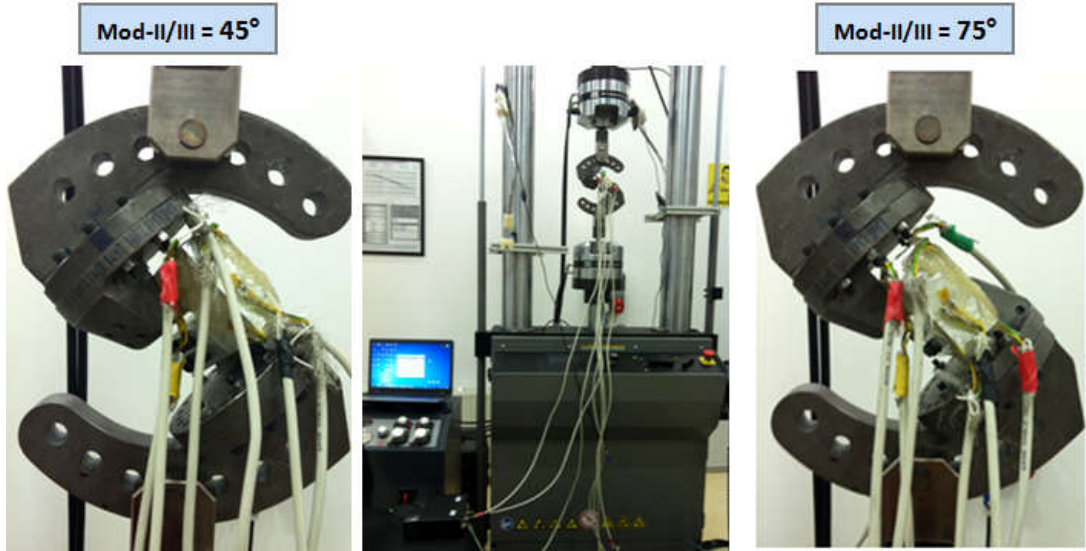


Şekil 2.104. Strain-gage uygulaması için oluşturulan sonlu eleman modelleri ve analiz sonrası strain-gagelerin yerleştirileceği yerlerin belirlenmesi, (a) mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45°, (b) mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yüklemeye durumu.



Şekil 2.104. Strain-gage uygulaması için oluşturulan sonlu eleman modelleri ve analiz sonrası strain-gagelerin yerleştirileceği yerlerin belirlenmesi, (a) mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45°, (b) mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yükleme durumu. (Devamı)

Deney esnasında yükleme sıfırdan başlayarak ikişer kN artırılarak 10 kN yüke çıkarılmış, daha sonra ikişer kN azaltılarak yüksüz konuma getirilmiştir. Şekil 2.105.'te her iki yükleme durumu için gerçekleştirilen deneylerden bir kesit görüntüsü verilmiştir.

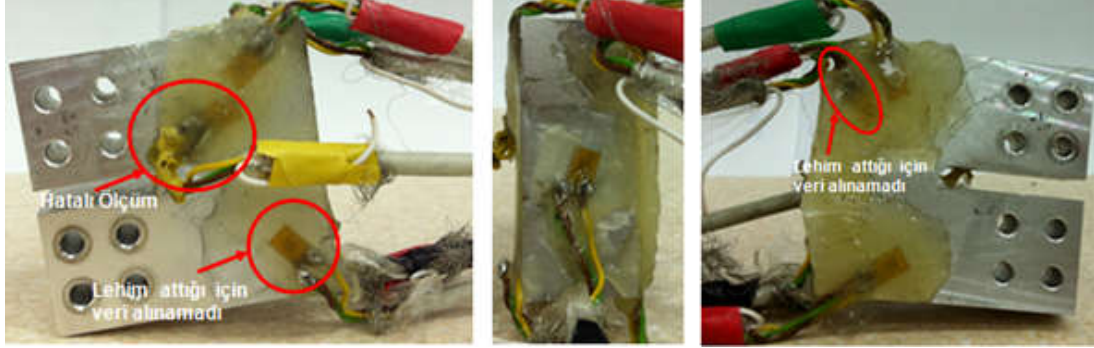


Şekil 2.105. Strain-gage deneyleri esnasında cihazın ve test sisteminin genel görünümü.

Şekil 2.106.'da numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü verilmiştir. Numune ön yüzeyinde çentik ucuna yakın kısımda yer alan strain-gageten hatalı ölçüm alındığı için, bu strain-gageten alınan ölçümler değerlendirmeye alınmamıştır. Ayrıca numune ön yüzeyinin alt kısmında yer alan ve numune arka yüzeyinin üst

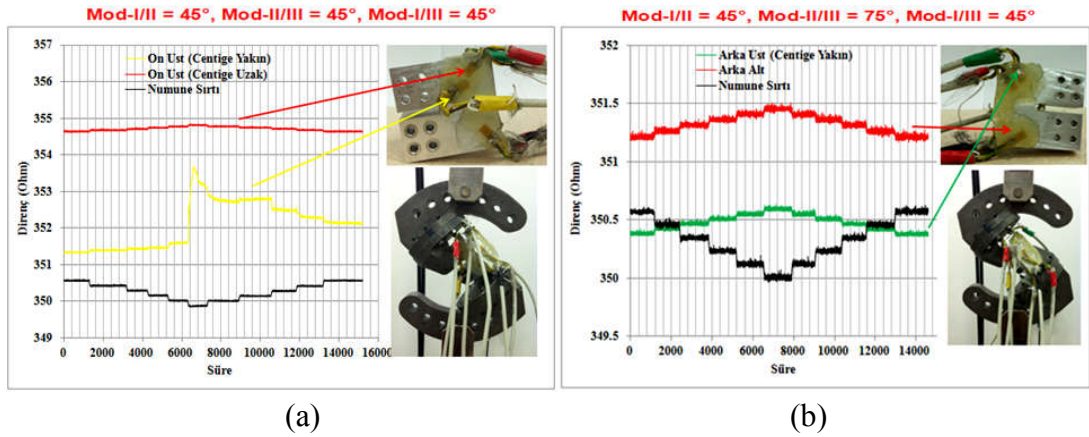


kısmında yer alan strain-gagelerin lehimini attığı için bu strain-gagelerden veri alınamamıştır.



Şekil 2.106. Her iki yüklemeye açıları için numuneye yapıştırılan strain-gagelerin görüntüleri.

Uygulanan farklı yükler sonucunda deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin değişen yüklere bağlı olarak zamanla değişim grafiği Şekil 2.107.'de verilmiştir. Bu şekilde hem yüklemeler arasında birim şekil değişiminin lineer değişip değişmediği kontrol edilmekte hem de ilgili değerler simülasyon sonucu ile mukayese edilerek her bir yük aralığındaki % fark hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.107. Deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin değişen yüklere bağlı olarak zamanla değişim grafiği, (a) mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45°, (b) mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yüklemeye durumu.

Simülasyonlar 10 kN yüklemeye durumunda gerçekleştirildiği için, deney sonrası herhangi iki yük arasındaki birim şekil değişimi hesaplandıktan sonra aradaki yük farkının 10 kN olması durumunda beklenen değer, lineer interpolasyon yöntemiyle hesaplanarak, simülasyon sonucunda elde edilen değer ile mukayese

edilebilmektedir. Tablo 2.22.'de öncelikle, yüksüz durumdan 10 kN yüke kadar artış esnasındaki her bir yük farkına karşılık gelen birim şekil değişim (strain) değerleri her iki yükleme durumu için ölçülerek, simülasyondan elde edilen birim şekil değişim değerleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Son olarak ise yüksüz durum referans alınarak 10 kN'a kadar olan her bir artış için oluşan birim şekil değişimleri karşılaştırılmıştır. Simülasyon 10 kN yükte gerçekleştirildiği için, deneyde 0-10 kN arası elde edilen değerler referans alınarak karşılaştırma yapılmış ve değerler arasındaki % fark son satırda verilmiştir. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme durumu için (Tablo 2.22.a) elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, numune ön yüzeyinin üst kısmında yer alan strain-gage yaklaşık %8, sırtında yer alan strain-gageden alınan ölçümlerde ise yaklaşık %3 hata oranı ile analiz ve deney sonuçlarının örtüşüğünü göstermektedir. Mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yükleme durumunda ise (Tablo 2.22.b), numune arka yüzeyinin alt kısmında yer alan strain-gageten alınan ölçümlerde %6,5 hata oranı ile simülasyon ve deney sonuçlarının örtüştüğü görülmektedir. Numune arka yüzeyinin üst kısmında yer alan strain-gage için ise simülasyon ve deney sonuçları arasında yaklaşık %22,6 fark gözlenmiştir. Numune sırtına yerleştirilen strain-gage ise mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısında gerçekleştirilen analiz sonucuna göre yerleştirilmiştir. Numune sırtına yerleştirilebilecek strain-gage alanının dar olmasından dolayı bu yükleme açısı için numune sırtına ikinci bir strain-gage yerleştirilmemiş ve mevcut strain-gageten veriler alınmıştır. Bu verilere göre numune sırtında yer alan strain-gage için ise simülasyon ve deney sonuçları arasında yaklaşık %24 fark gözlenmiştir.

Tablo 2.22. Simülasyondan elde edilen birim şekil değişimi değerleri ile deneyde ölçülen değerlerin karşılaştırılması (a) mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45°, (b) mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yükleme durumu.

	Ön Üst Çentiğe Uzak	% Fark	Numune Sırtı	% Fark
0-2 kN yüklemde $\epsilon$	0,000210	-8,95	-0,000874	-3,15
0-4 kN yüklemde $\epsilon$	0,000209	-9,67	-0,000859	-4,85
0-6kN yüklemde $\epsilon$	0,000206	-10,92	-0,000851	-5,70
0-8kN yüklemde $\epsilon$	0,000204	-11,49	-0,000859	-4,82
0-10kN yüklemde $\epsilon$	0,000212	-8,17	-0,000875	-3,02
	Ön Üst Çentiğe Uzak	% Fark	Numune Sırtı	% Fark
10 kN yüklemde $\epsilon$ (ANSYS Çözümü)	0,000231	-8,17	-0,000902	-3,02

(a)

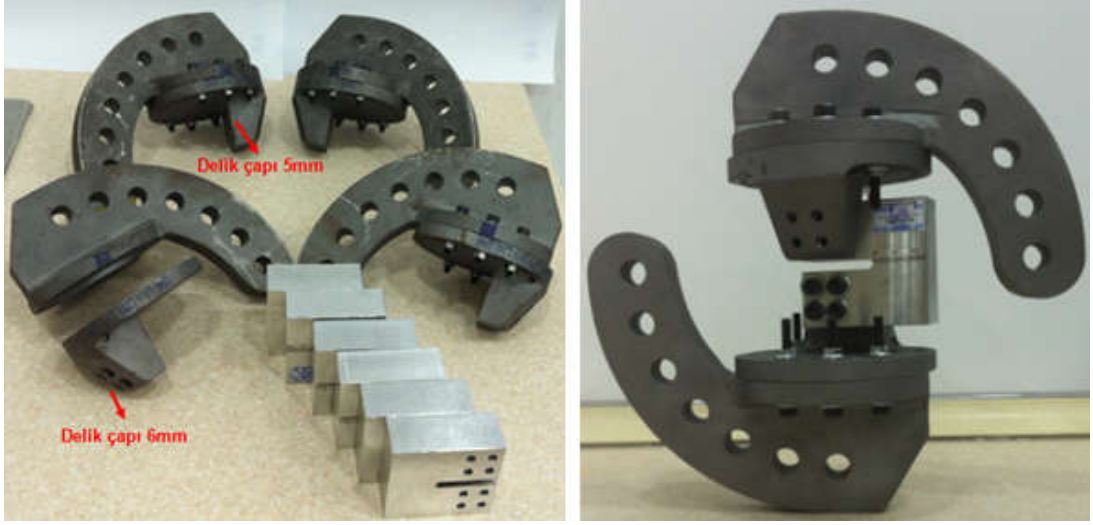
Tablo 2.22. (Devamı)

	Arka Üst Çentiğe Yakın	% Fark	Arka Alt	% Fark	Numune Sırtı	% Fark
0-2 kN yüklemde $\epsilon$	0,000270	-22,07	0,000321	-3,78	-0,000692	-27,04
0-4 kN yüklemde $\epsilon$	0,000272	-21,41	0,000335	0,57	-0,000706	-25,48
0-6kN yüklemde $\epsilon$	0,000266	-23,10	0,000322	-3,50	-0,000710	-25,07
0-8kN yüklemde $\epsilon$	0,000263	-23,86	0,000318	-4,62	-0,000711	-24,95
0-10kN yüklemde $\epsilon$	0,000268	-22,65	0,000312	-6,55	-0,000718	-24,28
	Arka Üst Çentiğe Yakın	% Fark	Arka Alt	% Fark	Numune Sırtı	% Fark
10 kN yüklemde $\epsilon$ (ANSYS Çözümü)	0,000346	-22,65	0,000333	-6,55	-0,000948	-24,28

(b)

#### 2.5.4. Mod-I/II/III CTST numunesi kırılma tokluğu testleri

CTST numunesinin mod-I/II/III kırılma tokluğu deneyleri, Sakarya Üniversitesi'nde bulunan MTS 100 kN-1100 Nm kapasiteli yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. CTST numunesine uygun olarak tasarlanan ve ayrıntılı ölçüleri Bölüm 2.5.2.'de verilen mod-I/II/III CTST tutucusu tasarım boyutlarına uygun olarak üretilmiş ve Şekil 2.108.'de tutucu ve numunelerin olduğu genel bir görünüm verilmiştir. "Mod-I/II=75°, mod-II/III=15°, mod-I/III=75°" ve "mod-I/II=75°, mod-II/III=30°, mod-I/III=75°" yükleme açıları için gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinde cıvatalara gelen yüksek kesme yüklerinden dolayı cıvatalar kırılmıştır. Tutucu kulağında yer alan 4 adet deliğin çapı 5 mm'den 6 mm'ye çıkarılarak ikinci bir mod-I/II/III CTST-numune tutucusu üretilmiş (Şekil 2.108) ve mod-I/II ve mod-I/III=75° yükleme açısı için mod-II/III=45°, 60° ve 75° yükleme açılarında kırılma tokluğu deneyleri bu tutucu ile 6 mm çapında cıvatalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.109.'da ise mod-I/II/III CTST numune tutucusunun mod-II/III yüklemesi yapabilmesi için tasarlanan ve kaynak işlemi ile tutucuya tutturulan aparat ve tutucunun ve mod-II/III yüklemesini sağlayan tutucu kulağının yakın görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.108. CTST numunesi ve tasarım boyutlarına uygun olarak üretilen tutucu aparatlarının genel görünümü.



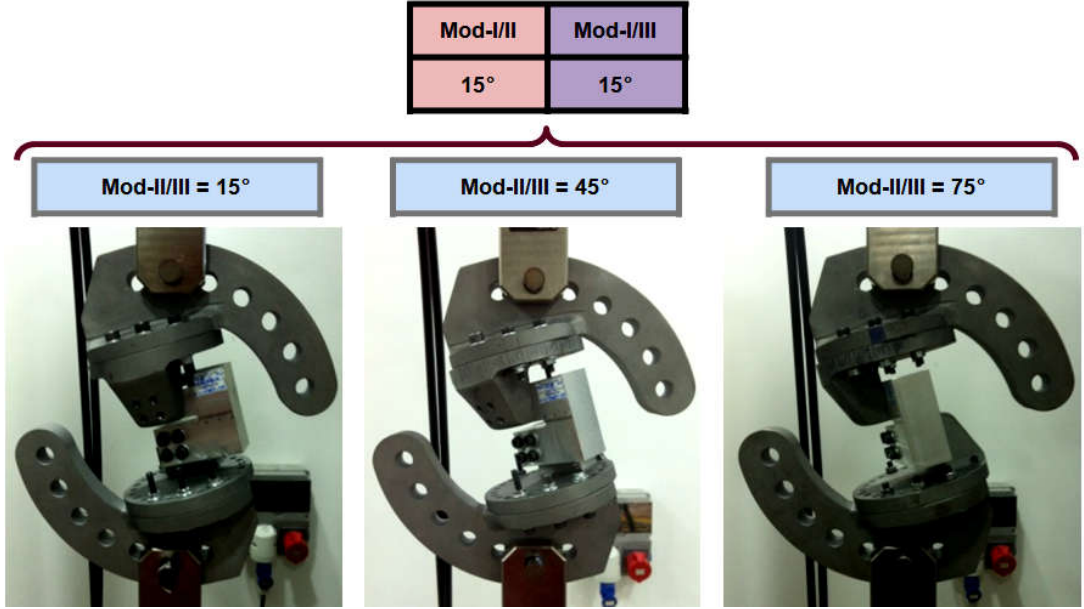
Şekil 2.109. Mod-I/II/III CTST numune tutucusunun mod-II/III yüklemesi yapabilmesi için tasarlanan ve kaynak işlemi ile tutucuya tutturulan aparat ve tutucunun yakın görünümü.

CTST numunesi mod-I/II/III kırılma tokluğu testlerinden önce yorulma cihazı kullanılarak, her bir numunede 2,5 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Bir önceki dönemde Richard ve T-numunelerinde olduğu gibi CTST numuneleri için de ön çatlak oluşturulurken R-oranı ( $K_{min}/K_{max}$ ) 0,1 alınmıştır.

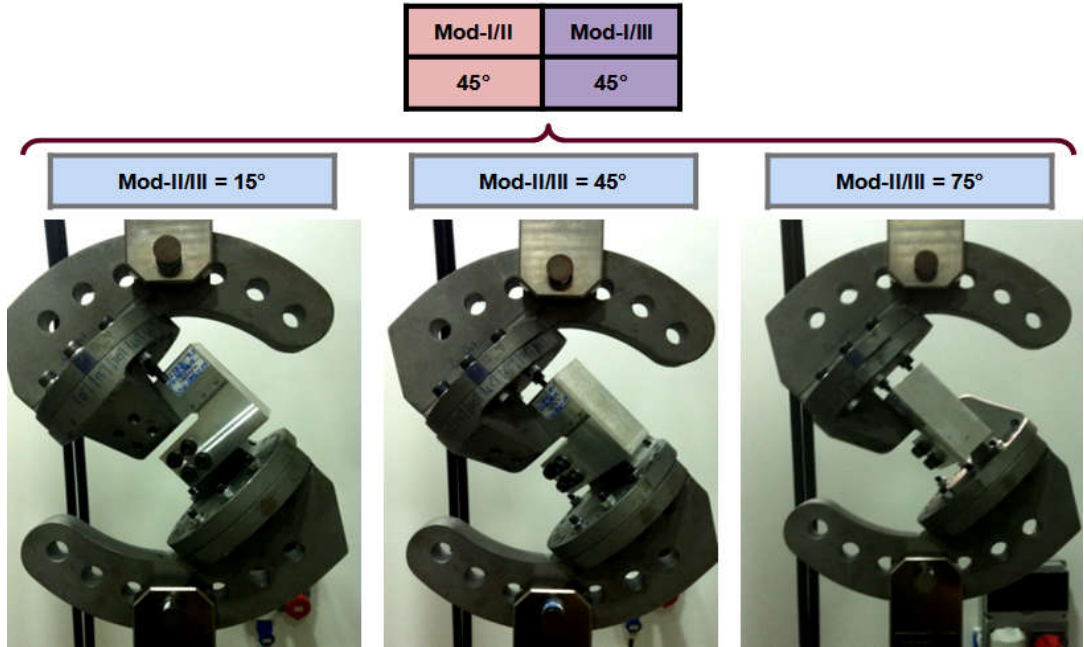
Şekil 2.110.'da, bir önceki bölümde analiz sonuçları verilen farklı yükleme açıları için gerçekleştirilmiş kırılma tokluğu testlerinden birer kesit temsili olarak



verilmiştir. Her açıda ikişer adet olmak üzere CTST numunesi kullanılarak toplam 18 adet mod-I/II/III kırılma tokluğu deneyi gerçekleştirilmiştir.

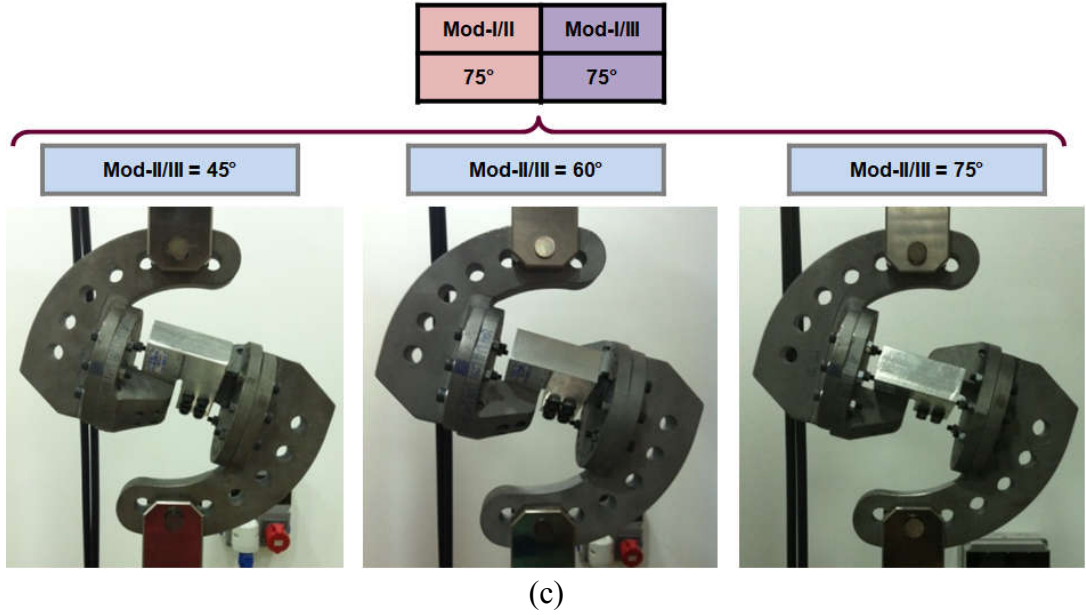


(a)



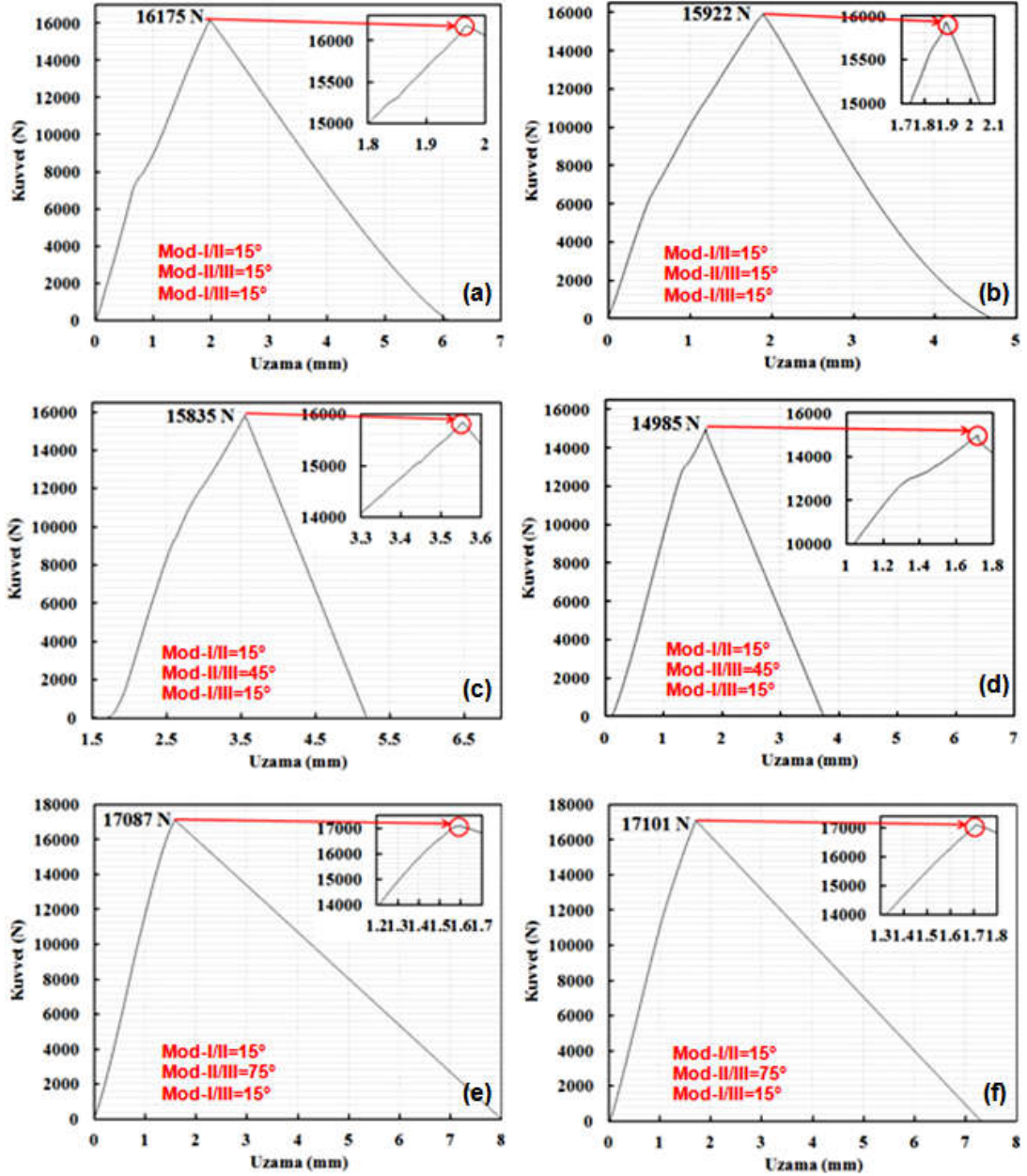
(b)

Şekil 2.110. Farklı yükleme açılarında gerçekleştirilen CTST numunesi kırılma tokluğu testlerinden birer kesit, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° yükleme durumu.



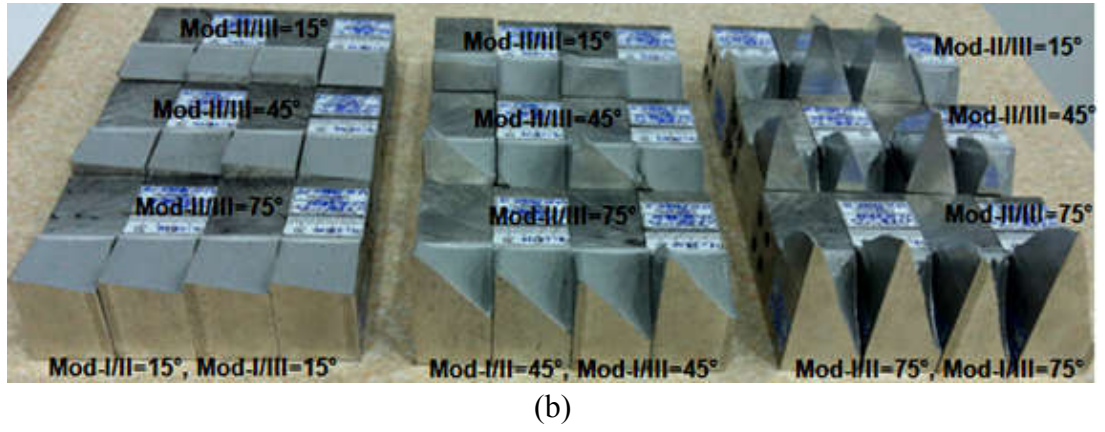
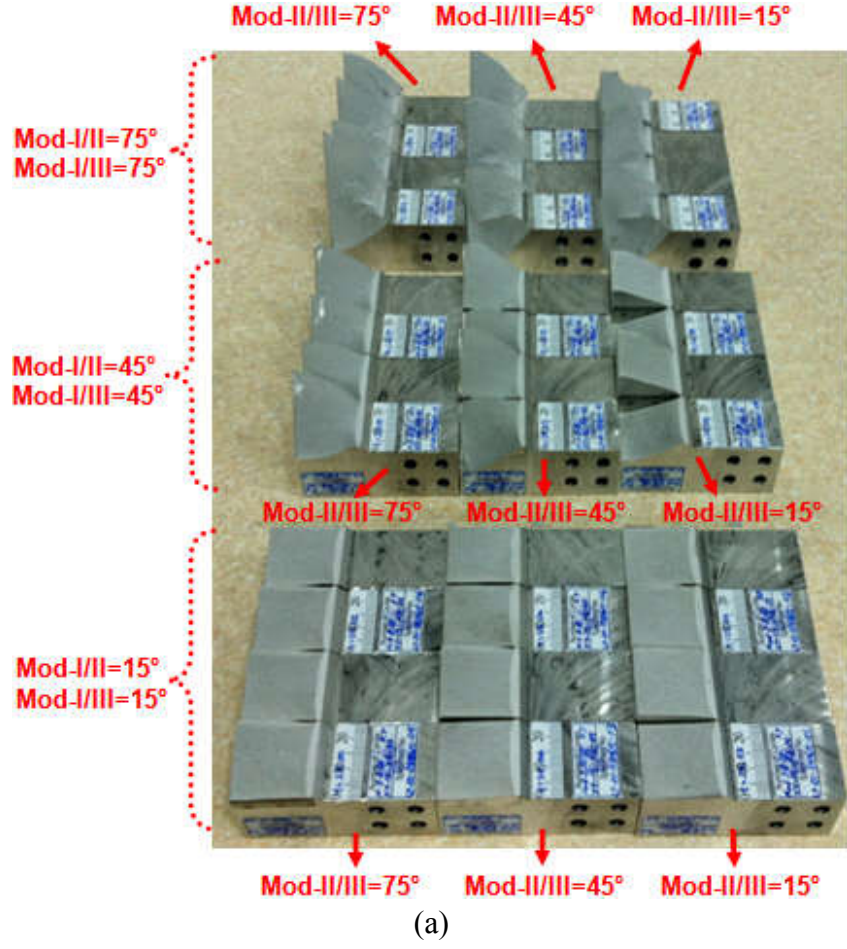
Şekil 2.110. Farklı yükleme açılarında gerçekleştirilen CTST numunesi kırılma tokluğu testlerinden birer kesit, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° yükleme durumu. (Devamı)

Testler sonrasında cihazdan alınan kuvvet-uzama verileri Excel programı yardımıyla çizdirilerek kopma yükleri ASTM E399-12 standardında belirtilen kriterlere uyularak belirlenmektedir. Şekil 2.111.'de mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açıları için oluşturulan kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir. Gerçekleştirilen tüm testler için aynı şekilde kuvvet-uzama eğrileri çizdirilerek kopma yükleri belirlenmiştir. Şekilde verilen kopma yüklerinden de görüldüğü gibi tekrar edilebilir ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



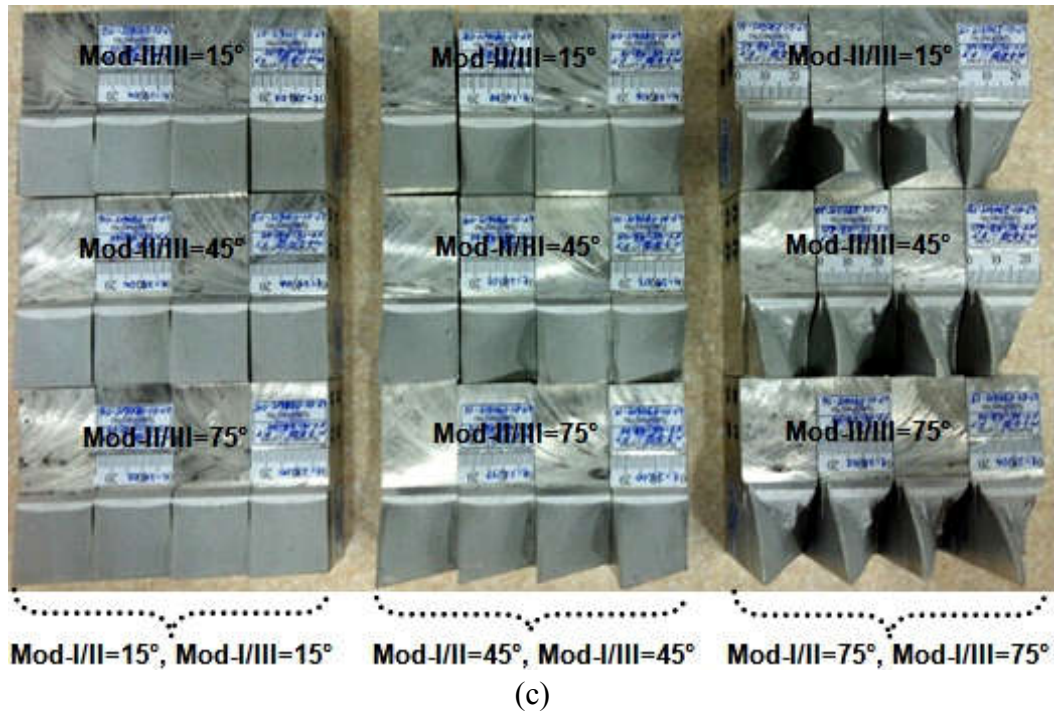
Şekil 2.111. Mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açılarında gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra elde edilen kopma yüklerinin uzamaya bağlı olarak değişim grafikleri.

Şekil 2.112.'de, belirlenen açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra CTST numunelerinin kırık yüzeylerinin ön açıdan, yan açıdan ve üstten genel görünüşleri verilmiştir.



Şekil 2.112. Farklı açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra CTST-numunelerinin kırılan yüzeylerinin (a) ön açıdan, (b) yan açıdan, (c) üstten genel görünümü.





Şekil 2.112. Farklı açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra CTST-numunelerinin kırılan yüzeylerinin (a) ön açıdan, (b) yan açıdan, (c) üstten genel görünümü. (Devamı)

Tablo 2.23.'te, gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçları özet olarak verilmiştir. Bölüm 2.6.5.'te bu sonuçlar literatürdeki mevcut kriterler ile kıyaslanarak ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Tablo 2.23. CTST-numunesi kırılma tokluğu test sonuçları.

Numune No	Yükleme Açısı (°)		Kalınlık (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	Kopma Yüğü (kN)
	M-I/II & M-I/III	M-II/III			
CTST-01	15	15	25,03	26,56	16,18
CTST-02	15	15	25,04	26,72	15,92
CTST-03	15	45	25,06	26,83	15,84
CTST-04	15	45	25,04	27,10	14,99
CTST-05	15	75	25,00	26,50	17,09
CTST-06	15	75	25,02	26,49	17,10
CTST-07	45	15	25,06	26,49	20,84
CTST-08	45	15	24,98	27,03	20,67
CTST-09	45	45	25,01	26,61	22,10
CTST-10	45	45	25,03	26,62	21,69

Tablo 2.23. (Devamı)

CTST-11	45	75	25,00	26,50	23,82
CTST-12	45	75	24,99	26,51	22,99
CTST-13	75	45	25,00	26,44	38,43
CTST-14	75	45	25,00	26,52	39,43
CTST-15	75	60	25,00	26,06	37,58
CTST-16	75	60	25,00	26,59	38,11
CTST-17	75	75	25,04	26,47	36,77
CTST-18	75	75	25,02	26,77	36,68

### 2.5.5. Mod-I/II/III CTST numunesi çatlak ilerleme testleri

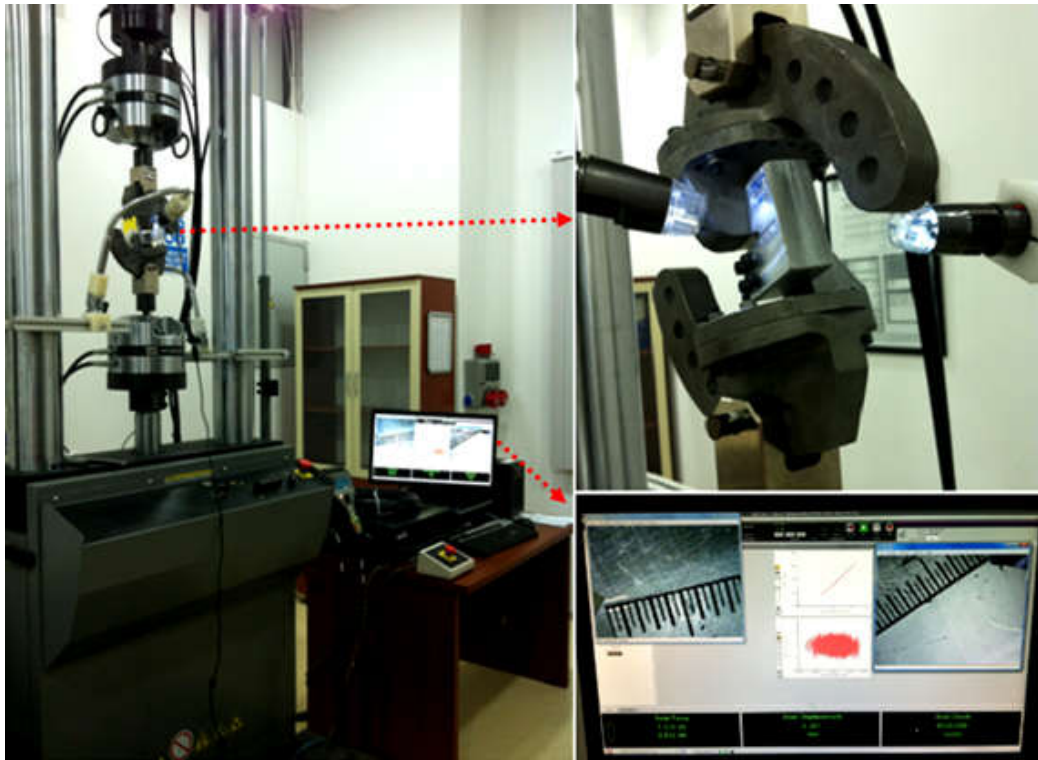
CTST numune mod-I/II/III çatlak ilerleme testleri de, Sakarya Üniversitesi'nde bulunan MTS marka 100 kN-1100 Nm kapasiteli aksenal-torsiyonel yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. da/dN testlerinde yük belirli limitler arasında çevrimli olarak uygulandığı için cıvatalarda kırılma sorunu yaşanmış ve bu yüzden kırılma tokluğu deneylerinde uygulanan yükleme açılarından farklı olarak "mod-I/II=75°, mod-II/III=60°, mod-I/III=75°" yerine "mod-I/II=75°, mod-II/III=15°, mod-I/III=75°" ve "mod-I/II=75°, mod-II/III=30°, mod-I/III=75°" yükleme açıları için da/dN testleri gerçekleştirilmiştir.

Mod-I/II/III da/dN testlerinden önce her bir numuneye 2,5 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Ön çatlak oluşumu için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı, standartta yer alan;  $(K_{max})_{son}$  ön çatlak  $\leq (K_{max})_{başlangıç}$  testi limitine göre belirlenmiştir. Mod-I/II/III da/dN testi için yorulma ön çatlağı mod-I açılma modunda oluşturulmaktadır. Bu yüzden yorulma ön çatlağının oluşturulması için gerekli olan yük aralığı, her açılı yükleme durumu için aynı alınmıştır.

Her bir yükleme açısı için yorulma ön çatlağı oluşturulduktan sonra da/dN testleri için yük aralıkları belirlenerek mod-I/II/III testleri gerçekleştirilmiştir. Yük aralıklarının belirlenmesinde daha önceki karışık mod testlerinde izlenen yöntemlerden farklı olarak, yorulma deneyi yük aralıkları mevcut kriterlerden

hesaplanan kritik yük değerlerine göre belirlenmemiştir. Karışık mod-I/II testlerinde mod-II yükleme tipinin baskın olduğu yükleme durumlarında deneylerden elde edilen kopma yükleri ile kriterlere göre hesaplanan kopma yükleri arasında sapma gözlemlendiği için, her bir yükleme açısı için uygulanması gereken yorulma yük aralıkları kendi yapmış olduğumuz kırılma tokluğu deneylerinden elde edilen kopma yükleri baz alınarak belirlenmiştir.

Mod-I/II/III çatlak ilerleme testlerinde çatlak ucu ön ve arka kenarındaki çatlak ilerleme yön ve hızları farklı olduğu için test esnasında çatlak ilerlemesinin takibi için iki adet kamera kullanılarak, çevrim sayısı ile birlikte çatlak ilerlemeleri takip edilerek (Şekil 2.113), her 30 saniyede bir bilgisayar üzerindeki ekran görüntüsü otomatik olarak bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 2.113. Gerçekleştirilen mod-I/II/III da/dN testlerinden bir kesit görünümü.

Şekil 2.114.'te, belirlenen yükleme açılarında gerçekleştirilen da/dN testleri sonrasında numunelerin kırılan yüzeylerinin farklı açılardan genel görünimleri verilmiştir. Gerçekleştirilen da/dN test verileri Bölüm 3.5.'te mevcut ve iyileştirilmiş mod-I/II/III kriterleri ile birlikte ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.114. Farklı yüklenme açılarında gerçekleştirilen da/dN testleri sonrasında kırılan numunelerin farklı açılardan görünüşleri, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15° ve mod-II/III=15°-45°-75°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45° ve mod-II/III=15°, 45° ve 75°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° ve mod-II/III=15°, 30° ve 45° yüklenme açıları.

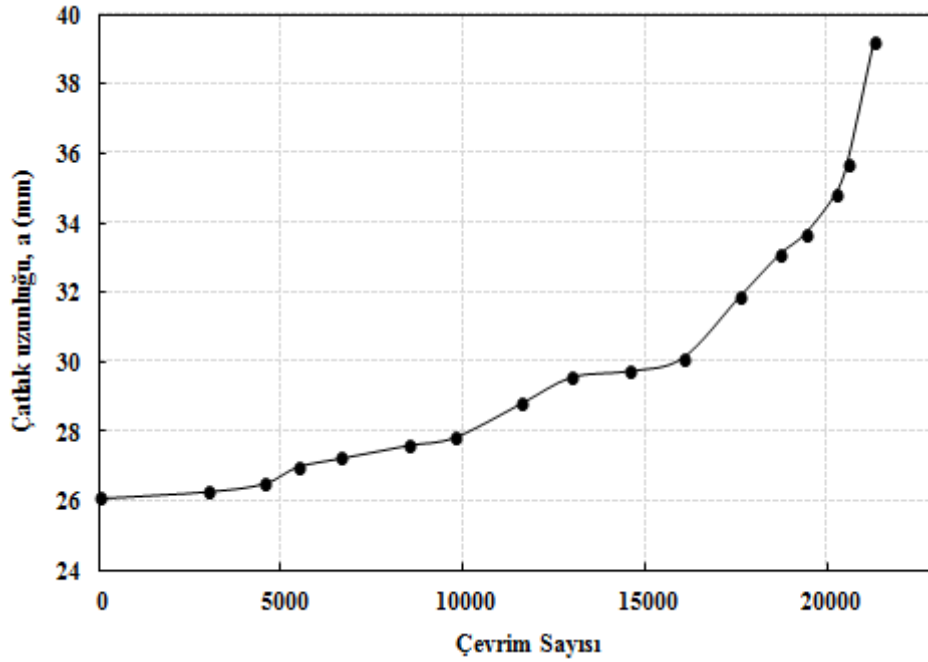




(c)

Şekil 2.114. Farklı yüklem açılarında gerçekleştirilen da/dN testleri sonrasında kırılan numunelerin farklı açılardan görünüşleri, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15° ve mod-II/III=15°-45°-75°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45° ve mod-II/III=15°, 45° ve 75°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° ve mod-II/III=15°, 30° ve 45° yüklem açıları. (Devamı)

da/dN testleri gerçekleştirilirken numune ön ve arka yüzeyinde bulunan çatlakların çevrim sayılarına göre ilerleyişi kameralar ile kaydedilmektedir. Şekil 2.115.'te mod-I/II=45°, mod-I/III=45° ve mod-II/III=45° yüklem açısında gerçekleştirilen da/dN testi esnasında çatlakın numune ön yüzeyinde bulunan uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi temsili olarak verilmiştir.



Şekil 2.115. Mod-I/II=45°, mod-I/III=45° ve mod-II/III=45° yüklem açısında gerçekleştirilen da/dN testi esnasında çatlakın numune ön yüzeyinde bulunan uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi.

## 2.6. Karışık Modlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Değerlendirilmesi ve Literatür Modelleri ile Karşılaştırılması

Endüstriyel alanlarda karşılaşılan çatlak ve kırılma problemlerinin sebebi, makine parçalarının karmaşık yükler altında yorulmaya maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Son yirmi-otuz yıla kadar yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak basit mod-I yüklemesi altında malzemelerin çatlak ilerleme davranışının incelenmesi üzerine olmuştur. Ancak mühendislik malzemeleri, çalışma koşulları bakımından mod-II ve mod-III yüklemeye tiplerinin de olduğu, karışık mod yüklerle de maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden son yıllarda karışık modlu çatlak ilerleme deneyleri de önem kazanmış, karışık modlu yükler altında farklı malzeme grupları test edilmiş ve farklı çatlak ilerleme modelleri (kriterleri) geliştirilmiştir. Bu kriterler yüklemeye durumuna bağlı olarak iki boyutlu ve üç boyutlu karışık mod kırılma ve çatlak ilerleme kriterleri olarak iki kısma ayrılmaktadır. İki-boyutlu kriterler düzlem içi (in-plane) karışık mod-I/II kırılma ve çatlak ilerleme problemlerini, üç boyutlu kriterler ise düzlem dışı (out-of-plane) karışık mod-I/III, II/III ve I/II/III kırılma ve çatlak ilerleme problemlerini kapsamaktadır.

Bu bölümde, literatürde mevcut olan iki ve üç boyutlu kriterler detaylı olarak verilerek, gerçekleştirilen karışık mod-I/II, I/III, II/III ve I/II/III kırılma testlerinin sonuçları, mevcut kriterler ile kıyaslanarak ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

### 2.6.1. İki boyutlu karışık mod kırılma kriterleri

#### 2.6.1.1. Maksimum teğetsel gerilme (maximum tangential stress-MTS) kriteri

Düzlem içi karışık mod yükleme koşulları altında kırılma davranışının tahmini üzerine literatürde bulunan çeşitli çalışmalar arasında en yaygın kriterlerden biri Erdoğan ve Sih'in (1963) önermiş olduğu maksimum teğetsel gerilme kriteridir. Bu kritere göre çatlak, maksimum teğetsel gerilmeye dikey yönde çatlak ucundan radyal olarak ilerler. Eğer bu teğetsel gerilme değeri kritik bir değeri aşarsa veya eşdeğer gerilme şiddet faktörü ( $K_{eş}$ ) değeri kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerine ulaşırsa, çatlak ilerlemesi kararsız hale gelir ve kırılma meydana gelir. Bu kritere göre verilen herhangi bir karışık mod-I/II probleminde,  $K_{eş}$  ve çatlak sapma açısı değerleri aşağıdaki (2.4) ve (2.5) no.lu denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$K_{eş} = \cos \frac{\theta_0}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right] = K_{IC} \quad (2.4)$$

$$\theta_0 = -\arccos \left( \frac{3K_{II}^2 + K_I \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \quad (2.5)$$

#### 2.6.1.2. Maksimum enerji salınım hızı (maximum energy release rate-MERR) kriteri

Maksimum enerji salınım hızı kriteri, Nuismer (1975) ve Hussain ve Pu (1974) tarafından Griffith'in (1920) teorisinden yola çıkarak farklı formlarda ifade edilmiştir. Bu kriter, çatlak ilerlemesinin maksimum enerji salınım hızının olduğu

yönde başladığını varsayar. Kriteria göre, maksimum enerji salınım hızı kritik bir değeri aştığı durumda çatlak kararsız hale gelmektedir. Ayrıca, Nuismer ve Hussain ve Pu 'nun önermiş olduğu enerji esaslı kriterler ile Erdoğan ve Sih 'in önermiş olduğu gerilme esaslı kriterden elde edilen çatlak sapma açısı değerleri aynıdır.

### 2.6.1.3. Minimum birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu (minimum strain energy density-MSED) kriteri

Bir diğer yaygın kırılma kriteri ise, Sih ve Macdonald (1974) tarafından geliştirilen minimum birim şekil değiştirme yoğunluğu kriteridir. Bu kriterde, başlangıç çatlağı minimum birim şekil değiştirme yoğunluğu faktörünün olduğu yönde oluşmaktadır. Malzemeye bağlı olarak değişen birim şekil değiştirme yoğunluk faktörü, kritik bir değere ulaştığı zaman kararsız çatlak ilerlemesi meydana gelmektedir. Mod-I ve mod-II gerilme şiddet faktörleri,  $k_I$  ve  $k_{II}$  aşağıda verilen (2.6) ve (2.7) no.lu denklemlerde yerine koyularak çatlak sapma açısı,  $\theta$  hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} & [2 \cos \theta - (\kappa - 1)] \sin \theta k_I^2 + 2[2 \cos 2\theta - (\kappa - 1) \cos \theta] k_I k_{II} \\ & + [(\kappa - 1 - 6 \cos \theta) \sin \theta] k_{II}^2 = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} & [2 \cos 2\theta - (\kappa - 1) \cos \theta] k_I^2 + 2[(\kappa - 1) \sin \theta - 4 \sin 2\theta] k_I k_{II} \\ & + [(\kappa - 1) \cos \theta - 6 \cos 2\theta] k_{II}^2 > 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

### 2.6.1.4. Maksimum teğetsel birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu (maximum tangential strain energy density-MTSED) kriteri

Chang (1981) tarafından önerilen maksimum teğetsel birim şekil değiştirme kriterini, Koo ve Choy (1991) iyileştirerek maksimum teğetsel birim şekil değiştirme kriteri olarak isimlendirilen yeni bir kriter geliştirmişlerdir. Bu kriter gere çatlak, maksimum teğetsel birim şekil değiştirme enerji yoğunluk faktörü yönünde ilerler ve enerji yoğunluk faktörü kritik bir değere ulaştığı zaman kararsız çatlak ilerlemesi meydana gelir. Enerji yoğunluk faktörü, C'nin denklemi ve denklemde yer alan katsayılar aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$k_i = K_i / \sqrt{\pi} \quad (i=1,2), \quad (2.8)$$

$$C = b_{11} \frac{K_I^2}{\pi} + b_{12} \frac{K_I K_{II}}{\pi} + b_{22} \frac{K_{II}^2}{\pi} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} b_{11} &= (1/64\mu)(1 + \cos \theta)(\kappa + 2 + \cos \theta) \\ b_{12} &= (1/64\mu)(\sin \theta - 3/2 - \kappa - 3 \cos \theta) \\ b_{22} &= (1/64\mu)(3 \sin^2 \theta)(\kappa + 3 \cos \theta) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Düzlem birim şekil değiştirme durumunda,  $\kappa=3-4\nu$  ve düzlem gerilme durumunda,  $\kappa=(3-\nu)/(1+\nu)$ ,  $\nu$ , Poisson oranı ve  $\mu$  malzemenin kayma modülüdür. Çatlak sapma açısı,  $\theta$ , aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial^2 C}{\partial \theta^2} < 0 \quad (2.11)$$

#### 2.6.1.5. Tanaka kriteri

Tanaka (1974), karışık modlu koşullar için empirik bir denklem geliştirmiştir. Bu kriter gere eşdeğer gerilme şiddet faktörü aşağıda verilen (2.12) no.lu denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta K_{eş} = [\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4]^{1/4} \quad (2.12)$$

#### 2.6.1.6. Pook kriteri

Düzlem içi karışık mod problemleri için bir diğer empirik denklem ise Pook (1989) tarafından geliştirilmiştir. Bu kriter gere mod-I ve mod-II GŞF değerleri aşağıda verilen (2.13) no.lu denklemde yerine koyularak eşdeğer GŞF değeri hesaplanmaktadır.

$$\frac{\Delta K_{II}}{\Delta K_{th}} = \left[ 0.08 \left( \frac{\Delta K_I}{\Delta K_{th}} \right)^2 - 0.83 \frac{\Delta K_I}{\Delta K_{th}} + 0.75 \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

### 2.6.1.7. Richard kriteri

Bir diğerk iki boyutlu kriter ise Richard (1985; 1987) tarafından geliştirilmiştir. Richard karışık mod-I/II problemlerinde eşdeğer GŞF ve çatlak sapma açısı değerlerinin hesaplanması için aşağıda (2.14) ve (2.15) nolu denklemler ile verilen empirik eşitlikler önermiş ve bu eşitlikleri kullanarak çok sayıda doğrulama çalışması gerçekleştirmiştir. Bölüm 2.3.'te bu çalışmaların bir kısmına atıfta bulunulmuştur.

$$K_{eş} = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 4(\alpha_1 K_{II})^2} \leq K_{IC} \quad (2.14)$$

$$\theta_0 = \mp \left[ 155.5^\circ \frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right] - 83.4^\circ \left[ \frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right]^2 \quad (2.15)$$

Denklem (2.14)'te yer alan  $\alpha_1$ ,  $K_{IC}/K_{IIC}$  oranını ifade eden bir malzeme parametresidir ve genellikle 1.155 değerini almaktadır.

Literatürde yaygın olarak kullanılan düzlem içi karışık mod-I/II kırılma ve çatlak ilerleme kriterlerinin bir özeti verilmiştir. Geliştirilen kriterler, enerjiye dayalı veya gerilmeye dayalı olarak geliştirilmiş kriterlerdir. Bazı kriterler ise gerçekleştirilen deneylere bağlı olarak geliştirilmiş empirik denklemlerden oluşmaktadır. İlerleyen bölümlerde, karışık mod-I/II deneylerinden önce gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerlerini, karışık mod-I/II deneylerinden elde edilen kopma yüklerini ve çatlak sapma açısı değerlerini kullanarak, yukarıda detayları verilen bu kriterler değerlendirilecektir.

## 2.6.2. Üç boyutlu karışık mod kırılma kriterleri

### 2.6.2.1. Minimum birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu (minimum strain energy density- $S_{\min}$ ) kriteri

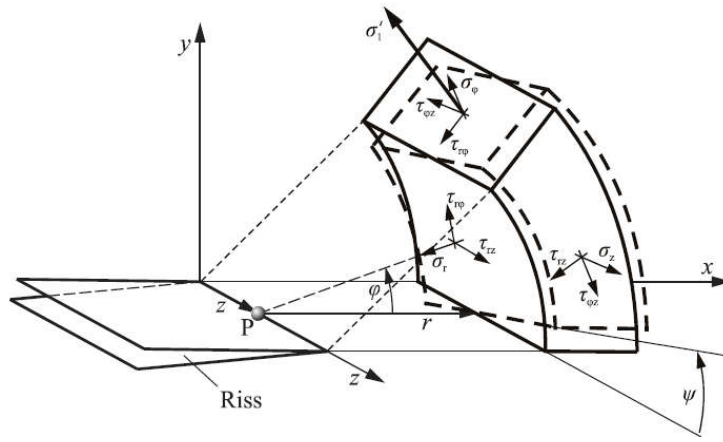
Bir önceki bölümde Sih ve Macdonald 'ın (1974) iki boyutlu karışık mod problemleri için geliştirmiş olduğu, iki boyutlu minimum birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu kriteri verilmişti. Sih (1974) üç boyutlu karışık mod-I/II/III problemleri için de bir kriter geliştirmiştir. Bu kritere göre çatlak, çatlak ucu etrafında birim şekil değiştirme enerjisini (S) minimize eden  $\theta=\theta_0'$  yönünde ilerler.  $\theta=\theta_0'$  için minimize edilmiş eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması ile ilgili geliştirilen denklem aşağıda verilmiştir.

$$K_{eş}^2 = \frac{1}{4(1-2\nu)} \left\{ \begin{aligned} &(3-4\nu-\cos\theta)\cdot(1+\cos\theta)\cdot K_I^2 + 2\sin\theta\cdot[\cos\theta-1+2\nu]\cdot K_I\cdot K_{II} \\ &+ [4\cdot(1-\nu)\cdot(1-\cos\theta)+(1+\cos\theta)\cdot(3\cos\theta-1)]\cdot K_{II}^2 + 4K_{III}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Yukarıda verilen denklemde yer alan eşdeğer GŞF değerinin kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) değerine ulaşması durumunda kırılma meydana gelmektedir.

### 2.6.2.2. Schöllmann ( $\sigma_1'$ ) kriteri

Schöllmann ve arkadaşları (2001; 2003) geliştirmiş olduğu kritere göre çatlağın, Şekil 2.116.'da verilen  $\sigma_1'$  gerilmesine dikey yönde ilerlediğini varsaymaktadır.



Şekil 2.116. Üç boyutlu çatlak önünde silindirik koordinat sistemi ve gerilme bileşenleri, (Richard ve ark., 2012).

Bu kritere göre şekilde yer alan  $\theta_0$  sapma açısı aşağıda verilen (2.17) no.lu denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}
 & -6K_I \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right) - K_{II} \left(6 - 12 \tan^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right)\right) + \\
 & \left\{ \left[ 4K_I - 12K_{II} \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \right] \cdot \left[ -6K_I \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right) - K_{II} \left(6 - 12 \tan^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right)\right) \right] - 32K_{III}^2 \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \cdot \left(1 + \tan^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right)\right)^2 \right\} \\
 & \cdot \left\{ \left[ 4K_I - 12K_{II} \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \right]^2 + 64K_{III}^2 \left(1 + \tan^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right)\right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (2.17)
 \end{aligned}$$

$K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri yukarıda verilen denklemde yerine koyularak,  $\theta_0$ , sapma açısı hesaplanmakta ve GŞF değerlerini ve hesaplanan  $\theta_0$  sapma açısını kullanarak eşdeğer GŞF değeri  $K_{eş}$ , aşağıda verilen (2.18) no.lu denklem ile elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 K_{eş} &= \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \cdot \\
 & \cdot \left\{ K_I \cos^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right) - \frac{3}{2} K_{II} \sin(\theta_0) + \sqrt{\left[ K_I \cos^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right) - \frac{3}{2} K_{II} \sin(\theta_0) \right]^2 + 4K_{III}^2} \right\} \quad (2.18)
 \end{aligned}$$



### 2.6.2.3. Richard kriteri

Bir önceki bölümde iki boyutlu karışık mod kriterleri arasında Richard 'ın geliştirmiş olduğu iki boyutlu kriterin bir özeti verilmişti. Richard ve arkadaşları (2012), üç boyutlu karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme problemleri için de empirik bir kriter geliştirmişlerdir. Kriterin temeli, Denklem (2.19) ile verilen eşitliğe dayanmaktadır.

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^u + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^v + \left(\frac{K_{III}}{K_{IIIC}}\right)^w = 1 \quad (2.19)$$

$u=1$  ve  $v=w=2$  için, yorulmalı çatlak ilerlemesinde (2.2) no.lu denklem ile verilen Paris-Erdoğan denklemine yer alan eşdeğer GŞF değeri, üç boyutlu yükleme durumunda aşağıdaki eşitlik ile elde edilmektedir.

$$\Delta K_{eş} = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 5,366 \cdot \Delta K_{II}^2 + 4 \cdot \Delta K_{III}^2} \quad (2.20)$$

$\Delta K_{eş}$  değeri eşik bir değere ulaştığı zaman yorulma çatlak ilerlemesinin başladığını ve kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) değerine ulaştığı zaman da kararsız çatlak ilerlemesinin oluştuğunu belirtmişlerdir.

### 2.6.2.4. Pook kriteri

Yukarıda verilen bazı kriterler gibi Pook da iki ve üç boyutlu yükleme durumları için farklı yaklaşımlarda bulunarak iki ve üç boyutlu kriterler önermiştir. Pook (1980; 1985), üç boyutlu karışık mod kriteri için öncelikle  $K_I$  ve  $K_{II}$  arasında bir ilişki tanımlayarak,  $K_{eş,I,II}$  için bir eşitlik elde etmiş ve sonrasında  $K_{eş,I,II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerlerini kullanarak  $K_{eş,I,II,III}$  için bir eşitlik elde etmiştir.

$$K_{eş,I,II} = \frac{0,83K_I \cdot \sqrt{0,4489K_I^2 + 3K_{II}^2}}{1,5} \quad (2.21)$$

$$K_{e\check{s},I,II,III} = \frac{K_{e\check{s},I,II} \cdot (1 + 2\nu) + \sqrt{K_{e\check{s},I,II}^2 \cdot (1 - 2\nu)^2 + 4K_{III}^2}}{1,5} \quad (2.22)$$

Denklemden yer alan  $\nu$ , Poisson oranını temsil etmektedir. Bu kriter için de,  $K_{e\check{s},I,II,III}$  değeri, kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) değerine ulaştığı zaman ani çatlak ilerlemesi başlamaktadır.

### 2.6.2.5. Kikuchi kriteri

Bir diğer üç boyutlu kriter, Kikuchi ve arkadaşları (2012) tarafından önerilmiştir. Pook'tan farklı olarak Kikuchi kriterinde öncelikle  $K_I$  ve  $K_{III}$  arasında  $K_{e\check{s},I,III}$  denklemi (2.23) tanımlanmış ve sonrasında elde edilen  $K_{e\check{s},I,III}$  ve  $K_{II}$  GŞF değerleri kullanılarak,  $K_{e\check{s},I,II,III}$  denklemi (2.24) elde edilmiştir.

$$\Delta K_{e\check{s}(I,III)} = \frac{\sqrt{(\Delta K_I - \sqrt{2} \cdot |\Delta K_{III}|)^2 + \Delta K_I^2}}{\sqrt{2}} \quad (2.23)$$

$$\Delta K_{e\check{s}(I,II,III)} = \frac{\Delta K_{e\check{s}(I,III)}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_{e\check{s}(I,III)}^2 + 4 \cdot (1,155 \cdot \Delta K_{II})^2} \quad (2.24)$$

### 2.6.2.6. Tanaka kriteri

Tanaka (1974), üç boyutlu yükleme durumları için empirik bir denklem önermiştir. Bu kritere göre tanımlanan eşdeğer GŞF aşağıdaki denklemde verilmiştir. Denklemden verilen  $\nu$ , Poisson oranını ifade etmektedir.

$$K_{e\check{s}} = \left[ K_I^4 + 8K_{II}^4 + \frac{8K_{III}^4}{1 - \nu} \right]^{1/4} \quad (2.25)$$

### 2.6.2.7. Irwin kriteri

Empirik olarak önerilen bir diğer kriter ise Irwin (1957) kriteridir. Karışık mod-I/II/III problemleri için basit bir eşdeğer GŞF denklemi tanımlamıştır. Diğer kriterlerde olduğu gibi  $K_{eş}$ , malzemenin kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) değerine ulaştığı zaman kararsız çatlak ilerlemesi meydana gelmektedir.

$$K_{eş} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + (1 + \nu) \cdot K_{III}^2} \quad (2.26)$$

### 2.6.3. Mod-I/II karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme testlerinin değerlendirilmesi ve literatür modelleri ile karşılaştırılması

#### 2.6.3.1. CTS (Richard) numune sonuçlarının değerlendirilmesi

Bölüm 2.3.1.'de, CTS-numunesi için  $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$  yükleme açılarında gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizlerinin sonuçları ve sonrasında bu yükleme açıları için gerçekleştirilen kırılma test sonuçları ayrıntılı bir şekilde verilmiş olup, bu bölümde ise deneyden elde edilen veriler yukarıda özeti verilen mevcut iki boyutlu kırılma kriterleri ile karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Tablo 2.24.'te 10 mm kalınlıktaki CTS numuneleri için farklı açılarda gerçekleştirilen mod-I/II kırılma testlerinin sonuçları özet olarak verilmiştir.

Tablo 2.24.  $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$  yükleme açılarında CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti.

Numune No	Yükleme Açısı (°)	Kalınlık (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	DENEYSEL	
				Kopma Yüğü (kN)	Çatlak Sapma Açısı (°)
CTS-01	0	10,00	46,50	11,38	0,0
CTS-02	15	10,07	46,07	26,11	-12,4
CTS-03	15	10,06	45,96	26,68	-12,6
CTS-04	30	9,60	45,08	27,52	-21,1
CTS-05	30	10,10	44,94	28,59	-20,7
CTS-06	30	10,20	45,03	29,57	-20,2
CTS-07	45	10,13	44,95	35,61	-31,2
CTS-08	45	10,17	44,75	33,01	-31,7
CTS-09	45	10,13	45,40	35,60	-38,5

Tablo 2.24. (Devamı)

CTS-10	60	10,16	44,93	46,25	-43,1
CTS-11	60	10,15	45,22	46,90	-43,6
CTS-12	60	10,18	45,20	45,71	-
CTS-13	75	10,10	46,38	62,73	-61,5
CTS-14	75	10,14	45,24	68,07	-59,5

Tablo 2.25.'te, FCPAS çözümünden elde edilen GŞF değerleri ve Bölüm 2.6.1.'de detayları verilen iki boyutlu çatlak ilerleme kriterlerine göre elde edilen eşdeğer GŞF değerleri verilmiştir. Eşdeğer GŞF değerleri, FCPAS çözümünden elde edilen  $K_I$  ve  $K_{II}$  değerlerini kullanarak hesaplanmıştır.

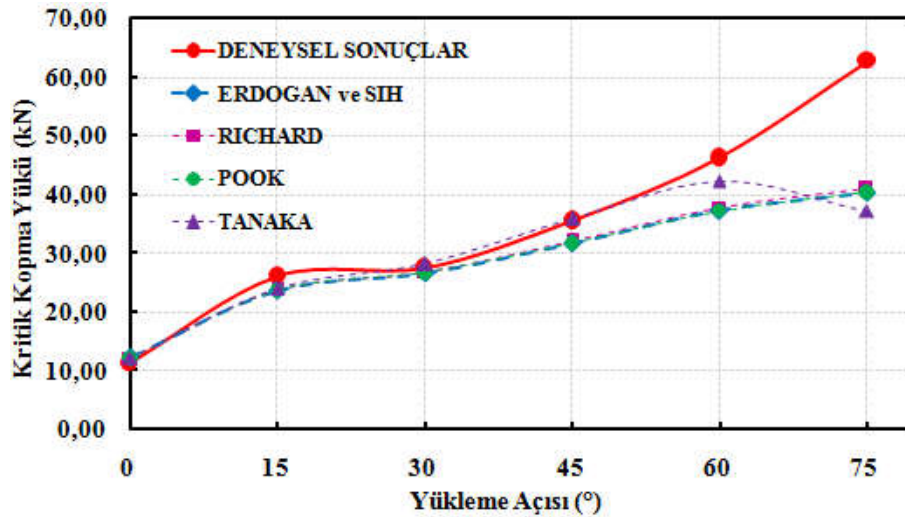
Tablo 2.25. CTS numuneleri için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF değerleri ve bu değerlere göre değişik kriterler kullanılarak hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri (Yük=10kN).

Numune No	Yükleme Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m <sup>1/2</sup> )			Keş (Mpa*m <sup>1/2</sup> )			
			$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$ (Çatlak ucu kenarı)	Richard	Erdoğan ve Sih	Pook	Tanaka
CTS-01	0	46,50	9,47	0,00	0,00	9,47	9,47	9,47	9,47
CTS-02	15	46,07	4,88	0,45	0,17	4,94	4,94	4,94	4,88
CTS-03	15	45,96	4,85	0,45	0,17	4,91	4,91	4,91	4,85
CTS-04	30	45,08	3,93	0,82	0,25	4,15	4,17	4,17	3,95
CTS-05	30	44,94	3,91	0,81	0,24	4,12	4,14	4,14	3,92
CTS-06	30	45,03	3,92	0,82	0,25	4,13	4,15	4,15	3,93
CTS-07	45	44,95	3,16	1,17	0,36	3,67	3,71	3,71	3,28
CTS-08	45	44,75	3,16	1,14	0,36	3,64	3,68	3,68	3,26
CTS-09	45	45,40	3,28	1,21	0,38	3,80	3,84	3,84	3,39
CTS-10	60	44,93	2,20	1,46	0,49	3,12	3,17	3,17	2,78
CTS-11	60	45,22	2,25	1,50	0,51	3,19	3,24	3,25	2,85
CTS-12	60	45,20	2,24	1,50	0,51	3,19	3,24	3,24	2,85
CTS-13	75	46,38	1,25	1,86	0,60	2,86	2,90	2,91	3,14
CTS-14	75	45,24	1,13	1,70	0,53	2,61	2,65	2,65	2,88

Tablo 2.26.'da kriterlerden ve kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri, Şekil 2.117.'de ise bu yüklerin yüklenme açlarına göre değişimi grafik olarak verilmiştir. Kopma yükleri, kriterlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) değerine ulaşması için gerekli olan yükler hesaplanarak belirlenmiştir.

Tablo 2.26. CTS numuneleri için değişik kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.

Numune No	Yükleme Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	KRİTERLERE GÖRE KOPMA YÜKÜ (kN)				Deneysel Kopma Yüğü (kN)
			Richard	Erdoğan ve Sih	Pook	Tanaka	
CTS-01	0	46,50	12,24	12,24	12,24	12,24	11,38
CTS-02	15	46,07	23,66	23,63	23,64	23,92	26,11
CTS-03	15	45,96	23,78	23,74	23,75	24,04	26,68
CTS-04	30	45,08	26,83	26,68	26,69	28,20	27,52
CTS-05	30	44,94	28,45	28,30	28,30	29,89	28,59
CTS-06	30	45,03	28,63	28,48	28,48	30,10	29,57
CTS-07	45	44,95	32,05	31,70	31,70	35,85	35,61
CTS-08	45	44,75	32,40	32,06	32,05	36,14	33,01
CTS-09	45	45,40	30,94	30,60	30,60	34,61	35,60
CTS-10	60	44,93	37,78	37,20	37,17	42,35	46,25
CTS-11	60	45,22	36,86	36,29	36,26	41,28	46,90
CTS-12	60	45,20	37,03	36,45	36,42	41,46	45,71
CTS-13	75	46,38	40,92	40,39	40,32	37,29	62,73
CTS-14	75	45,24	45,01	44,43	44,36	40,88	68,07



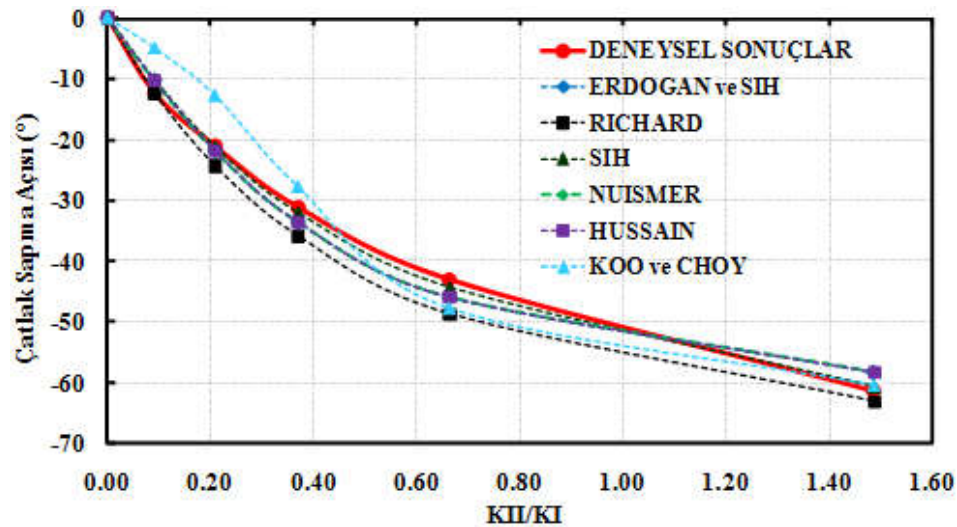
Şekil 2.117. CTS numuneleri için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklem açlarına göre değişim grafiği.

Şekilde verilen dağılım incelendiğinde, özellikle 45° yüklem açısından sonra Erdoğan-Sih, Richard ve Pook kriterlerinde deney sonuçlarından sapmalar olduğu gözlemlenmektedir. Tanaka kriterinin ise 60° yüklem açısından sonra deney sonuçlarından sapmaya başladığı görülmektedir.

Tablo 2.27.'de kriterlerden ve kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları, Şekil 2.118.'de ise bu sapma açılarının,  $K_{II}/K_I$  oranlarına göre değişimi verilmiştir. Tabloda yer alan deneysel çatlak sapma açıları, her bir numunenin kırık yüzeylerinden ölçülen çatlak sapma açılarıdır.

Tablo 2.27. CTS numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları.

Numune No	Yükleme Açısı (°)	KRİTERLERE GÖRE ÇATLAK SAPMA AÇISI (°)						Deneysel Çatlak Sapma Açısı (°)
		Erdoğan ve Sih	Richard	Sih	Nuismer	Hussain	Koo ve Choy	
CTS-01	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
CTS-02	15	-10,28	-12,44	-10,20	-10,28	-10,28	-4,99	-12,4
CTS-03	15	-10,37	-12,54	-10,29	-10,37	-10,37	-5,04	-12,6
CTS-04	30	-21,86	-24,36	-21,22	-21,86	-21,86	-12,78	-21,1
CTS-05	30	-21,72	-24,22	-20,22	-21,72	-20,78	-11,86	-20,7
CTS-06	30	-21,87	-24,37	-21,24	-21,87	-21,87	-12,79	-20,2
CTS-07	45	-33,64	-35,91	-32,08	-33,64	-33,64	-27,82	-31,2
CTS-08	45	-33,03	-35,31	-31,51	-33,03	-33,03	-26,82	-31,7
CTS-09	45	-33,64	-35,90	-32,07	-33,64	-33,64	-27,82	-38,5
CTS-10	60	-46,00	-48,75	-44,37	-46,00	-46,00	-47,82	-43,1
CTS-11	60	-46,13	-48,90	-44,52	-46,13	-46,13	-48,01	-43,6
CTS-12	60	-46,14	-48,91	-44,53	-46,14	-46,14	-48,01	-
CTS-13	75	-58,39	-63,16	-60,71	-58,39	-58,39	-60,45	-61,5
CTS-14	75	-58,53	-63,33	-60,94	-58,53	-58,53	-60,55	-59,5



Şekil 2.118. CTS numuneleri için elde edilen çatlak sapma açıları ile kriterlerden elde edilen sapma açılarının,  $K_{II}/K_I$  oranına göre değişim grafiği.

Çatlak sapma açılarının değişimi incelendiğinde, Koo ve Choy kriteri hariç diğer kriterlerin 45° yükleme açısına kadar birbirine yakın bir eğilimde oldukları ancak 60° ve 75° yükleme açılarında kriterler arasında bir miktar sapmalar gözlemlenmektedir. Sih kriterinin deneysel sonuçlara en yakın eğilimde olduğu görülmüştür.

### 2.6.3.2. T-numunesi sonuçlarının değerlendirilmesi

Bölüm 2.3.5.'te, 25 mm kalınlıktaki T-numuneleri için  $\theta=0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizlerinin sonuçları ve sonrasında bu yükleme açıları için gerçekleştirilen kırılma test sonuçları ayrıntılı bir şekilde verilmiş olup, bu bölümde ise deneyden elde edilen veriler mevcut iki boyutlu kırılma kriterleri ile karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Tablo 2.28.'de T-numuneleri için farklı açılarda gerçekleştirilen mod-I/II kırılma testlerinin sonuçları özet olarak verilmiştir.

Tablo 2.28.  $\theta=0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında T-numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti.

Numune No	Yükleme Açısı (°)	Kalınlık (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	DENEYSEL	
				Kopma Yüğü (kN)	Çatlak Sapma Açısı (°)
T-01	0	25,00	27,57	18,82	0,00
T-02	0	24,87	26,03	19,60	0,00
T-03	15	25,00	26,93	19,80	-11,40
T-04	15	24,98	26,34	19,70	-11,10
T-05	30	24,98	26,21	23,07	-18,20
T-06	30	25,00	26,90	20,64	-19,80
T-07	45	25,00	25,24	28,09	-27,20
T-08	45	25,01	25,46	29,21	-26,90
T-09	60	24,96	27,13	33,59	-37,60
T-10	60	25,00	26,58	34,76	-42,40
T-11	75	25,03	26,89	54,31	-55,90
T-12	75	24,96	26,70	55,04	-62,00

Tablo 2.29.'da T-numunelerinin kırılma tokluğu testleri sonrasında kırılan numuneden ölçülen ön çatlak uzunluğuna göre FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri verilmiştir.

Tablo 2.29. T-numuneleri için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.

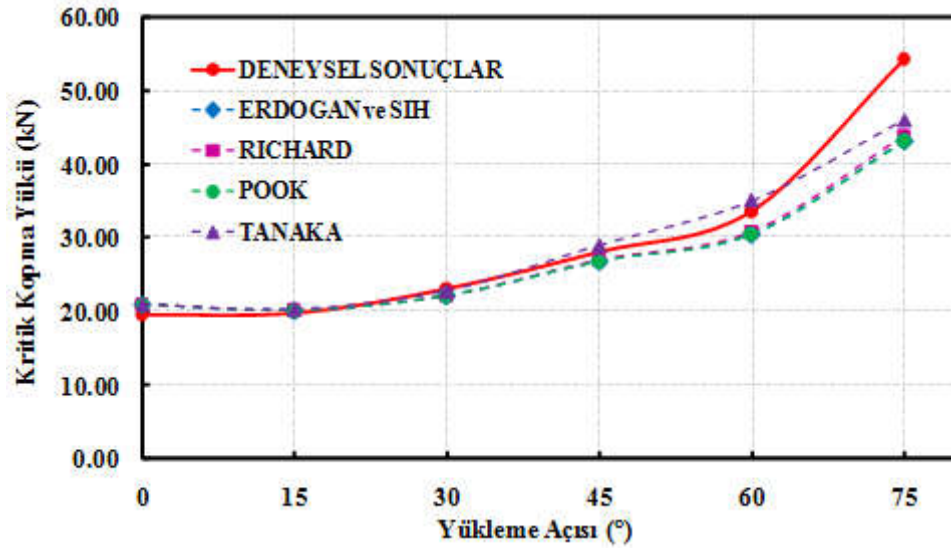
Numune No	Yükleme Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m <sup>1/2</sup> )			Keş (Mpa*m <sup>1/2</sup> )			
			K <sub>I</sub>	K <sub>II</sub>	K <sub>III</sub> (Çatlak ucu kenarı)	Richard	Erdoğan ve Sih	Pook	Tanaka
T-01	0	27,57	14,71	0,00	0,00	14,71	14,71	14,71	14,71
T-02	0	26,03	13,73	0,00	0,00	13,73	13,73	13,73	13,73
T-03	15	26,93	14,24	1,08	0,49	14,35	14,36	14,36	14,24
T-04	15	26,34	14,06	1,04	0,45	14,17	14,18	14,18	14,06
T-05	30	26,21	12,69	1,84	0,77	13,04	13,08	13,08	12,70
T-06	30	26,90	12,87	1,94	0,81	13,25	13,29	13,29	12,88
T-07	45	25,24	9,91	2,54	0,95	10,72	10,80	10,80	10,00
T-08	45	25,46	10,06	2,52	0,97	10,85	10,92	10,92	10,14
T-09	60	27,13	7,74	3,38	1,25	9,37	9,49	9,50	8,25
T-10	60	26,58	7,54	3,14	1,23	9,01	9,12	9,12	7,95
T-11	75	26,89	4,00	3,58	1,35	6,61	6,71	6,72	6,30
T-12	75	26,70	3,94	3,60	1,33	6,58	6,69	6,70	6,31

Tablo 2.30.'da, T-numuneleri için kriterlerden ve kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri, Şekil 2.119.'da ise bu yüklerin yükleme açılarına göre değişimi verilmiştir.

Tablo 2.30.  $\theta=0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yüklemeye açılarındaki T-numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.

Numune No	Yüklemeye Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	KRİTERLERE GÖRE KOPMA YÜKÜ (kN)				Deneysel Kopma Yüğü (kN)
			Richard	Erdoğan ve Sih	Pook	Tanaka	
T-01	0	27,57	19,72	19,72	19,72	19,72	18,82
T-02	0	26,03	21,01	21,01	21,01	21,01	19,60
T-03	15	26,93	20,21	20,19	20,20	20,37	19,80
T-04	15	26,34	20,46	20,44	20,44	20,60	19,70
T-05	30	26,21	22,22	22,15	22,16	22,81	23,07
T-06	30	26,90	21,88	21,82	21,82	22,51	20,64
T-07	45	25,24	27,05	26,86	26,86	29,01	28,09
T-08	45	25,46	26,75	26,56	26,56	28,62	29,21
T-09	60	27,13	30,89	30,50	30,49	35,10	33,59
T-10	60	26,58	32,20	31,81	31,81	36,46	34,76
T-11	75	26,89	43,93	43,24	43,19	46,07	54,31
T-12	75	26,70	43,97	43,29	43,23	45,89	55,04





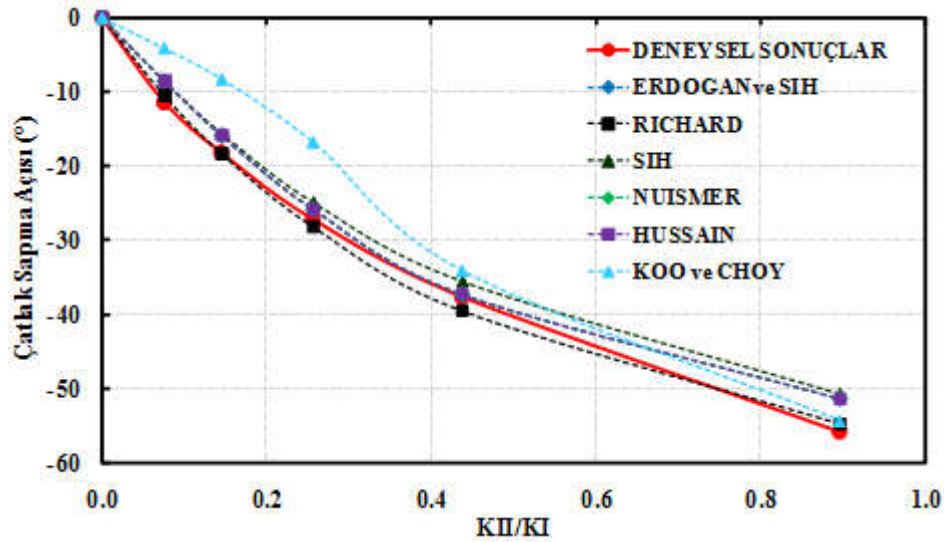
Şekil 2.119. T-numuneleri için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açılarına göre değişim grafiği.

CTS numunesi kopma yükü sonuçlarında olduğu gibi, T-numunesi için de 45° yüklemeye açısından sonra Erdoğan-Sih, Richard ve Pook kriterlerinde deney sonuçlarından bir miktar sapmalar olduğu gözlemlenmektedir. Ancak özellikle 75° yüklemeye açısında belirgin bir sapma oluşmaktadır. Tanaka kriterinin 60° yüklemeye açısına kadar deney sonuçlarıyla gayet uyumlu olduğu ancak daha sonra bu kriterde de sapma olduğu görülmektedir.

Tablo 2.31.'de kriterlerden ve kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları, Şekil 2.120.'de ise bu sapma açılarının,  $K_{II}/K_I$  oranlarına göre değişimi verilmiştir.

Tablo 2.31.  $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında T-numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları.

Numune No	Yükleme Açısı ( $^\circ$ )	KRİTERLERE GÖRE ÇATLAK SAPMA AÇISI ( $^\circ$ )						Deneysel Çatlak Sapma Açısı ( $^\circ$ )
		Erdoğan ve Sih	Richard	Sih	Nuismer	Hussain	Koo ve Choy	
T-01	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T-02	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T-03	15	-8,55	-10,52	-8,50	-8,55	-8,55	-4,09	-11,73
T-04	15	-8,33	-10,27	-8,29	-8,33	-8,33	-3,98	-9,34
T-05	30	-15,90	-18,39	-15,63	-15,90	-15,90	-8,28	-21,95
T-06	30	-16,45	-18,95	-16,15	-16,45	-16,45	-8,64	-18,07
T-07	45	-25,84	-28,25	-24,90	-25,84	-25,84	-16,77	-26,26
T-08	45	-25,40	-27,83	-24,50	-25,40	-25,40	-16,29	-24,15
T-09	60	-37,31	-39,59	-35,54	-37,31	-37,31	-34,12	-33,69
T-10	60	-36,24	-38,51	-34,52	-36,24	-36,24	-32,26	-36,41
T-11	75	-51,38	-54,85	-50,73	-51,38	-51,38	-54,33	-50,19
T-12	75	-51,69	-55,20	-	-51,69	-51,69	-	-53,17



Şekil 2.120. T-numuneleri için elde edilen çatlak sapma açıları ile kriterlerden elde edilen sapma açılarının,  $K_{II}/K_I$  oranına göre değişim grafiği.

CTS numunesinde olduğu gibi, Koo ve Choy kriteri hariç diğer kriterlerin  $45^\circ$  yükleme açısına kadar birbirine yakın bir eğilimde oldukları ancak  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında kriterler arasında bir miktar sapmalar olduğu gözlemlenmektedir. T-numunesi için Richard kriterinin diğer kriterlere oranla deneysel sonuçlara daha yakın eğilimde olduğu görülmüştür.

#### 2.6.4. Mod-I/III karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme testlerinin değerlendirilmesi ve literatür modelleri ile karşılaştırılması

Bölüm 2.4.'te, CTT numunesi için  $\theta=0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$  yüklemeye açılarında gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizlerinin sonuçları ve sonrasında bu yüklemeye açıları için gerçekleştirilen kırılma test sonuçları ayrıntılı bir şekilde verilmiş olup, bu bölümde ise deneyden elde edilen veriler yukarıda özet verilen mevcut üç boyutlu kırılma kriterleri ile karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Tablo 2.32.'de, 25 mm kalınlıktaki CTT numuneleri için farklı açılarda gerçekleştirilen mod-I/III kırılma testlerinin sonuçları özet olarak verilmiştir.

Tablo 2.32.  $\theta=0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$  yüklemeye açılarında CTT numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti.

Numune No	Yüklemeye Açısı ( $^\circ$ )	Kalınlık (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	DENEYSEL Kopma Yüğü (kN)
CTT-01	0	25,00	26,19	17,98
CTT-02	15	25,00	26,46	17,28
CTT-03	15	25,00	26,49	17,96
CTT-04	30	25,00	26,09	20,72
CTT-05	30	25,00	26,49	19,69
CTT-06	45	25,00	26,76	23,38
CTT-07	45	25,00	26,60	23,82
CTT-08	45	25,00	26,29	21,99
CTT-09	60	25,00	26,47	26,22
CTT-10	60	25,00	26,36	27,18
CTT-11	75	25,00	25,93	30,91
CTT-12	75	25,00	26,21	32,48
CTT-13	75	25,00	27,09	29,66
CTT-14	90	25,00	26,12	39,72
CTT-15	90	25,00	26,88	36,79

Mod-I/III yüklemeye durumunda elde edilen  $K_{I1}$  değeri, düzlem dışı yönde eğilme etkisinden kaynaklandığı ve bu yüzden çatlak ucu boyunca negatiften pozitif veya pozitiften negatife (yüklemeye duruma bağlı olarak) değişen, merkezde sıfır değerini alan lineer bir eğilimde olduğu için, çatlak ucu merkezi ve kenarı için elde edilen eşdeğer GŞF değerleri farklıdır. Bu yüzden kriterlere göre elde edilen eşdeğer GŞF

değerleri ve kopma yükleri, çatlak ucu merkezi ve kenarı için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Tablo 2.33.'te, çatlak ucu merkezi için, Tablo 2.34.'te ise çatlak ucu kenarı için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF değerleri ve Bölüm 2.6.2.'de detayları verilen üç boyutlu çatlak ilerleme kriterlerinden, Richard, Irwin, Pook, Tanaka ve Kikuchi kriterlerine göre elde edilen eşdeğer GŞF değerleri verilmiştir.

Tablo 2.33. CTT numunelerinde *çatlak ucu merkezi* için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.

Numune No	Yük Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m <sup>1/2</sup> )			Keş(Mpa*m <sup>1/2</sup> )				
			Çatlak Ucu Merkez			Richard	Irwin	Pook	Tanaka	Kikuchi
			K <sub>I</sub>	K <sub>II</sub>	K <sub>III</sub>					
CTT-01	0	26,19	16,54	0,00	0,00	16,54	16,54	27,46	16,54	16,45
CTT-02	15	26,46	16,23	0,12	2,84	16,71	16,56	27,24	16,28	15,08
CTT-03	15	26,49	16,25	0,12	2,84	16,73	16,57	27,27	16,29	15,09
CTT-04	30	26,09	14,46	-0,06	5,51	16,32	15,79	25,20	15,29	14,12
CTT-05	30	26,49	14,63	-0,02	5,54	16,50	15,97	25,50	15,46	14,28
CTT-06	45	26,76	12,07	0,13	7,74	15,86	15,02	22,69	15,91	14,20
CTT-07	45	26,60	12,02	0,12	7,72	15,79	14,95	22,59	15,86	14,15
CTT-08	45	26,29	11,91	0,12	7,67	15,66	14,83	22,39	15,74	14,04
CTT-09	60	26,47	8,43	0,12	9,37	14,49	13,70	18,69	17,65	14,79
CTT-10	60	26,36	8,40	0,12	9,35	14,45	13,67	18,64	17,61	14,75
CTT-11	75	25,93	4,09	0,08	10,04	12,29	12,28	13,99	18,67	16,08
CTT-12	75	26,21	4,26	0,12	10,42	12,77	12,75	14,54	19,39	16,68
CTT-13	75	27,09	4,52	0,14	10,83	13,32	13,28	15,22	20,14	17,31
CTT-14	90	26,12	-0,08	0,10	10,86	10,82	12,52	10,92	20,18	19,13
CTT-15	90	26,88	-0,07	0,10	11,02	10,98	12,71	11,09	20,48	19,41

Tablo 2.34. CTT numunelerinde *çatlak ucu kenarı* için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.

Numune No	Yük Açısı (°)	Çatlak Uzunluk Değeri (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m <sup>1/2</sup> )			Keş(Mpa*m <sup>1/2</sup> )				
			Çatlak Ucu Kenar			Richard	Irwin	Pook	Tanaka	Kikuchi
			K <sub>I</sub>	K <sub>II</sub>	K <sub>III</sub>					
CTT-01	0	26,19	14,41	0,00	0,00	14,41	14,41	23,92	14,41	14,40
CTT-02	15	26,46	14,13	-2,78	1,91	15,06	14,57	24,88	14,19	13,22
CTT-03	15	26,49	14,15	-2,79	1,91	15,08	14,59	24,91	14,20	13,23
CTT-04	30	26,09	12,74	-5,92	3,78	16,45	14,71	26,99	14,02	12,00
CTT-05	30	26,49	12,88	-6,04	3,85	16,69	14,91	27,39	14,21	12,15
CTT-06	45	26,76	10,49	-8,42	5,45	17,56	14,85	28,59	15,83	11,21
CTT-07	45	26,60	10,43	-8,32	5,40	17,41	14,73	28,33	15,67	11,13

Tablo 2.34. (Devamı)

CTT-08	45	26,29	10,32	-8,11	5,32	17,11	14,49	27,83	15,35	10,99
CTT-09	60	26,47	7,33	-10,01	6,53	17,44	14,51	28,19	18,00	10,68
CTT-10	60	26,36	7,31	-9,92	6,50	17,32	14,42	27,99	17,86	10,63
CTT-11	75	25,93	3,55	-9,21	6,72	14,48	12,55	23,07	16,92	10,59
CTT-12	75	26,21	3,73	-11,03	7,22	16,63	14,32	26,70	19,71	11,40
CTT-13	75	27,09	4,01	-12,82	7,97	18,94	16,27	30,52	22,68	12,59
CTT-14	90	26,12	0,02	-11,55	7,54	15,33	14,46	24,48	20,62	13,24
CTT-15	90	26,88	0,03	-12,28	7,84	16,22	15,25	25,93	21,83	13,77

Tablo 2.35.'te çatlak ucu merkezi için, Tablo 2.36.'da ise çatlak ucu kenarı için kriterlerden ve kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri verilmiştir. Kopma yükleri, kriterlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin kırılma tokluğu (K<sub>1c</sub>) değerine ulaşması için gerekli olan yükleri temsil etmektedir.

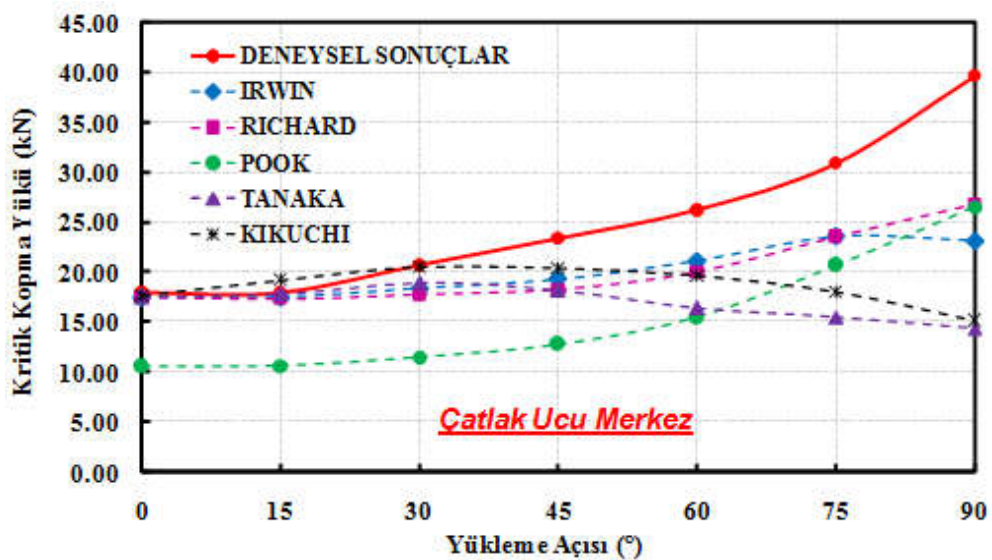
Tablo 2.35. CTT numunelerinde çatlak ucu merkezi için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.

Numune No	Yük Açısı (°)	Çatlak Uzunluk Değeri (mm)	KRİTERLERE GÖRE KOPMA YÜKÜ (kN)					Deneysel Kopma Yüğü (kN)
			Çatlak Ucu Merkez					
			Richard	Irwin	Pook	Tanaka	Kikuchi	
CTT-01	0	26,19	17,53	17,53	10,56	17,53	17,63	17,98
CTT-02	15	26,46	17,35	17,51	10,65	17,82	19,24	17,28
CTT-03	15	26,49	17,33	17,50	10,64	17,80	19,22	17,96
CTT-04	30	26,09	17,77	18,36	11,51	18,96	20,53	20,72
CTT-05	30	26,49	17,58	18,16	11,37	18,76	20,31	19,69
CTT-06	45	26,76	18,29	19,31	12,78	18,22	20,42	23,38
CTT-07	45	26,60	18,37	19,39	12,84	18,29	20,50	23,82
CTT-08	45	26,29	18,51	19,55	12,95	18,42	20,65	21,99
CTT-09	60	26,47	20,02	21,16	15,51	16,43	19,61	26,22
CTT-10	60	26,36	20,07	21,22	15,56	16,47	19,66	27,18
CTT-11	75	25,93	23,60	23,62	20,73	15,53	18,04	30,91
CTT-12	75	26,21	22,71	22,74	19,94	14,96	17,38	32,48
CTT-13	75	27,09	21,77	21,83	19,05	14,40	16,75	29,66
CTT-14	90	26,12	26,81	23,16	26,56	14,37	15,16	39,72
CTT-15	90	26,88	26,41	22,82	26,16	14,16	14,94	36,79

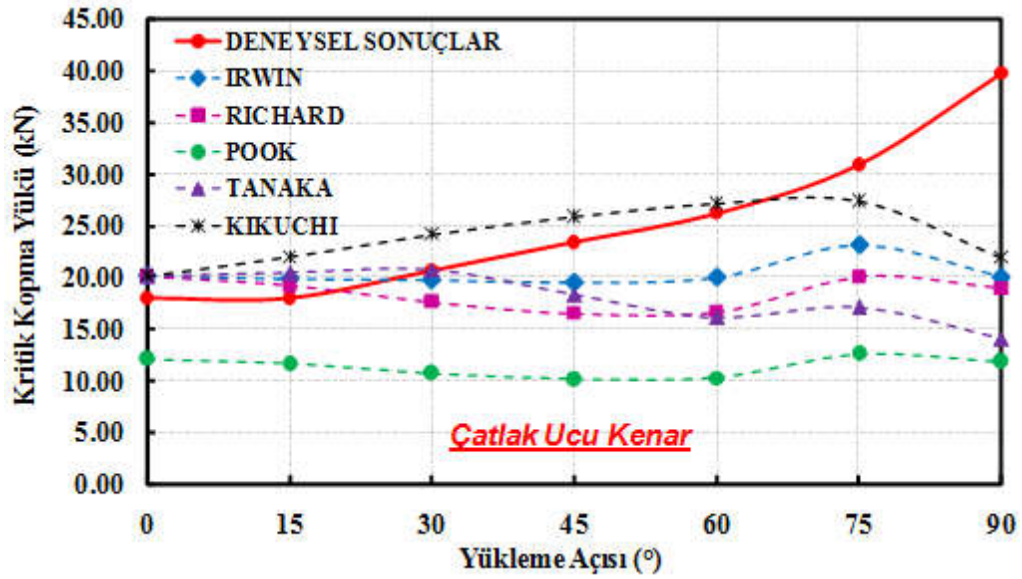
Tablo 2.36. CTT numunelerinde *çatlak ucu kenarı* için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.

Numune No	Yük Açısı (°)	Çatlak Uzunluk Değeri (mm)	KRİTERLERE GÖRE KOPMA YÜKÜ (kN)					Deneysel Kopma Yüğü (kN)
			<i>Çatlak Ucu Kenar</i>					
			Richard	Irwin	Pook	Tanaka	Kikuchi	
CTT-01	0	26,19	20,12	20,12	12,12	20,12	20,13	17,98
CTT-02	15	26,46	19,26	19,90	11,65	20,44	21,93	17,28
CTT-03	15	26,49	19,24	19,88	11,64	20,42	21,91	17,96
CTT-04	30	26,09	17,63	19,72	10,74	20,69	24,16	20,72
CTT-05	30	26,49	17,38	19,46	10,59	20,40	23,88	19,69
CTT-06	45	26,76	16,51	19,53	10,14	18,32	25,88	23,38
CTT-07	45	26,60	16,66	19,69	10,24	18,51	26,04	23,82
CTT-08	45	26,29	16,95	20,01	10,42	18,89	26,38	21,99
CTT-09	60	26,47	16,63	19,98	10,29	16,11	27,14	26,22
CTT-10	60	26,36	16,74	20,11	10,36	16,24	27,28	27,18
CTT-11	75	25,93	20,03	23,11	12,57	17,14	27,37	30,91
CTT-12	75	26,21	17,44	20,26	10,86	14,71	25,44	32,48
CTT-13	75	27,09	15,31	17,82	9,50	12,79	23,03	29,66
CTT-14	90	26,12	18,91	20,06	11,85	14,06	21,90	39,72
CTT-15	90	26,88	17,88	19,02	11,18	13,29	21,06	36,79

Şekil 2.121 ve 2.122.'de çatlak ucu merkezi ve kenarı için değişik kriterlere göre hesaplanan kopma yükleri ile deneylerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açlarına göre değişim grafikleri sırasıyla verilmiştir.



Şekil 2.121. CTT numunelerinde *çatlak ucu merkezi* için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açlarına göre değişim grafiği.



Şekil 2.122. CTT numunelerinde *çatlak ucu kenarı* için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açılarına göre değişim grafiği.

Çatlak ucu merkezi için elde edilen kopma yüklerinde (Şekil 2.121) Pook kriteri hariç tüm kriterler  $30^\circ$  yüklemeye açısına kadar birbirine yakın eğilim göstermektedirler. Ancak  $30^\circ$  den sonra tüm kriterler deneysel sonuçlardan sapmaktadırlar. Yüklemeye açısı arttıkça deneylerden elde edilen kopma yükleri artarken, Kikuchi ve Tanaka kriterine göre hesaplanan kopma yükleri  $30^\circ$  yüklemeye açısından sonra, Kikuchi kriteri ise  $75^\circ$  yüklemeye açısından sonra azalma yönünde eğilim göstermektedir. Özellikle  $90^\circ$  lik yüklemeye durumuna, deneysel kopma yüküne en yakın sonuç veren kriter yaklaşık 13-14 kN fark ile deneysel sonuca yaklaşmaktadır.

Çatlak ucu kenarı için elde edilen kopma yüklerinde de (Şekil 2.122)  $30^\circ$  yüklemeye açısından sonra deneysel kopma yüklerinden sapmalar oluşmaktadır. Pook kriteri her iki durum için de deneysel sonuçlardan uzak kalmaktadır. Kikuchi kriteri çatlak ucu kenarı için yapılan değerlendirmede, deneysel sonuçlara en yakın eğilimi vermektedir.



### 2.6.5. Mod-I//II/III karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme testlerinin değerlendirilmesi ve literatür modelleri ile karşılaştırılması

Bölüm 2.5.2.'de, 25 mm kalınlıktaki CTST numuneleri için  $\theta=0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$  yükleme açılarındaki gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizlerinin sonuçları ve sonrasında bu yükleme açıları için gerçekleştirilen kırılma test sonuçları ayrıntılı bir şekilde verilmiş olup, bu bölümde ise deneyden elde edilen veriler yukarıda özeti verilen mevcut üç boyutlu kırılma kriterleri ile karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Tablo 2.37.'de, deneyde kullanılan numunelerin kodu, yükleme açıları ve kırılma modlarının birbirlerine göre etkinliğini temsil eden katsayılar verilmiştir. Bu katsayılar kırılma modlarının gerçek değerleri olmayıp sadece modlar arasında kıyaslama yapmak için kullanılmaktadır.

Tablo 2.37. CTST numunesi kırılma tokluğu testleri ile ilgili test matrisi tablosu.

Numune No	Yük Açısı ( $^\circ$ )			Mod-I-II		Mod-II-III		Mod-I-III		M-I $\cos\alpha*\cos\theta$	M-II $\sin\alpha*\cos\beta$	M-III $\sin\beta*\sin\theta$
	M I-II ( $\alpha$ )	M II-III ( $\beta$ )	M I-III ( $\theta$ )	M-I $\cos\alpha$	M-II $\sin\alpha$	M-II $\cos\beta$	M-III $\sin\beta$	M-I $\cos\theta$	M-III $\sin\theta$			
CTST-01	15	15	15	0,97	0,26	0,97	0,26	0,97	0,26	<b>0,93</b>	<b>0,25</b>	<b>0,07</b>
CTST-02	15	15	15	0,97	0,26	0,97	0,26	0,97	0,26	<b>0,93</b>	<b>0,25</b>	<b>0,07</b>
CTST-03	15	45	15	0,97	0,26	0,71	0,71	0,97	0,26	<b>0,93</b>	<b>0,18</b>	<b>0,18</b>
CTST-04	15	45	15	0,97	0,26	0,71	0,71	0,97	0,26	<b>0,93</b>	<b>0,18</b>	<b>0,18</b>
CTST-05	15	75	15	0,97	0,26	0,26	0,97	0,97	0,26	<b>0,93</b>	<b>0,07</b>	<b>0,25</b>
CTST-06	15	75	15	0,97	0,26	0,26	0,97	0,97	0,26	<b>0,93</b>	<b>0,07</b>	<b>0,25</b>
CTST-07	45	15	45	0,71	0,71	0,97	0,26	0,71	0,71	<b>0,50</b>	<b>0,68</b>	<b>0,18</b>
CTST-08	45	15	45	0,71	0,71	0,97	0,26	0,71	0,71	<b>0,50</b>	<b>0,68</b>	<b>0,18</b>
CTST-09	45	45	45	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>
CTST-10	45	45	45	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>
CTST-11	45	75	45	0,71	0,71	0,26	0,97	0,71	0,71	<b>0,50</b>	<b>0,18</b>	<b>0,68</b>
CTST-12	45	75	45	0,71	0,71	0,26	0,97	0,71	0,71	<b>0,50</b>	<b>0,18</b>	<b>0,68</b>
CTST-13	75	45	75	0,26	0,97	0,71	0,71	0,26	0,97	<b>0,07</b>	<b>0,68</b>	<b>0,68</b>
CTST-14	75	45	75	0,26	0,97	0,71	0,71	0,26	0,97	<b>0,07</b>	<b>0,68</b>	<b>0,68</b>
CTST-15	75	60	75	0,26	0,97	0,50	0,87	0,26	0,97	<b>0,07</b>	<b>0,48</b>	<b>0,84</b>
CTST-16	75	60	75	0,26	0,97	0,50	0,87	0,26	0,97	<b>0,07</b>	<b>0,48</b>	<b>0,84</b>
CTST-17	75	75	75	0,26	0,97	0,26	0,97	0,26	0,97	<b>0,07</b>	<b>0,25</b>	<b>0,93</b>
CTST-18	75	75	75	0,26	0,97	0,26	0,97	0,26	0,97	<b>0,07</b>	<b>0,25</b>	<b>0,93</b>

Tablo 2.38.'de ise deneylerde kullanılan numunelerin kalınlıkları, ortalama çatlak uzunluğu, deneylerden elde edilen kopma yükleri ve çatlak ucunun merkezi, ön ve



arka kenarı için kırılma analizleri sonrası FCPAS çözümünden, ölçülen çatlak uzunlukları için elde edilen GŞF ( $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$ ) değerleri verilmiştir. Mod-I/II/III yüklemesinde, çatlak ucunun ön, arka ve merkezinde farklı GŞF değerleri elde edildiği için, bu noktalarda elde edilen GŞF değerleri ve bu değerleri kullanarak kriterlere göre hesaplanan kopma yükü değerleri çatlak ucu merkezi, ön ve arka kenarı için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Tablo 2.38. CTST numunesi kırılma tokluğu test verileri ve FCPAS çözümleri.

Numune No	Yükleme Açısı (°)			t (mm)	Çatlak Uzunluk Değeri (mm)	Kopma Yükü (kN)	FCPAS ÇÖZÜMÜ								
	M I-II (α)	M II-III (β)	M I-III (θ)				Çatlak Ucu Merkez Değeri			Çatlak Ucu Arka Kenar Değeri			Çatlak Ucu Ön Kenar Değeri		
	KI	KII	KIII				KI	KII	KIII	KI	KII	KIII			
CTST-01	15	15	15	25,03	26,56	<b>16,18</b>	16,10	0,42	-0,79	14,41	1,46	-0,99	13,78	-0,40	-0,44
CTST-02	15	15	15	25,04	26,72	<b>15,92</b>	16,45	0,59	-0,82	14,73	1,74	-1,05	14,10	-0,34	-0,45
CTST-03	15	45	15	25,06	26,83	<b>15,84</b>	17,05	0,48	-2,09	14,84	2,76	-1,97	15,12	-1,60	-1,50
CTST-04	15	45	15	25,04	27,10	<b>14,99</b>	17,28	0,60	-2,18	15,10	3,16	-2,07	15,31	-1,76	-1,60
CTST-05	15	75	15	25,00	26,50	<b>17,09</b>	16,10	-0,02	-2,33	13,94	1,80	-1,87	14,24	-1,82	-1,90
CTST-06	15	75	15	25,02	26,49	<b>17,10</b>	16,08	0,00	-2,32	13,93	1,80	-1,86	14,21	-1,79	-1,89
CTST-07	45	15	45	25,06	26,49	<b>20,84</b>	12,20	1,70	-2,26	9,97	4,45	-2,74	11,35	-0,40	-1,10
CTST-08	45	15	45	24,98	27,03	<b>20,67</b>	13,27	2,61	-2,42	11,11	5,90	-3,06	12,27	0,01	-1,13
CTST-09	45	45	45	25,01	26,61	<b>22,10</b>	13,17	1,33	-5,64	11,42	6,67	-5,16	11,77	-3,50	-3,86
CTST-10	45	45	45	25,03	26,62	<b>21,69</b>	13,18	1,33	-5,64	11,43	6,69	-5,17	11,78	-3,51	-3,86
CTST-11	45	75	45	25,00	26,50	<b>23,82</b>	12,74	0,36	-7,94	11,14	8,26	-6,64	11,31	-7,35	-6,21
CTST-12	45	75	45	24,99	26,51	<b>22,99</b>	12,75	0,36	-7,95	11,15	8,28	-6,65	11,31	-7,37	-6,22
CTST-13	75	45	75	25,00	26,44	<b>38,43</b>	4,24	2,04	-8,14	3,22	10,48	-7,48	4,27	-5,70	-5,64
CTST-14	75	45	75	25,00	26,52	<b>39,43</b>	4,28	2,08	-8,18	3,30	10,70	-7,55	4,29	-5,83	-5,70
CTST-15	75	60	75	25,00	26,06	<b>37,58</b>	4,27	1,30	-9,10	3,73	10,53	-7,82	3,74	-7,59	-6,68
CTST-16	75	60	75	25,00	26,59	<b>38,11</b>	4,48	1,43	-9,32	3,98	11,49	-8,26	3,90	-8,27	-7,06
CTST-17	75	75	75	25,04	26,47	<b>36,77</b>	4,41	0,68	-10,84	3,77	11,39	-8,97	4,04	-9,78	-8,35
CTST-18	75	75	75	25,02	26,77	<b>36,68</b>	4,56	0,70	-11,03	4,08	12,18	-9,29	4,04	-10,50	-8,65

FCPAS çözümlerinden elde edilen GŞF değerleri, mevcut kriterlerden Richard, Tanaka ve Pook kriterlerinde verilen eşdeğer GŞF formülasyonunda yerine koyularak, çatlak ucunun merkezi, ön ve arka kenarı için eşdeğer GŞF değerleri elde edilmiş ve Tablo 2.39.'da verilmiştir.

Tablo 2.39. CTST numunesinin, Richard, Tanaka ve Pook kriterine göre elde edilen eşdeğer GŞF değerleri.

Numune No	Yüklemeye Açısı (°)			Kv (3B RICHARD KRITERINE GÖRE)			Kv (3B TANAKA KRITERINE GÖRE)			Kv (3B POOK KRITERINE GÖRE)					
	M I-II (α)	M II-III (β)	M I-III (θ)	Merkez	Arka Kenar	Ön Kenar	Merkez	Arka Kenar	Ön Kenar	Kv (I-II) Merkez	Kv (I-II) Arka Kenar	Kv (I-II) Ön Kenar	Kv (I-II-III) Merkez	Kv (I-II-III) Arka Kenar	Kv (I-II-III) Ön Kenar
CTST-01	15	15	15	16,15	14,67	13,81	16,10	14,42	13,78	16,11	14,63	13,80	26,77	24,32	22,91
CTST-02	15	15	15	16,52	15,08	14,12	16,45	14,74	14,10	16,48	15,03	14,11	27,38	25,00	23,43
CTST-03	15	45	15	17,32	15,74	15,48	17,06	14,89	15,12	17,07	15,57	15,36	28,49	25,99	25,59
CTST-04	15	45	15	17,57	16,20	15,73	17,29	15,18	15,32	17,31	16,03	15,60	28,90	26,77	25,99
CTST-05	15	75	15	16,43	14,48	14,78	16,12	13,96	14,26	16,10	14,28	14,57	26,93	23,85	24,34
CTST-06	15	75	15	16,41	14,47	14,75	16,10	13,95	14,24	16,08	14,26	14,54	26,90	23,82	24,29
CTST-07	45	15	45	12,90	12,66	11,48	12,25	10,82	11,35	12,54	12,32	11,37	21,06	20,81	18,94
CTST-08	45	15	45	14,32	14,87	12,38	13,36	12,69	12,27	14,00	14,57	12,27	23,48	24,57	20,44
CTST-09	45	45	45	15,39	16,62	14,00	14,33	14,26	12,32	13,36	15,56	13,14	23,54	26,82	22,48
CTST-10	45	45	45	15,40	16,65	14,02	14,34	14,28	12,33	13,38	15,59	13,16	23,56	26,87	22,51
CTST-11	45	75	45	16,56	18,48	17,62	16,49	16,60	15,49	12,76	16,92	16,14	23,82	29,58	28,16
CTST-12	45	75	45	16,57	18,50	17,63	16,49	16,62	15,51	12,76	16,95	16,15	23,83	29,62	28,19
CTST-13	75	45	75	10,85	15,96	11,08	15,16	19,13	12,01	5,36	13,97	9,21	13,73	25,40	17,15
CTST-14	75	45	75	10,93	16,26	11,23	15,24	19,48	12,20	5,44	14,27	9,37	13,85	25,89	17,42
CTST-15	75	60	75	11,60	16,47	13,06	16,93	19,45	14,98	4,79	14,33	10,99	13,90	26,13	20,42
CTST-16	75	60	75	11,97	17,78	14,01	17,35	21,02	16,11	5,08	15,59	11,87	14,45	28,28	21,97
CTST-17	75	75	75	13,30	17,95	16,24	20,17	21,46	19,05	4,56	15,35	13,67	15,27	28,32	25,44
CTST-18	75	75	75	13,58	19,05	17,08	20,52	22,69	20,13	4,72	16,44	14,49	15,62	30,15	26,84

Son olarak bu eşdeğer GŞF değerlerine karşılık gelen kritik kopma yükleri hesaplanarak deneyden elde edilen kopma yükleri ile birlikte Tablo 2.40.'ta verilmiştir.

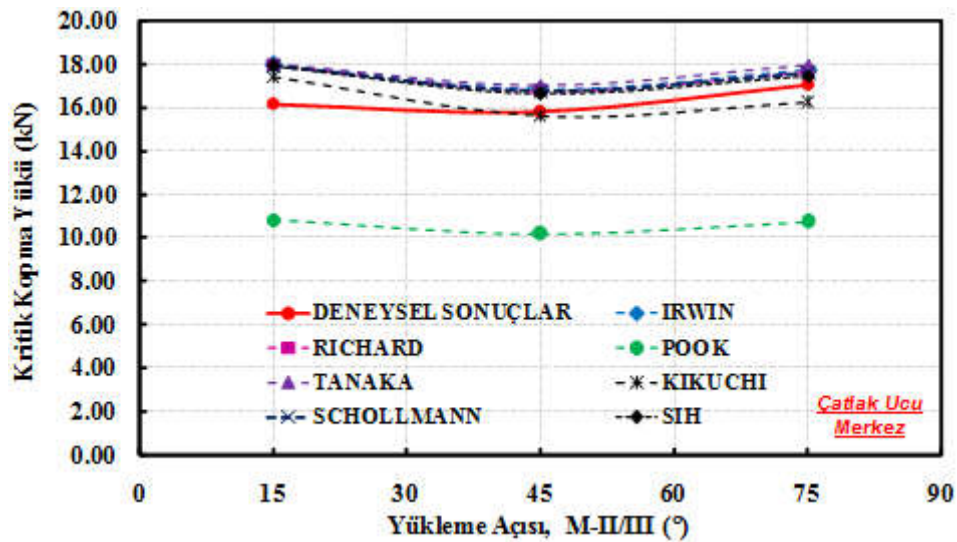
Tablo 2.40. CTST numunesinin kırılma tokluğu deneylerinden ve Richard, Tanaka ve Pook kriterlerinden elde edilen kopma yükü değerleri.

Numune No	Mod I-II Yük Açısı (α)	Mod II-III Yük Açısı (β)	Mod I-III Yük Açısı (θ)	P kritik (N) (3D RICHARD KRITERINE GÖRE)			P kritik (N) (3D TANAKA KRITERINE GÖRE)			P kritik (N) (3D POOK KRITERINE GÖRE)			P(kritik) Deneysel Sonuçlara göre (N)
				Merkez	Arka Kenar	Ön Kenar	Merkez	Arka Kenar	Ön Kenar	Merkez	Arka Kenar	Ön Kenar	
CTST-01	15	15	15	17978	19788	21029	18037	20142	21073	10845	11937	12674	16175
CTST-02	15	15	15	17587	19267	20565	17660	19706	20602	10609	11619	12396	15922
CTST-03	15	45	15	16785	18469	18775	17039	19520	19221	10204	11183	11359	15835
CTST-04	15	45	15	16527	17932	18465	16799	19138	18965	10052	10850	11174	14985
CTST-05	15	75	15	17648	20029	19622	17986	20773	20342	10768	12162	11915	17087

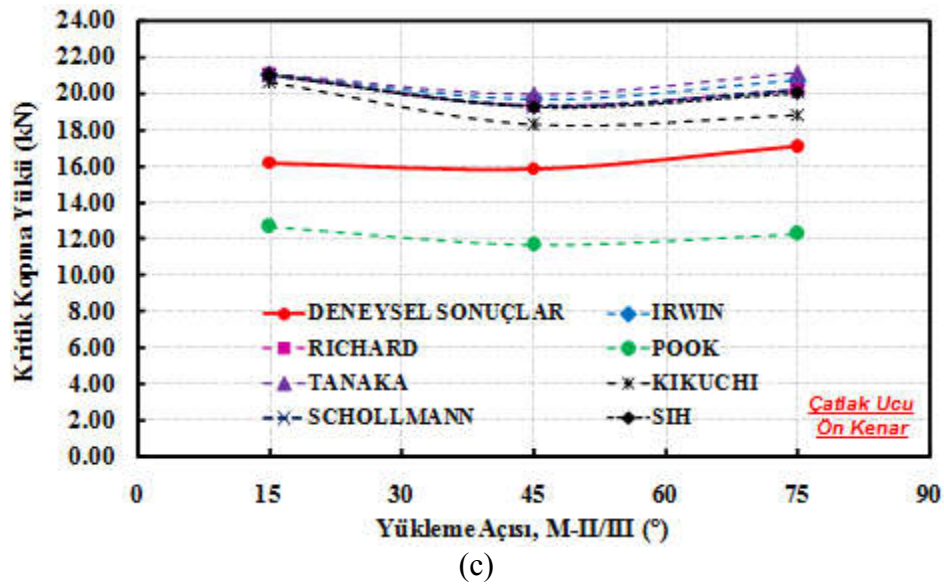
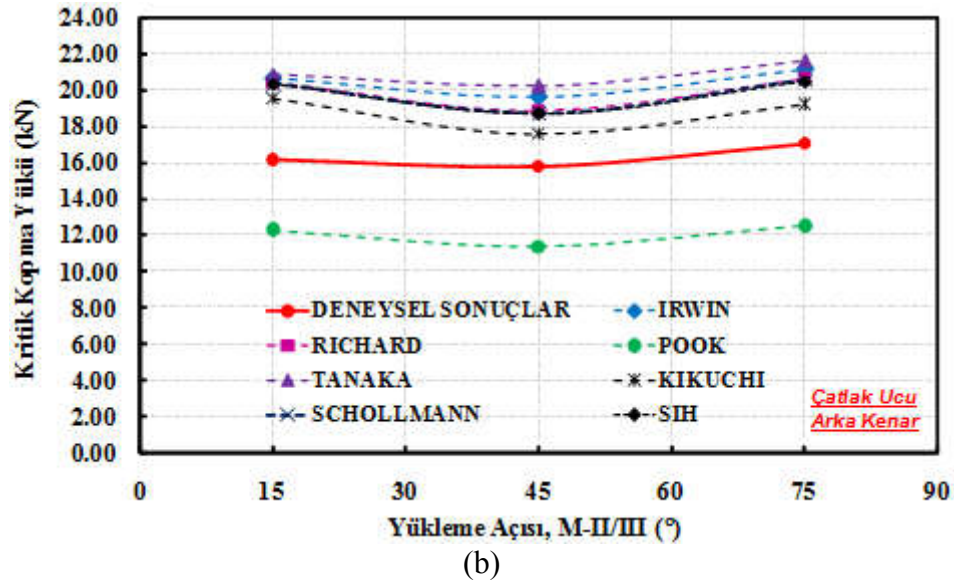
Tablo 2.40. (Devamı)

CTST-06	15	75	15	17683	20063	19677	18022	20809	20389	10789	12183	11949	<b>17101</b>
CTST-07	45	15	45	22542	22957	25331	23731	26872	25602	13802	13970	15346	<b>20838</b>
CTST-08	45	15	45	20234	19480	23413	21693	22829	23606	12340	11793	14180	<b>20667</b>
CTST-09	45	45	45	18853	17459	20718	20246	20347	23551	12327	10817	12908	<b>22095</b>
CTST-10	45	45	45	18848	17443	20705	20242	20327	23542	12323	10806	12900	<b>21691</b>
CTST-11	45	75	45	17511	15691	16463	17590	17470	18727	12173	9803	10300	<b>23819</b>
CTST-12	45	75	45	17496	15665	16438	17574	17438	18696	12162	9786	10284	<b>22985</b>
CTST-13	75	45	75	26723	18169	26184	19130	15157	24138	21127	11419	16911	<b>38430</b>
CTST-14	75	45	75	26531	17836	25812	19034	14887	23774	20933	11199	16649	<b>39431</b>
CTST-15	75	60	75	24997	17609	22200	17127	14912	19353	20858	11097	14200	<b>37575</b>
CTST-16	75	60	75	24221	16315	20695	16711	13796	17998	20076	10253	13199	<b>38105</b>
CTST-17	75	75	75	21845	16183	17885	14401	13536	15248	19028	10258	11417	<b>36769</b>
CTST-18	75	75	75	21379	15235	16995	14146	12792	14415	18576	9628	10813	<b>36680</b>

Tablolarda sonuçları verilen, kriterlere göre yapılan hesaplamalar diğer üç boyutlu kırılma kriterleri için de yapılmıştır. Şekil 2.123.'te, mod-I/II=15, mod-I/III=15° yükleme durumunda, çatlak ucu merkezi, ön ve arka kenarı için elde edilen kopma yüklerinin, mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açlarına göre değişim grafikleri verilmiştir.



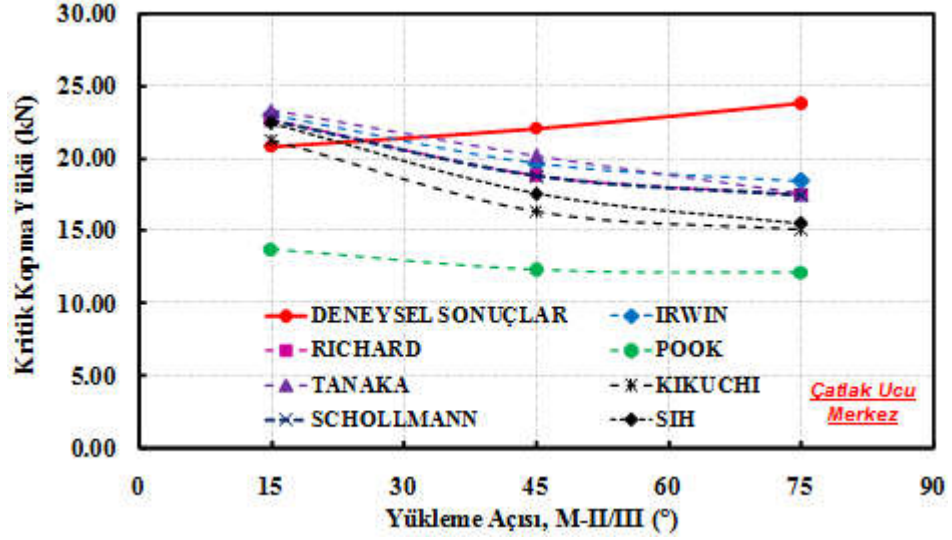
Şekil 2.123. CTST numunesinin, mod-I/II=15, mod-I/III=15° yükleme durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açlarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı.



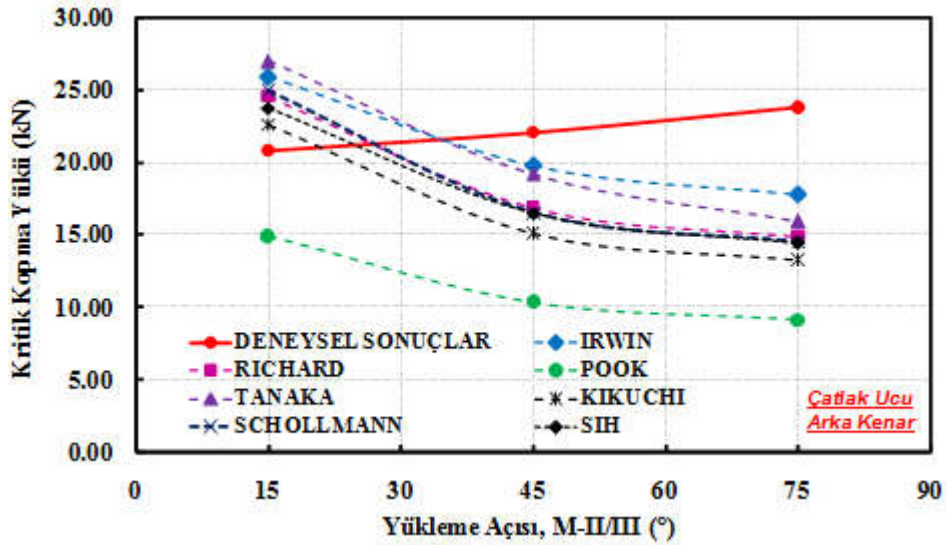
Şekil 2.123. CTST numunesinin, mod-I/II=15, mod-I/III=15° yüklem durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=15°, 45° ve 75° yüklem açılarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı. (Devamı)

Mod-I/II=15, mod-I/III=15° yüklem açısında, deneysel kopma yüklerine en yakın eğilimler çatlak ucu merkezi için çizdirilen dağılım grafiğinde (Şekil 2.123.a) görülmüştür. Kikuchi kriteri her üç durum için de deneysel sonuçlara en yakın dağılımı vermektedir.

Şekil 2.124.'te, mod-I/II=45, mod-I/III=45° yükleme durumunda, çatlak ucu merkezi, ön ve arka kenarı için elde edilen kopma yüklerinin, mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açılarına göre değişim grafikleri verilmiştir.

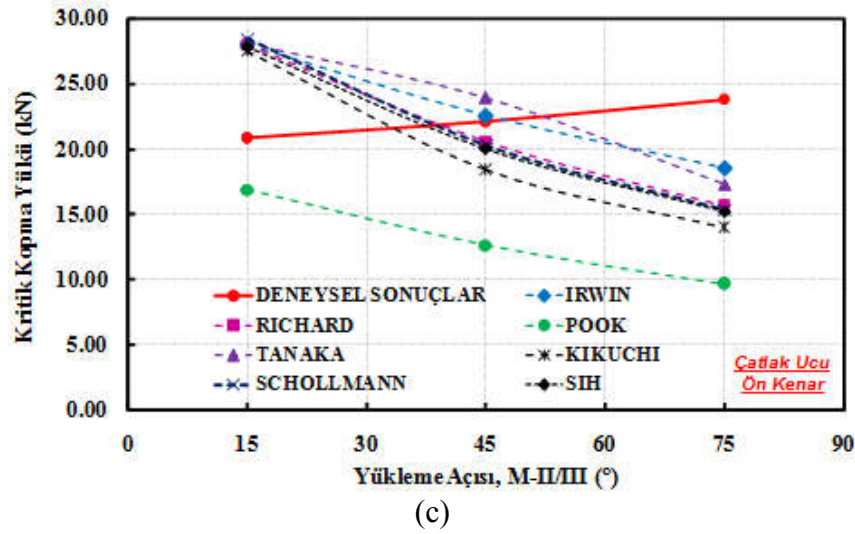


(a)



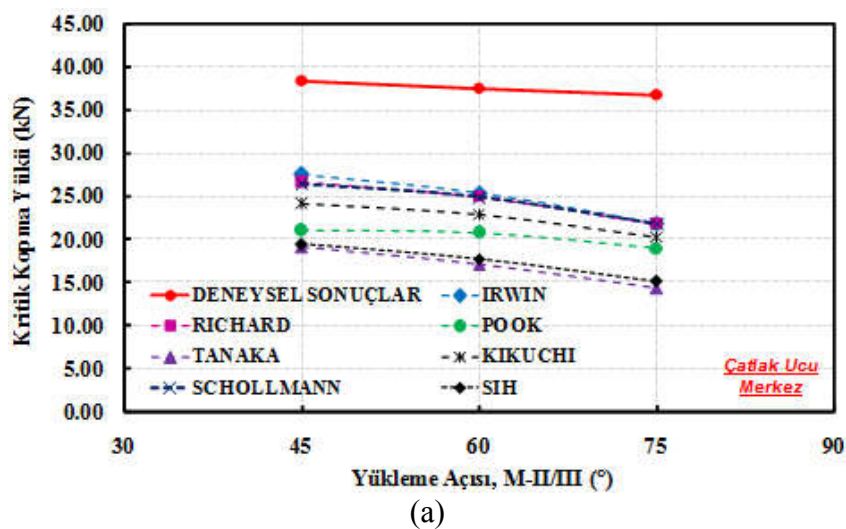
(b)

Şekil 2.124. CTST numunesinin, mod-I/II=45, mod-I/III=45° yükleme durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açlarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı.



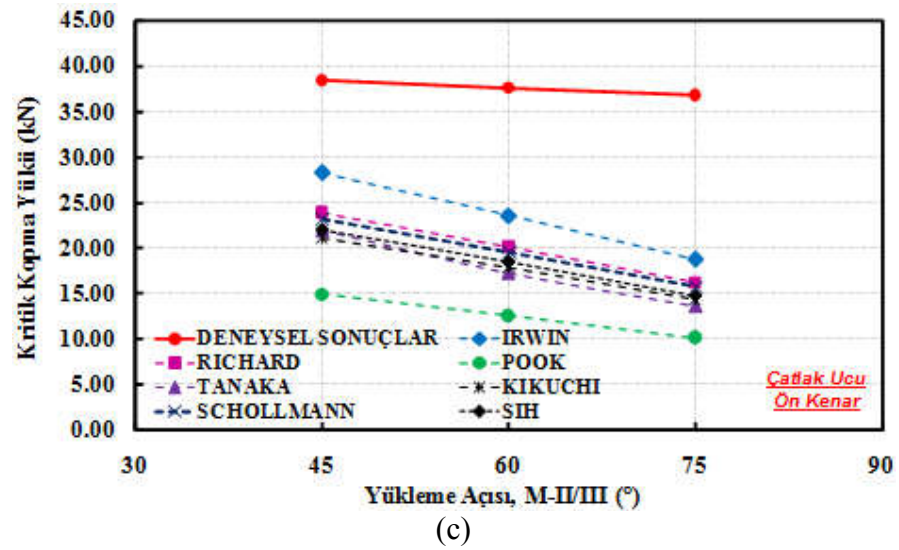
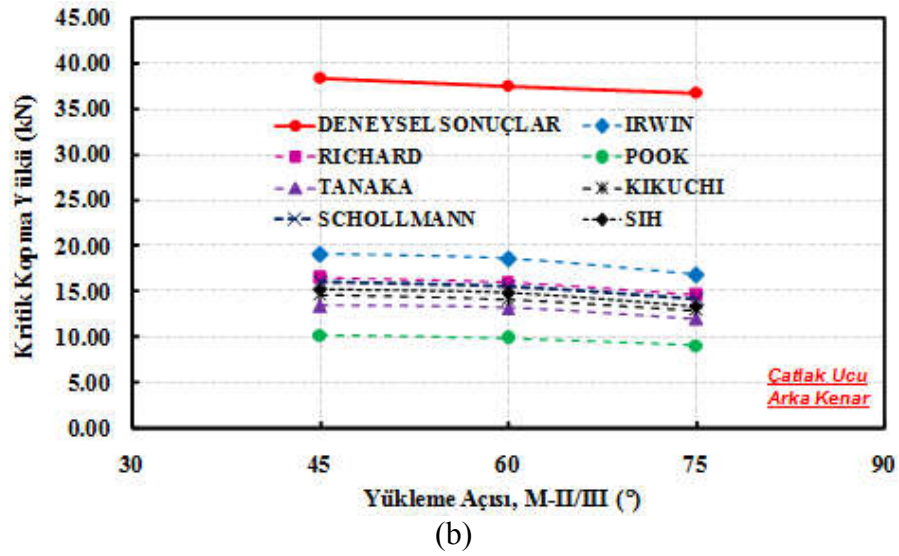
Şekil 2.124. CTST numunesinin, mod-I/II=45, mod-I/III=45° yüklemeye durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=15°, 45° ve 75° yüklemeye açılarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı. (Devamı)

Mod-I/II=45, mod-I/III=45° yüklemeye açısında, tüm kriterler deneysel kopma yüklerinden farklı bir eğilim göstermektedirler. Kriterlere göre yüklemeye açısı arttıkça kopma yüklerinin düşmesi beklenirken, yüklemeye açısının artışıyla numunenin daha yüksek yüklerde koptuğu görülmektedir. Şekil 2.125.'te, mod-I/II=75, mod-I/III=75° yüklemeye durumunda, çatlak ucu merkezi, ön ve arka kenarı için elde edilen kopma yüklerinin, mod-II/III=45°, 60° ve 75° yüklemeye açılarına göre değişim grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.125. CTST numunesinin mod-I/II=75, mod-I/III=75° yüklemeye durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=45°, 60° ve 75° yüklemeye açılarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı.





Şekil 2.125. CTST numunesinin mod-I/II=75, mod-I/III=75° yükleme durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=45°, 60° ve 75° yükleme açlarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı. (Devamı)

Bu yükleme açılarında, her üç durum için de kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin deneylerden elde edilen kopma yüklerine göre çok düşük olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen kopma yüklerine en yakın sonuç veren kriter yaklaşık 10 kN farkla sonuca yaklaşmaktadır. Sonuçlar arasındaki yük farklılıkları çok yüksek mertebelere sahiptir. Her üç durum da değerlendirildiğinde, bu yükleme

açıları için, diğer kriterlere oranla deneysel sonuçlara en yakın eğilimde olan Irwin kriteridir.

Mod-I/II=75, mod-I/III=75° ve mod-II/III=45°, 60° ve 75° yükleme açıları, mod-II ve mod-III kırılma modlarının mod-I kırılma moduna oranla çok daha baskın olduğu yükleme durumlarıdır. Mod-I/II CTS ve T-numunesi sonuçlarında, Mod-I/III CTT-numunesi sonuçlarında ve son olarak mod-I/II/III CTST-numunesi sonuçlarında da görüldüğü gibi, bu şekilde mod-II ve mod-III yüklerinin mod-I yüküne oranla çok daha baskın olduğu yükleme durumlarında mevcut kriterler deneysel sonuca ulaşma noktasında yetersiz kalmaktadırlar. Yükleme açıları arttıkça yani mod-II ve mod-III baskınlığı arttıkça, mevcut iki ve üç boyutlu kriterlerde gerçek yüklerden sapmalar gözlenmeye başlanmaktadır. Ayrıca sonuçlardan görüldüğü gibi, çatlak ucu merkezi, ön ve arka kenarı için elde edilen sonuçlar oldukça farklı çıkmaktadır. Bu yüzden çatlak başlangıcının hangi noktadan olduğunun doğru bir şekilde tespit edilip bu noktadaki değerlerin dikkate alınması gerekmektedir.

Mod-I/II, I/III ve I/II/III testleri sonrasında yapılan değerlendirmelerin sonucunda, mevcut iki ve üç boyutlu kriterlerin bazı yükleme durumlarında yetersiz kaldığı görülerek, yeni mod-I/II ve mod-I/II/III kriterleri geliştirilmiş ve mevcut kriterler ile sonuçlar tekrar kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Mod-I/II/III iyileştirilmiş kriterinin gelişiminde çatlak başlangıcının hangi noktadan olduğunun tespiti ile ilgili bir deneysel çalışma yapılmış ve bu durum göz önünde bulundurularak iyileştirilmiş kriter geliştirilmiştir.

## **2.7. İki Boyutlu Kırılma ve Çatlak Yüzeyi İlerleme Kriteri Geliştirilmesi**

### **2.7.1. Mod-I/II CTS (Richard) numunesi sonuçlarını kullanılarak geliştirilen kriter**

Bu bölümde öncelikle CTS numunelerinin kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kopma yüklerine göre kriter geliştirme çalışması yapılmıştır. Daha sonra CTS numunesi verilerine göre oluşturulan kriter T-numunesine uygulanarak, T-numunesi



kırılma tokluğu testlerinden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve sağlamaları yapılmıştır. Böylece hem kriter, hem de T-numunenin geçerliliği ve sonuçları da doğrulanmaya çalışılmıştır. Bir sonraki aşamada CTS ve T-numunesinin her ikisi için elde edilen deneysel veriler kullanılarak daha gelişmiş ve kapsayıcı bir kriter önerilmiştir. Ayrıca her iki numune için gerçekleştirilen farklı açılardaki kırılma tokluğu deneylerinden sonra, kırılan numunelerden ölçülen çatlak sapma açısı değerleri kullanılarak çatlak sapma açısı için de bir kriter geliştirilmiştir. Geliştirilen kriterler ve deneysel sonuçlarla mukayesesi verilmeden önce kriter gelişimi için izlenen yoldan aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

Kırılma tokluğu testinden önce farklı çatlak uzunlukları ve yükleme açıları için FCPAS/FRAC3D yardımıyla kırılma analizleri gerçekleştirilerek çatlak ucu boyunca  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  elde edilmektedir. Kırılma tokluğu testi sonrasında ölçülen çatlak uzunluğuna göre interpolasyon yapılarak, o çatlak uzunluğuna tekabül eden  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  hesaplanmaktadır. Kırılma tokluğu testinde, çatlak ucundaki eşdeğer gerilme şiddet faktörünün ( $K_{eş}$ ) kırılma tokluğuna ( $K_{Ic}$ ) ulaştığı anda numunenin kırıldığı düşünülerek, ölçülen çatlak uzunluğuna karşılık gelen  $K_{eş}$  değeri hesaplanmaktadır. Daha sonra DataFit (2015), lineer ve lineer olmayan regresyon analiz programı yardımıyla en uygun denklemler elde edilerek, tutarlı terimlerden oluşan kriterler geliştirilmiştir.

CTS numuneleri kullanılarak  $\theta=0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kopma yükleri ve ölçülen çatlak uzunluk değerleri ile FCPAS çözümlerinden elde edilen  $K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörleri kullanılarak geliştirilen kırılma kriteri aşağıdaki Denklem (2.27) 'de verilmiştir.

$$K_{eş} = \left( a \cdot K_I^4 + b \cdot K_{II}^4 + c \cdot K_I^2 \cdot K_{II}^2 \right)^{1/4} \quad (2.27)$$

Tablo 2.41.'de, yukarıdaki denklemde yer alan katsayılar verilmiştir.

Tablo 2.41. CTS numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin katsayıları.

a	b	c
0,9151	-0,2401	2,4070

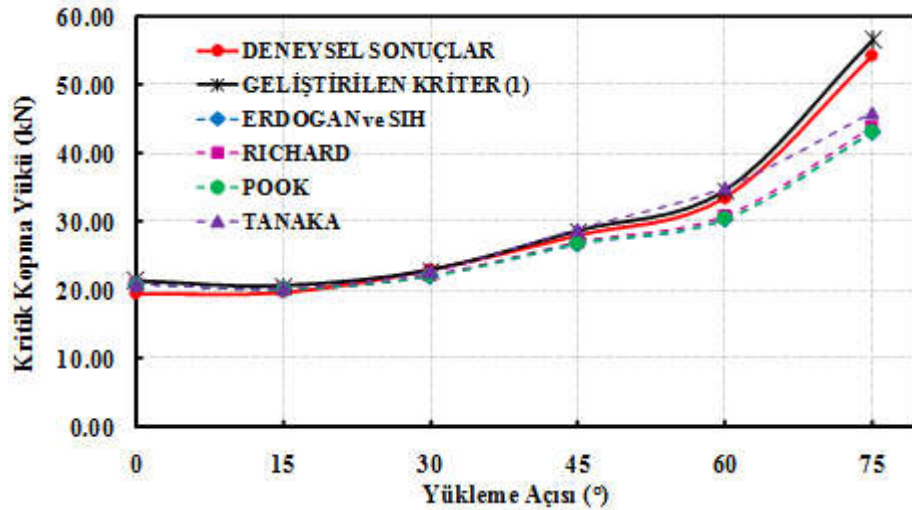
Geliştirilen kritere göre CTS numune verilerini kullanarak, eşdeğer GŞF değerleri ve kopma yükleri hesaplanmış ve deneysel kopma yükleri ile karşılaştırmalı olarak Tablo 2.42.'de verilmiştir.

Tablo 2.42. Geliştirilen kritere göre CTS numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF ile hesaplanan kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Numune No	Yük Açısı (°)	Çatlak Uzunluk Değeri (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m <sup>1/2</sup> )		GELİŞTİRİLEN KRİTERE GÖRE		Deneysel Kopma Yükü (kN)	Fark (%)
			K <sub>I</sub>	K <sub>II</sub>	Keş (Mpa*m <sup>1/2</sup> )	Kopma Yükü (kN)		
CTS-01	0	46,50	9,47	0,00	9,27	12,52	11,38	9,10
CTS-02	15	46,07	4,88	0,45	4,80	24,33	26,11	7,33
CTS-03	15	45,96	4,85	0,45	4,77	24,45	26,68	9,11
CTS-04	30	45,08	3,93	0,82	3,95	28,18	27,52	2,32
CTS-05	30	44,94	3,91	0,81	3,92	29,86	28,59	4,27
CTS-06	30	45,03	3,92	0,82	3,93	30,07	29,57	1,67
CTS-07	45	44,95	3,16	1,17	4,44	35,18	35,61	1,21
CTS-08	45	44,75	3,16	1,14	3,34	35,46	33,01	6,93
CTS-09	45	45,40	3,28	1,21	3,33	33,97	35,60	4,82
CTS-10	60	44,93	2,20	1,46	3,46	45,42	46,25	1,83
CTS-11	60	45,22	2,25	1,50	2,59	44,38	46,90	5,67
CTS-12	60	45,20	2,24	1,50	2,65	44,58	45,71	2,53
CTS-13	75	46,38	1,25	1,86	2,65	62,57	62,73	0,26
CTS-14	75	45,24	1,13	1,70	1,87	69,21	68,07	1,64

Kriter gelişimi CTS numune verileri ile gerçekleştirildiği için kopma yükleri, beklendiği gibi deneysel sonuçlara yakın çıkmıştır. Ortalama % 4,19 hata oranı ile kriterden elde edilen kopma yükleri deney sonuçları ile örtüşmektedir.

Şekil 2.126.'da, CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 2.126. CTS numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açısına göre değişim grafiği.

Geliştirilen kriterin, her bir yüklemeye durumu için birebir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. CTS ve T-numune verilerini kullanarak ikinci bir kriter daha geliştirildiği için, CTS numune verileri ile geliştirilen kriter "1" no.lu kriter olarak isimlendirilmiştir.

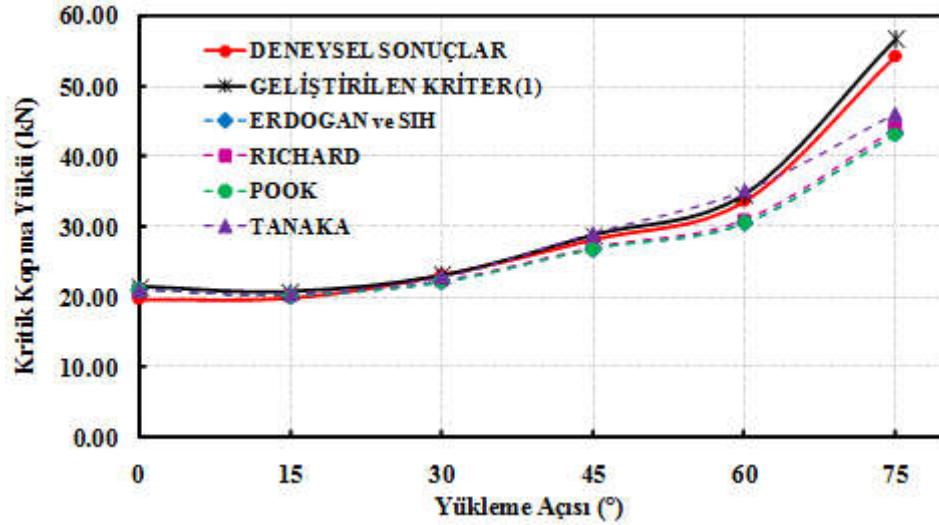
### 2.7.2. CTS numune verileri ile geliştirilen kriterin T-numunesine uygulanması

Tablo 2.43.'te, CTS numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin, T-numunesi için gerçekleştirilen FCPAS analiz sonuçlarına uygulanması sonucu elde edilen GŞF değerleri ( $K_1$  ve  $K_{11}$ ) kullanılarak hesaplanan deneysel kopma yükleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Ortalama % 4,52 hata oranı ile CTS numune verilerini kullanarak geliştirilen kriter, T-numunesi deney sonuçları ile örtüşmektedir. Böylece hem kriterin hem de mod-I/II karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme problemleri için önerilen yeni numunenin doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.43. Geliştirilen kriterin (1) ve T-numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF değerlerini kullanılarak hesaplanan kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Numune No	Yük Açısı (°)	Çatlak Uzunluk Değeri (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m <sup>1/2</sup> )		GELİŞTİRİLEN KRİTERE GÖRE		Deneysel Kopma Yüğü (kN)	Fark (%)
			K <sub>I</sub>	K <sub>II</sub>	Keş (Mpa*m <sup>1/2</sup> )	Kopma Yüğü (kN)		
T-01	0	27,57	<b>14,71</b>	<b>0,00</b>	14,38	20,16	<b>18,82</b>	6,65
T-02	0	26,03	<b>13,73</b>	<b>0,00</b>	13,43	21,48	<b>19,60</b>	8,75
T-03	15	26,93	<b>14,24</b>	<b>1,08</b>	13,98	20,75	<b>19,80</b>	4,58
T-04	15	26,34	<b>14,06</b>	<b>1,04</b>	13,80	20,99	<b>19,70</b>	6,15
T-05	30	26,21	<b>12,69</b>	<b>1,84</b>	12,58	23,03	<b>23,07</b>	0,17
T-06	30	26,90	<b>12,87</b>	<b>1,94</b>	12,77	22,71	<b>20,64</b>	9,11
T-07	45	25,24	<b>9,91</b>	<b>2,54</b>	10,09	28,75	<b>28,09</b>	2,30
T-08	45	25,46	<b>10,06</b>	<b>2,52</b>	10,22	28,38	<b>29,21</b>	2,92
T-09	60	27,13	<b>7,74</b>	<b>3,38</b>	8,36	34,62	<b>33,59</b>	2,98
T-10	60	26,58	<b>7,54</b>	<b>3,14</b>	8,09	35,86	<b>34,76</b>	3,07
T-11	75	26,89	<b>4,00</b>	<b>3,58</b>	5,13	56,64	<b>54,31</b>	4,11
T-12	75	26,70	<b>3,94</b>	<b>3,60</b>	5,08	56,98	<b>55,04</b>	3,40

Şekil 2.127.'de T-numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği verilmiştir. Geliştirilen kriterin tüm yükleme açılarında ve özellikle 75° yükleme açısında deneysel sonuçlara çok yakın eğilimde olduğu görülmektedir. Böylece, hem farklı bir deney numunesi olan CTS numunesinden elde edilen kriter T-numunesine uygulanarak kriterin genel olarak geçerliliği ve uygulanabilirliği gösterilmiş, hem de T-numunesinin de karışık modlu yükleme altında tokluk testleri için geçerli bir numune türü olduğu ispat edilmiştir.



Şekil 2.127. T-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği.

### 2.7.3. Mod-I/II CTS (Richard) ve T-numunesi sonuçlarını kullanılarak geliştirilen kriter

CTS numuneleri kullanılarak  $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri ile T-numuneleri kullanılarak  $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kopma yükleri ve FCPAS çözümlerinden elde edilen  $K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörleri kullanılarak, tüm verileri kapsayan ikinci bir veri tabanı ile yeni bir kriter geliştirilmiştir. Geliştirilen kriter Denklem (2.28)'de verilmiştir.

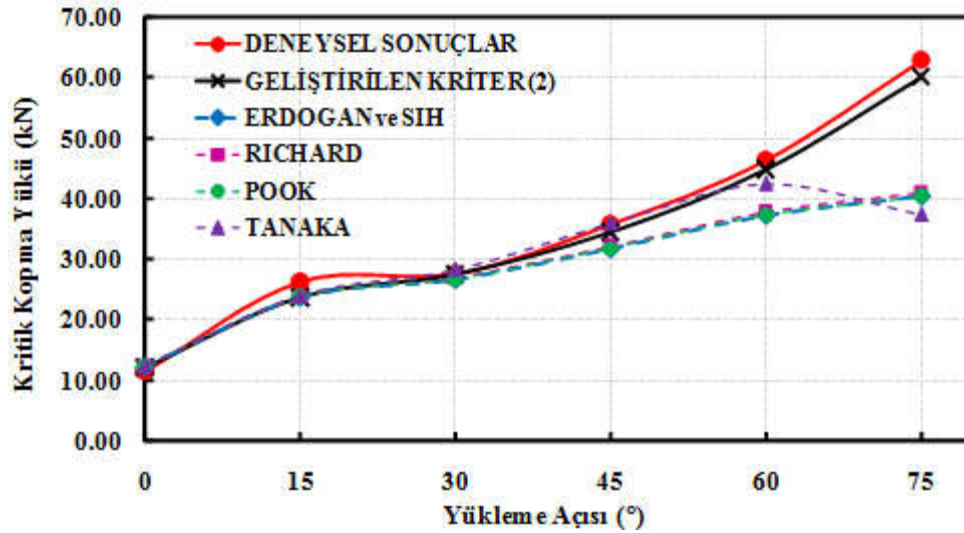
$$K_{eş} = \left( a \cdot K_I^4 + b \cdot K_{II}^4 + c \cdot K_I^2 \cdot K_{II}^2 \right)^{1/4} \quad (2.28)$$

Tablo 2.44.'te, yukarıdaki denklemde yer alan katsayılar verilmiştir.

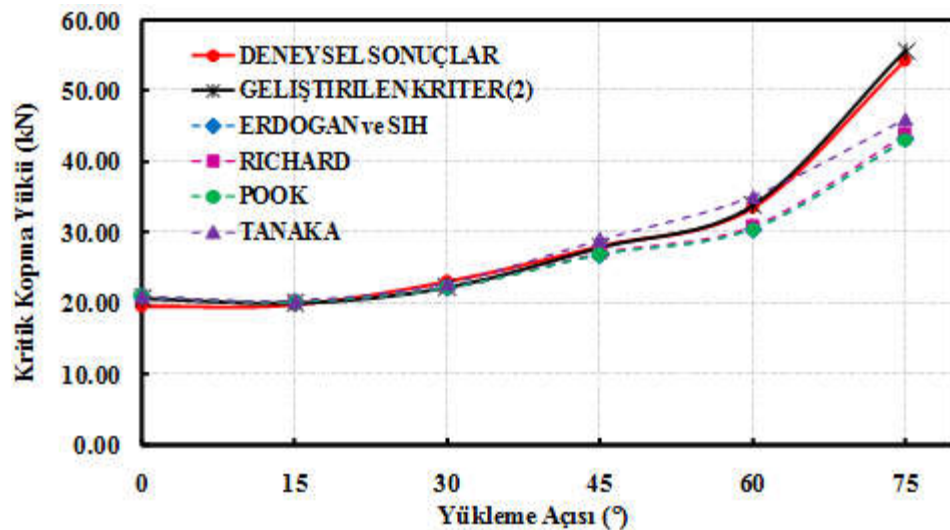
Tablo 2.44. CTS ve T-numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin katsayıları.

a	b	c
1,0519	-0,0350	2,3056

Şekil 2.128.'de, CTS numunesi için mevcut kriterlere ve geliştirilen ikinci kriterle göre hesaplanan kopma yüklerinin deneysel kopma yükleri ile kıyaslandığı grafik verilmiştir. Benzer grafik T-numunesi için de oluşturularak Şekil 2.129.'da verilmiştir.



Şekil 2.128. CTS numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut kriterler ve geliştirilen ikinci kriterden elde edilen kopma yüklerinin yüklem açısına göre değişim grafiği.



Şekil 2.129. T-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut kriterler ve geliştirilen ikinci kriterden elde edilen kopma yüklerinin yüklem açısına göre değişim grafiği.

CTS ve T-numune verilerini kullanarak geliştirilen kriter, CTS numunesi için elde edilen deneysel kopma yükü sonuçlarına ortalama %4,91 hata oranı ile yaklaşmıştır.

T-numunesi için hesaplanan hata oranı ise %2,92'dir. Görüldüğü gibi her iki kriterde diğer kriterlere oranla deneysel sonuçlara en yakın eğilimi vermiştir.

#### 2.7.4. Mod-I/II CTS (Richard) ve T-numunesi sonuçlarını kullanılarak geliştirilen çatlak sapma açısı kriteri

CTS ve T-numuneleri kullanılarak  $\theta=0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri sonrasında kırılan numune yüzeylerinden ölçülen çatlak sapma açıları ile FCPAS/FRAC3D çözümlerinden elde edilen  $K_I$  ve  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörleri kullanılarak, mod-I/II analizlerinde bir sonraki çatlak profilinin tahmininde gerekli olan çatlak sapma açısı kriteri geliştirilmiştir. Geliştirilen kriter Denklem (2.29)'da verilmiştir. Kriter gelişiminde diğer kriterlerde olduğu gibi tutarlı terimlerden oluşmasına dikkat edilmiştir.

$$\theta_0 = -\arccos\left(\frac{a \cdot K_{II}^2 + K_I \cdot \sqrt{K_I^2 + b \cdot K_{II} \cdot K_I + c \cdot K_{II} \cdot K_I}}{K_I^2 + d \cdot K_{II}^2}\right) \quad (2.29)$$

Denkleminde yer alan katsayılar Tablo 2.45.'te verilmiştir.

Tablo 2.45. CTS ve T-numune verileri kullanılarak geliştirilen çatlak sapma açısı kriterinin katsayıları.

a	b	c	d
0,1723	5,1062	-2,7483	-1,1636

Geliştirilen kriter ve mevcut kriterlere göre CTS ve T-numuneleri için elde edilen çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 2.46. ve Tablo 2.47.'de verilmiştir. Diğer kriterler ile karıştırılmaması için çatlak sapma açısı için geliştirilen kriter "3" no.lu kriter olarak isimlendirilmiştir.

Tablo 2.46. Geliştirilen kritere ve mevcut kriterlere göre CTS numunesi için elde edilen çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

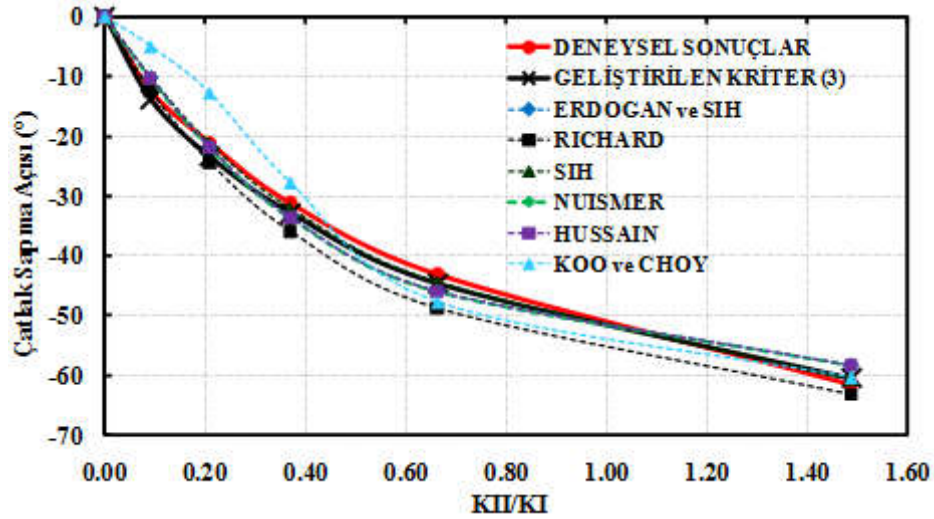
ÇATLAK SAPMA AÇILARI (°)									
Numune No	Yük Açısı (°)	Erdoğan ve Sih	Richard	Sih	Nuismer	Hussain	Koo ve Choy	Geliştirilen Kriter (3)	Deneysel Sonuçlar
CTS-01	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CTS-02	15	-10,28	-12,44	-10,20	-10,28	-10,28	-4,99	-13,90	-12,44
CTS-03	15	-10,37	-12,54	-10,29	-10,37	-10,37	-5,04	-13,97	-12,59
CTS-04	30	-21,86	-24,36	-21,22	-21,86	-21,86	-12,78	-23,41	-21,12
CTS-05	30	-21,72	-24,22	-20,22	-21,72	-21,72	-11,86	-23,30	-20,66
CTS-06	30	-21,87	-24,37	-21,24	-21,87	-21,87	-12,79	-23,42	-20,22
CTS-07	45	-33,64	-35,91	-32,08	-33,64	-33,64	-27,82	-32,82	-31,20
CTS-08	45	-33,03	-35,31	-31,51	-33,03	-33,03	-26,82	-32,31	-31,72
CTS-09	60	-46,00	-48,75	-44,37	-46,00	-46,00	-47,82	-44,63	-43,09
CTS-10	60	-46,13	-48,90	-44,52	-46,13	-46,13	-48,01	-44,79	-43,64
CTS-11	60	-46,14	-48,91	-44,53	-46,14	-46,14	-48,01	-	-
CTS-12	75	-58,39	-63,16	-60,71	-58,39	-58,39	-60,45	-60,52	-61,48
CTS-13	75	-58,53	-63,33	-60,94	-58,53	-58,53	-60,55	-60,78	-59,53

Tablo 2.47. Geliştirilen kritere ve mevcut kriterlere göre T-numunesi için elde edilen çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

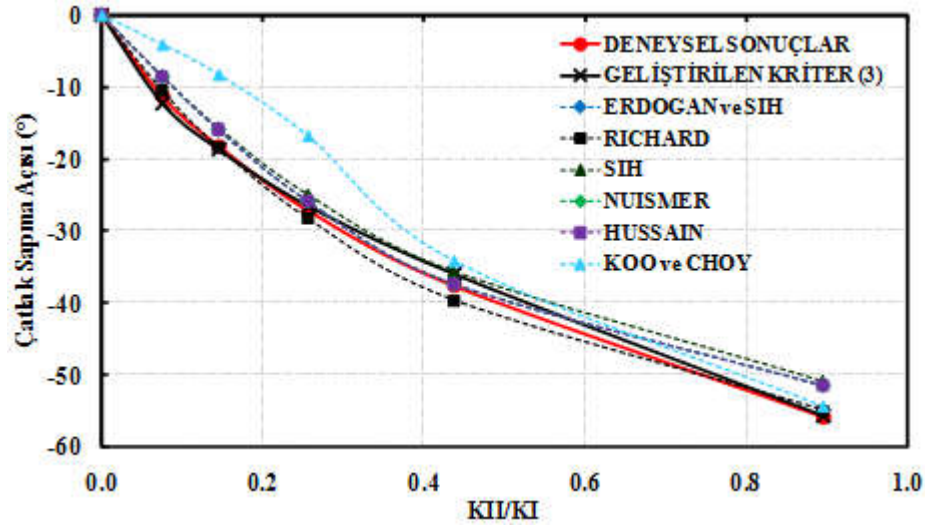
ÇATLAK SAPMA AÇILARI (°)									
Numune No	Yük Açısı (°)	Erdoğan ve Sih	Richard	Sih	Nuismer	Hussain	Koo ve Choy	Geliştirilen Kriter (3)	Deneysel Sonuçlar
T-01	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T-02	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T-03	15	-8,55	-10,52	-8,50	-8,55	-8,55	-4,09	-12,31	-11,35
T-04	15	-8,33	-10,27	-8,29	-8,33	-8,33	-3,98	-12,11	-11,08
T-05	30	-15,90	-18,39	-15,63	-15,90	-15,90	-8,28	-18,67	-18,22
T-06	30	-16,45	-18,95	-16,15	-16,45	-16,45	-8,64	-19,11	-19,80
T-07	45	-25,84	-28,25	-24,90	-25,84	-25,84	-16,77	-26,52	-27,18
T-08	45	-25,40	-27,83	-24,50	-25,40	-25,40	-16,29	-26,18	-26,85
T-09	60	-37,31	-39,59	-35,54	-37,31	-37,31	-34,12	-35,98	-37,63
T-10	60	-36,24	-38,51	-34,52	-36,24	-36,24	-32,26	-35,04	-42,38
T-11	75	-51,38	-54,85	-50,73	-51,38	-51,38	-54,33	-55,72	-55,85
T-12	75	-51,69	-55,20	-51,12	-51,69	-51,69	-54,65	-61,98	-62,01



Şekil 2.130.'da CTS numunesi için ve Şekil 2.131.'de ise T-numunesi için, mevcut kriterlere ve geliştirilen çatlak sapma açısı kriterine göre hesaplanan çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sapma açıları ile kıyaslandığı grafik verilmiştir. Şekillerde çatlak sapma açılarının  $K_{II}/K_I$  oranlarına göre değişimleri verilmiştir. CTS numunesi için, ortalama %6,58 hata oranı ile geliştirilen kriter deneysel sonuçları karşılamaktadır. Koo ve Choy kriteri hariç diğer kriterler  $45^\circ$  yüklemeye açısına kadar deneysel sapma açılarına yakın bir eğilim göstermektedirler. Ancak  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yüklemeye açısında deneysel sonuçlardan bir miktar sapma gözlenmektedir. Benzer eğilim T-numunesi için elde edilen sonuçlarda da görülmektedir. T-numunesi için, ortalama %4,59 hata oranı ile geliştirilen kriter deneysel sonuçları karşılamaktadır.



Şekil 2.130. CTS numunesi için, deneysel çatlak sapma açıları ile mevcut kriterler ve geliştirilen kriterden elde edilen sapma açılarının  $K_{II}/K_I$  oranına göre değişim grafiği.



Şekil 2.131. T-numunesi için elde edilen deneysel çatlak sapma açıları ile mevcut kriterler ve geliştirilen kriterlerden elde edilen sapma açılarının  $K_{II}/K_I$  oranına göre değişim grafiği.

## 2.8. Üç Boyutlu Kırılma ve Çatlak Yüzeyi İlerleme Kriteri Geliştirilmesi

Bölüm 2.4.'te CTT numunesi için gerçekleştirilen mod-I/III kırılma analizleri sonuçlarından görüldüğü gibi, analiz sonrasında çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_{II}$  GŞF değerleri, çatlak ucunun bir kenarından diğer kenarına negatiften pozitif doğru simetrik değişen ve merkezde sıfır değerini alan bir eğilim göstermektedir. Bunun sebebi, mod-III yüklemesi altında çatlak yüzeylerinin çatlak ucu orta noktası etrafında birbirlerine ters yönlü dönme deformasyonu eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden çatlak ucu merkezi ve kenarları için farklı GŞF değerleri elde edilmektedir. Mod-I/II/III CTST numunesi analiz sonuçlarında ise, hem çatlak ucu merkezi, hem de kenarları için farklı GŞF değerleri elde edilmektedir. Çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri incelendiğinde,  $K_{II}$ 'nin çatlak ucunun bir kenarından diğer kenarına negatiften pozitif doğru simetrik değiştiği ve merkezde sıfırdan farklı bir değer aldığı,  $K_{III}$ 'ün ise her üç nokta için de farklı değerler aldığı görülmektedir.  $K_{II}$ 'de gözlemlenen durumun sebebi, hem yüklem durumundan dolayı çatlak ucunda oluşan mod-II etkisi, hem de mod-III yüklemesi altında çatlak yüzeylerinin çatlak ucu orta noktası etrafında birbirlerine ters yönlü dönme deformasyonu eğiliminde olmasından kaynaklı ilave mod-II etkisinden kaynaklanmaktadır.  $K_{III}$ 'te gözlemlenen durumun sebebi ise, hem

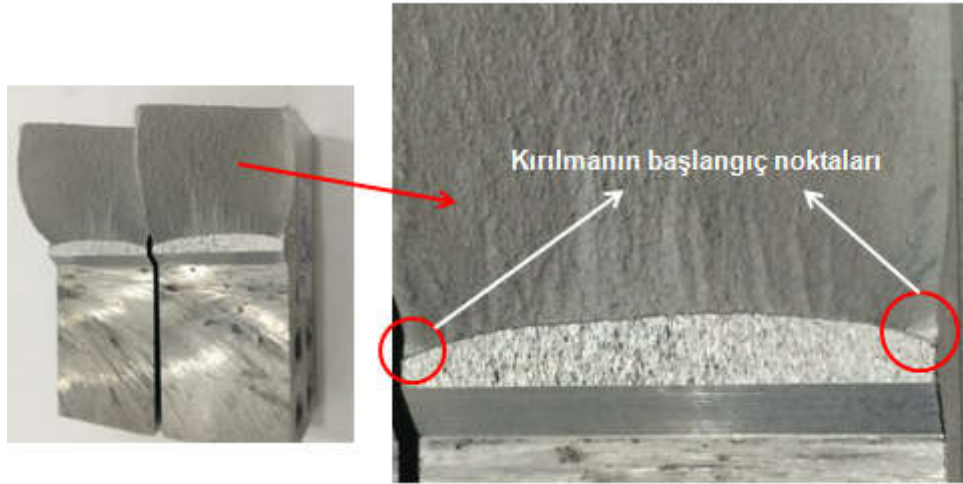
yüklemeye durumundan dolayı çatlak ucunda oluşan mod-III etkisi, hem de Poisson oranının etkisinden dolayı oluşan ilave mod-III etkisinden kaynaklanmaktadır.

Yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı, üç boyutlu kriter gelişiminden önce, ani kırılma anında çatlak başlangıcının merkezden mi yoksa kenarlardan mı olduğunun tespit edilmesi ve bu noktadaki GŞF değerlerinin dikkate alınarak ilgili kriterin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, CTT numunesine mod-I yükü altında ön çatlak oluşturulduktan sonra, mod-I/III 45° yüklemeye açısında belirli bir çevrim sayısı kadar daha numune yorulmaya devam edilmiş ve daha sonra kopma yüküne ulaşınca kadar numune düşük hızda yüklenmiş ve numune koparılmıştır. Şekil 2.132.'de, gerçekleştirilen testten bir kesit verilmiştir.



Şekil 2.132. Çatlak ilerleme başlangıç noktasının tespiti için, mod-I/III yüklemeye açısında CTT numunesi için gerçekleştirilen testten bir kesit.

Şekil 2.133.'te ise, kırılan numune yüzeylerinin görünümü verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, çatlak ilerlemesi çatlak ucu kenarlarından (kenarlardaki parlak yüzeylerde yorulma çatlakları devam etmiştir) olduğu görülmektedir. Üç boyutlu kriter gelişiminde bu durum göz önünde bulundurularak, çatlak ucu kenarlarındaki gerilme şiddet faktörleri kullanılmış ve diğer kriterlerde olduğu gibi tutarlı terimlerle kriter gelişimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.133. Çatlak başlangıcının tespiti için, mod-I/III yükleme açısında CTT numunesi için gerçekleştirilen test sonrası kırılan numunenin yüzey görünümü.

Bölüm 2.6.2.'de, literatürde mevcut üç boyutlu kırılma kriterlerinin geniş bir özeti verilmişti. Kriterler incelendiğinde, Pook (1980; 1985) kriterinde, önce  $K_{I1}$  ve  $K_{II1}$  arasında bir ilişki tanımlanarak,  $K_{eş,I,II}$  için bir eşitlik elde edilmiş ve sonrasında  $K_{eş,I,II}$  ve  $K_{III1}$  GŞF değerleri kullanılarak  $K_{eş,I,II,III}$  için bir eşdeğer GŞF denklemi elde edilmiştir. Kikuchi (2012) kriterinde ise, önce  $K_{I1}$  ve  $K_{III1}$  arasında  $K_{eş,I,III}$  denklemi tanımlanmış ve sonrasında elde edilen  $K_{eş,I,III}$  ve  $K_{II1}$  değerleri kullanılarak,  $K_{eş,I,II,III}$  eşdeğer GŞF denklemi elde edilmiştir. Ancak, gerçekleştirilen üç boyutlu kırılma analizleri sonuçlarında, çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri incelendiğinde görülmektedir ki, mod-II yüklemesinden kaynaklanan ilave  $K_{III1}$  ve mod-III yüklemesinden kaynaklanan ilave  $K_{II1}$  GŞF değerleri çatlak ucu boyunca elde edilmektedir. Oluşum sebepleri yukarıda açıklanan kırılma modları arasındaki bu etkileşimden dolayı, kriter gelişiminde öncelikle  $K_{II1}$  ve  $K_{III1}$  arasında bir denklem tanımlanarak aşağıda verilmiştir (Denklem 2.30). Bu denklem, sadece mod-II ve mod-III etkilerinin olduğu, mod-I/III  $90^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarına göre elde edilmiştir. Çünkü bu yükleme açısı basit mod-III yüklemesi olduğu için, çatlak ucu boyunca sadece  $K_{II1}$  ve  $K_{III1}$  GŞF değerleri oluşmaktadır. Basit mod-III yüklemesi için,  $K_{eş(II/III)}$  değerinin  $K_{Ic}$  değerine ulaşması durumunda numunenin kırılacağı varsayılarak  $K_{eş(II/III)}$  denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan  $K_{eş(II/III)}$  denklemi genel üç boyutlu kriter gelişimi için, mod-I/III ve Tablo 2.18.'de test matrisi verilen mod-I/II/III yükleme açıları için gerçekleştirilen test ve analiz verilerine uygulanmıştır. Buradan elde edilen  $K_{eş(II/III)}$  ile mod-I/III ve

mod-I/II/III analizlerinden elde edilen  $K_I$  değerlerini kullanarak Denklem (2.31) ile verilen  $K_{eş(I/II/III)}$  denklemi oluşturulmuştur.

$$K_{eş(II/III)} = \sqrt{a \cdot K_{II}^2 + b \cdot K_{III}^2} \quad (2.30)$$

$$K_{eş(I/II/III)} = \sqrt{c \cdot K_I^2 + d \cdot K_{eş(II/III)}^2 + e \cdot K_I \cdot K_{eş(II/III)}} + \left( f \cdot K_I^4 + g \cdot K_I \cdot K_{eş(II/III)}^3 \right)^{0,25} \quad (2.31)$$

Denklem (2.30) ve (2.31)'de verilen eşitliklerde yer alan katsayılar Tablo 2.48.'de verilmiştir. Denklemde görüldüğü gibi, geliştirilen kriter tutarlı terimlerden oluşmaktadır.

Tablo 2.48. Mod-I/III ve mod-I/II/III test verilerini kullanılarak geliştirilen eşdeğer gerilme şiddet faktörü kriterinin katsayıları.

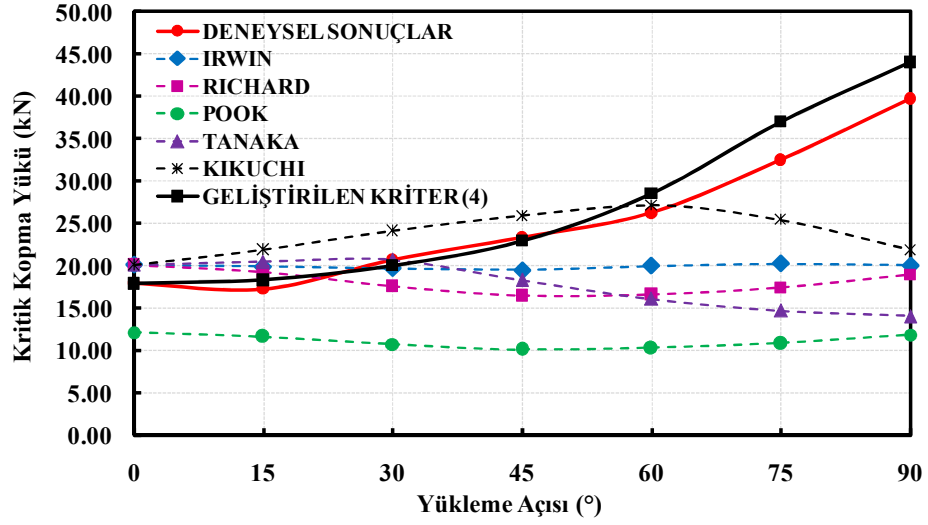
a	b	c	d	e	f	g
0,6890	0,6796	0,5263	0,3322	-0,1112	0,0257	-0,0004

Kırılma anında çatlak başlangıcının tespit edilmesine yönelik yukarıda gerçekleştirilen uygulamada, çatlak başlangıcının çatlak ucu kenarından başladığı görüldüğü için, kriter gelişiminde mod-I/III verileri çatlak ucu kenarından ( $K_{II}$  simetrik dağıldığı için her iki kenar için de aynı değerler elde edilmiştir), mod-I/II/III verileri ise mod-I/II=mod-I/III=15° yükleme durumları haricinde çatlak ucu arka kenarından alınmıştır. Arka kenar değerlerinin alınma sebebi, en yüksek GŞF değerlerinin bu noktada elde edilmesinden dolayıdır. Mod-I/II=mod-I/III=15°, mod-II/III=15°-30°-45° yükleme durumları için elde edilen  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri  $K_I$ 'e oranla çok düşük olduğu için, bu yükleme durumlarında çatlakın merkezden ilerleyeceği öngörülerek, bu yükleme açıları için veriler çatlak ucu merkezinden alınmıştır. Tablo 2.49.'da geliştirilen kriterin mod-I/III CTT-numunesi sonuçlarına uygulanması sonucu elde edilen eşdeğer GŞF ile kopma yükleri ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere, geliştirilen üç boyutlu kriter ortalama %5,74 hata oranı ile deneysel sonuçları karşılamaktadır.

Tablo 2.49. Geliştirilen üç boyutlu kritere göre CTT numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF ile kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

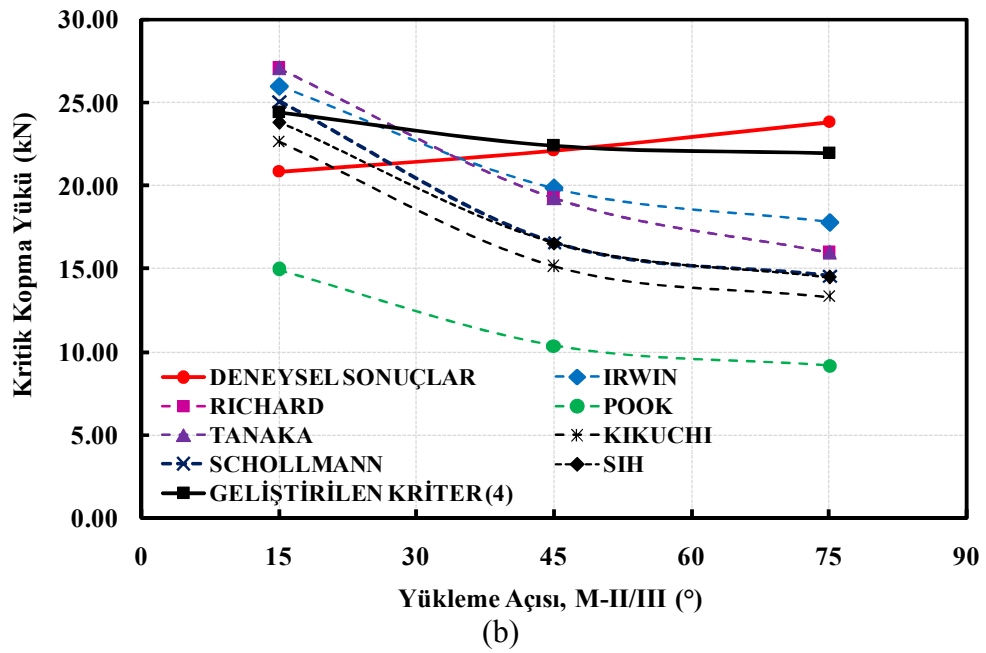
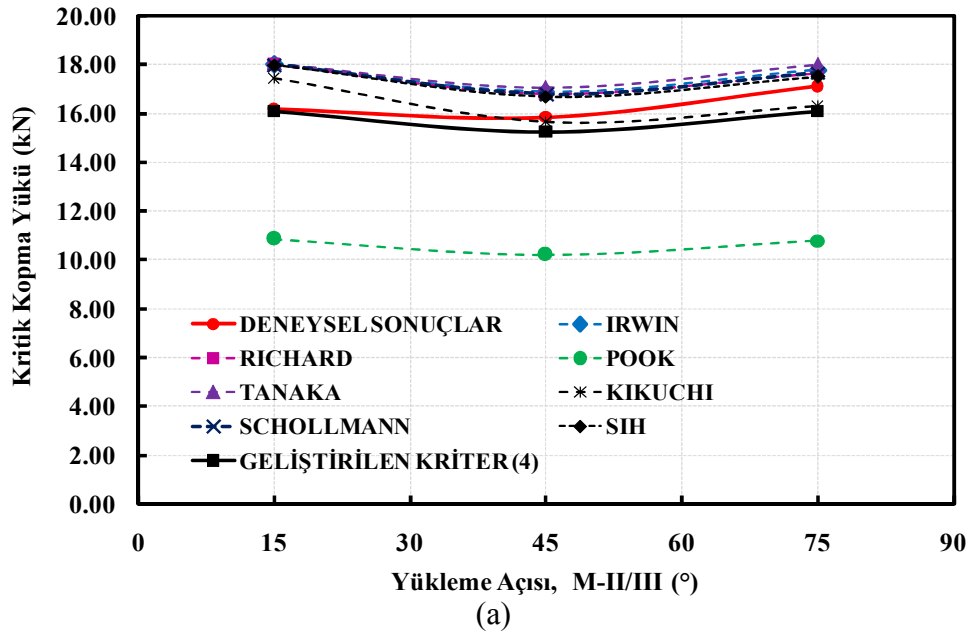
Numune No	Yük Açısı (°)	Çatlak Uzunluk Değeri (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m <sup>1/2</sup> )			GELİŞTİRİLEN KRİTERE GÖRE			Deneysel Kopma Yüğü (kN)	Fark (%)
			<i>Çatlak Ucu Kenar</i>			$K_{\sigma_T(III)}$ (Mpa*m <sup>1/2</sup> )	$K_{\sigma_T(II/III)}$ (Mpa*m <sup>1/2</sup> )	Kopma Yüğü (kN)		
			K <sub>I</sub>	K <sub>II</sub>	K <sub>III</sub>					
CTT-01	0	26,19	14,41	0,00	0,00	0,00	16,23	17,87	17,98	0,59
CTT-02	15	26,46	14,13	-2,78	1,91	2,79	15,82	18,33	17,28	5,71
CTT-03	15	26,49	14,15	-2,79	1,91	2,80	15,84	18,31	17,96	1,91
CTT-04	30	26,09	12,74	-5,92	3,78	5,82	14,50	20,00	20,72	3,58
CTT-05	30	26,49	12,88	-6,04	3,85	5,94	14,67	19,77	19,69	0,42
CTT-06	45	26,76	10,49	-8,42	5,45	8,31	12,63	22,96	23,38	1,83
CTT-07	45	26,60	10,43	-8,32	5,40	8,21	12,55	23,11	23,82	3,05
CTT-08	45	26,29	10,32	-8,11	5,32	8,04	12,39	23,41	21,99	6,05
CTT-09	60	26,47	7,33	-10,01	6,53	9,90	10,17	28,51	26,22	8,03
CTT-10	60	26,36	7,31	-9,92	6,50	9,82	10,12	28,66	27,18	5,15
CTT-11	75	25,93	3,55	-9,21	6,72	10,92	7,83	37,02	30,91	12,26
CTT-12	75	26,21	3,73	-11,03	7,22	12,50	8,77	33,05	32,48	10,27
CTT-14	90	26,12	0,02	-11,55	7,54	11,43	6,59	44,04	39,72	9,81
CTT-15	90	26,88	0,03	-12,28	7,84	12,07	6,96	41,69	36,79	11,76

Şekil 2.134.'te CTT numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği verilmiştir. Geliştirilen kriterin diğer kriterler ile karıştırılmaması için bu kriter, 4 no.lu kriter olarak isimlendirilmiştir. Kriterin, tüm yükleme açılarında ve özellikle 75° ve 90° yükleme açılarında diğer kriterlere oranla deneysel sonuçlara çok daha yakın olduğu görülmektedir.



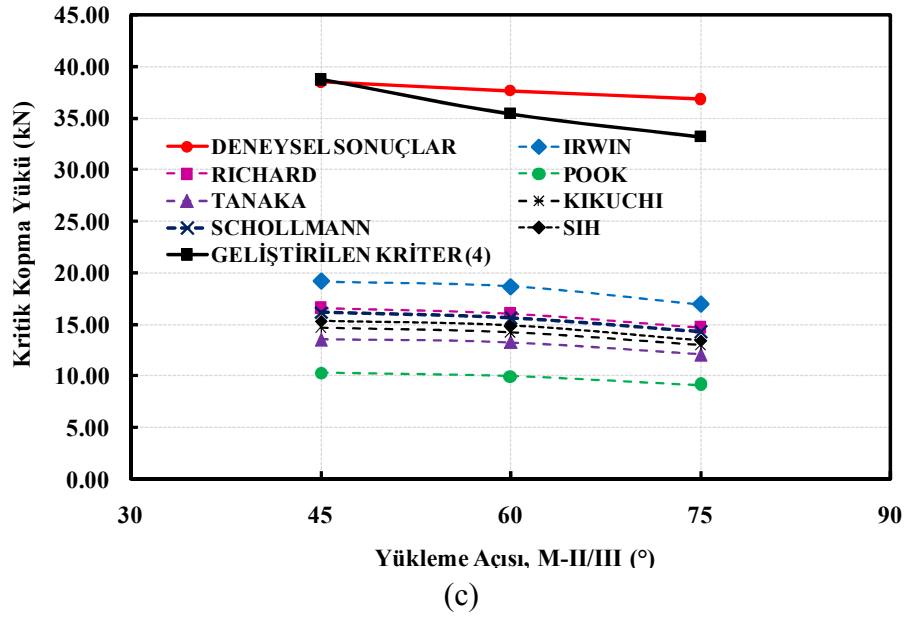
Şekil 2.134. CTT numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklem açısına göre değişim grafiği.

Benzer çalışmalar mod-I/II/III CTST numunesi için de gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kriter mod-I/II/III CTST numunesi sonuçlarına uygulanmıştır. Düşük yüklem açılarında çatlakın merkezden ilerlediği öngörüsüne göre, mod-I/II=mod-I/III=15°, mod-II/III=15°-45°-75° yüklem durumları için kriter, çatlak ucu merkez değerlerine uygulanmıştır. Diğer tüm yüklem durumları için ise kriter, çatlak ucu arka kenarından alınan değerlere uygulanmıştır. Bunun sonucunda elde edilen eşdeğer GŞF değerlerine göre hesaplanan kopma yükleri, hem deneysel, hem de mevcut kriterlere göre hesaplanan kopma yükleri ile kıyaslanarak Şekil 2.135.'te verilmiştir.



Şekil 2.135. CTT numunesi kopma yüklerinin mevcut ve geliştirilen kriterler ile kıyaslanması, (a) mod-I/II=15, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75, mod-I/III=75°.





Şekil 2.135. CTT numunesi kopma yüklerinin mevcut ve geliştirilen kriterler ile kıyaslanması, (a) mod-I/II=15, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75, mod-I/III=75°. (Devamı)

Şekilde görüldüğü gibi, özellikle mod-II ve mod-III yükleme tiplerinin baskın olduğu açılarda (Şekil 2.115.c) geliştirilen kriterin deneysel sonuçlara çok yakın değerler aldığı, mevcut diğer kriterlerin ise deneysel kopma yüklerini tahmin edemediği görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, tüm yükleme açıları için ortalama %6,21 hata oranı ile geliştirilen kriter deneysel sonuçları karşılamaktadır.

## **BÖLÜM 3. KARIŞIK MODLU YÜKLEME ALTINDA ÜÇ BOYUTLU ÇATLAK İLERLEME ANALİZ KABİLİYETİ GELİŞTİRİLMESİ**

Üç boyutlu çatlak ilerleme problemlerinde, geometri, yükleme ve sınır şartlarına bağlı olarak çatlak düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyebilmektedir. Farklı yükleme açılarında gerçekleştirilen mod-I/III ve mod-I/II/III kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kırılan numune yüzeyleri incelendiğinde çatlak yüzeylerinin düzlemsel olmadığı görülmektedir. Bu bölümde, düzlemsel olmayan yüzeylerin modellenmesi kabiliyeti geliştirilmiş, farklı problem tipleri ve yaklaşımlar ele alınarak mevcut kriterler ile üç-boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, mod-I/II, mod-I/III ve mod-I/II/III yükleme durumları için yapılan çatlak ilerleme testleri de modellenerek, yaygın kullanılan bir kriter ile çok sayıda analiz gerçekleştirilmiştir. Son olarak geliştirilen kriterler, literatürden seçilen farklı üç boyutlu problemlere ve gerçekleştirilen mod-I/II, mod-I/III ve mod-I/II/III çatlak ilerleme testlerine uygulanarak, kriterlerin sağlanması yapılmıştır.

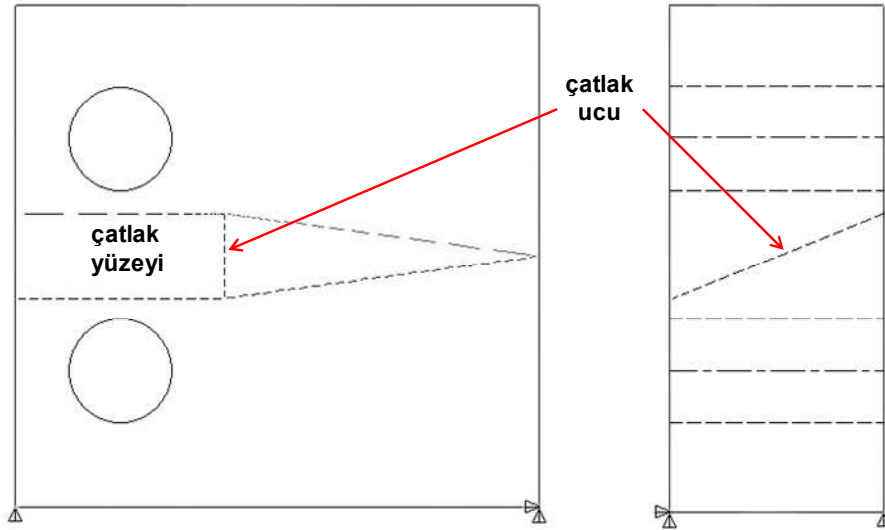
Bu bölümün yazımında, 113M407 numaralı, "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi-Aşama 2" isimli, TÜBİTAK destekli araştırma projesinin gelişme ve sonuç raporlarından (Ayhan, 2014; 2015; 2016a; 2016b) yararlanılmıştır.

### **3.1. FRAC3D'de Karışık Mod Yükleme İçin Çatlak İlerleme Profili Tahmini ve Test Edilmesi**

Bu bölümde, düzlemsel olmayan artırımlı çatlak ilerlemesi ve modellenmesinde kullanılan yöntem ve çatlak ilerleme prosedüründe izlenen adımlar detayları ile verilmiştir. Bu kapsamda, çatlaklı yapıların mod-I kırılma tokluğunu ( $K_{IC}$ ) belirlemede kullanılan standart CT numunesine eğik (eğim düzlem dışı yöndedir)

çatlak yerleştirilerek, mod-I dış yüklemesi altında çatlağın üç boyutlu modelleme ve çatlak ilerleme simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yük çatlak yüzeyine açılı olarak etkidiği için, problem karışık mod-I/III yüklemeye durumunun oluştuğu üç boyutlu bir problem haline dönüşmektedir. Kırılma analizleri sonrası, bir sonraki düzlemsel olmayan çatlak profili tahmin edilerek profillere polinom eğri uydurulmuştur. Düzlemsel olmayan bir şekilde artırımlı ilerlemiş çatlağın tüm yüzeyi katı model olarak temsil edildikten sonra model bölüntülenerek çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Düzlemsel olmayan artırımlı çatlak ilerleme analiz işlemlerinin tam olarak anlaşılabilmesi için aşağıda önce problemin tanımı yapılmıştır. Daha sonra, örnek olarak 5. çatlak ilerleme adımından 6. çatlak ilerleme profilinin tahminine kadar olan bir adımlık çatlak ilerleme döngüsünde gerçekleştirilen işlem adımları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

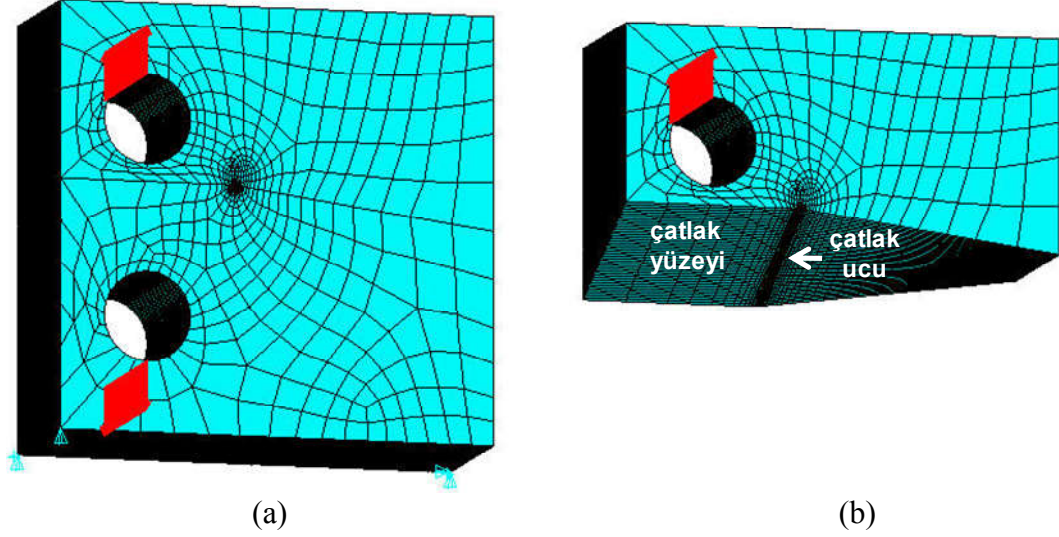
Karışık modlu düzlem dışı mod-I/III yüklemeye durumunu analiz etmek için, standart CT numunesine eğik (eğim düzlem dışı yöndedir) çatlak yerleştirilerek yüklemeye deliklerinden numuneye dış mod-I yüklemesi uygulanmıştır (Şekil 3.1).



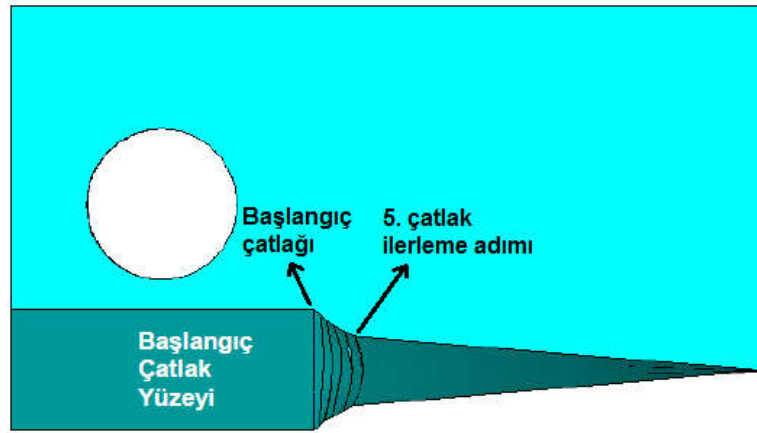
Şekil 3.1. Düzlem dışı yönde eğik çatlak yerleştirilen CT numunesinin önden ve yandan görünümü.

Uygulanan yük çatlak yüzeyine düzlem dışı açılı olarak etkidiği için problem karışık mod-I/III yüklemeye durumunun oluştuğu üç boyutlu bir problem haline dönüşmektedir. Şekil 3.2.'de yük ve sınır şartları uygulanmış numunenin tamamının

ve çatlak yüzeyinin üst kısmını oluşturan bölümün sonlu eleman modelinin perspektif görünümü verilmektedir.



Şekil 3.2. Yük ve sınır şartları uygulanan numunenin sonlu eleman modeli, (a) modelin tamamı, (b) çatlak yüzeyinden sonraki üst bölümü.



Şekil 3.3. "5." çatlak ilerleme adımı için oluşturulan modelde çatlak yüzeyinin önden görünümü.

#### a. Adım 1: Çatlak Modellemesi

Çatlak ilerleme simülasyonları ilk olarak, Şekil 3.2.'de verildiği gibi başlangıç çatlak oluşturulan numune üzerinde kırılma analizinin yapılması ile başlatılmıştır. Kırılma analiz sonuçlarına göre bir sonraki çatlak profili tahmin edilerek çatlak ilerlemesi gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.3.'te, ilerletilen çatlakın 5. adımı için oluşturulan modelin yarı görünümü verilmektedir.

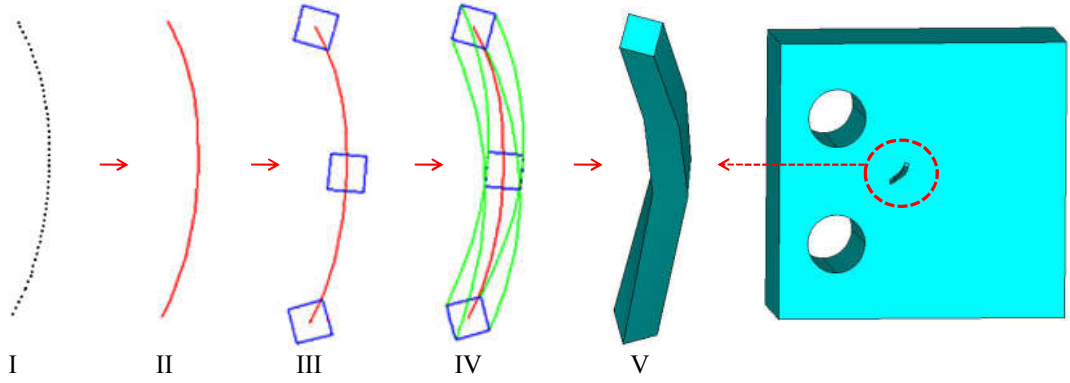
5. çatlak profiline göre FRAC3D çözücüsü ile gerçekleştirilen analizlerinden elde edilen GŞF değerleri ve bu değerler ile belirli bir çatlak ilerleme kriteri kullanılarak 6. çatlak profilini oluşturacak düğüm noktalarının konum bilgileri elde edilmektedir. Bu yeni düğüm noktaları koordinatları, Datafit™ (2015) eğri uydurma programı içerisinde kullanılarak, bu noktalardan geçen en yakın polinom eğri uydurulmaktadır (Şekil 3.4. Durum I).

İlk olarak 6. çatlak profilinin oluşturulması için, uydurulan eğrinin tüm düğüm noktalarından geçen bir eğri modellenmektedir (Şekil 3.4. Durum II).

Çatlak civarında yoğun ve düzenli bir bölüntülemenin gerçekleştirilmesi için çatlağı çevreleyen izole bir tüpün oluşturulması gerekmektedir. Çatlak bölgesinde böyle bir tünel hacmin oluşturulmasıyla, çatlak civarının, modelin tamamından izole edilerek bu bölgedeki ağ yapısının bağımsız olarak kontrol edilebilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için öncelikle, çatlak ucunda bulunan düğüm noktalarından bazılarını, oluşturulmak istenen tüpün boyutlarında kare kesitler belirli açılarda yerleştirilmektedir (Şekil 3.5. Durum III).

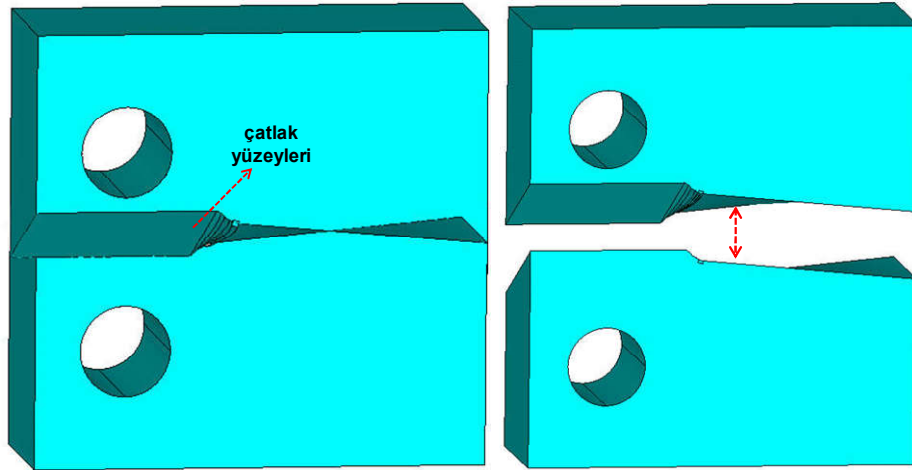
Kare kesitli alanların her birinin köşelerinden geçen eğriler oluşturulmaktadır (Şekil 3.4. Durum IV).

Oluşturulan eğrilerden meydana gelen alanlar ve bu alanlardan meydana gelen bir hacim oluşturularak çatlak civarını çevreleyen bir tünel hacim modellenmektedir (Şekil 3.4. Durum V).



Şekil 3.4. Çatlak profilini çevreleyen tünel hacmin modellenmesinde gerçekleşen işlem adımları.

Tünel hacmin modelleme adımından sonra modelin tamamından tünel hacim ayrıştırılarak, bölüntüleme işlemlerinde modelin tamamı ile tünel modeli ayrı ayrı kontrol etmek mümkün hale getirilmektedir. 5. çatlak profili ile 6. çatlak profili arasındaki yüzey tanımlanmakta ve bir önceki çatlak yüzeyleri ile birleştirilerek nihai çatlak yüzeyi oluşturulmaktadır. Her iki model, çatlak yüzeyini oluşturan alanlar ile önce bölünmekte ve sonrasında çatlak ucu kenar düğüm noktalarından birleştirilerek düzlemsel olmayan üç boyutlu çatlak profili modelde tanımlanmaktadır (Şekil 3.5).

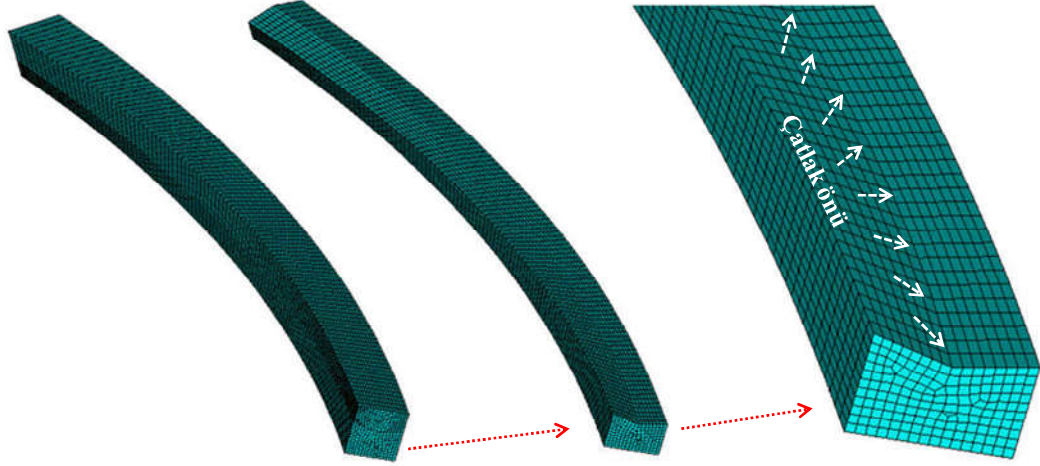


Şekil 3.5. Modelin çatlak yüzeyi ile ayrıştırılarak çatlak profilinin tanımlanması.

#### b. Adım 2: Bölüntüleme İşlemi

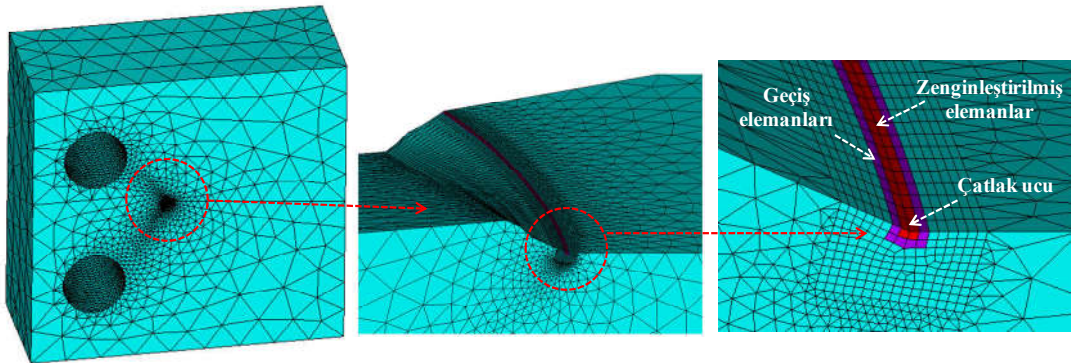
Çatlak ucu boyunca daha hassas GŞF değerlerinin elde edilebilmesi için çatlak ucu civarında tünel hacim hexahedral elemanlar ile bölüntülenerek düzenli ve yoğun bir

ağ yapısı oluşturulmaktadır. Bunun için tünel hacmin kenarında yer alan kare kesitin yüzeyi, istenen eleman boyutu elde edilecek şekilde yüzey elemanları ile bölüntülenmekte ve bu yüzey ağı çatlak ucu boyunca süpürülerek tüm hacimde aynı ağ yapısının düzenli bir şekilde örülmesi sağlanmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Hexahedral elemanlar ile bölüntülenen tünel hacim.

Tünel hacmin bölüntülenmesinin ardından tünel hacim dışında kalan tüm model dört yüzlü tetrahedral elemanlar ile bölüntülenmektedir. Şekil 3.7.'de, bölüntüleme işlemi tamamlanan sonlu eleman modelinin perspektif görünümü ve kırılma analizi için FRAC3D çözücüsünün kullandığı zenginleştirilmiş ve geçiş elemanlarının olduğu çatlak ucu civarının yakın görünümü verilmektedir. Şekilde çatlak ucuna değen zenginleştirilmiş elemanlar kırmızı renkte ve zenginleştirilmiş elemanlarla yüzey, kenar ya da nokta paylaşımında bulunan geçiş elemanları ise mor renkte gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Sonlu eleman modelinin perspektif ve çatlak ucu civarının yakın görünümü.

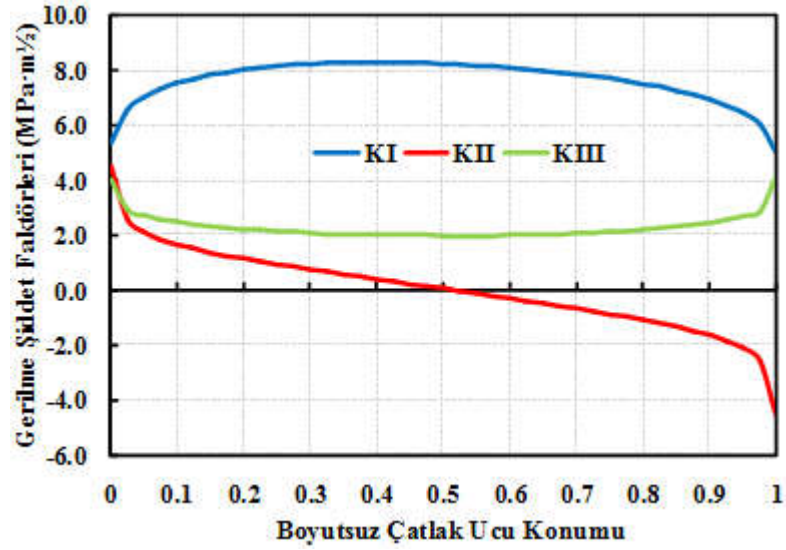
c. Adım 3: Analiz Parametreleri, Malzeme ve Model Bilgileri

Kırılma analizi yapılmadan önce, sınır koşulları ve yükleri tanımlayan analiz parametreleri, malzeme özellikleri (elastisite modülü, Poisson oranı vb.), çatlak ucu ve modelin tamamının sahip olduğu eleman ve düğüm noktalarının listesini içeren model bilgileri, FRAC3D çözücüsü için oluşturulmaktadır. Sınır koşulu olarak öteleme ve dönme rijit cisim hareketlerinin engellenmesi için, sonlu eleman modelinin belirli düğüm noktalarına gerekli yer değiştirme sınırlamaları verilmektedir. Analizlerin tamamında yükleme deliklerine 10 kN sabit yük uygulanarak analizler gerçekleştirilmektedir. Numune malzemesi alaşımlı alüminyum (elastisite modülü 72 GPa ve Poisson oranı 0,3) olarak alınmıştır.

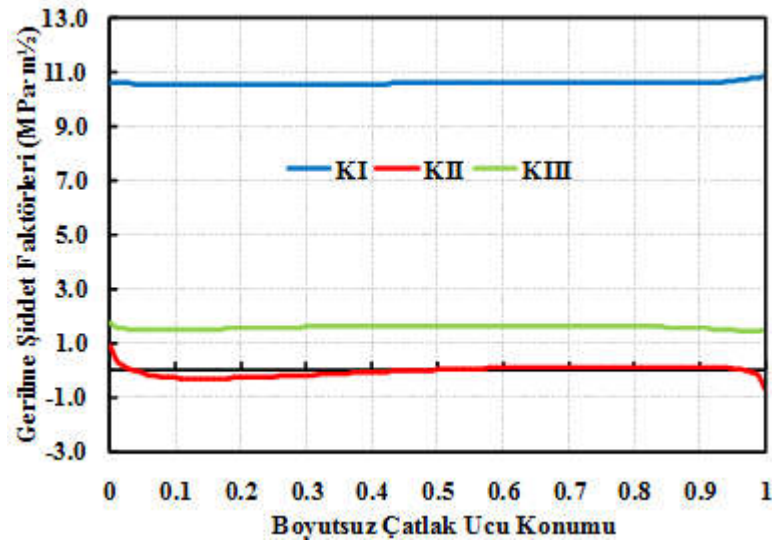
d. Adım 4: FRAC3D Çözücüsü ile Kırılma Analizinin Gerçekleştirilmesi

Bir önceki adımda FRAC3D çözücüsü için oluşturulan çatlak ucu ve sonlu eleman modelinin eleman ve düğüm noktası listeleri sınır koşulları ile birlikte programa transfer edilerek kırılma analizi gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.8.'de, başlangıç çatlak profili ve 6. çatlak profili için gerçekleştirilen analiz sonrasında çatlak ucu boyunca elde edilen gerilme şiddet faktörü değerleri,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$ 'ün değişimi verilmiştir. İlk çatlak profili analiz sonucundan da (Şekil 3.8.a) görüldüğü gibi, mod-I yüklemesi altında çatlağın konumundan dolayı çatlak ucu boyunca her üç GŞF değeri de elde edilmektedir. Çatlak ilerledikçe, çatlak önü civarında yüzeyi yükleme eksenine dik konuma gelmekte ve problem mod-I/III yükleme durumundan basit mod-I yükleme durumuna dönüşmektedir. Bu durum, 5 adım çatlak ilerlemesinden sonra 6. çatlak profili için gerçekleştirilen analiz sonucunda da (Şekil 3.8.b) görülmektedir.  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değeri giderek azalarak sifıra yaklaşmaktadır.





(a)



(b)

Şekil 3.8. Analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri, (a) başlangıç çatlak profili, (b) 6. çatlak profili sonucu.

#### e. Adım 5: Sonraki Çatlak Profili Tahmini

Bir sonraki çatlak profili tahmini için kırılma analizlerinden elde edilen gerilme şiddet faktörü değerlerini içeren eşdeğer bir GŞF ( $\Delta K_{eq}$ ) tanımlanması gerekmektedir. Yükleme tipi karışık mod-I/III yükleme durumu olmasına rağmen, kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca  $K_{II}$  gerilme şiddet faktörü değeri de gözlemlenmektedir. Bu yükleme açısında çatlak ucu boyunca mod-II kırılma

modunun gözlemlenmesinin ve çatlak ucu boyunca lineer olarak pozitiften negatif bir değere değişkenlik göstermesinin sebebi, mod-III yüklemesi altında çatlak yüzeylerinin çatlak ucu orta noktası etrafında birbirlerine ters yönlü dönme deformasyonu eğiliminde olmalarından kaynaklanmaktadır. Çatlağın sapma açısında ( $\theta_0$ )  $K_{III}$  gerilme şiddet faktörü değerinin lokal olarak çatlak ucuna dik düzlemlerdeki sapma açılarına etkisi olmadığından dolayı, bu düzlemlerde iki boyutlu çatlak ilerleme kriteri olan Erdoğan ve Sih'in (1963) geliştirmiş olduğu maksimum teğetsel gerilme kriteri kullanılmıştır. 6. çatlak profilinden elde edilen gerilme şiddet faktörü değerleri kullanılarak  $\Delta K_{eş}$  ve  $\theta_0$  hesaplanmaktadır. Bu değerler kullanılarak bir sonraki çatlak profilinin koordinatları elde edilmektedir. Çatlak ilerleme malzeme sabitleri için  $C=2.28*10^{-7}$  ve  $n=3,11$  değerleri kullanılmıştır.

f. Adım 6: Tahmin edilen profile polinom eğri uydurulması

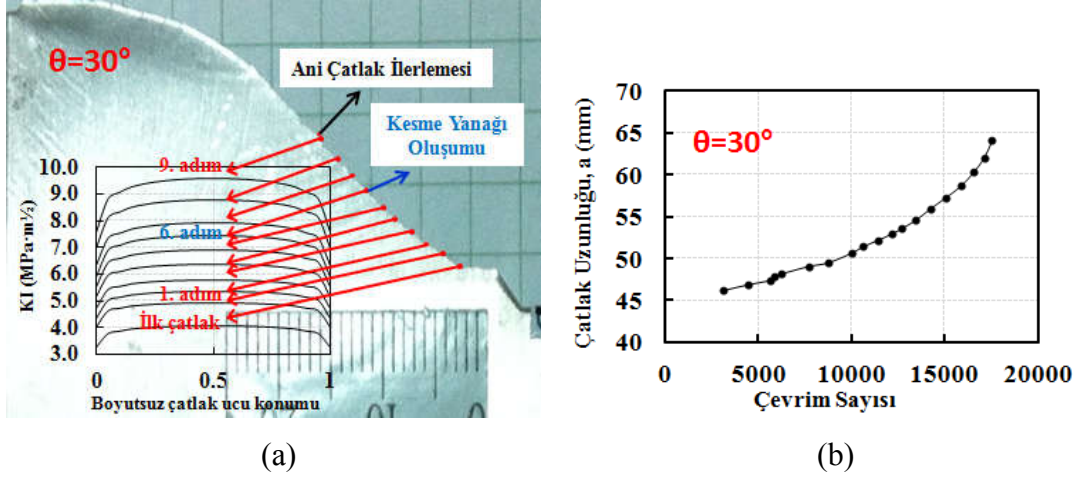
Çatlak ucu boyunca GŞF değerleri çok hassas bir şekilde hesaplandığı için, düğüm noktalarının dizilimindeki en küçük sapma, o düğüm noktası için elde edilen gerilme şiddet faktörü değerlerinde çok büyük sapmalara neden olmaktadır. Bu yüzden profile en yakın eğri uydurularak düğüm noktalarının sıralanmasında var olan düzensizliklerin giderilmesi gerekmektedir. Datafit<sup>TM</sup> (2015) eğri uydurma programı kullanılarak, tahmin edilen bir sonraki çatlak ucu profiline en yakın üç boyutlu düzlemsel olmayan eğrisel bir profil uydurularak elde edilen konum, boyut ve yön bilgileri alınmakta ve ilk işlem adımına tekrar geri dönülerek çatlak profilinin modellenmesi işlemine geçilmektedir.

5. çatlak ilerleme adımından 6. çatlak ilerleme profilinin tahminine kadar olan bir adımlık çatlak ilerleme döngüsünde gerçekleştirilen işlem adımları yukarıda detaylı bir şekilde verilmiştir. Çatlak uzunluğu kritik boyuta ulaşana veya  $\Delta K_{eş}$  değeri kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerine ulaşana kadar, yukarıdaki işlemler döngü şeklinde devam ettirilmektedir.

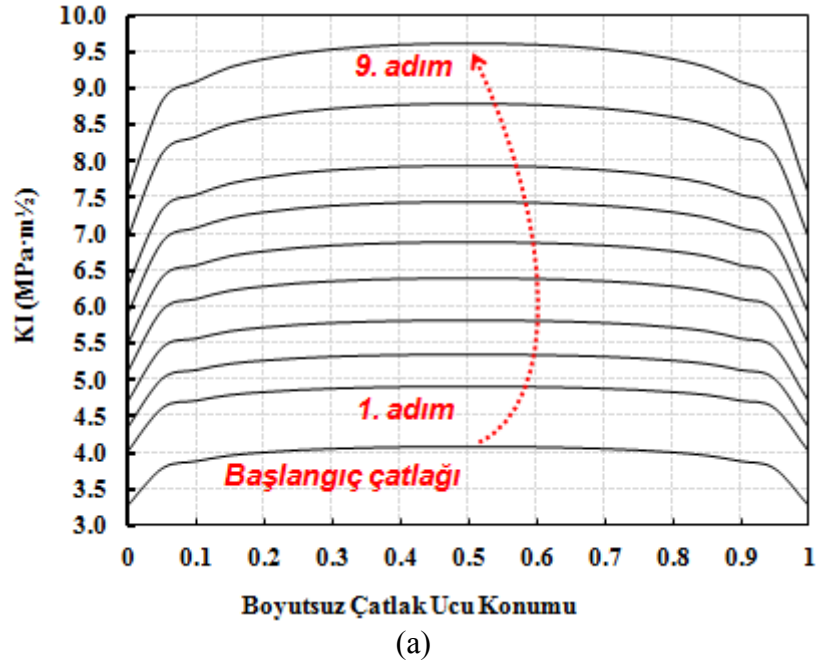
### 3.2. Mod-I/II Richard Numunesi Çatlak İlerleme Testlerinin Modellenmesi

Bölüm 2.3.4.'te, CTS (Richard) numuneleri için farklı açılarda gerçekleştirilen mod-I/II çatlak ilerleme deneylerinin detayları verilmiş ve bölüm sonunda,  $\theta=30^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $60^\circ$  yükleme açılarında test edilen CTS numunelerinin, çevrim sayısına göre çatlak ilerlemelerinin değişimi verilmişti. Bu bölümde ise, her üç açı değeri için gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen kırık numune yüzeyleri birebir modellenmiş ve her bir numunenin ortalama 10 adım çatlak ilerlemesi sonrasında kırıldığı varsayılarak, her bir çatlak adımı için tekil kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerin tamamı 10 kN yük altında gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$  ve  $K_{II}$  GŞF değerleri kullanılarak, tez kapsamında geliştirilen iki boyutlu kırılma kriterine (Denklem 2.28) ve mevcut kriterlere göre ömür tahminleri yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Böylece, mod-I/II CTS ve T-numunesi kırılma test sonuçları ile doğrulaması yapılan iki boyutlu kırılma kriterinin, yorulma ömür tahmini açısından da sağlaması gerçekleştirilmiştir.

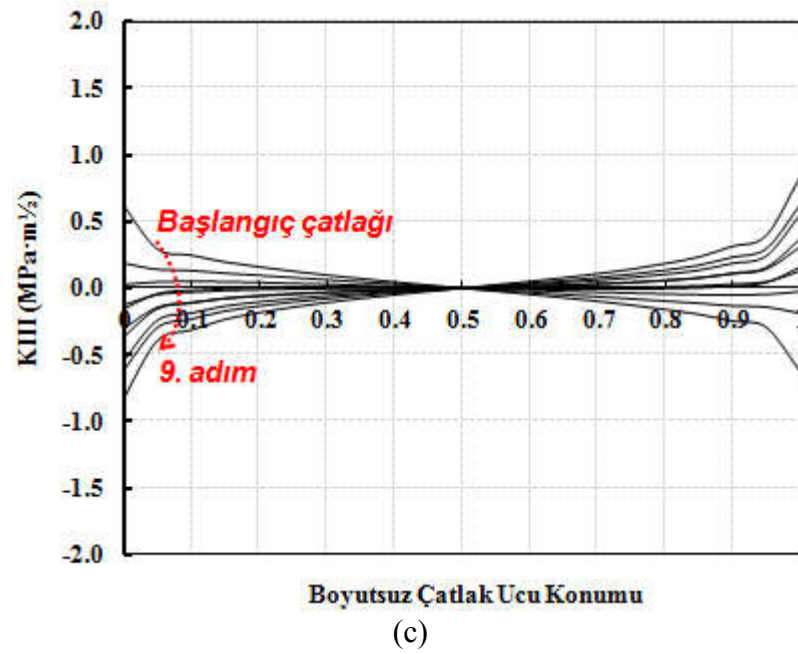
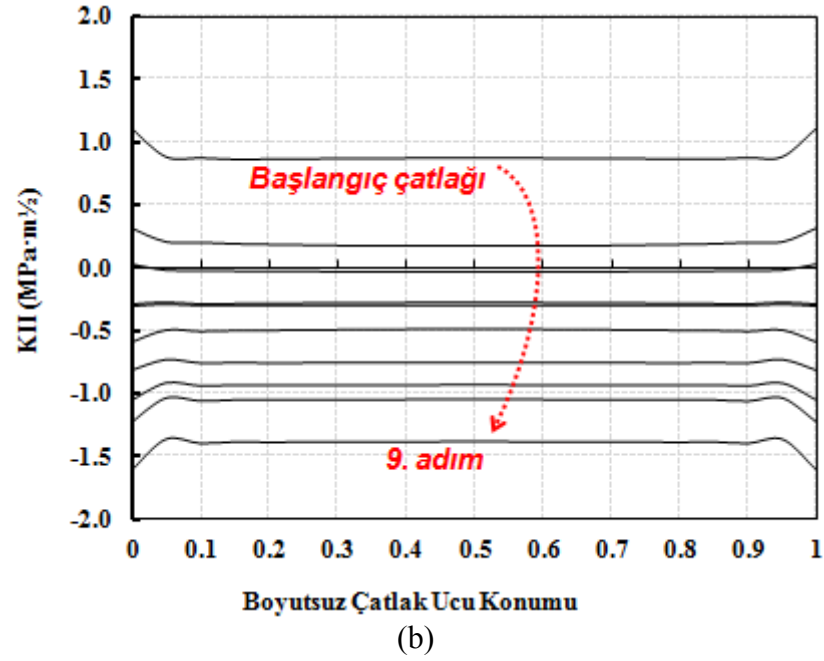
Şekil 3.9.'da,  $\theta=30^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen çatlak ilerleme testinin 9 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek, her bir adım için FCPAS yardımıyla gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında numunenin çatlak ucunda oluşan  $K_I$  dağılımının numune üzerinde temsil edildiği yerler ve çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği verilmiştir. Şekil 3.10.'da ise, bu ilerleme adımlarının her biri için çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$ 'ün dağılım grafikleri sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.9.  $\theta=30^\circ$  yüklemesi açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 9 adım çatlak ilerlemesi modellenerek gerçekleştirilen analizler sonrasında (a) numunenin çatlak ucunda oluşan  $K_I$  dağılımının temsil edildiği yerler, (b) çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği.



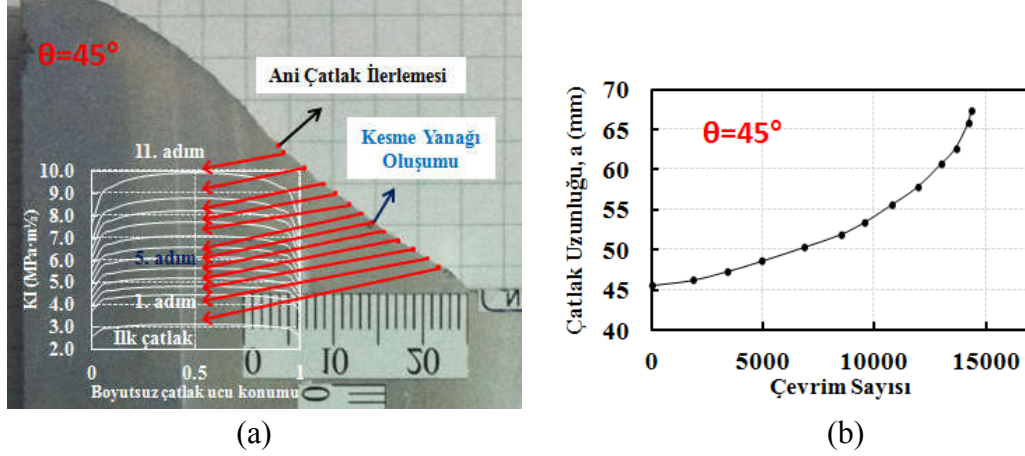
Şekil 3.10.  $\theta=30^\circ$  yüklemesi açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 9 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  dağılımı.



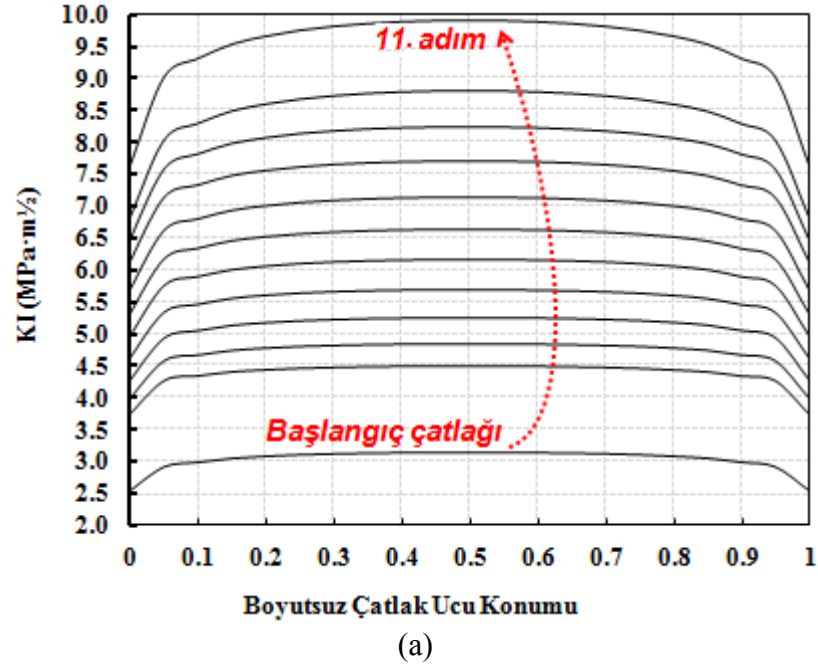
Şekil 3.10.  $\theta=30^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 9 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  dağılımı. (Devamı)

Şekil 3.11.'de,  $\theta=45^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen çatlak ilerleme testinin 11 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek, her bir adım için FCPAS yardımıyla gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında numunenin çatlak ucunda oluşan  $K_I$  dağılımının numune üzerinde temsil edildiği yerler ve çevrim sayısına göre çatlak

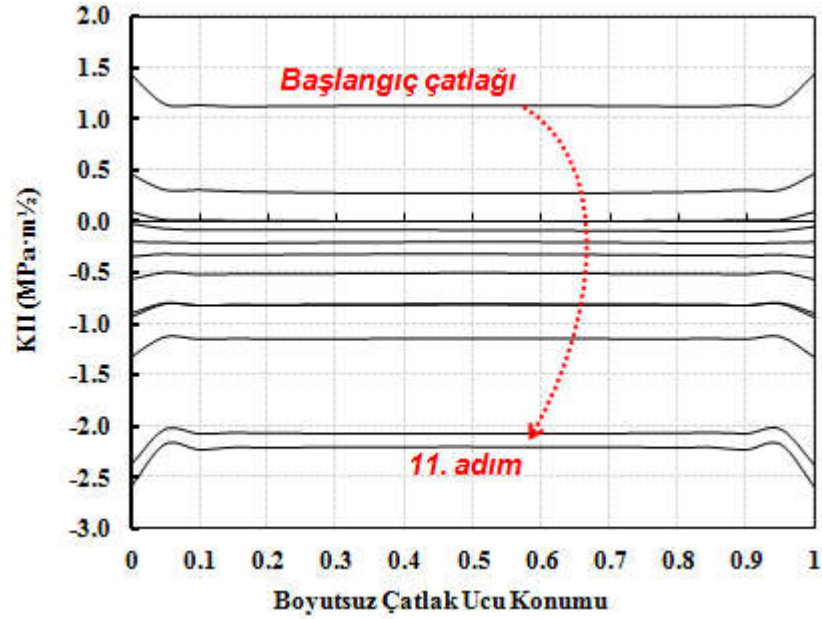
uzunluğunun değişim grafiği verilmiştir. Şekil 3.12.'de ise, bu ilerleme adımlarının her biri için çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$ 'ün dağılım grafikleri sırasıyla verilmiştir.



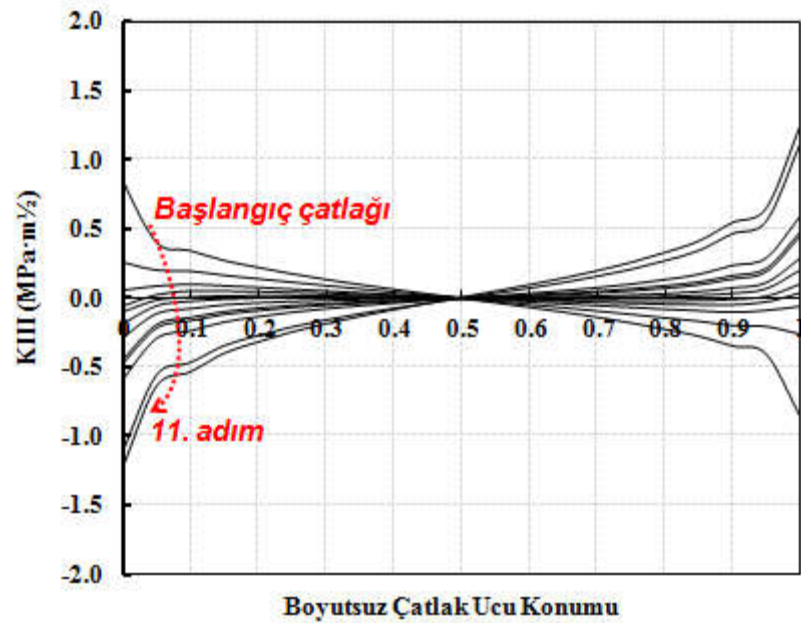
Şekil 3.11.  $\theta=45^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 11 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen analizler sonrasında (a) numunenin çatlak ucunda oluşan  $K_I$  dağılımının temsil edildiği yerler, (b) çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği.



Şekil 3.12.  $\theta=45^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 11 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  dağılımı.



(b)

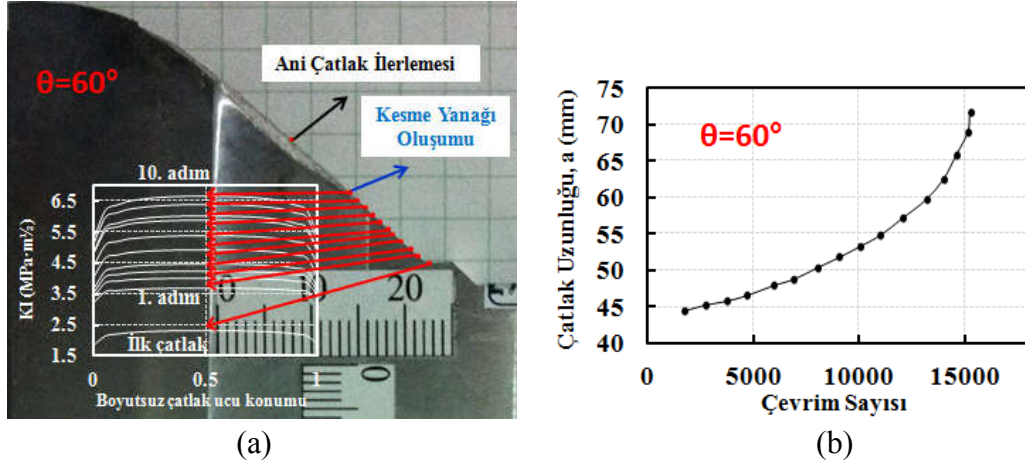


(c)

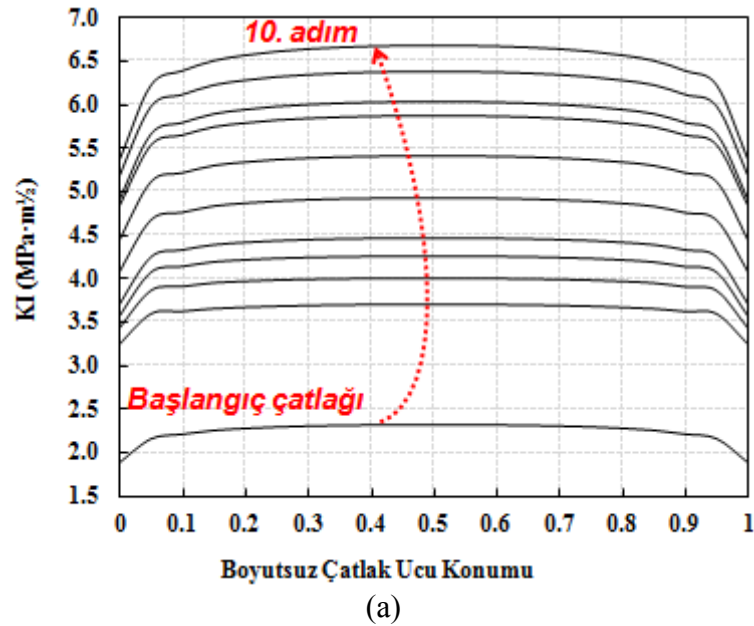
Şekil 3.12.  $\theta=45^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 11 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  dağılımı. (Devamı)

Şekil 3.13.'te,  $\theta=60^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen çatlak ilerleme testinin 10 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek, her bir adım için FCPAS yardımıyla gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında numunenin çatlak ucunda oluşan  $K_I$  dağılımının numune üzerinde temsil edildiği yerler ve çevrim sayısına göre çatlak

uzunluğunun değişim grafiği verilmiştir. Şekil 3.14.'te ise, bu ilerleme adımlarının her biri için çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$ 'ün dağılım grafikleri sırasıyla verilmiştir.

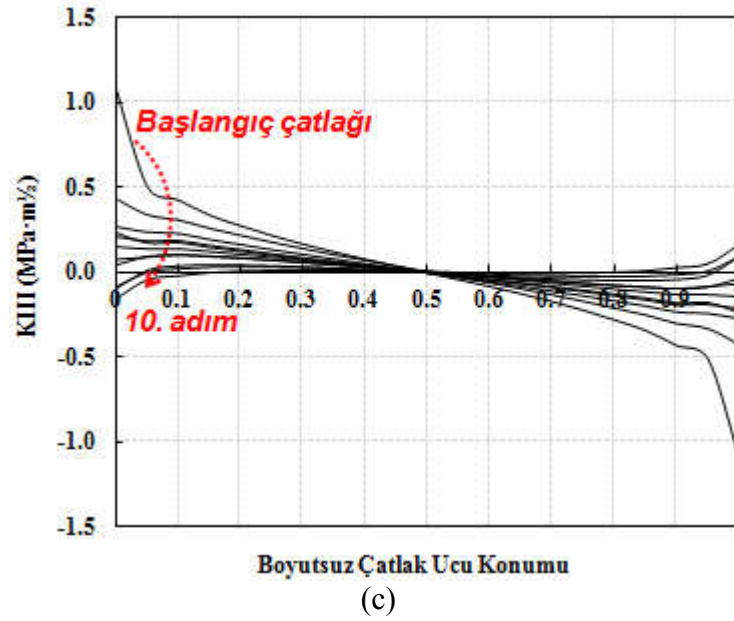
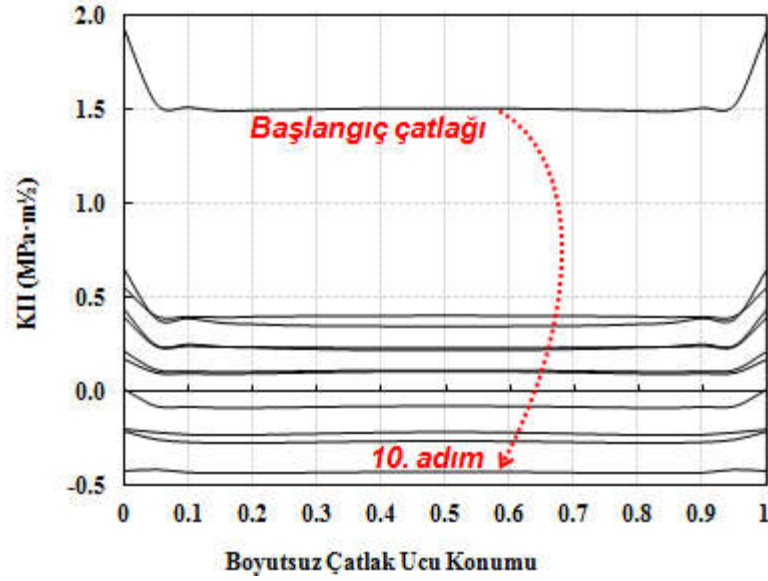


Şekil 3.13.  $\theta=60^\circ$  yüklemeye açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 10 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen analizler sonrasında (a) numunenin çatlak ucunda oluşan  $K_I$  dağılımının temsil edildiği yerler, (b) çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği.



Şekil 3.14.  $\theta=60^\circ$  yüklemeye açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 10 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  dağılımı.





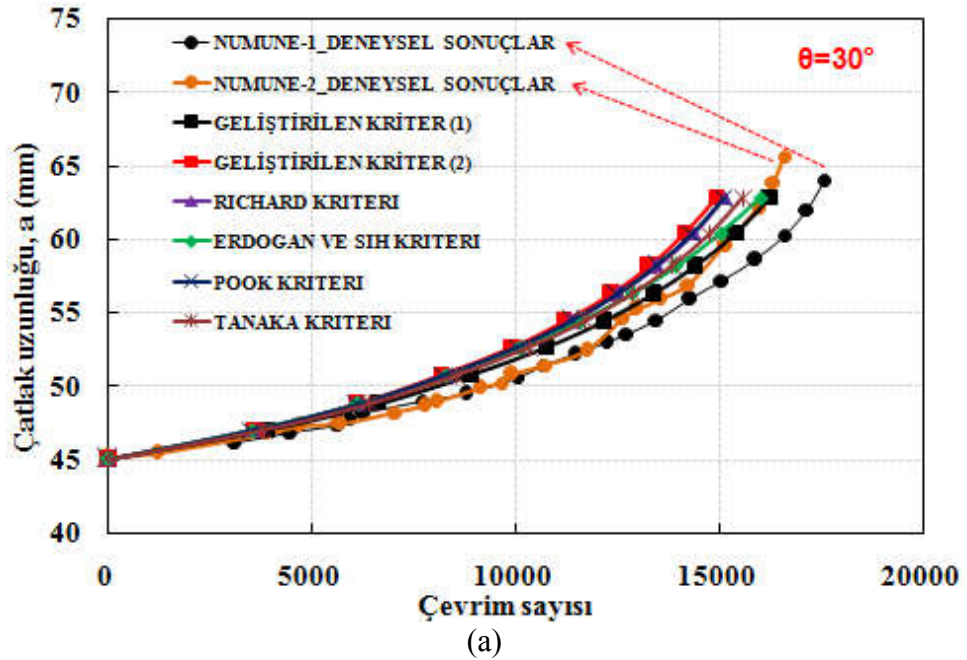
Şekil 3.14.  $\theta=60^\circ$  yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 10 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  dağılımı. (Devamı)

Yukarıda sonuçları verilen analizlerden elde edilen  $K_I$  ve  $K_{II}$  değerlerini kullanarak, mod-I/II kırılma test sonuçlarına göre geliştirilen iki boyutlu, "1" (Denklem 2.27) ve "2" (Denklem 2.28) no.lu kriterlere göre ve mevcut iki boyutlu kriterlere göre ömür tahminleri yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve geliştirilen kriterlerin ömür tahminleri açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

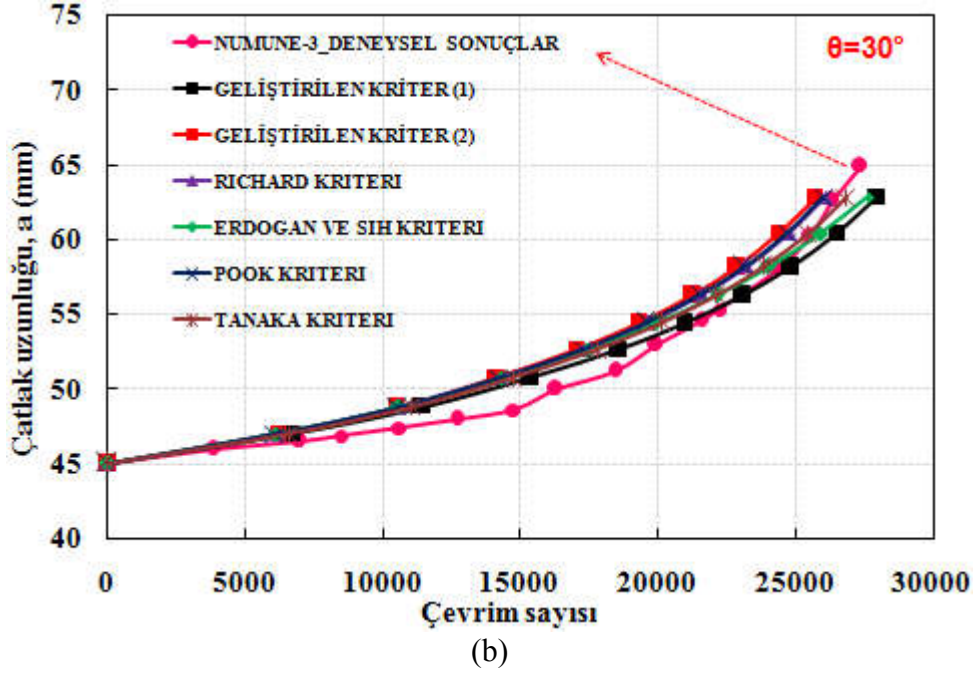
Tez kapsamında standart CT numunesi kullanılarak mod-I şartları altında gerçekleştirilen da/dN testleri sonrasında elde edilen malzeme sabitleri, aşağıda eşitliği verilen Paris-Erdoğan denkleminde yerine koyularak ömür tahminleri yapılmıştır.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (3.1)$$

Analizler sabit 10 kN yük altında, deneyler ise farklı yorulma yükleri altında gerçekleştirildiği için ömür tahminleri yapılırken gerekli yük dönüşümleri gerçekleştirilmiştir. Tüm çatlak ilerleme testlerinde R-oranı 0,1 alınmıştır.  $\theta=30^\circ$  yükleme açısında 3 adet numune için gerçekleştirilen çatlak ilerleme test sonuçlarının, mevcut kriterler ve geliştirilen kriterler ile karşılaştırması Şekil 3.15.'te verilmiştir. "Numune-1" ve "Numune-2" için gerçekleştirilen testler 1,1 kN-11 kN yorulma yüklemesi altında (Şekil 3.15.a), "Numune\_3" için gerçekleştirilen test ise 0,88 kN-8,8 kN yorulma yüklemesi altında (Şekil 3.15.b) gerçekleştirildiği için sonuçlar ayrı grafikler halinde verilmiştir.



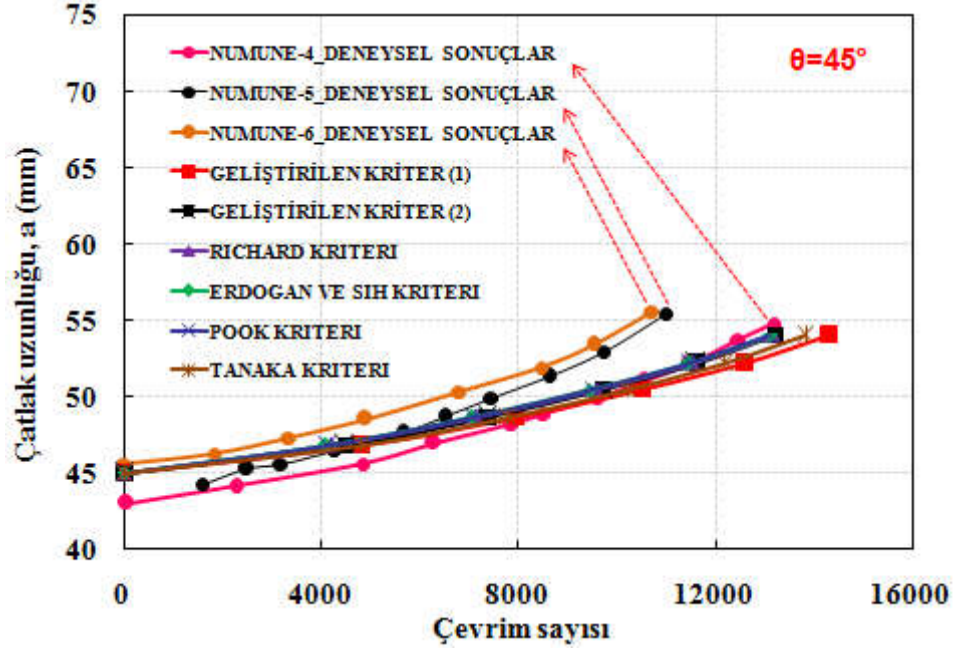
Şekil 3.15.  $\theta=30^\circ$  yükleme açısında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin (a) 11 kN (R=0,1), (b) 8,8 kN (R=0,1) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması.



Şekil 3.15.  $\theta=30^\circ$  yükleme açısında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin (a) 11 kN (R=0,1), (b) 8,8 kN (R=0,1) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması. (Devamı)

"3" no.lu numune daha düşük yorulma yükünde test edildiği için, bu numune için elde edilen ömür, diğer numunelere oranla beklendiği gibi daha yüksek çıkmıştır. Her iki grafikte yer alan sonuçlardan görüldüğü üzere, hem geliştirilen kriterlere göre hem de mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahminleri test sonuçları ile çok yakın sonuç vermektedir. Çatlak ilerleme testlerinin, elde edilen sonuçlar bakımından tekrarlı ve tutarlı olduğu görülmektedir.

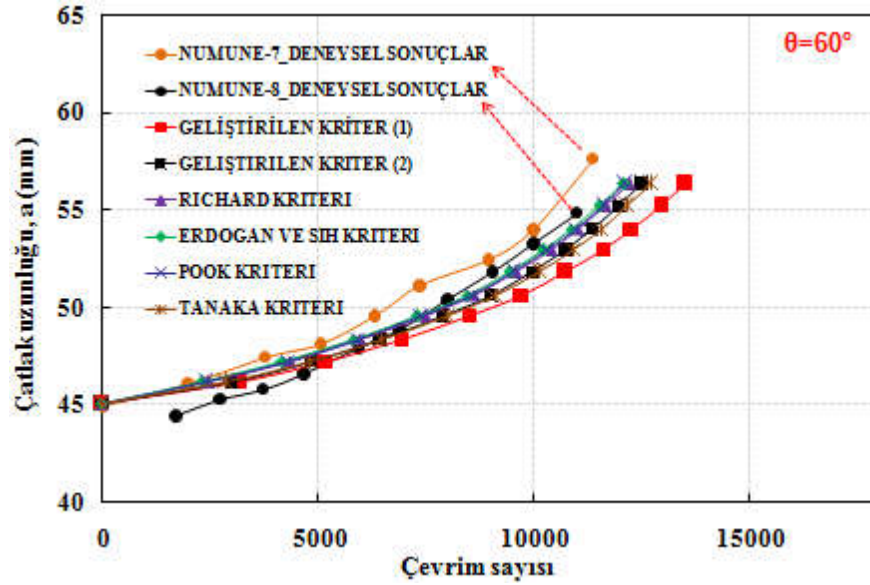
Şekil 3.16.'da,  $\theta=45^\circ$  yükleme açısında 3 adet numune için gerçekleştirilen çatlak ilerleme test sonuçlarının mevcut kriterler ve geliştirilen kriterler ile karşılaştırması verilmiştir. Her üç numune de 1,14 kN-11,4 kN (R=0,1) yorulma yüklemesi altında test edilmiştir.



Şekil 3.16.  $\theta=45^\circ$  yükleme açısında CTS numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin, 11,4kN (R=0,1) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması.

$\theta=45^\circ$  yükleme açısı için de geliştirilen kriterlere göre yapılan ömür tahminleri, hem mevcut kriterler ile hem de deneysel veriler ile yakın sonuçlar vermektedir.

Son olarak,  $\theta=60^\circ$  yükleme açısında 2 adet numune için gerçekleştirilen çatlak ilerleme test sonuçlarının mevcut kriterler ve geliştirilen kriterler ile karşılaştırması Şekil 3.17.'de verilmiştir. Her iki numune de 1,365 kN-13,65 kN (R=0,1) yorulma yüklemesi altında test edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bu yükleme durumu için de geliştirilen ve mevcut kriterler deneysel sonuçlara yakın ömür tahminleri vermiştir. Sonuç olarak, kırılma test sonuçlarına göre doğrulaması gerçekleştirilen iki boyutlu yeni kriterler, çatlak ilerleme test sonuçlarına göre de doğrulanmıştır.



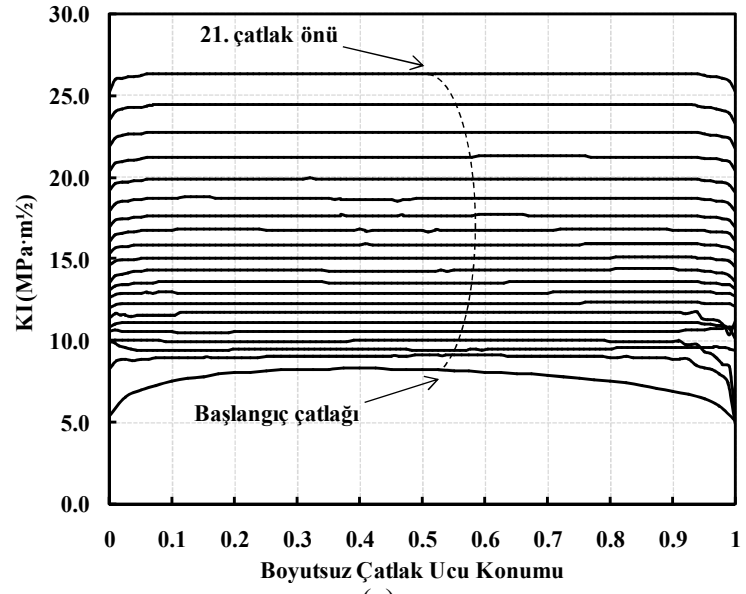
Şekil 3.17.  $\theta=60^\circ$  yüklemesi altında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin, 13,65 kN (R=0,1) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması.

### 3.3. Eğik Çatlak İçeren CT Modeli Analizi

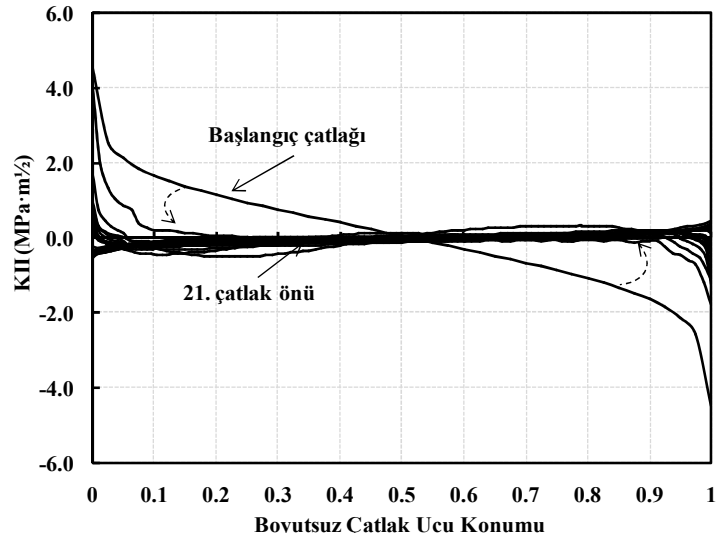
Bölüm 3.1.'de, eğik çatlak yerleştirilen CT numunesinin (Şekil 3.1), mod-I yüklemesi altında düzlemsel olmayan artırımlı çatlak ilerlemesi ve modellenmesinde kullanılan yöntem ve çatlakın bir adım ilerletilmesinde izlenen adımlar detaylı olarak açıklanmıştır.

Bu bölümde, karışık modlu kırılma olgusunun anlaşılabilmesini sağlamak ve düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesinin modellenmesinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olması amacıyla, bir başlangıç çalışması olarak CT numunesine eğik çatlak yerleştirilerek, mod-I yüklemesi altında çatlakın üç boyutlu modelleme ve çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.1.'de detayları verilen çatlak ilerleme döngüsü, eğrisel çatlak düzlemsel hale gelene kadar devam ettirilerek, 21. adım sonunda düzlemsel hale gelen çatlak yüzeyi için gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

Şekil 3.18.'de, tüm adımlar için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında elde edilen GŞF değerleri,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$ 'ün çatlak ucu boyunca değişimleri sırasıyla verilmiştir.

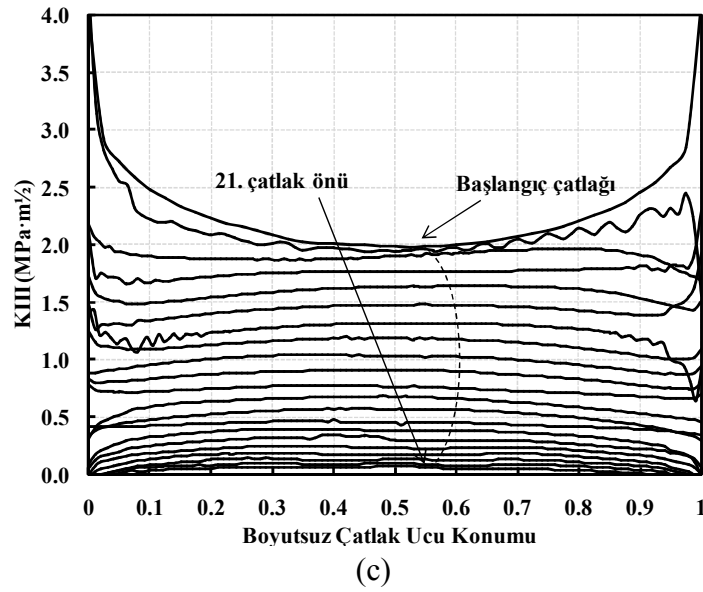


(a)

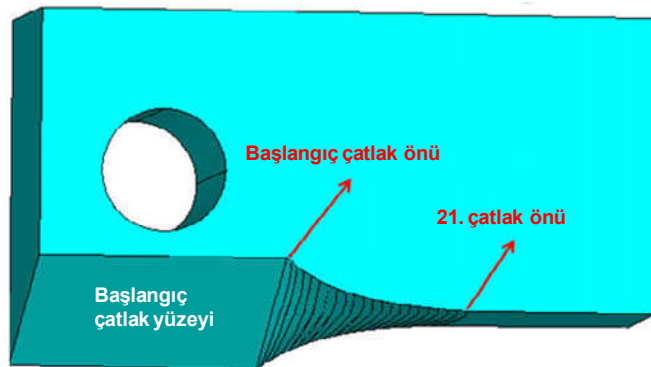


(b)

Şekil 3.18. Tüm çatlak profilleri için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrası elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$  ve (c)  $K_{III}$ .



Şekil 3.18. Tüm çatlak profilleri için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrası elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$  ve (c)  $K_{III}$ . (Devamı)



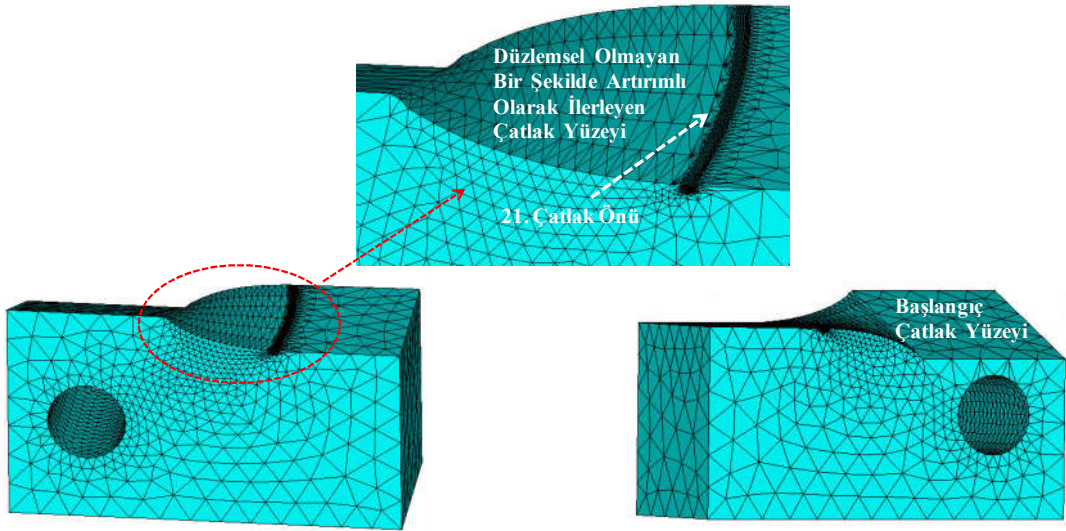
Şekil 3.19. "21." adım sonunda modellenen çatlak profilinin üst kısmının yarı model görünümü.

Şekilde görüldüğü gibi çatlak ilerledikçe  $K_I$  artarken  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Bir başka deyişle, problem karışık mod-I/III durumundan,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$ 'ün etkinliğinin çatlak ilerleme sürecinde azalmasıyla, mod-I çatlağı durumuna dönüşmektedir. Şekillerde bazı dağılımlarda gözlemlenen gürültüler, profillere uydurulan eğrilerin düğüm noktalarının dizilimindeki küçük oranda sapmalardan kaynaklanmaktadır. Şekil 3.19.'da, 21. adım sonunda modellenen çatlak profilinin üst kısmının yarı model görünümü verilmektedir. Her bir adımda bir önceki çatlak profili de dâhil edilerek çatlak tanımlandığı için, profillerin tümü 21. adım çatlak modelinde görülmektedir. Tıpkı  $K_{II}$  GŞF değerinin çatlak ucu boyunca pozitiften negatif bir değere değişkenlik gösterdiği gibi, çatlak ucu kenarlarının aşağı ve yukarı



yönlü zıt doğrultularda ilerleme eğilimi göstererek çatlakın giderek düzlemsel hale geldiği şekilden görülmektedir. Bu da çatlak sapma açısının tespitinde  $K_{II}$ 'nin etkin bir rol oynadığını doğrulamaktadır.

Şekil 3.20.'de ise, 21. çatlak adımının sonlu eleman modelinin farklı açılarda görüntüleri verilmektedir. Her adımda olduğu gibi, bu adımda da çatlak ucu bölgesinde tünel hacim oluşturularak, düzenli ve yoğun bir ağ yapısının oluşturulması için altı yüzlü hexahedral elemanlar ile bölüntülenmiş ve modelin geri kalanı ise dört yüzlü tetrahedral elemanlar ile bölüntülenmiştir.



Şekil 3.20. "21." çatlak profilinin sonlu eleman modelinin farklı açılarda görüntüleri.

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında, çatlakın ilerletilmesinde üç boyutlu karışık mod-I/III probleminde,  $K_{III}$ 'ün olmadığı ancak  $K_{III}$ 'ün etkisinde oluşan  $K_I$ 'nin yer aldığı iki boyutlu mod-I/II kriteri kullanılarak, çatlak sapma açısının ( $\theta_0$ ) tespitinde mod-III yüklemesi dolayısıyla oluşan  $K_I$ 'nin etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda,  $K_I$ 'nin etkin bir rol oynadığı görülmüş ancak daha doğru ve güvenilir bir sonuca varmak için ve  $K_{II}$  ve  $K_{III}$ 'ün hem eşdeğer GŞF ( $\Delta K_{eş}$ ) değeri, hem de çatlak sapma açısı ( $\theta_0$ ) değerinin tespiti üzerindeki etkisini belirlemek için, gerçekleştirilen analizlerin deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak sonuçların değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden bir sonraki bölümde, mod-I/III yüklenme durumunda farklı açılarda gerçekleştirilen deneyler modellenerek iki boyutlu kriter ile çatlak ilerleme



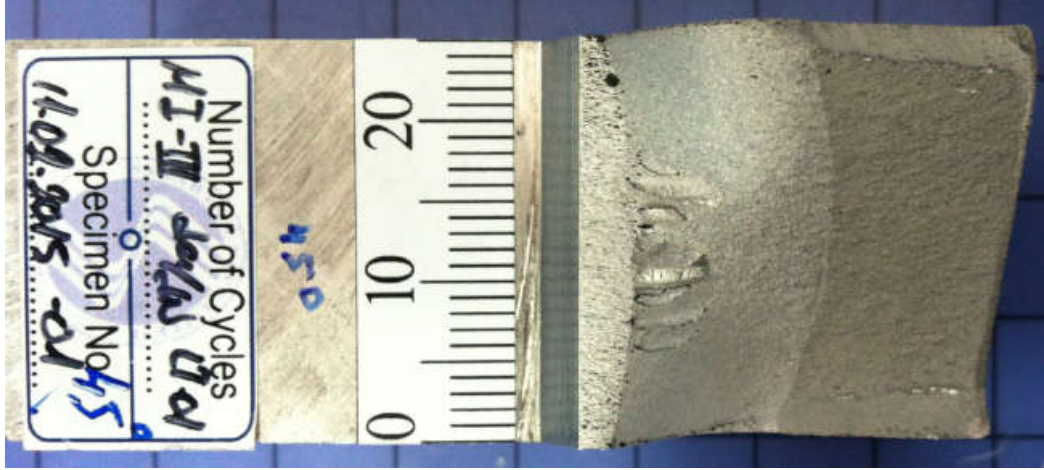
analizleri gerçekleştirilmiş, sonrasında kriter ile tahmin edilen çatlak yüzeyleri ve ömürler, deneysel yüzey ve ömür verileri ile karşılaştırılmıştır. Aynı çalışmalar, mod-I/II/III deneyleri için de gerçekleştirilmiştir.

### **3.4. Mod-I/III Yükleri Altında CTT Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Maksimum Teğetsel Gerilme Kriteri)**

Bu bölümde, farklı yükleme açıları için gerçekleştirilmiş mod-I/III çatlak ilerleme testleri, Bölüm 3.3.'te detayları verilen analiz yöntemi uygulanarak modellenmiş ve Erdoğan ve Sih'in (1963) geliştirmiş olduğu mevcut iki boyutlu kırılma kriteri (maksimum teğetsel gerilme kriteri) kullanılarak çatlak profilleri artırımlı olarak ilerletilerek elde edilen çatlak yüzeyleri, deneysel yüzey profilleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece, bir önceki bölümde bahsedilen, iki boyutlu kriter ile üç boyutlu mod-I/III çatlak ilerleme deneylerinin modellenmesinde K<sub>II</sub>'ün etkili olup olmadığı, deneysel yüzeyler ile karşılaştırılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

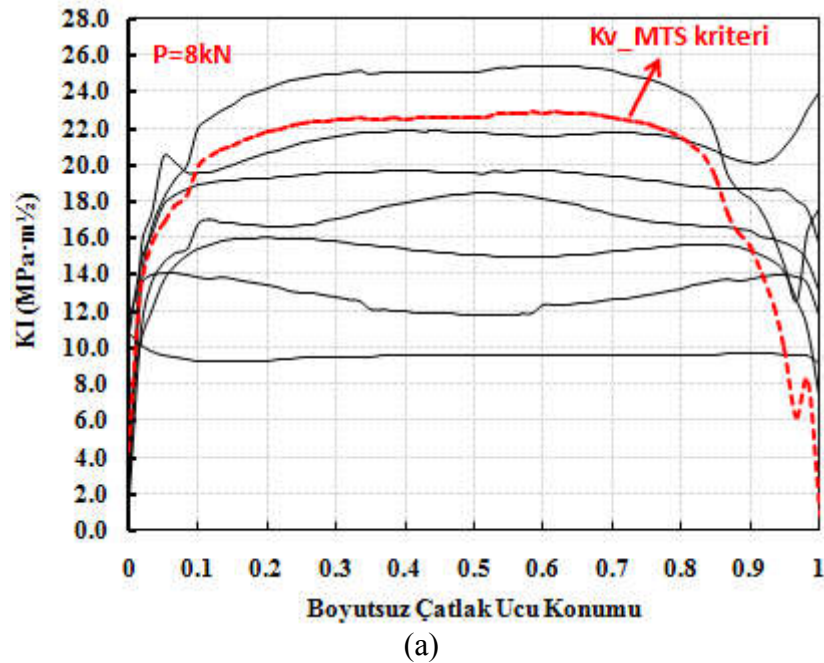
#### **3.4.1. Mod-I/III 45° yükleme açısında CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri**

Mod-I/III 45° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyindeki (Şekil 3.21) ön çatlak uzunluğu ölçülerek bire bir modellenmiş ve MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme testi saniyede 2 çevrim (2 hertz) 8 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.

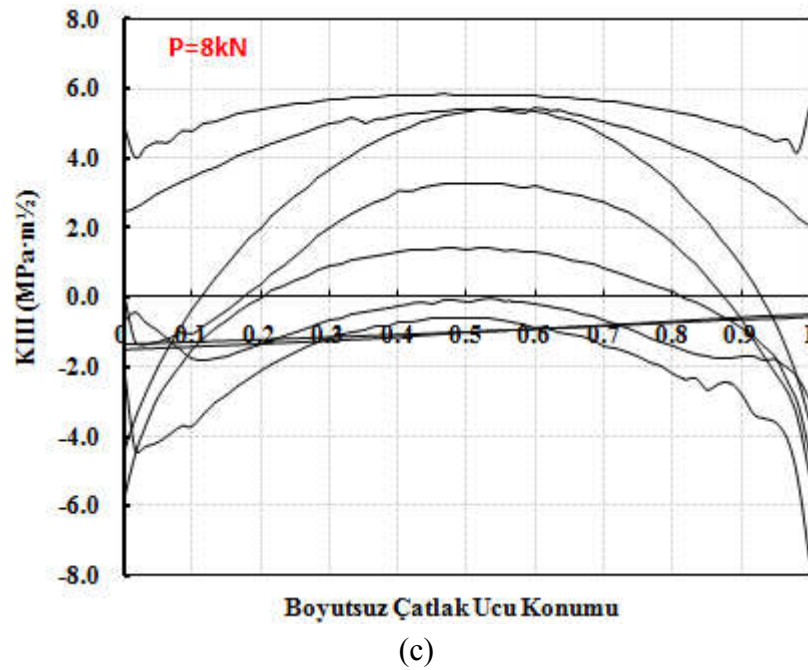
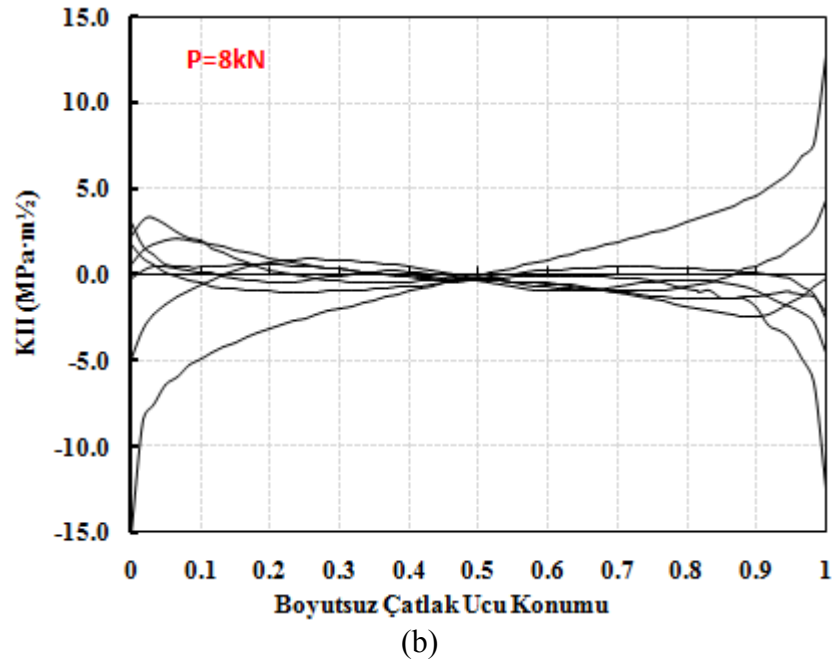


Şekil 3.21. Mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan yorulma çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

Gerçekleştirilen çatlak ilerleme simülasyonları sonrasında her bir çatlak adımında çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri Şekil 3.22.'de sırasıyla verilmiştir. Son çatlak adımı için MTS kriterine göre eşdeğer GŞF değeri ayrıca hesaplanarak Şekil 3.22.a'da çizdirilmiştir. Bölüm 3.6.'da her profil için eşdeğer GŞF elde edilerek ömür tahminleri yapılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



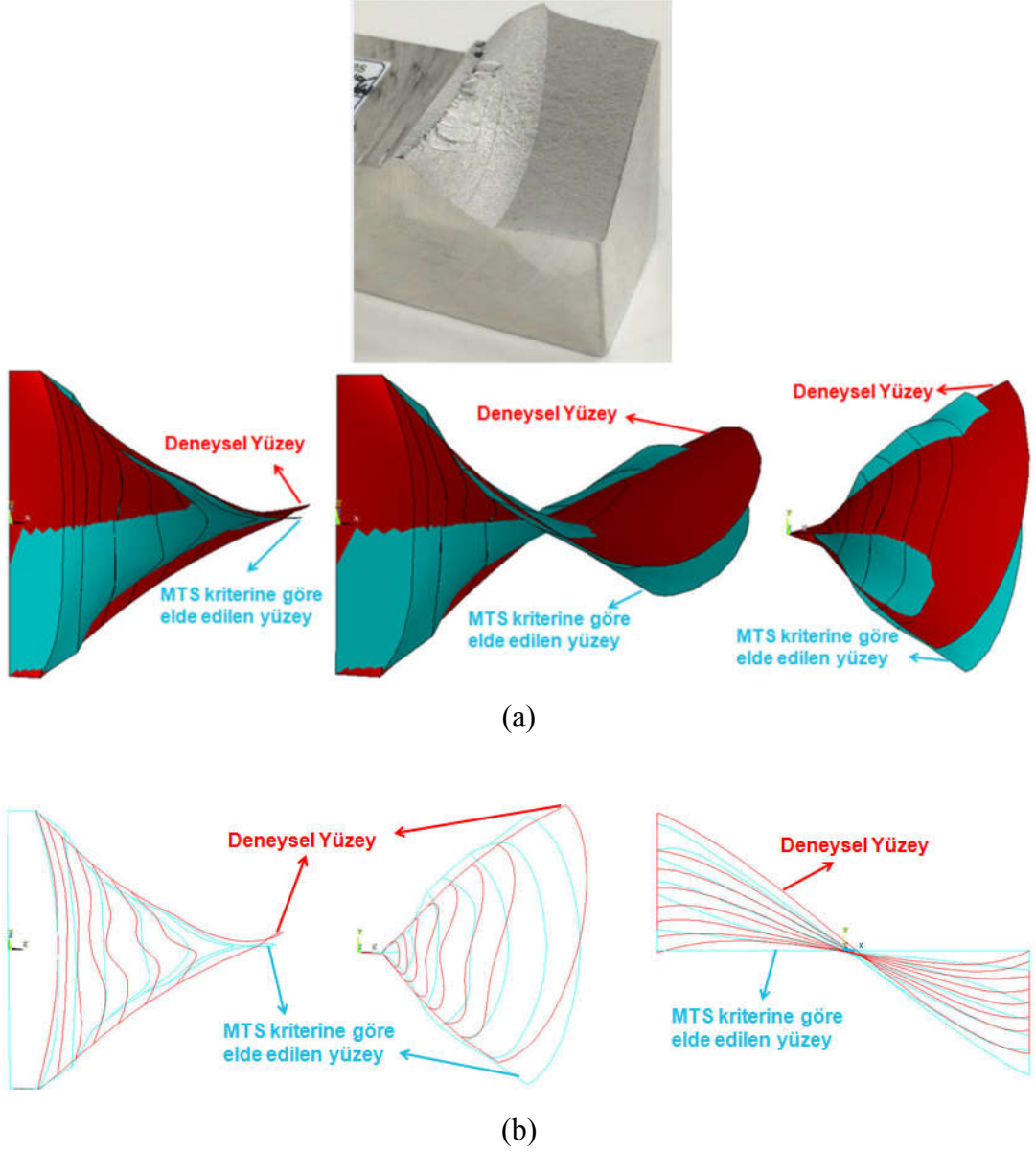
Şekil 3.22. Mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.



Şekil 3.22. Mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzey üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı açılardan görünümü Şekil 3.23.'te verilmiştir. Deney gerçekleştirilirken ilerleyen çatlağın belirgin olması için bazı aralıklarda belirli bir süre bir miktar yük artırılmıştır. Deneysel yüzeyde görülen

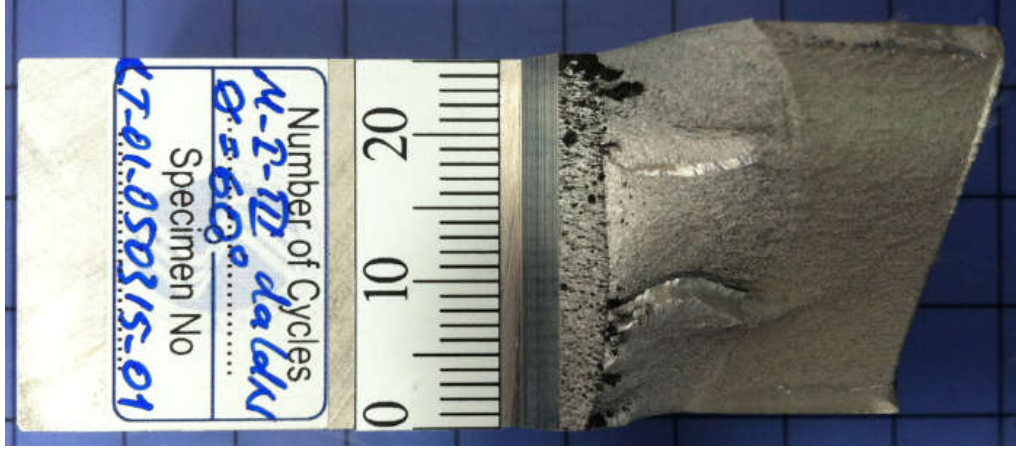
çatlak çizgileri bunu ifade etmektedir. İki yüzeyin de birbirine çok yakın eğilim gösterdiği şekillerden görülmektedir.



Şekil 3.23. Mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin (a) yüzeyel, (b) çizgisel karşılaştırılması.

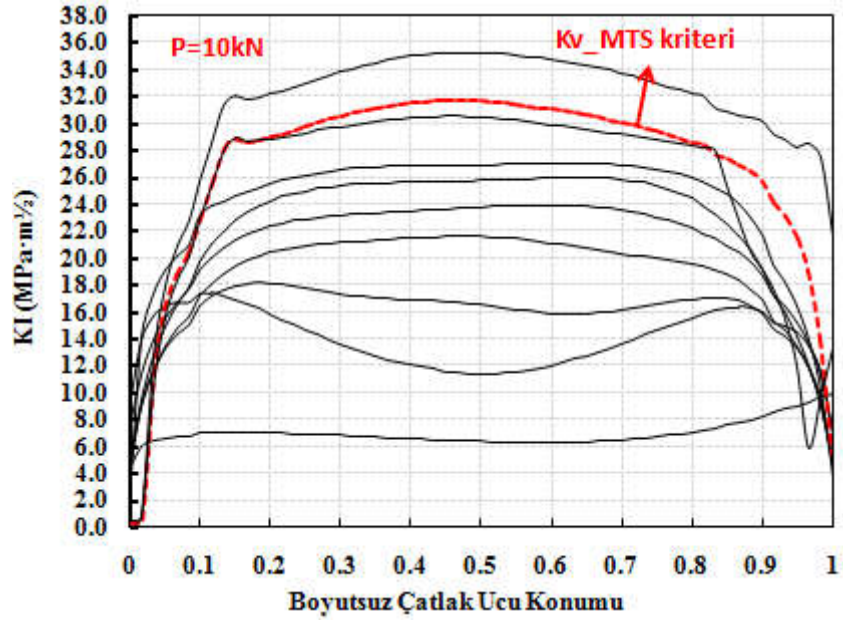
### 3.4.2. Mod-I/III 60° yüklemeye açısında CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri

Mod-I/III 60° yüklemeye açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numunenin üstten görünümü Şekil 3.24.'te verilmiştir. Şekilde görülen ön çatlak uzunluğu dijital ölçer yardımıyla ölçülerek bire bir modellenmiş ve MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu yüklemeye açısında gerçekleştirilen deney 10 kN (R=0,1) yorulma yüklemesi altında gerçekleştirildiği için, analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.

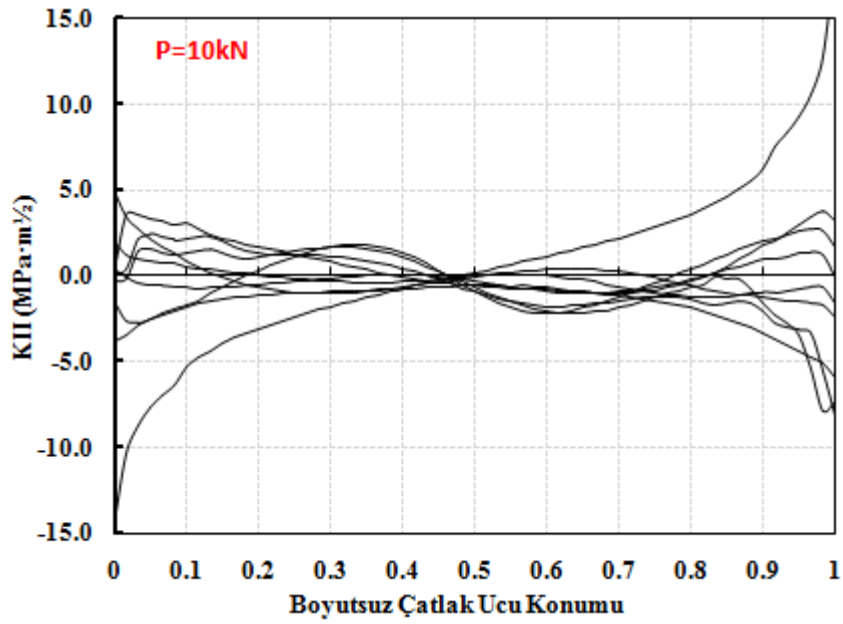


Şekil 3.24. Mod-I/III 60° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

Çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.25.'te verilmiştir. Son çatlak adımı için MTS kriterine göre eşdeğer GŞF değeri hesaplanarak ayrıca çizdirilmiştir. R-oranı dikkate alınarak eşdeğer GŞF değeri hesaplanmıştır.



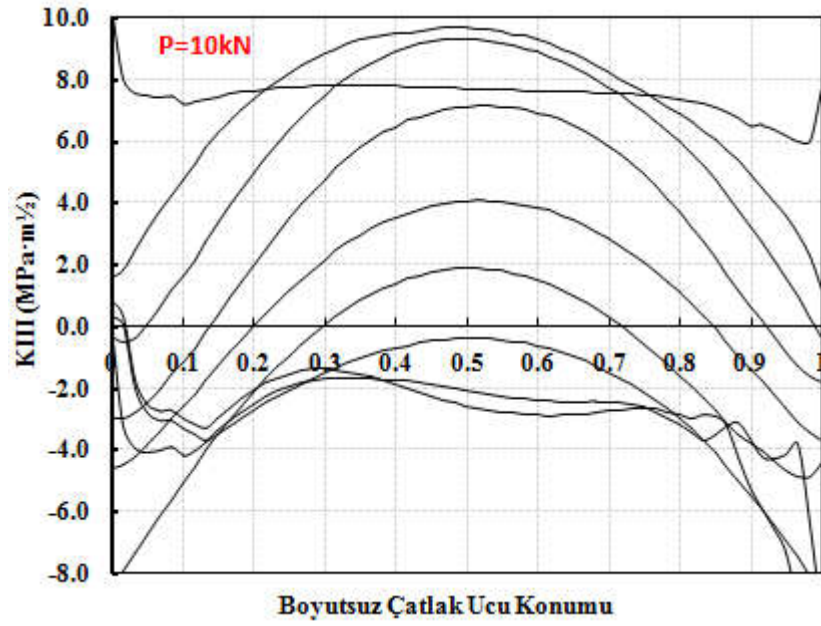
(a)



(b)

Şekil 3.25. Mod-I/III 60° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  değerleri.

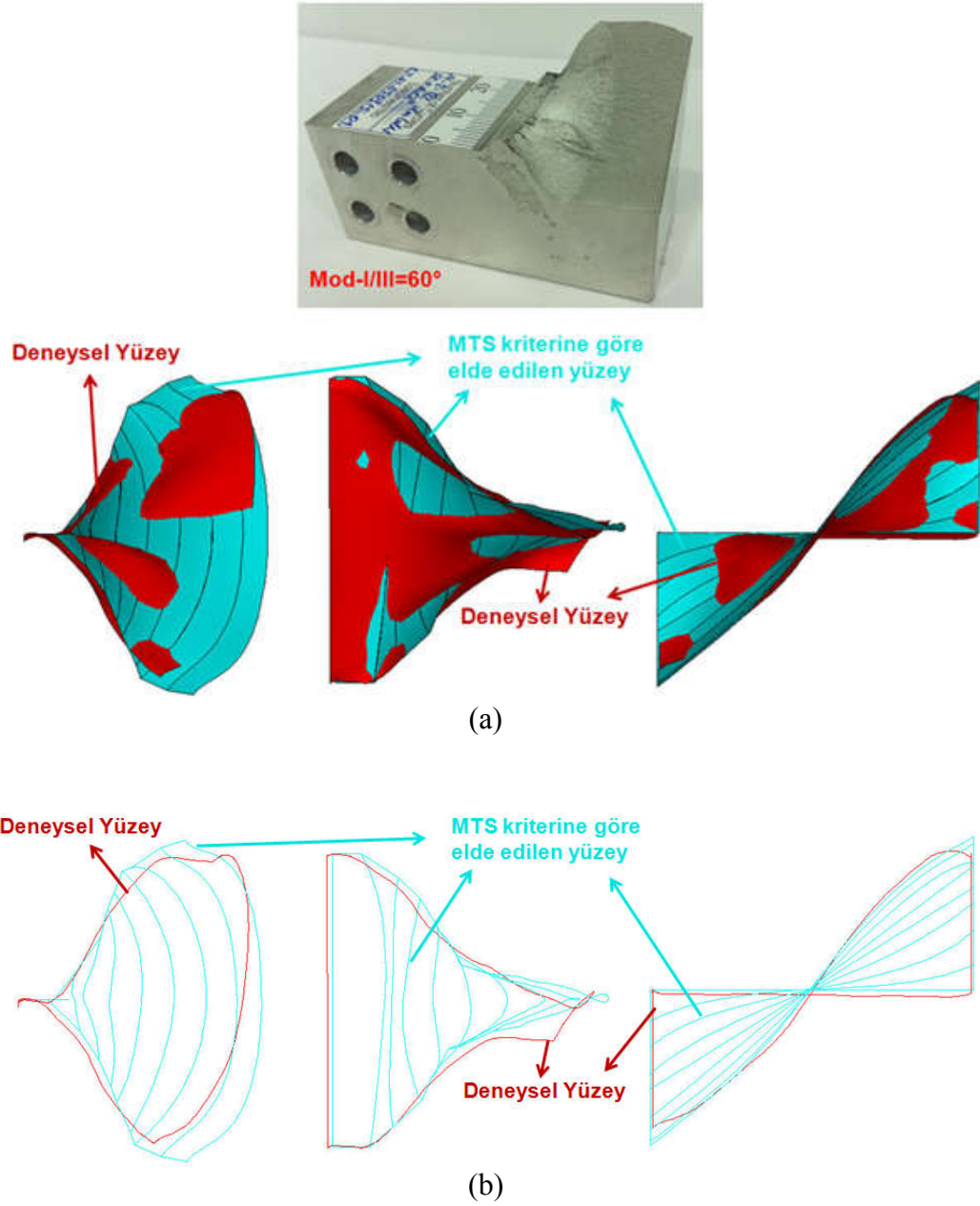




(c)

Şekil 3.25. Mod-I/III  $60^\circ$  yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  değerleri. (Devamı)

Şekil 3.26.'da, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak elde edilen yüzeylerin karşılaştırması verilmiştir. Her iki yüzeyinde ufak sapmalar dışında birbirine yakın eğilim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.26. Mod-I/III 60° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin (a) yüzeyel, (b) çizgisel karşılaştırılması.

### 3.4.3. Mod-I/III 75° yükleme açısında CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri

Mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyindeki (Şekil 3.27) ön çatlak uzunluğu ölçülerek bire bir modellenmiş ve MTS kriterine göre

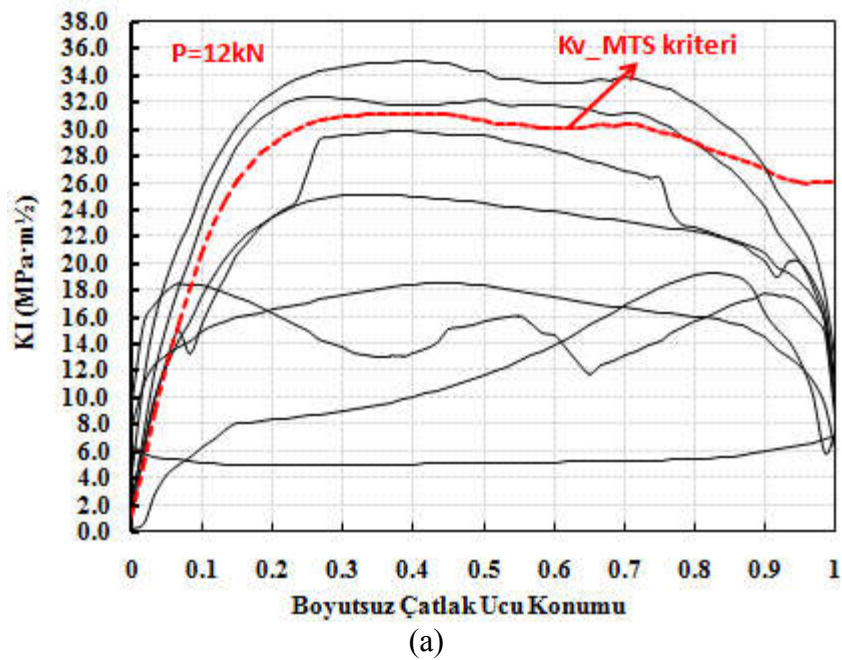


çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme testi saniyede 2 çevrim (2 hertz) 12 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.

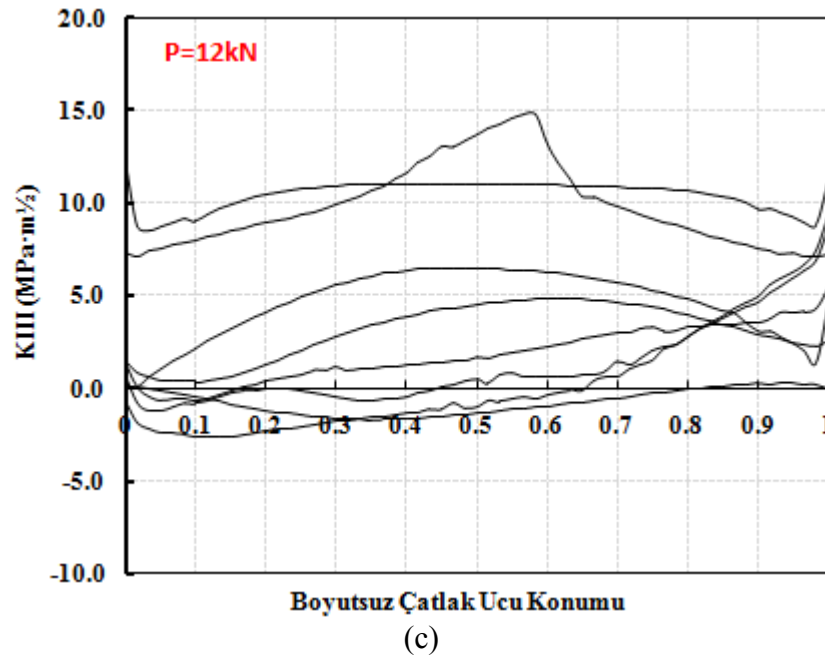
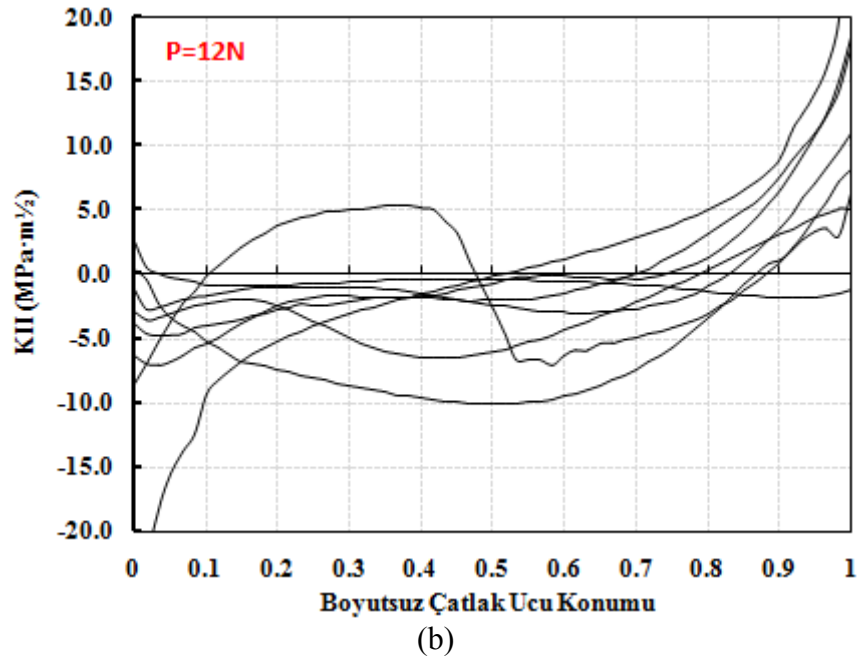


Şekil 3.27. Mod-I/III 75° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

Analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değeri Şekil 3.28.'de verilmiştir. Bu yüklemeye durumu için de, son çatlak adımı için MTS kriterine göre eşdeğer GŞF hesaplanarak şekilde çizdirilmiştir.



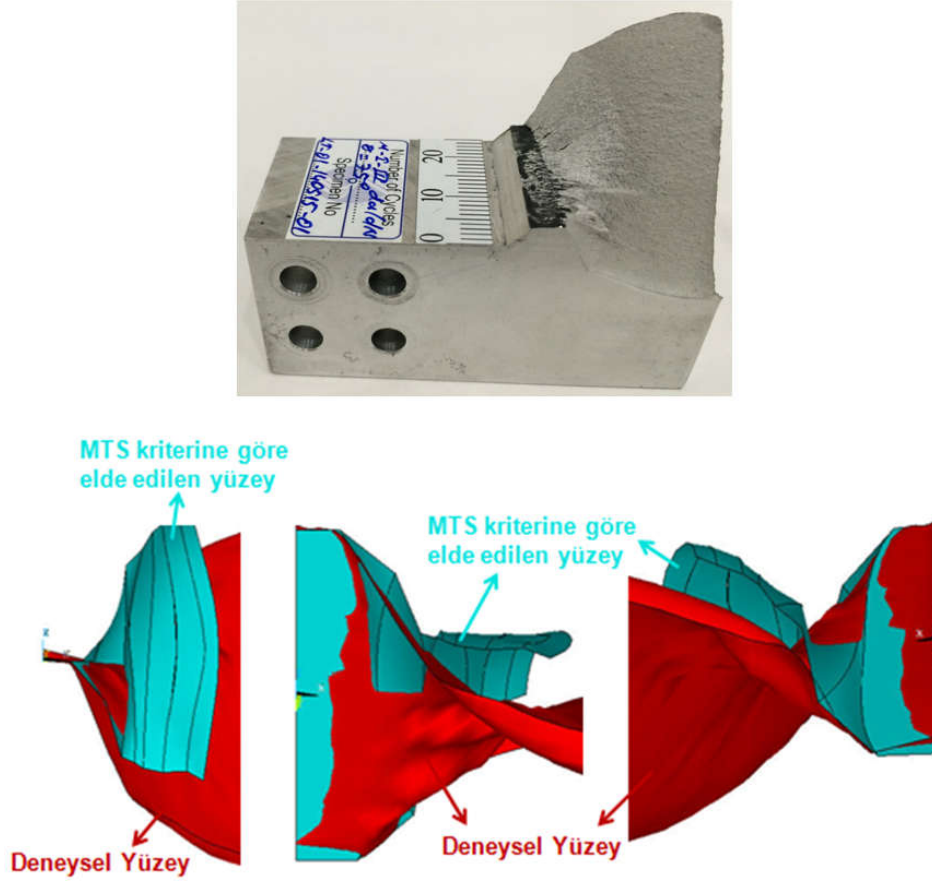
Şekil 3.28. Mod-I/III 75° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değeri.



Şekil 3.28. Mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

Şekil 3.29.'da, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak elde edilen yüzeylerin karşılaştırması verilmiştir. Karışık modlu yüklemenin oldukça yüksek olduğu, bu

yüklemeye açısı için deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak tahmin edilen çatlak ilerleme yüzeyinin birbirinden uzak bir eğilim gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 3.29. Mod-I/III 75° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması.

Bu bölümde mod-I/III 45°, 60° ve 75° yüklemeye açılarında gerçekleştirilen çatlak ilerleme testleri modellenerek kırılma ve çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiş ve elde edilen yüzeyler ve çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri karşılaştırılmıştır. 45° ve 60° yüklemeye açıları için gerçekleştirilen analizlerde deney sonuçlarına çok yakın yüzeyler elde edilmiştir. Bu durum  $K_{III}$  GŞF değerinin, çatlak sapma açısının tahmininde etkin olmadığını göstermektedir. 75° yüklemeye açısında yüzeyler arasında sapmaların oluşmasının nedeni, baskın mod-III yüklemesi ve bunun sonucunda oluşan baskın mod-II nedeniyle, çatlak sapma açısı kriterinin (MTS kriteri) bu yüklemeye durumlarına olan hassasiyetinin düşüklüğünden kaynaklanabilir. Mod-I/II deneyleri sonrasında da görüldüğü gibi, yüklemeye açısı arttıkça kriterlere göre elde edilen çatlak sapma açıları da bir miktar sapmalar

gözlenmekteydi. Diğer bir sebep ise, yüksek yükleme açılarında deney esnasında numune yüzeylerinde yüklemeye kaynaklı bozulmalar oluşarak, literatürde "factory roof" olarak bilinen keskin köşeli tepecikler meydana gelmektedir. Bu yüzey bozukluklarının sebebi halen bir araştırma konusudur ve literatürde henüz tam olarak açıklanamamıştır. Bu yüzden, Bölüm 3.6.'da MTS kriteri kullanarak tahmin edilen mod-I/III yüzeyleri, çatlak sapma açısı tahmini için tez kapsamında geliştirilen iki boyutlu çatlak sapma açısı kriteri ve üç boyutlu eşdeğer GŞF denklemi kullanılarak da tahmin edilmiş, sonrasında MTS ve geliştirilen kriterlere göre elde edilen yüzeyler ve kriterlere göre yapılan ömür tahminleri, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

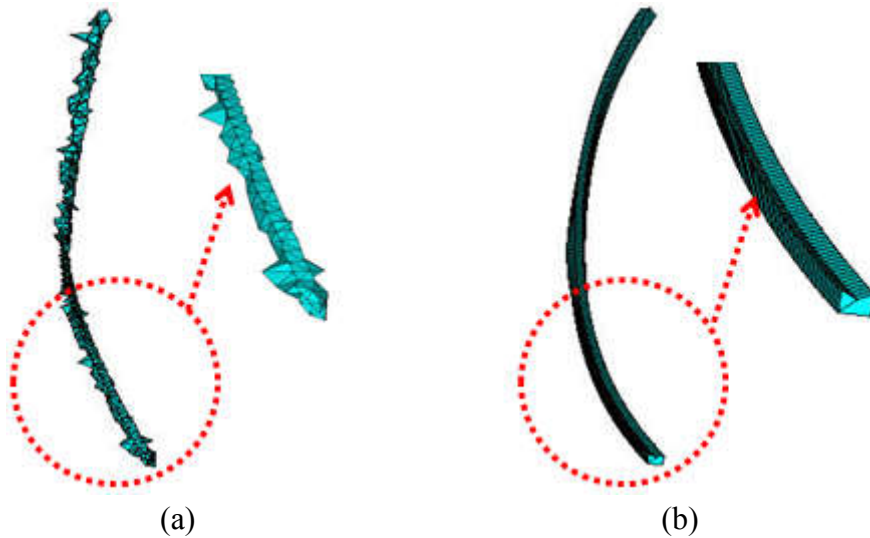
### **3.5. Mod-I/II/III Yükleri Altında CTST Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Maksimum Teğetsel Gerilme Kriteri)**

Bu bölümde, farklı yükleme açıları için gerçekleştirilmiş olan mod-I/II/III çatlak ilerleme deneyleri, MTS kriteri kullanılarak modellenmiştir. Çatlak profilleri artırılmış olarak ilerletilmiş ve elde edilen çatlak yüzeyleri, deneysel yüzey profilleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece, iki boyutlu kriter ile üç boyutlu çatlak ilerleme deneylerinin modellenmesinde K<sub>II</sub>'ün etkisi, mod-I/II/III deneyleri için de test edilmiştir. Mod-I/II/III çatlak ilerleme analizlerinde, mod-I/III analizlerinde kullanılan ve Bölüm 3.3.'te detayları verilen analiz yönteminde, çatlak modellenmesinde ve analiz sonrası verilerin işlenmesinde uygulanan işlem adımlarında bazı değişikliklere gidilmiştir. Bir sonraki bölümde mod-I/II/III analizleri için kullanılan analiz yönteminin detayları verilerek, elde edilen sonuçlar açısından iki yöntem karşılaştırılmıştır.

#### **3.5.1. Farklı ağ yapısı kullanarak gerçekleştirilen üç boyutlu çatlak ilerleme analiz yöntemi**

Mod-I/III analizlerinde kullanılan yöntemde, çatlağın modellenmesi aşamasında çatlak ucu civarında tünel hacim oluşturularak, oluşturulan bu tünel hacme altı yüzlü hexahedral elemanlar ile ağ yapısı örülmektedir. Daha sonra bu tünel hacmin dışında kalan tüm yapı dört yüzlü tetrahedral elemanlar ile örülerek bölüntüleme işlemi

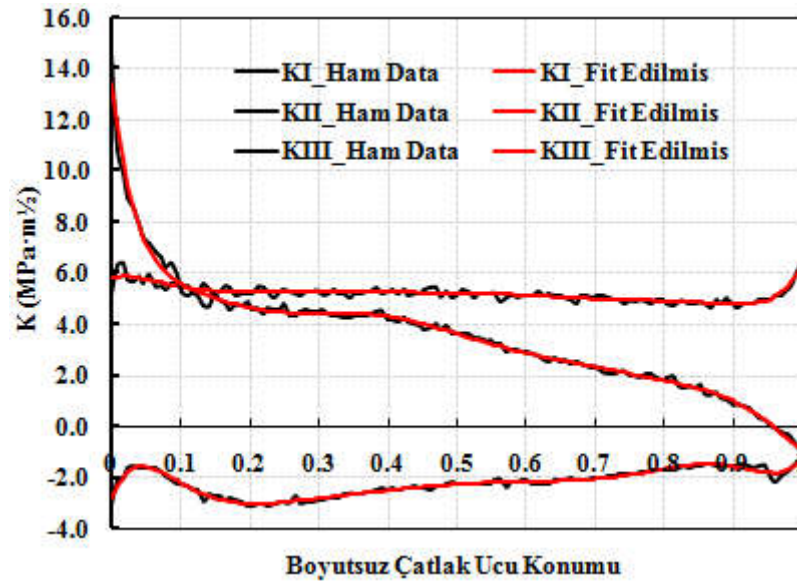
tamamlanmaktadır. Ancak tünel hacmin oluşturulması ve özellikle düzlemsel olmayan yüzeylere ağ yapısı örülmesi, bazı çatlak modelleri için çok zor olmakta ve zaman almaktadır. Bu yüzden, mod-I/II/III analizlerinde çatlak ucu civarında tünel hacim oluşturulmadan, yapının tamamı tetrahedral elemanlar ile bölüntülenmiştir. Böylece modelleme ve bölüntüleme işlemi için harcanan zaman en aza indirilmiştir. Ancak, çatlak ucu boyunca sıralanan tetrahedral elemanların hexahedral elemanlara göre nispeten daha düzensiz şeklinden dolayı, FRAC3D kodu kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonrası çatlak ucu boyunca GŞF değerlerinin dağılımında gürültüler oluşmaktadır. Şekil 3.30.'da, çatlak ucu boyunca sıralanan tetrahedral ve hexahedral elemanlar gösterilmektedir. Oluşan bu gürültüyü en aza indirmek için şekilde görüldüğü gibi (Şekil 3.30.a) düşük eleman boyutuna sahip ve çatlak ucu boyunca sık dizilimli bir ağ yapısı oluşturmak gerekmektedir.



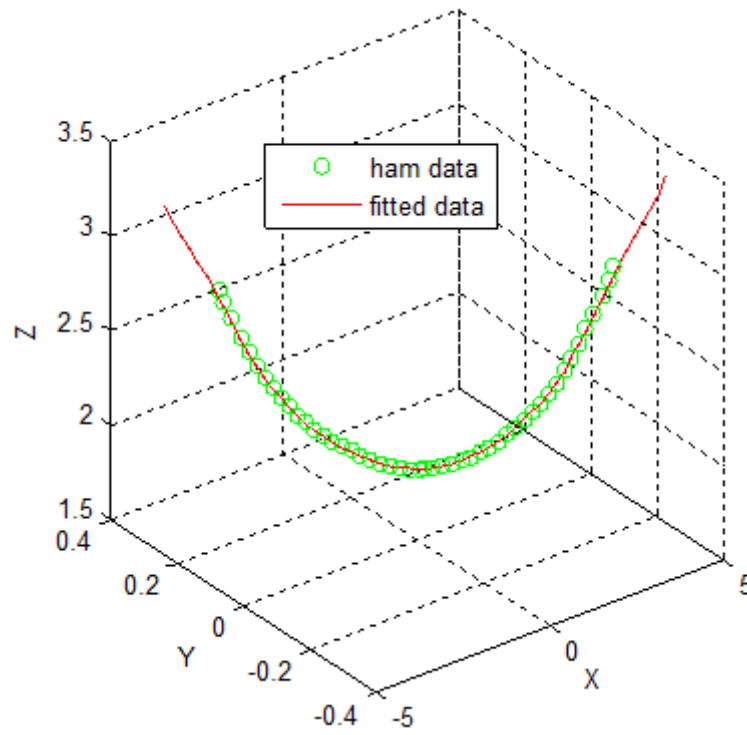
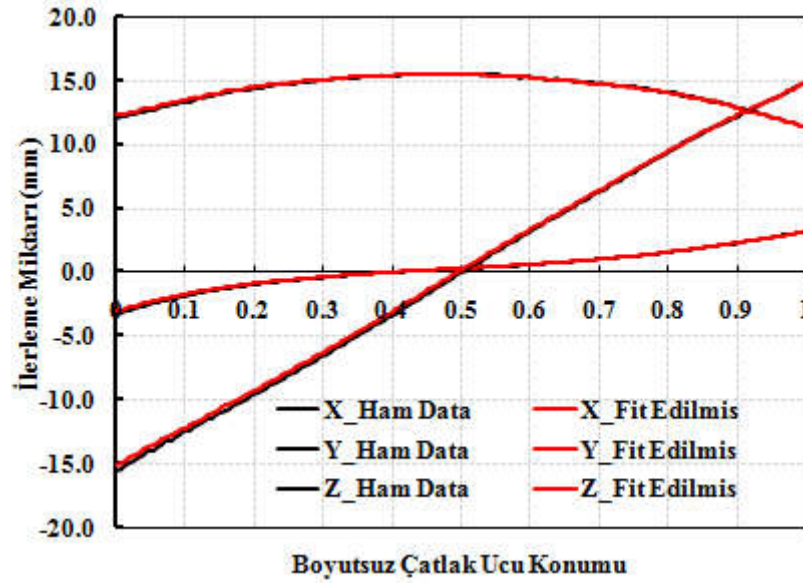
Şekil 3.30. Çatlak ucu boyunca sıralanan (a) tetrahedral, (b) hexahedral elemanlar.

Tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonrası GŞF dağılımlarında oluşan gerçek çözüm dağılımının yakın bölgesindeki gürültünün giderilmesi gerekmektedir. Çünkü mevcut gürültüler bir sonraki profil tahminini olumsuz etkileyecektir. GŞF dağılımına eğri uydurularak gürültüler ortadan kaldırılmıştır. Şekil 3.31.'de tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen bir analizden, çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerlerinin dağılımı verilmiştir. Oluşturulan program, GŞF dağılımlarının olduğu dosya içerisindeki verileri alarak, 10. dereceden polinom eğri uydurmakta ve yeni elde edilen dataları ayrı bir dosya halinde vererek ham

verilere göre uydurulan değerleri üst üste çakıştırarak grafik halinde vermektedir. Uydurulan GŞF dağılımları kullanılarak bir sonraki profil tahmin edilmekte ve tahmin edilen profil verilerine yine program yardımıyla 10. dereceden polinom eğri uydurularak profildeki gürültüler giderilmektedir (Şekil 3.32.a). Tahmin edilen profildeki gürültülerin giderilmesi için oluşturulan program, mevcut profil koordinatlarının olduğu dosya içerisindeki verileri alarak, üç boyutlu uzayda her bir eksen için eğri uydurmakta, daha sonra mevcut ve oluşan yeni profili üst üste çakıştırarak grafik halinde vermektedir (Şekil 3.32.b).



Şekil 3.31. Tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen bir analizden çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerlerinin dağılımı.

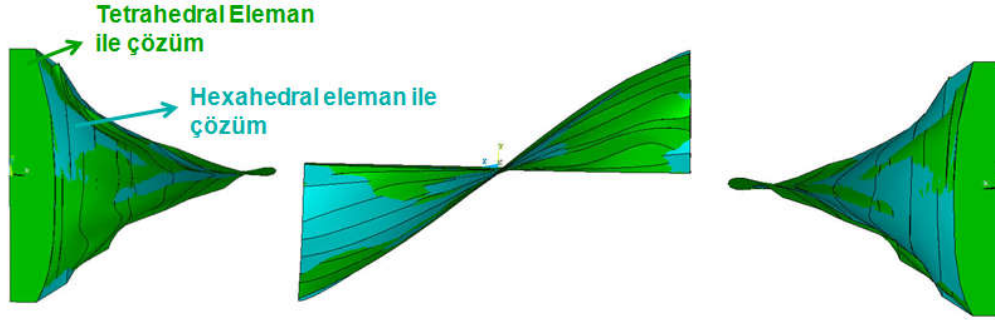


Şekil 3.32. Çatlak ilerleme analizi sonrası tahmin edilen bir sonraki profilin ham veri koordinatları ve bu data'lara eğri uydurulduktan sonra elde edilen yeni koordinatların (a) iki boyutlu, (b) üç boyutlu dağılımı.

Üç boyutlu çatlak ilerleme analizleri için çatlak ucu boyunca farklı ağ yapısı (tetrahedral elemanlar) kullanılarak geliştirilen yaklaşım, mod-I/III  $45^\circ$  yükleme açısına uygulanarak çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen çatlak



yüzeyleri, çatlak ucu boyunca hexahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonrasında elde edilen yüzeyler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.33). Şekilde görüldüğü gibi, farklı ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilen her iki analiz sonuçlarından elde edilen yüzeyler de birbiri ile örtüşmektedir.



Şekil 3.33. Mod-I/III 45° yüklemesi için, hexahedral ve tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen her iki analiz sonuçlarından elde edilen yüzeyler.

Analizler sonrası tutarlı sonuçlar elde edildiği için, çatlak modellemesi ve ağ yapısının oluşturulması esnasında zamandan tasarruf sağlamak amacıyla, ilerleyen bölümlerde sonuçları verilen mod-I/II/III çatlak ilerleme analizleri, çatlak ucu boyunca tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3.5.2. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklemesi altında CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri

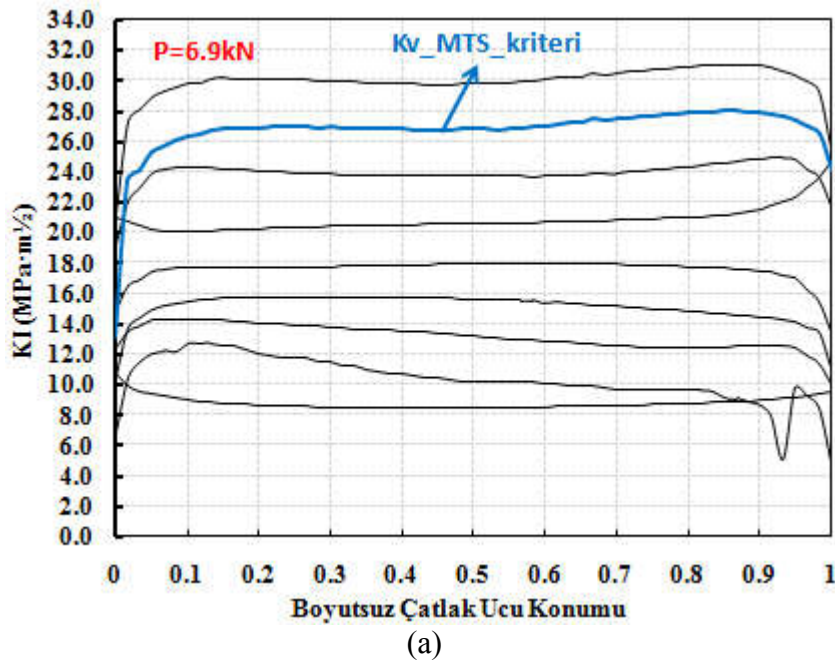
Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° üç eksenli yüklemesi altında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numunenin üstten görünümü Şekil 3.34.'te verilmiştir. Şekilde görülen ön çatlak uzunluğu dijital ölçer yardımıyla ölçülerek bire bir modellenmiş ve MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme testi saniyede 2 çevrim (2 hertz), 6,9 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.



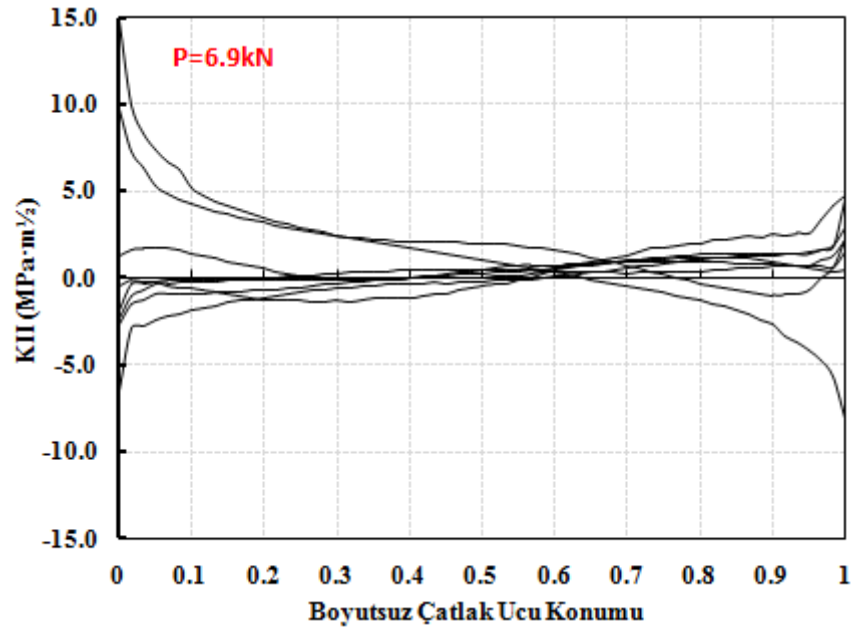


Şekil 3.34. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklem açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

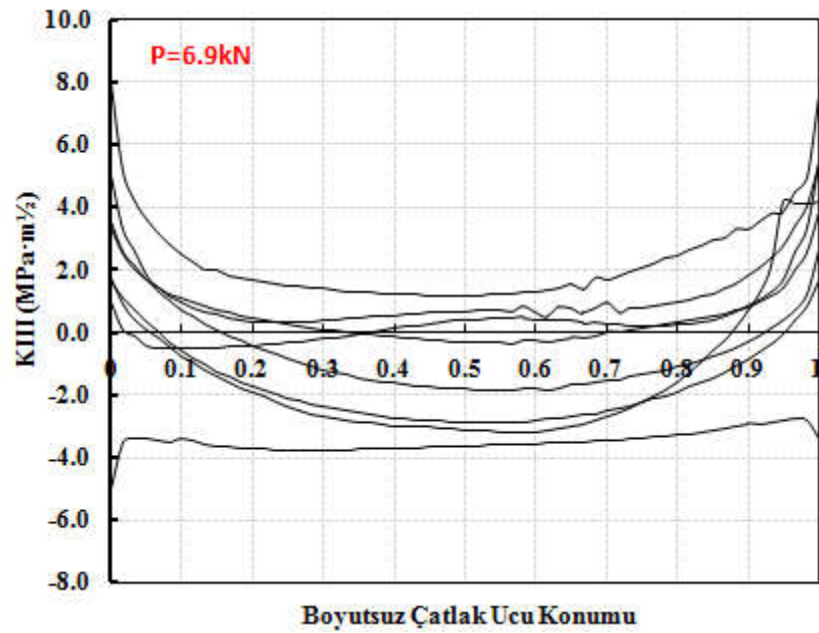
Gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.35.'te verilmiştir. Son çatlak adımı için hesaplanarak çizdirilen eşdeğer GŞF değeri daha sonra tüm profiller için hesaplanarak Bölüm 3.6.'da ömür tahminleri yapılmıştır.



Şekil 3.35. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklem açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.



(b)

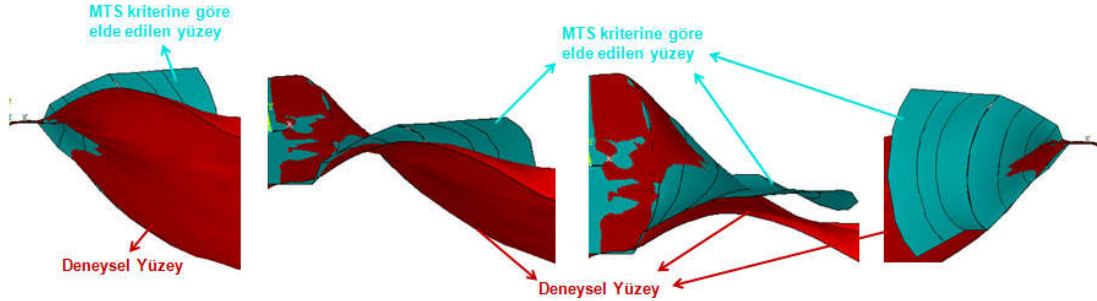


(c)

Şekil 3.35. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

Şekil 3.36.'da, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak elde edilen yüzeylerin karşılaştırması verilmiştir. Çatlağın bir kenarı deneysel yüzey ile bire bir örtüşürken

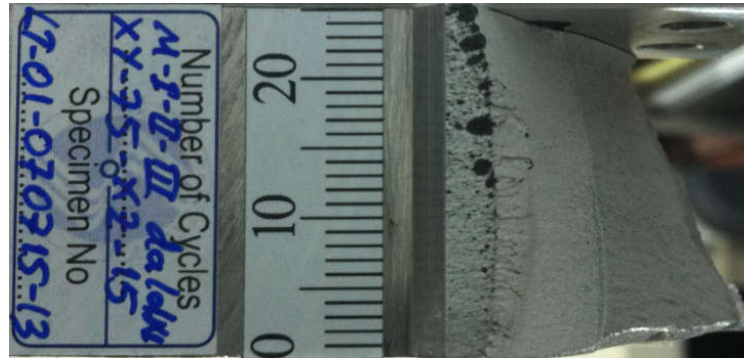
diğer kenarı ise deneysel yüzeyden sapmıştır. Çatlak merkezi ise deneysel yüzeyden giderek uzaklaşmaktadır.



Şekil 3.36. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması.

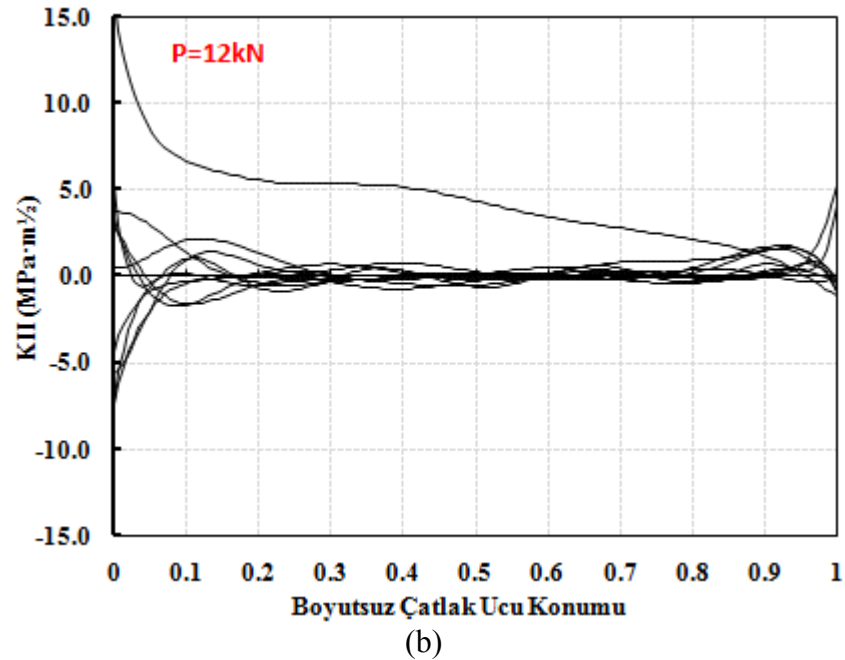
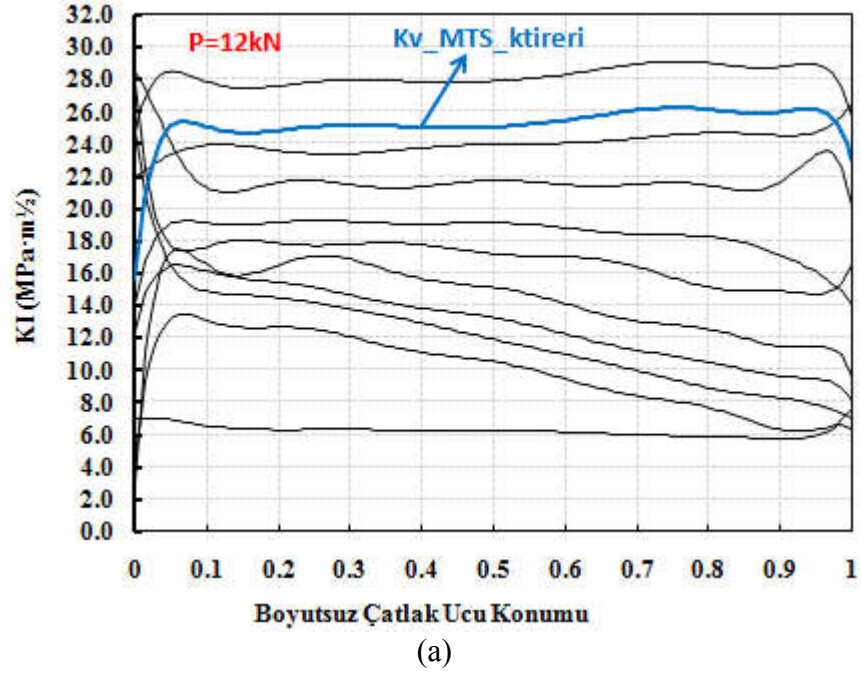
### 3.5.3. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısında CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri

Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme deneyi sonrasında Şekil 3.37.'de verilen kırılan numunenin ön çatlak uzunluğu ölçülerek bire bir modellenmiş ve MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme testi saniyede 2 çevrim (2 hertz), 12 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.

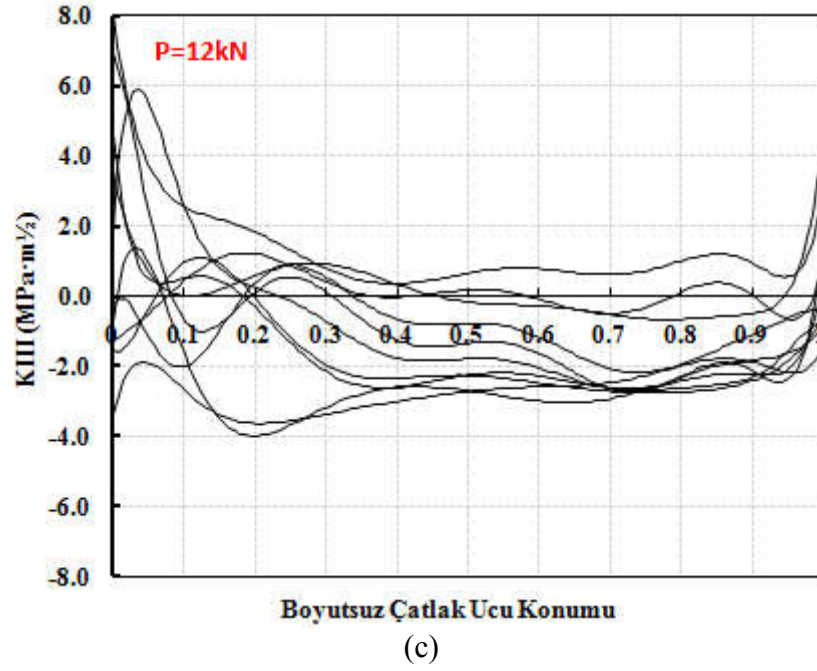


Şekil 3.37. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

Bu yükleme durumu için gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.38.'de verilmiştir.

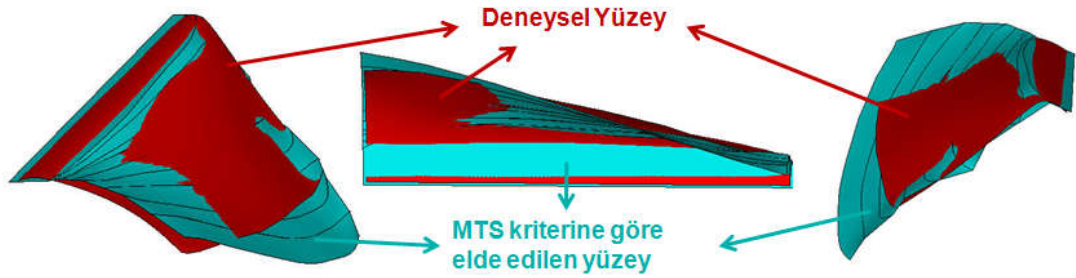


Şekil 3.38. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.



Şekil 3.38. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklem açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

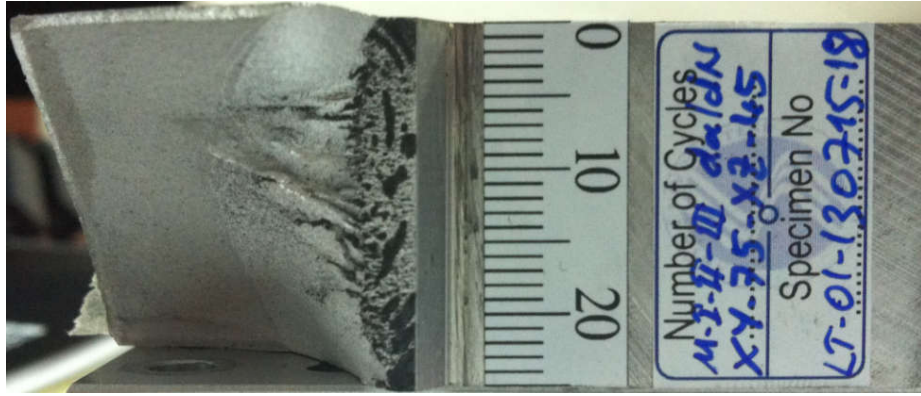
Şekil 3.39.'da, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak elde edilen yüzeylerin karşılaştırması verilmiştir. Bu yüklem açısı için MTS kriteri kullanarak elde edilen yüzey, küçük sapmaların dışında deneysel yüzeye yakın bir sonuç vermiştir.



Şekil 3.39. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklem açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması.

### 3.5.4. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme analizleri

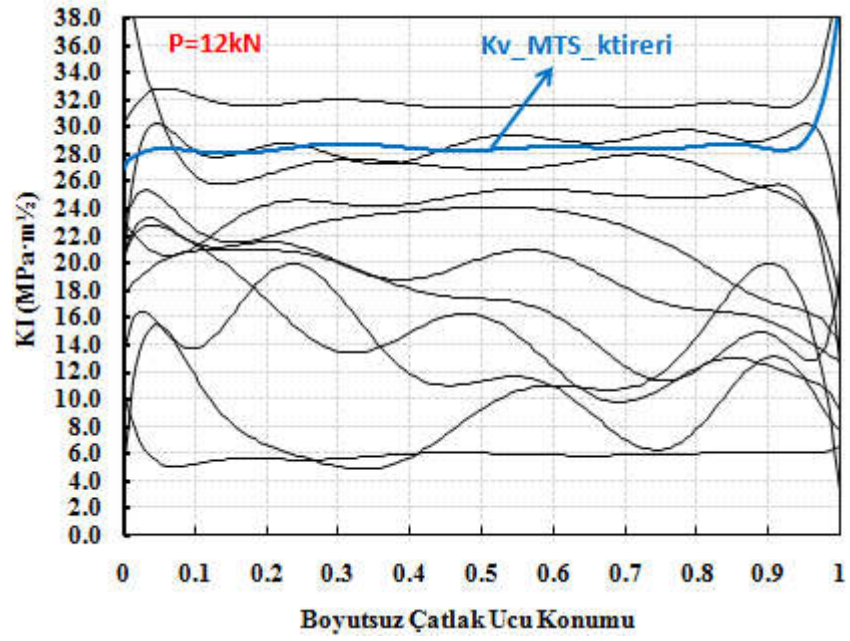
Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75°, üç eksenli yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numunenin üstten görünümü Şekil 3.40.'da verilmiştir. Şekilde görülen ön çatlak uzunluğu dijital ölçer yardımıyla ölçülerek bire bir modellenmiş ve MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme testi saniyede 2 çevrim (2 hertz), 12 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.



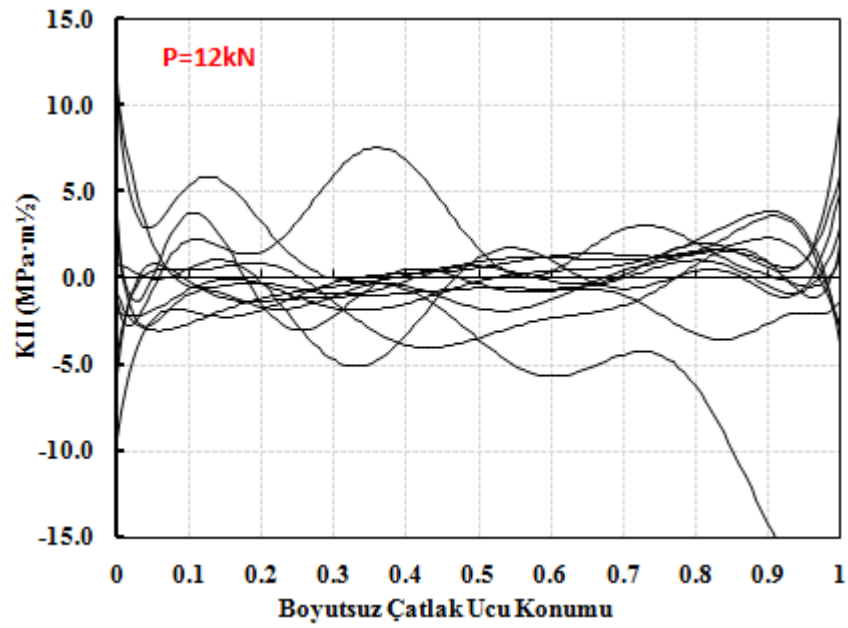
Şekil 3.40. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

Gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.41.'de verilmiştir.



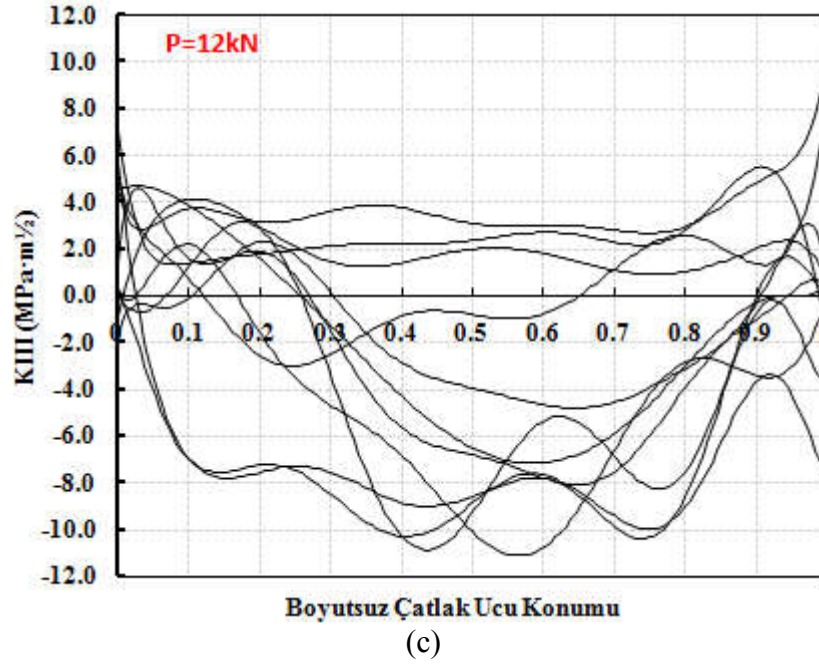


(a)



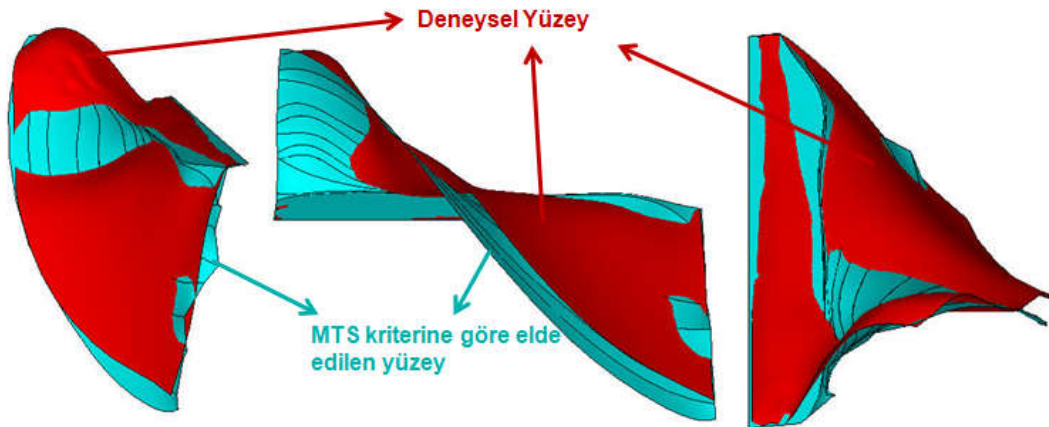
(b)

Şekil 3.41. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.



Şekil 3.41. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

Şekil 3.42.'de, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak elde edilen yüzeylerin karşılaştırması verilmiştir. Bu yükleme durumunda baskın mod-II ve mod-III yükleme durumu olmasına rağmen deneysel yüzeylere yakın sonuçlar alınmıştır. Ancak bir önceki yükleme durumuna göre özellikle çatlak merkezinde sapmaların daha çok olduğu görülmektedir.



Şekil 3.42. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin, MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması.



Mod-I/III ve mod-I/II/III çatlak ilerleme testlerinden üçer adet yükleme durumu seçilerek, MTS kriteri kullanarak çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve analizlere göre elde edilen çatlak yüzeyleri deneysel yüzeyler ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarından da görülmüştür ki,  $K_{III}$  GŞF değeri çatlak yüzey tahmininde belirgin bir rol oynamamaktadır. Ancak, kullanılan MTS kriteri, bazı yükleme durumlarında yüzeylere yakın tahminlerde bulunurken, bazı yükleme durumlarında ise deneysel yüzeylerden uzaklaşmaktadır. Bu yüzden çatlak yüzeylerinin tahmini için Bölüm 3.6.'da, mod-I/II kırılma deneylerine göre geliştirilen iki boyutlu çatlak sapma açısı kriteri (Denklem 2.29) ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için mod-I/III, mod-I/II/III kırılma testlerine göre geliştirilen üç boyutlu kırılma kriteri (Denklem 2.31) kullanılarak, yukarıda sonuçları verilen mod-I/III ve mod-I/II/III deneyleri için çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlere göre elde edilen çatlak yüzeyleri, hem MTS kriterine göre elde edilen yüzeyler ile hem de deneysel yüzeyler ile karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca kriterlere göre ömür tahminleri de yapılarak deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

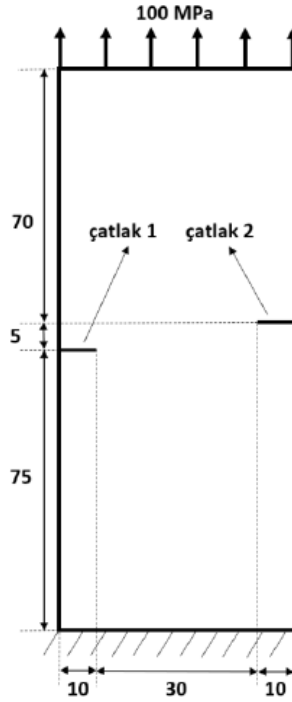
## **BÖLÜM 4. ÜÇ BOYUTLU KIRILMA ve ÇATLAK İLERLEME ANALİZ KABİLİYETLERİNİ SAĞLAMA PROBLEMLERİ**

Bu bölümde, önceki bölümlerde detayları verilen modelleme, analiz ve deneysel çalışmalar ile geliştirilen iyileştirilmiş kriterler de kullanılarak analiz edilen bağımsız bazı problemler çözülerek, uygulanan yöntem ve geliştirilen kriterlerin sağlamaları gösterilmektedir. Bu problemler, alt bölümler halinde aşağıda verilmektedir.

Bu bölümün yazımında, 113M407 numaralı, "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi-Aşama 2" isimli, TÜBİTAK destekli araştırma projesinin sonuç raporundan (Ayhan, 2016b) yararlanılmıştır.

### **4.1. İki Adet Kenar Çatlağı İçeren Plakada Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod-I/II) Çatlak İlerleme Analizi**

Literatürde, Price ve Trevelyan (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, bir plakanın iki ayrı kenarından başlayarak düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesiyle birbirlerine doğru yaklaşan çatlakların nümerik analizi yapılmıştır. FCPAS ile bu uygulama analiz edilmiş ve geometrinin temsili Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılacak olan ve iki adet kenar çatlaklı barındıran plakanın geometrisi, ölçüleri ve çatlakların konumları.

Şekil 4.1.'de gösterilen plaka, Price ve Trevelyan (2014) tarafından iki boyutlu olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Geometrinin iki boyutlu olmasından dolayı düzlem gerilme (plane stress) durumu hâkim olacağı için model ANSYS'te oluşturulurken kalınlık ölçüsü, genişlik ve yükseklik ölçülerine göre oldukça küçük modellenmiştir (kalınlık değeri = plaka genişlik değeri/30 alınmıştır). Bu sayede, üç boyutlu FCPAS analizlerinde de düzlem gerilme durumu geçerli olmuştur.

50 mm genişliğindeki ve 150 mm yüksekliğindeki plakada her iki yan kenarda onar mm uzunluğunda iki adet başlangıç çatlaklı bulunmaktadır ve çatlak uçları arasındaki yatay mesafe 30 mm, dikey mesafe 5 mm'dir. Malzeme özellikleri, elastiklik modülü  $E=30$  GPa, Poisson oranı  $\nu=0,3$ , Paris-Erdoğan denklemi sabitleri (malzeme sabitleri)  $C=1,0E-12$ ,  $n=3,0$ 'dır. Plakanın üst alanına 100 MPa çekme yükü uygulanmış ve alt alanından sabitlenmiştir. Çevrimsel gerilme oranı  $R=0$ 'dır.

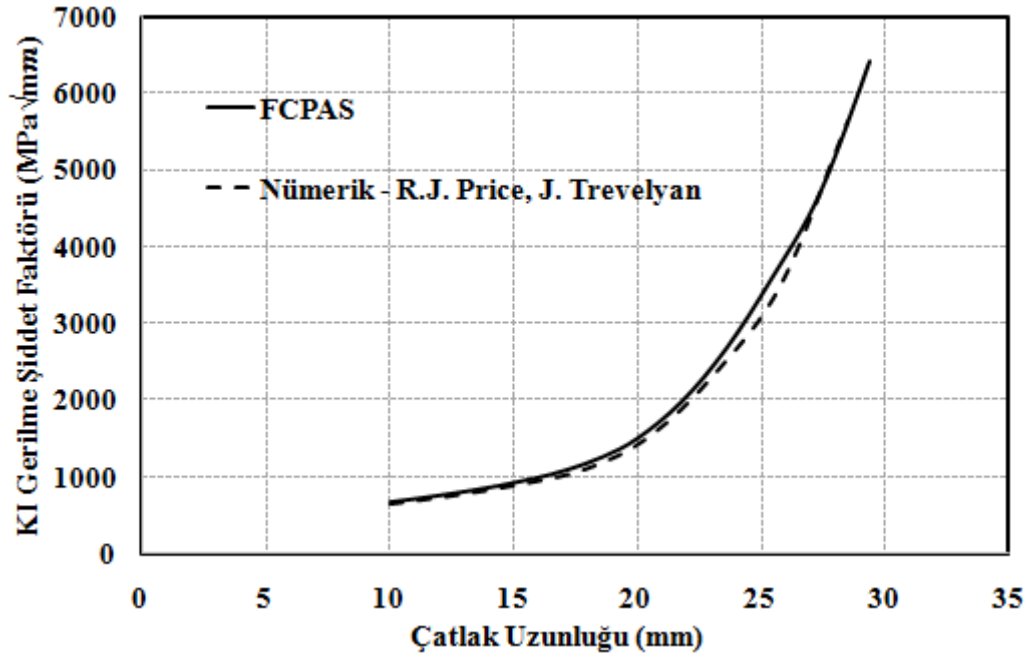
Literatürdeki uygulamada, maksimum çatlak ilerleme miktarı 1,71 mm ve 2,64 mm alınarak ayrı ayrı çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve ortaya çıkan sonuçlar arasında kayda değer bir fark olmadığı gösterilmiştir. FCPAS ile yapılan ilerleme

analizinde ise ilk adımlarda 0,1 mm artış miktarı kullanılmış ve çatlak ilerledikçe 0,24 mm'ye kadar artırılmıştır.

Bu uygulama için sonlu elemanlar modeli her bir adım için elle oluşturulmuştur. Bunun nedeni, çatlağın düzlemsel olmayan bir şekilde ilerlemesiyle önceki çatlak adımlarındaki çatlak geometrisinin de yeni modelde bulunmasıdır. Diğer bir deyişle çatlak düzlemden saparak ilerlemektedir ve her yeni çatlak, önceki çatlakların birleşimi olduğundan düzlemsel olmayan bir çatlak profili oluşmaktadır. Böyle bir çatlak profili ile ANSYS modeli oluşturulurken her yeni çatlak adımının eklenmesiyle geometri topolojisi ve dolayısıyla modeldeki kenar ve alan numaraları değişmektedir. Böylelikle makro oluşturmak pratik bir çözüm olmaktan çıkmaktadır ve her yeni çatlak adımında model manuel olarak ANSYS ara yüzünden oluşturulmuştur.

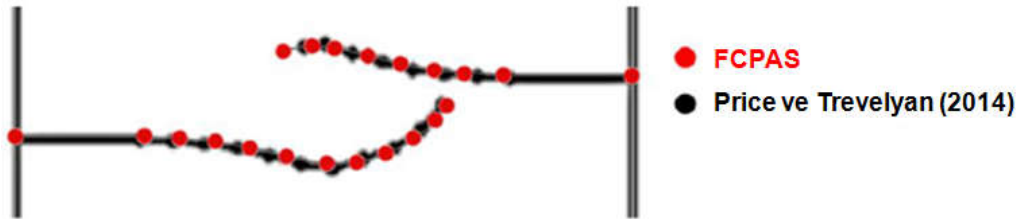
Model oluşturulduktan ve FCPAS ile kırılma analizi gerçekleştirilip çatlak her iki ekseninde de düzlemsel olmayan bir şekilde ilerletildikten sonra yeni çatlak ucu koordinatları kullanılarak ANSYS ile yeniden modelleme yapılmaktadır. Bu işlemler tekrarlanarak FCPAS ile düzlemsel olmayan çatlak ilerleme analizi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Bu uygulama hem düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesine hem de çoğul çatlak ilerlemesine birer örnektir.

Çatlak ilerleme analizi tamamlandıktan sonra elde edilen GŞF değerlerinin literatürdeki makalede yer alan GŞF değerleriyle kıyaslaması Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. FCPAS ile yapılan çoğul çatlak ilerleme analizi sonucu elde edilen GŞF değerlerinin literatürdeki veriler ile kıyaslaması (değerler uzun olan çatlaktan alınmıştır).

Şekil 4.2.'den görüldüğü üzere, GŞF değerleri birbirlerine oldukça yakındır. GŞF değerlerinin karşılaştırılmasının ardından, FCPAS analizi sonucu elde edilen çatlak profilleri literatürdeki veriler ile kıyaslanmış ve elde edilen sonuç Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.

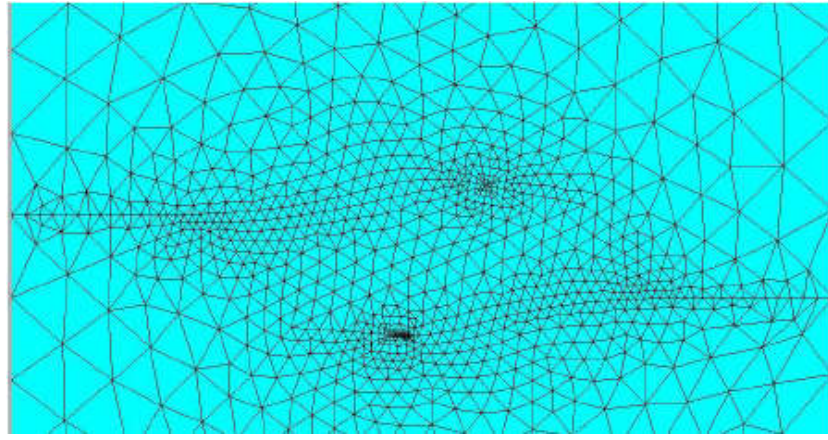


Şekil 4.3. FCPAS ile yapılan çoğul çatlak ilerleme analizi sonucu elde çatlak profillerinin literatürdeki veriler ile karşılaştırılması.

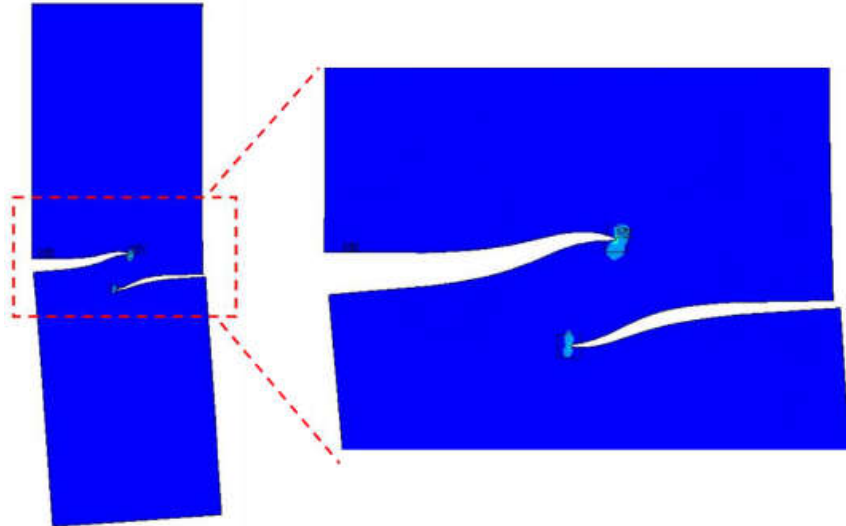
Şekil 4.3.'ten FCPAS analizi ve literatürdeki analizin sonuçlarında ortaya çıkan çatlak profillerinin birbirlerine oldukça benzer oldukları görülmektedir. Yatay düzleme paralel olarak başlayan çatlakların ilerledikçe birbirleri arasındaki yatay mesafenin azaldığı görülmektedir. Çatlaklar belirli bir uzunluğa geldikten sonra birbirlerine doğru dönmektedirler ve bu şekilde ilerlemektedirler. Çatlakların yatayda ilerlemeleri mod-I etkisi nedeniyle, çatlakların dikey yönde ilerlemeleri ise mod-II

etkisi nedeniyle olmaktadır. Geometrideki yüklemeye çatlaklara dik olarak etkimesine rağmen  $K_{II}$  GŞF değeri oluşmaktadır. Bunun nedeni ise geometrinin iki yanında bulunan ve aynı yatay eksen üzerinde bulunmayan yatay çatlaklardan dolayı, belirli bir çatlak ilerleme mesafesinden sonra geometrideki deformasyonun kayma gerilmesi oluşturmasıdır.

Plakada düzlemsel olmayarak ilerlemiş olan çatlakların bölüntü oluşturulmuş ve deformasyon sonrası görünümü, Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Düzlemsel olmayan çoğul çatlak ilerlemesinin olduğu plakanın ANSYS ile bölüntü oluşturulmuş hali.



Şekil 4.5. Düzlemsel olmayan çoğul çatlak ilerlemesinin olduğu plakanın çekme yükü altında deforme olmuş hali.

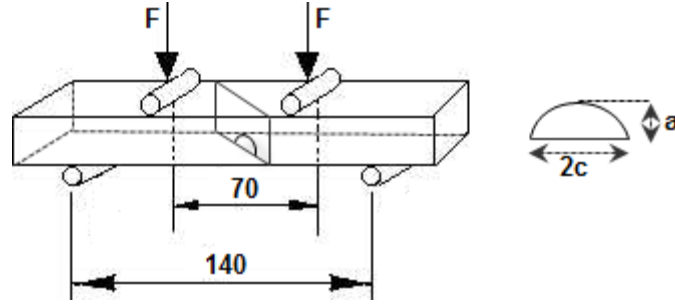
#### 4.2. Eğik Çatlak İçeren Plakada Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod-I/III) Çatlak İlerleme Analizi

Literatürde, Kikuchi ve arkadaşları (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, plakaya EDM (electro-discharge machining - elektro erezyon ile işleme) tekniği kullanılarak çentik oluşturulduktan sonra, mod-I yüklemesi altında ön çatlak oluşturulmuş ve ardından plakalar belirli açılarda kesilerek, çatlağın plaka kenarlarına açılı olarak yerleştirilmesi sağlanmıştır (Şekil 4.6). Şekilde mod-I yüklemesi ile ön çatlak oluşturulan plakadan 45° lik açı ile kesilen parçanın görünümü verilmiştir.



Şekil 4.6. Mod-I yüklemesi altında ön çatlak oluşturulmasının ardından belirli açılarda plakalar kesilerek çatlağın plaka kenarlarına açılı olarak yerleştirilmesinin sağlanması.

Kikuchi ve arkadaşları (2012), oluşturdukları ön çatlak yatayla 15°, 30° ve 45° açı yapacak şekilde plakaları kesmiş ve bu plakalar ile dört nokta yorulmalı eğme testi gerçekleştirmişlerdir (Şekil 4.7). Deneylede R-oranı 0,1 olacak şekilde yükleme yapılmıştır. Deney esnasında bazı noktalarda çatlak çizgilerinin belirgin olması için R-oranı 0,8 olacak şekilde aşırı yükleme de yapılarak belirgin çatlak çizgileri oluşturulmuştur. Gerçekleştirdikleri deneyleri sonlu elemanlar programında modelleyerek, yatayla 15°, 30° ve 45° açı yapan plakalar için çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirmiş ve Kikuchi kriterini (Denklem 2.24) kullanarak elde edilen çatlak profillerini deneysel profiller ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca, Kikuchi kriteri ve Richard kriterine (Denklem 2.20) göre ömür tahminlerinde bulunarak deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır.



Şekil 4.7. Yatayla  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  açı yapan ön çatlğa sahip plakalara uygulanan dört nokta yorulmalı eğme test düzeneği ve oluşturulan çatlak profili boyutları.

İki yük arası mesafe 70 mm ve destek noktaları arası mesafe 140 mm olarak verilmiştir. Çalışmada kullanılan plaka boyutları 65x160 mm olup, plaka kalınlığı 25 mm'dir. Tüm deneylerde oluşturulan ön çatlak uzunluğu  $2c=9$  mm ve  $a/c_0=0,7$  olarak verilmiştir.

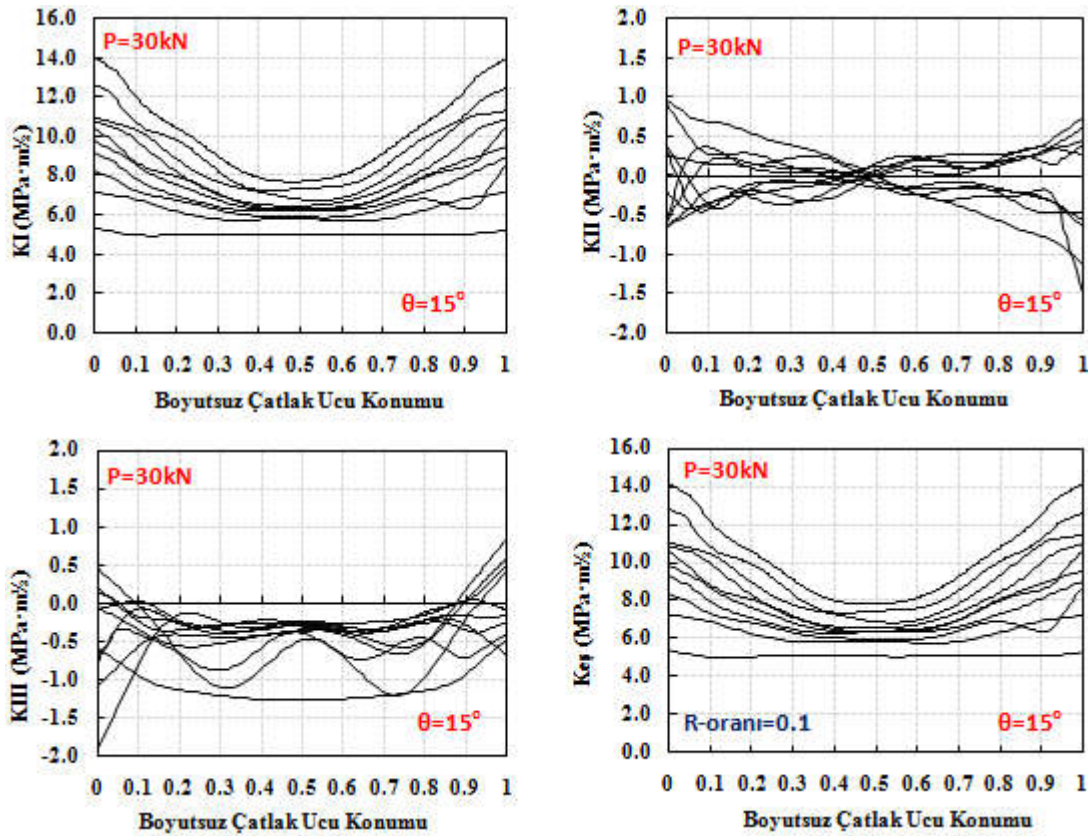
Bu çalışmada, Kikuchi ve arkadaşlarının (2012) yapmış oldukları deneyler ve çatlak ilerleme analizleri, tez kapsamında geliştirilen kriterler kullanılarak tekrar edilmiş ve elde edilen çatlak profilleri ve geliştirilen kriterlere göre yapılan ömür tahminleri, Kikuchi ve arkadaşları tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Makalede sözü edilen deney ve çatlak ilerleme analizleri, Al7075-T6 alüminyum alaşımlı malzeme için gerçekleştirilmiş, ancak Paris-Erdoğan denkleminde (Denklem 2.2) kullanılan malzeme sabitleri, C ve n değerleri verilmemiştir. Bu yüzden, bu çalışmada gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, tez kapsamında gerçekleştirilen mod-I çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen malzeme sabitleri ( $C=1,46191e-06$  mm/(cycle\*(Mpa $\sqrt{m}$ )<sup>n</sup>,  $n=2,4392$ ) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme analiz ve deneylerinde uygulanan yük, makalede belirtilmediği için bazı yükleme durumlarındaki ön çatlak analizleri için verilen GŞF dağılımı karşılaştırılarak 30 kN yük uygulandığı çıkarımında bulunulmuş, tüm analizlerde bu yük değeri kullanılmıştır.

Çatlak ilerleme analizleri, Bölüm 3.5.1.'de verilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çatlak sapma açısı tahmini için, tez kapsamında geliştirilen iki boyutlu çatlak sapma açısı kriteri (Denklem 2.29) ve eşdeğer GŞF değerinin



hesaplanması için ise tez kapsamında geliştirilen üç boyutlu kırılma kriteri (Denklem 2.31) kullanılmıştır.

Şekil 4.8.'de, yatayla  $15^\circ$  açı yapan ön çatlakla sahip plaka için gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen GŞF ve bu değerler için geliştirilen kriterlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ön çatlak için gerçekleştirilen analiz sonrası, çatlak ilerledikçe  $K_I$  değeri artarken,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değeri azalarak sifıra yaklaşmaktadır. Ön çatlak analizi sonucundan da görüldüğü gibi çok düşük mod-I/III yüklemesi olduğu için, eşdeğer GŞF değerleri için elde edilen dağılım  $K_I$  dağılımına benzer eğilimdedir.



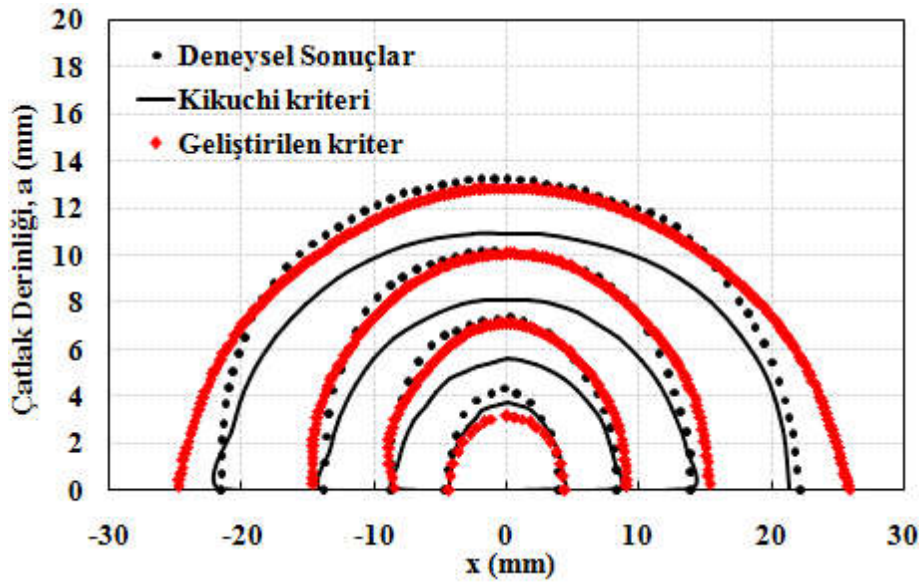
Şekil 4.8. Yatayla  $15^\circ$  açı yapan ön çatlakla sahip plaka için gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF ve bu değerlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.

Şekil 4.9.'da, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen analizler sonrası elde edilen çatlak yüzeyi verilmiştir.



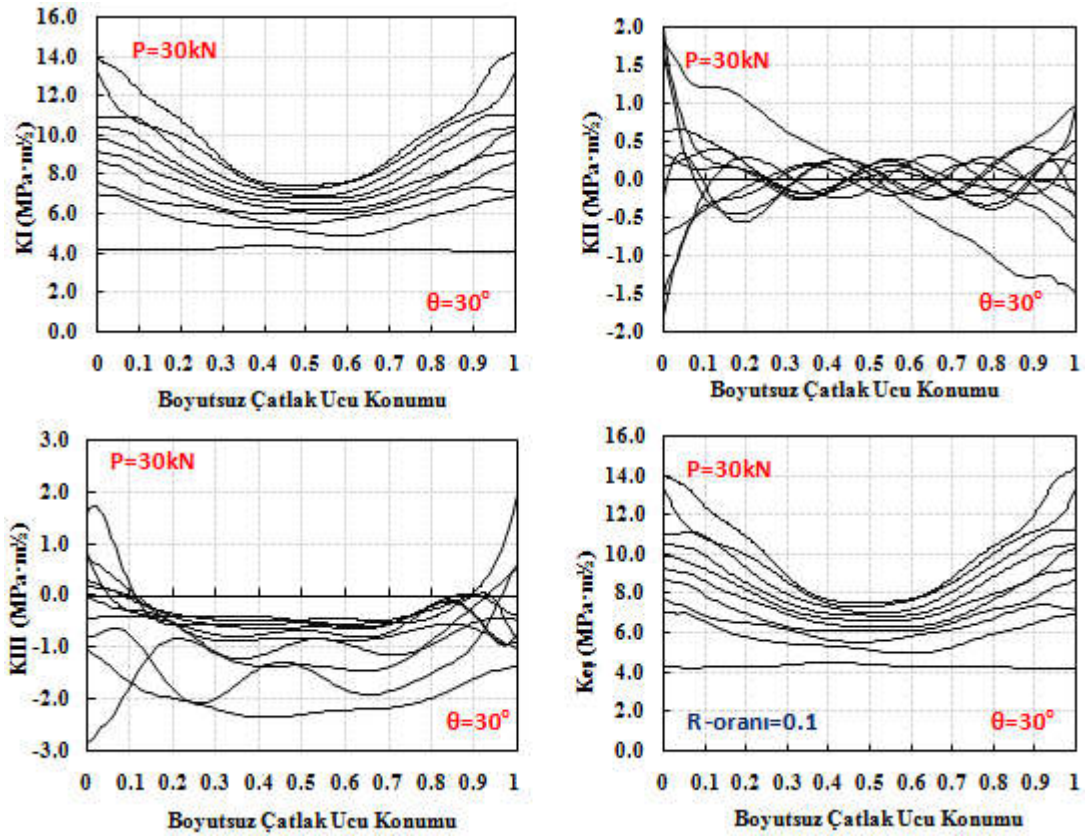
Şekil 4.9. Yatayla 15° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi.

Şekil 4.10.'da ise, yukarıda verilen çatlak yüzey profiline literatür dataları ile karşılaştırması verilmiştir. Şekilde yer alan çatlak profilleri, profillerin üstten görünümünü temsil etmektedir. Literatürde yer alan çalışmada profillerin iki boyutlu görünümü verildiği için karşılaştırma iki boyutlu olarak yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, FCPAS analizleri ile literatürdeki deneysel profillere yakın profiller elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Yatayla 15° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

Şekil 4.11.'de, yatayla 30° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen GŞF ve bu değerler için geliştirilen kriterlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı verilmiştir. Bir önceki yükleme durumuna göre, başlangıç çatlığı analizi sonrası elde edilen  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  değerleri artmasına rağmen, karışık mod-I/III yükleme durumunun düşük seviyelerde olduğu analiz sonuçlarından görülmektedir.

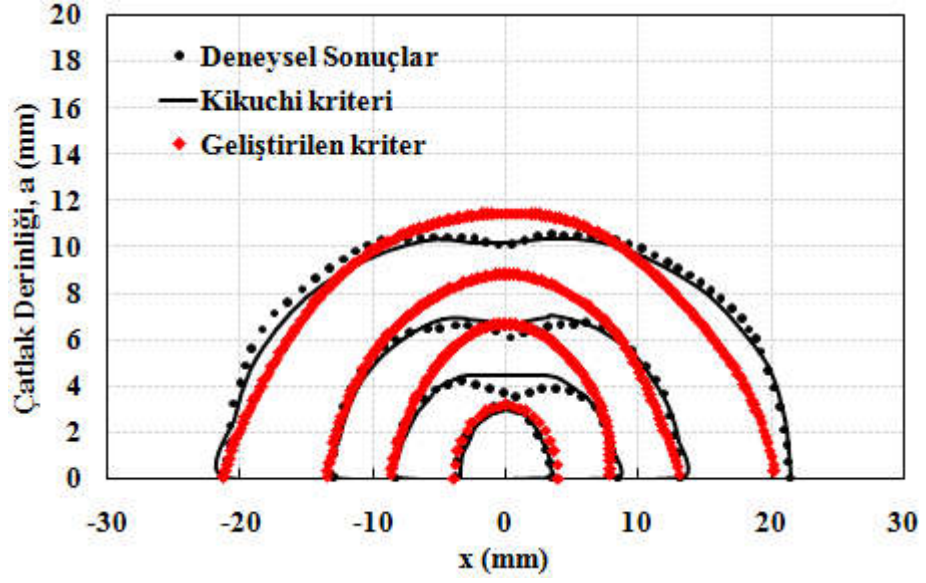


Şekil 4.11. Yatayla 30° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

Bu yükleme durumu için elde edilen çatlak yüzey profillerinin perspektif görünümü Şekil 4.12.'de, profillerin üstten görünümünün literatür verileri ile karşılaştırması ise Şekil 4.13.'te verilmiştir. Bu yükleme durumu için de, FCPAS analizleri ile elde edilen profillerin literatürdeki deneysel profillere yakın olduğu gözlemlenmiştir.



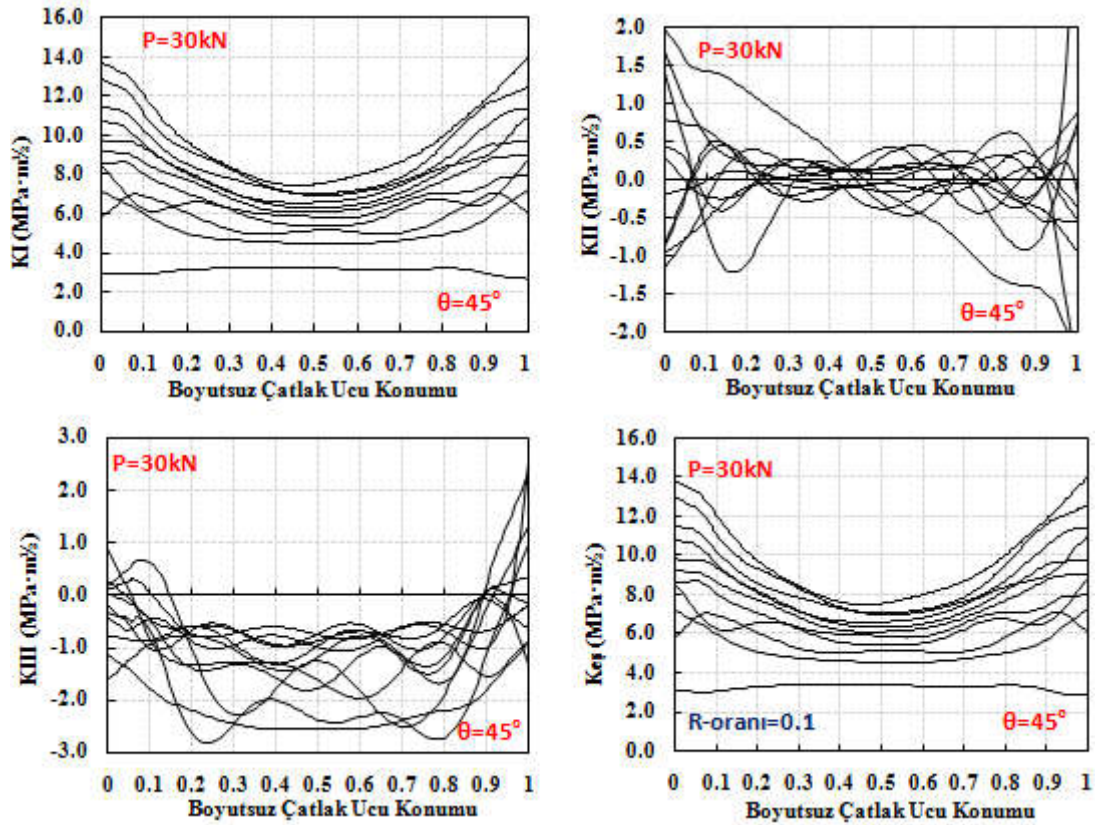
Şekil 4.12. Yatayla 30° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi.



Şekil 4.13. Yatayla 30° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

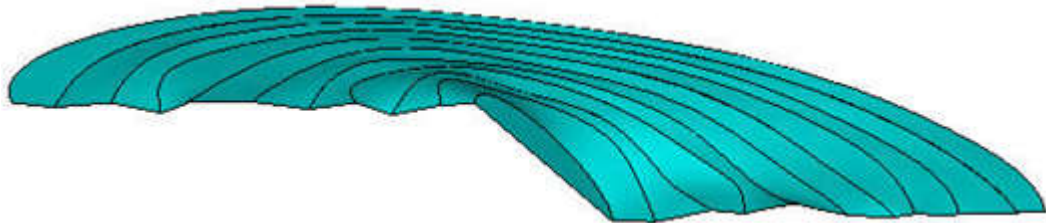
Son olarak yatayla 45° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen GŞF ve bu değerler için geliştirilen kriterlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı Şekil 4.14.'te verilmiştir.



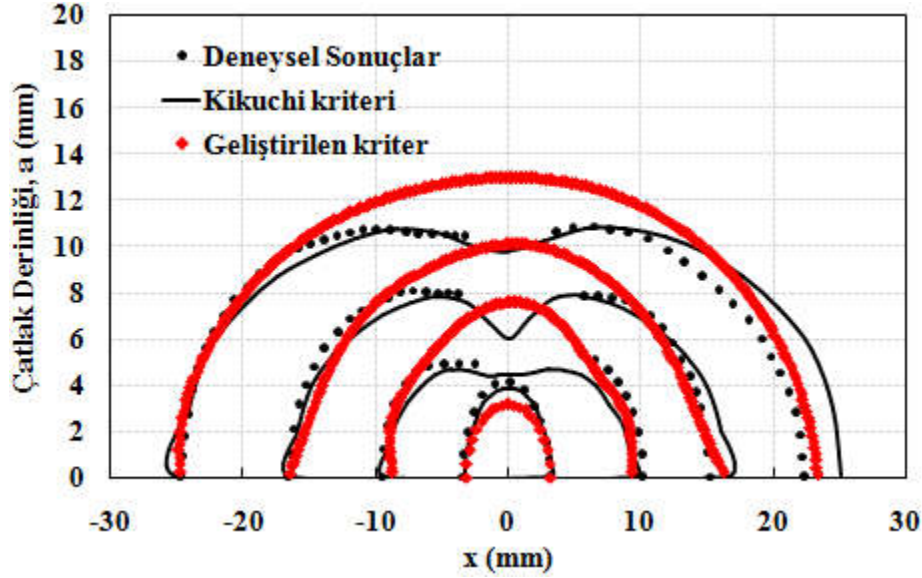


Şekil 4.14. Yatayla  $45^\circ$  açı yapan ön çatlığa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

Analizler sonrası elde edilen çatlak yüzey profillerinin perspektif görünümü ve profillerin üstten görünümünün literatür verileri ile karşılaştırılması Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da sırasıyla verilmiştir. Kırılma anında plakaların son çatlak uzunlukları verilmediği için, profiller kıyaslanarak son profile gelinen noktada analizler sonlandırılmaktadır.



Şekil 4.15. Yatayla  $45^\circ$  açı yapan ön çatlığa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi.

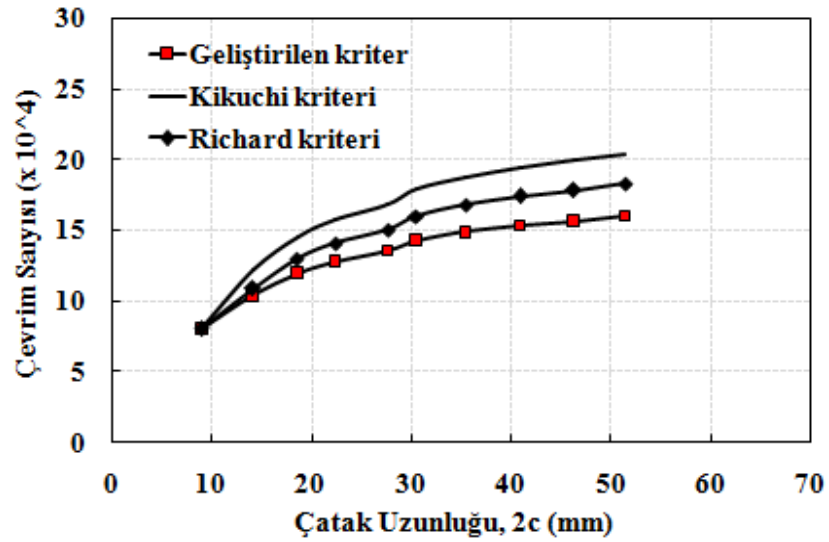


Şekil 4.16. Yatayla 45° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

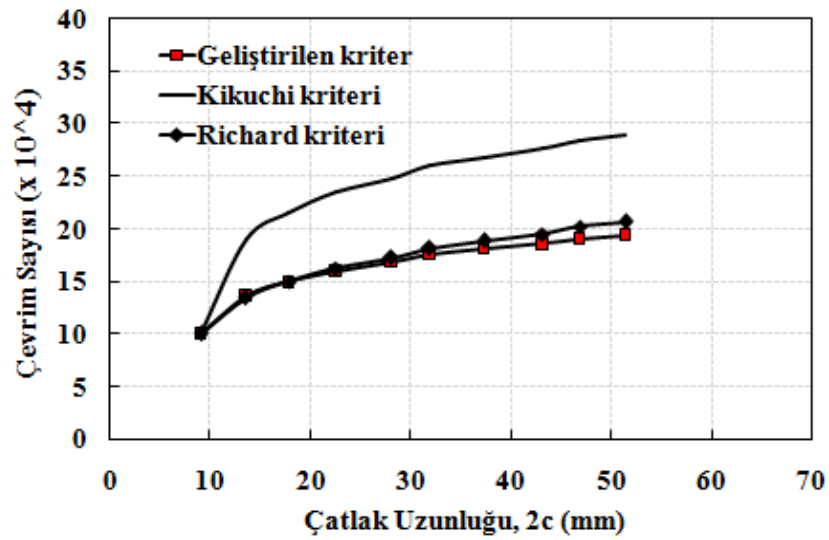
Çatlak ilerleme analizleri sonrası yapılan karşılaştırmalarda görüldüğü gibi, farklı oryantasyona sahip her üç çatlaklı yapı için birbirine yakın profiller elde edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmada, çatlak ilerleme analizleri sonrası tüm profiller için elde edilen GŞF değerleri verilmediği için, yukarıda sonuçları verilen analizlerden elde edilen GŞF değerleri kullanılarak, hem tez kapsamında geliştirilen kritere göre hem de Richard ve Kikuchi kriterine göre yapılan ömür tahminleri birbiri ile karşılaştırılmıştır. Literatürdeki çalışmada deneysel ömür dağılımları verilmiştir. Ancak bu deneylerin hangi yük şartları altında gerçekleştirildiği ve çatlak ilerleme analizlerde kullanılan C ve n malzeme sabitleri verilmediği için, bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ömür tahminleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.17.'de, farklı oryantasyonda ön çatağa sahip her üç plakanın analizlerinden elde edilen GŞF değerleri kullanılarak, mevcut ve geliştirilen kriterlere göre yapılan ömür tahminleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, her üç durum için de Richard ve geliştirilen kritere göre yapılan tahminler birbirine yakın sonuç vermektedir. Ancak, çatlakın yatayla yaptığı açı arttıkça Kikuchi kriterine göre elde edilen ömür tahmini, mevcut ve geliştirilen kriterden uzaklaşmaktadır. Yukarıda sonuçları verilen her üç çatlaklı yapının analiz sonuçlarından elde edilen GŞF dağılımları incelendiğinde, birbirine çok yakın eğilimde oldukları görülmektedir. Bu değerleri

kullanarak yapılan ömür tahminlerinin de her üç durum için birbirine yakın olması beklenir. Richard kriteri ve bu çalışmada geliştirilen kriterin kullanımında, beklenen bu durum gözlenmektedir. Grafiklerin farklı çevrim sayısından başlamasının sebebi, literatürde ön çatlak oluşumu için gerçekleştirilen mod-I çatlak ilerleme analizlerindeki çevrim sayısının da grafiğe dâhil edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu çevrim sayısı dikkate alınmadığında Richard ve geliştirilen kritere göre her üç durum için de benzer ömür tahminlerinin yapıldığı daha net anlaşılmaktadır.

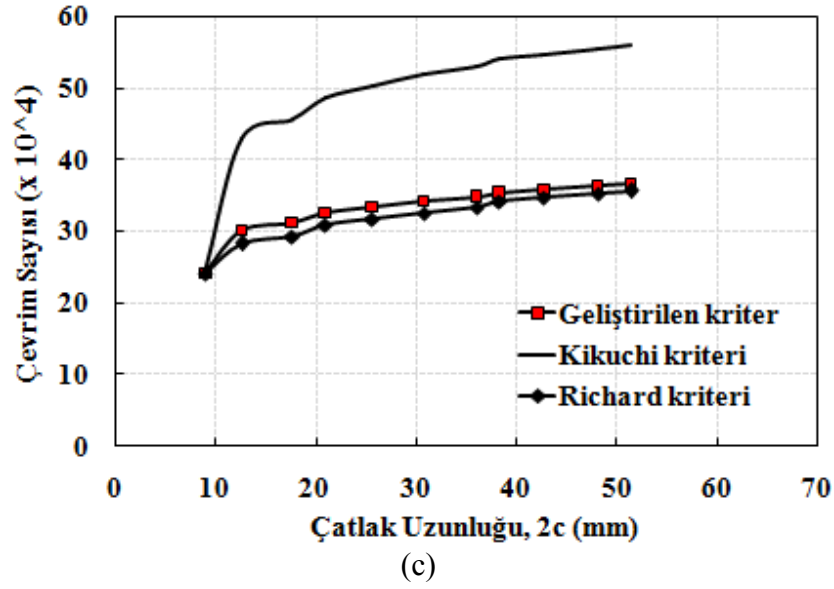


(a)



(b)

Şekil 4.17. Farklı eğim açılarında ön çatağa sahip plakaların analizlerinden elde edilen GŞF değerleri kullanılarak, mevcut ve geliştirilen kriterlere göre yapılan ömür tahminleri, (a)  $\theta=15^\circ$ , (b)  $\theta=30^\circ$ , (c)  $\theta=45^\circ$  çatlak açısı.

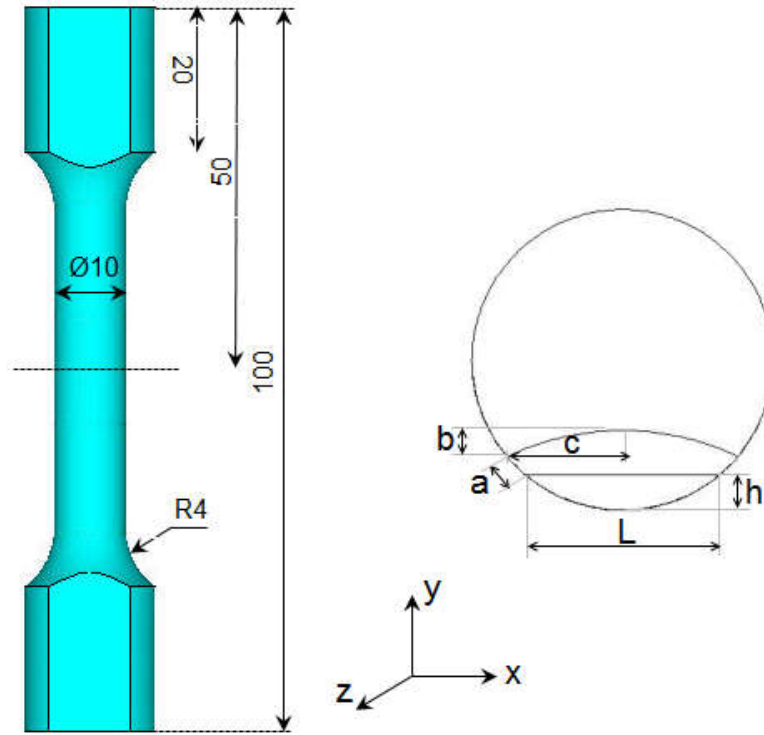


Şekil 4.17. Farklı eğim açılarında ön çatağa sahip plakaların analizlerinden elde edilen GŞF değerleri kullanılarak, mevcut ve geliştirilen kriterlere göre yapılan ömür tahminleri, (a)  $\theta=15^\circ$ , (b)  $\theta=30^\circ$ , (c)  $\theta=45^\circ$  çatlak açısı. (Devamı)

#### 4.3. 10 mm Çapa Sahip Silindirik Çelik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yükleme Altında Çatlak İlerleme Analizi

Citarella ve arkadaşları (2014) yapmış oldukları çalışmada, silindirik çelik bir numuneye kenar çentiği oluşturarak, mod-I yüklemesi ile ön çatlak oluşturmuş, ardından aynı anda hem eksenel hem de torsiyonel yorulma yükü uygulayarak çatlak ilerleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri deney için çatlak ilerleme simülasyonları da gerçekleştirerek, elde ettikleri GŞF değerlerini kullanarak MSED (Minimum Strain Energy Density - Minimum Birim Şekil Değiştirme Enerji Yoğunluğu) kriterine (Denklem 2.16) göre ömür tahminlerinde bulunmuşlardır. Şekil 4.18.'de deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları verilmiştir. Deneyler R2 M karbon çeliği için, R-oranı 0,1, maksimum çekme gerilmesi 250 MPa ve maksimum kayma gerilmesi 100 MPa olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Paris-Doğan malzeme sabitleri için,  $C=2,028 \times 10^{-9}$  (mm/(cycle\*(Mpa $\sqrt{m}$ )<sup>n</sup>) ve  $n=3,2046$  alınmıştır. Şekilde verilen uzunluklardan,  $L=6,08$  mm,  $h=1,14$  mm,  $a=0,855$  mm,  $b=0,852$  mm,  $c=3,705$  mm ve numune çapı 9,78 mm boyutlarına sahip numune için gerçekleştirilen deney ve simülasyonlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.





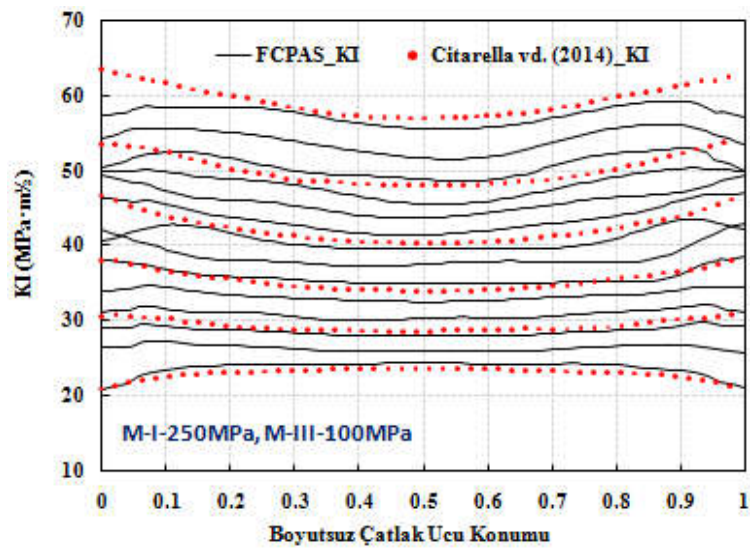
Şekil 4.18. Deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları.

Bu çalışmada, Citarella ve arkadaşları (2014) yapmış oldukları deneyler ve çatlak ilerleme analizleri, tez kapsamında geliştirilen kriterler kullanılarak tekrar edilmiş ve elde edilen GŞF değerleri ve geliştirilen kriterlere göre yapılan eşdeğer GŞF hesaplamaları ve ömür tahminleri, Citarella ve arkadaşları tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

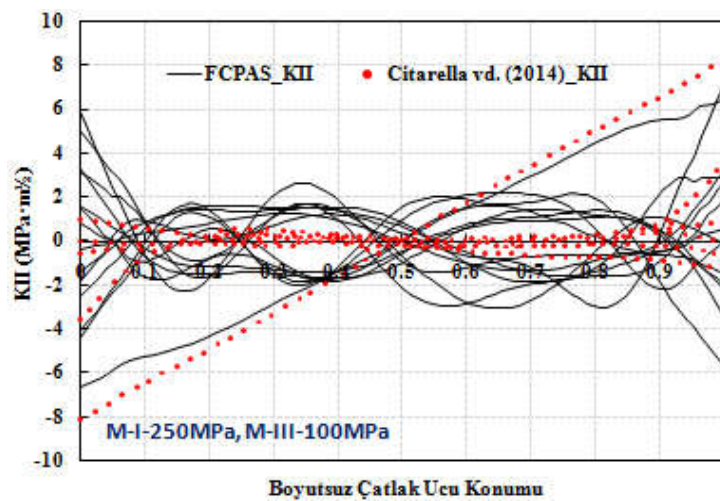
Çatlak ilerleme analizleri Bölüm 3.5.1.'de verilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çatlak sapma açısı tahmini için, tez kapsamında geliştirilen iki boyutlu çatlak sapma açısı kriteri (Denklem 2.29) ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için ise tez kapsamında geliştirilen üç boyutlu kırılma kriteri (Denklem 2.31) kullanılmıştır.

Yukarıda boyutları verilen numune ve çatlak, ANSYS programı kullanılarak modellenmiş, bölüntüleme işleminin ardından sınır şartları ve yükler uygulanarak FRAC3D kodu ile çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneyin birebir simülasyonunun yapılabilmesi için, numunenin 20 mm'lik üst bölümündeki alanları

çevreleyen düğüm noktaları her üç eksen yönünde sabitlenmiş, yüklerin etkisinde numunenin burulmasına izin verilmesi ancak x ve z eksenlerindeki hareketin engellenmesi için, alt alan merkezindeki düğüm noktası, x ve z eksenleri yönünde sabitlenmiştir. Maksimum çekme gerilmesi 250 MPa ve maksimum kayma gerilmesi 100 MPa olacak şekilde numuneye yükleme yapılarak çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonrası, çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  dağılımı Şekil 4.19.'da verilerek, Citarella ve arkadaşlarının analizlerinden elde ettikleri değerler ile karşılaştırılmıştır.

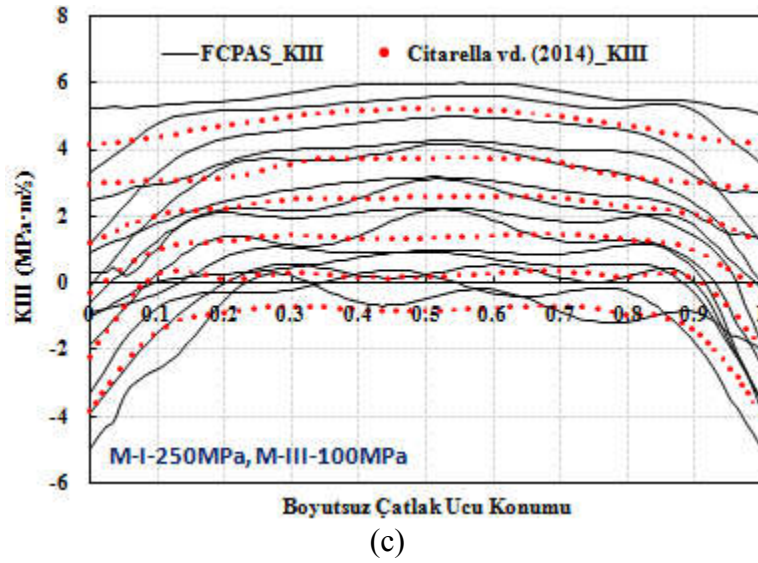


(a)



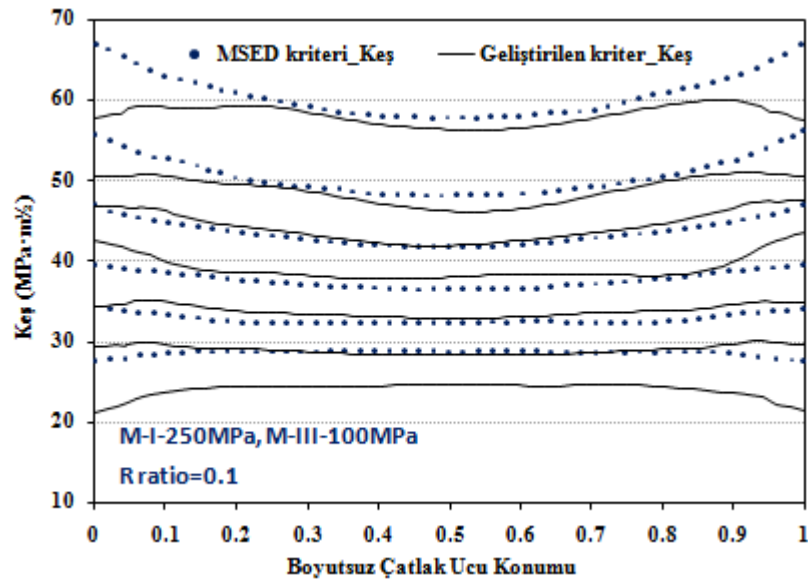
(b)

Şekil 4.19. Gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen çatlak ucu boyunca (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması.



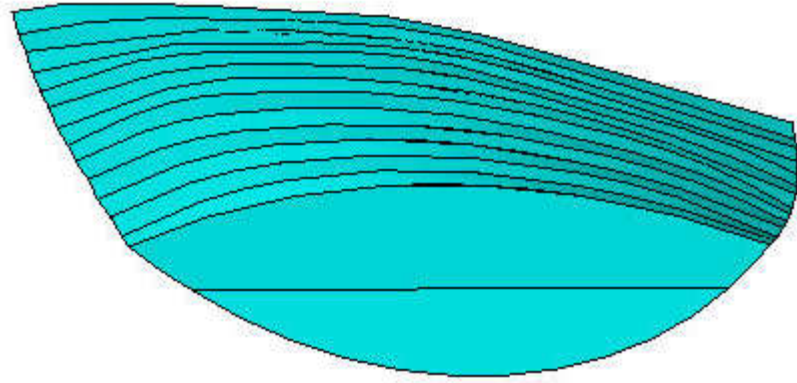
Şekil 4.19. Gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen çatlak ucu boyunca (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması. (Devamı)

Analiz sonuçlarından görüldüğü gibi literatür verilerine yakın GŞF değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler kullanılarak, tez kapsamında geliştirilen ve Denklem (2.31)'de verilen eşitlik kullanılarak, eşdeğer GŞF değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.20.'de bu değerlerin, Citarella ve arkadaşlarının MSED kriterini kullanarak hesapladıkları eşdeğer GŞF değerleri ile kıyaslaması verilmiştir.



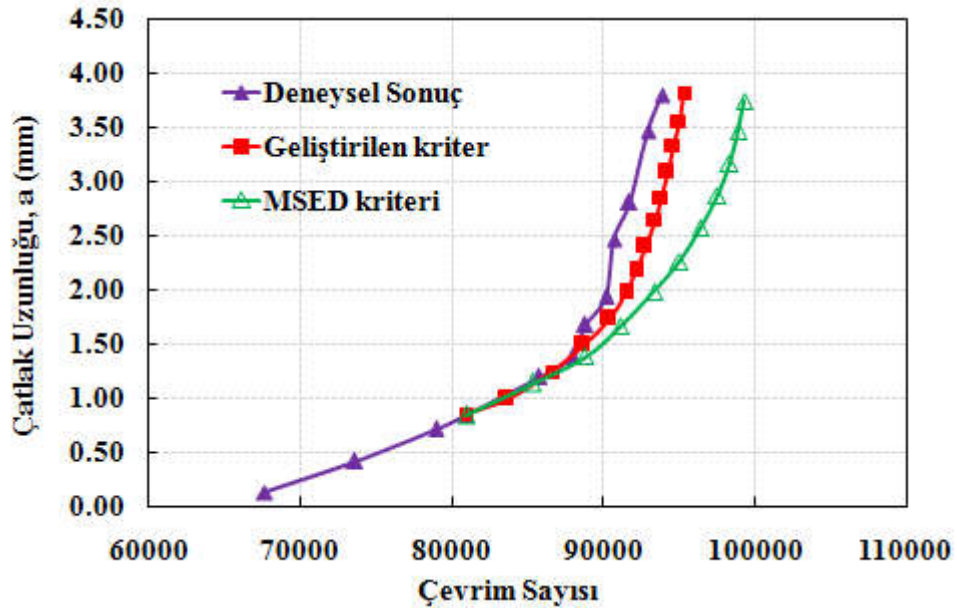
Şekil 4.20. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması.

Şekilde görüldüğü gibi kriterlere göre elde edilen eşdeğer GŞF değerleri Citeralle ve arkadaşlarının sonuçlarına oldukça yakındır. Citarella ve arkadaşları, çalışmalarında iki veya üç boyutlu çatlak yüzey profillerini vermedikleri için çatlak profilleri karşılaştırılamamıştır. Ancak çalışmalarında, Fig.5 numaralı şekilde çatlak ilerleme deneyi sonrası kırılan numune yüzeyinin perspektif görünümü verilmiştir. Şekil 4.21.'de, bu çalışmada gerçekleştirilen analizlerden elde edilen çatlak yüzeyleri aynı perspektifte verilmiş olup, yüzeylerin benzer olduğu makaleden teyit edilebilir. Yayın telif hakkına riayet etmek için, ilgili makaledeki deneysel resim burada verilmemiştir.



Şekil 4.21. Gerçekleştirilen 13 adım çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyleri.

Son olarak, geliştirilen kriterden elde edilen ömür grafiği, Citarella ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneyin sonuçları ve kullanmış oldukları MSED kriterine göre elde edilen ömür verileri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Gerçekleştirilen kritere göre elde edilen ömür verilerinin literatürden alınan veriler ile karşılaştırılması.

Şekilde görüldüğü gibi, geliştirilen üç boyutlu çatlak ilerleme kriterine göre elde edilen ömür grafiği, üç boyutlu MSED kriterinden daha iyi tahminde bulunarak, deneysel sonuçlara çok yakın bir eğilim vermiştir.

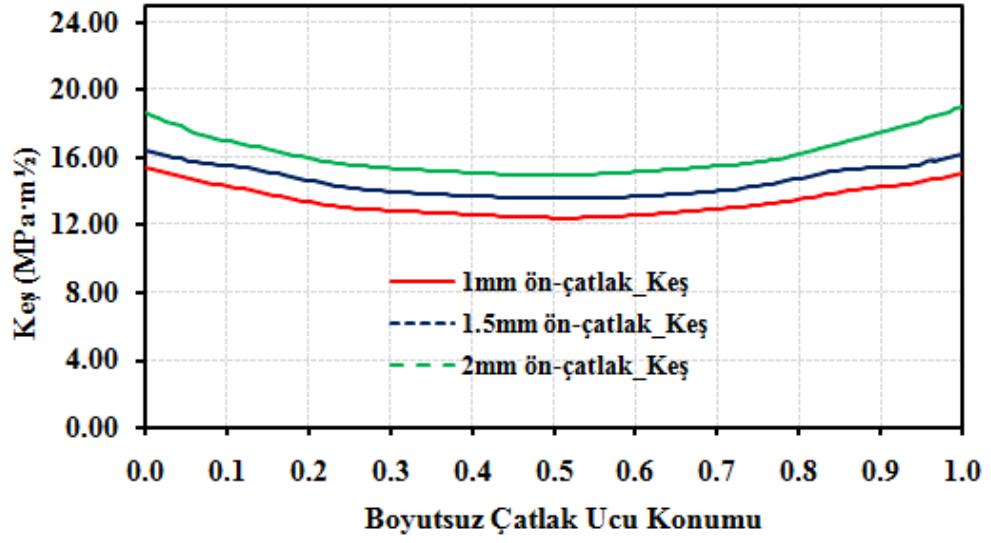
#### 4.4. 15 mm Çapa Sahip Alüminyum Alaşım (Al-7075 T-651) Silindirik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yükleme Altında Kırılma Analizi

Bu çalışmada, tez kapsamında alımı gerçekleştirilen alüminyum alaşım plakalardan (Al-7075 T-651) 15 mm çapında LT çatlak yönelmesine uygun olarak silindirik numuneler üretilerek, karışık mod yükleme altında kırılma testi gerçekleştirilmiştir. Önce, üretilen numuneler üzerinde kenar çentiği açılarak mod-I yüklemesi ile ön çatlak oluşturulmuş ve aynı anda hem eksenel hem de torsiyonel yüklemeyi orantılı bir hızda vererek numuneler kırılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler birebir analiz edilerek kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen GŞF değerleri kullanılarak mevcut ve geliştirilen kriterlere göre eşdeğer GŞF değeri ile kritik kopma yükü tahmin edilmiştir. Son olarak, kriterlere göre yapılan tahminler deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.23.'te deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları verilmiştir. Bu çalışmada iki adet numuneye aynı yükleme şartları altında kırılma testi gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçekleştirilmeden önce yükleme şartlarını belirlemek için farklı yükleme durumları analiz edilerek uygun yükleme oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, mod-I kırılma modunu oluşturacak eksenel yük 12,75 kN ve mod-II ve mod-III kırılma modlarını oluşturacak tork değerinin de 67,5 Nm olması durumunda,  $K_I$  değerine yakın  $K_{II}$  değeri elde edilmektedir. Kriter doğrulama çalışması için, mod-II ve mod-III'ün olabildiğince baskın olduğu karışık modlu yükleme durumlarında testler gerçekleştirilmek istendiği için, testlerin bu yük değerlerine karşılık gelen hızlarda gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Deney esnasında eksenel yükleme hızı 1,275 kN/s, ve torsiyonel yükleme hızı 6,75 Nm/s olacak şekilde yükleme yapılarak numuneler kırılmıştır. Deney sırasında oluşturulan ön çatlak uzunluğu her numunede aynı olmayıp bu uzunluk değerleri arasında farklar olduğu için ve her deney sonrası kırılan numune yüzeyinden ölçülen ön çatlağa göre tekrar analiz yapmak pratik olmayacağı için, şekilde gösterilen  $a$  değerinin 1 mm, 1.5 mm ve 2 mm olduğu durumlar için kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler için, bir önceki literatür uygulamasında uygulanan sınır şartlarının aynısı uygulanmıştır. Eksenel yük 12,75 kN ve burulma momenti değeri 67,5 Nm için kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerde oluşturulan çentiğin açısı  $45^\circ$  ve Şekil 4.23.'te gösterilen "L" değeri 11,18 mm ve "h" değeri 2,5 mm'dir.







Şekil 4.25. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı.

Şekil 4.26.'da ise gerçekleştirilen deneylerden bir kesit görünümü ve deneylerde kullanılan ve kırılan numunelerin görünümü verilmiştir.



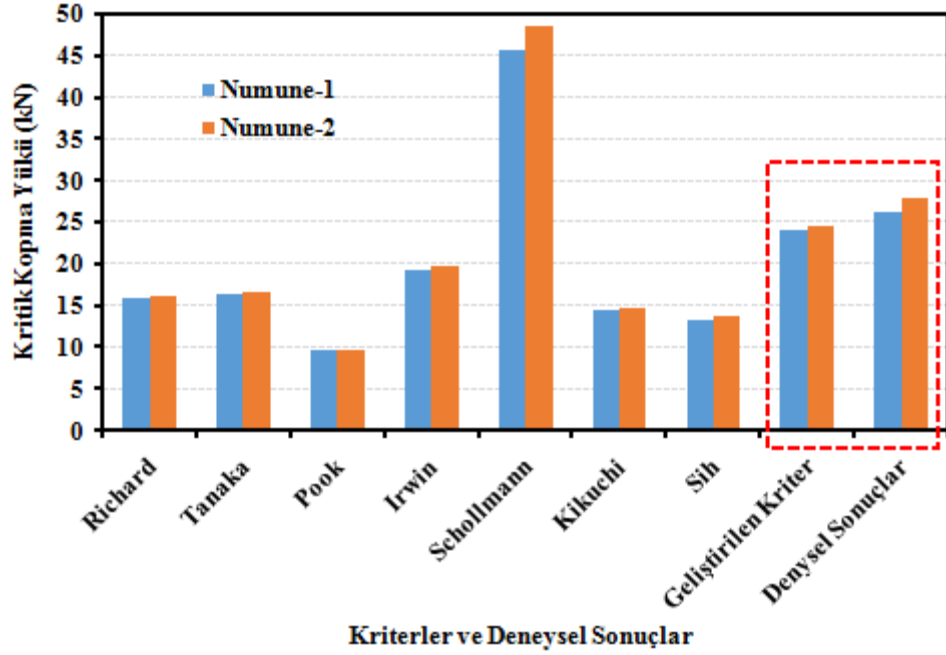
Şekil 4.26. Deneylerde kullanılan numuneler ve gerçekleştirilen deneyden bir kesit.



Tablo 4.1. Üç boyutlu mevcut ve geliştirilen kriterlere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri.

Kriterler (3 boyutlu)	Numune-1			Numune-2		
	Keş (MPa*m <sup>1/2</sup> )	Kritik Kopma Yükü (kN)	Deneysel Kopma Yükü (kN)	Keş (MPa*m <sup>1/2</sup> )	Kritik Kopma Yükü (kN)	Deneysel Kopma Yükü (kN)
Geliştirilen Kriter	15,37	24,05		15,13	24,44	
Richard	23,42	15,79		23,00	16,08	
Tanaka	22,74	16,26		22,26	16,61	
Pook	38,74	9,54	26,24	38,00	9,73	27,89
Irwin	19,15	19,31		18,83	19,64	
Schöllmann	8,12	45,56		7,62	48,53	
Kikuchi	25,76	14,36		25,33	14,60	
Sih	27,68	13,36		27,13	13,63	

Deney sonrası kırılan numune yüzeyinden ön yorulma çatlaklarının net uzunluğu ölçülerek, o değere karşılık gelen GŞF değerleri interpolasyon yöntemiyle hesaplanmıştır. Şekil 4.25.'te verilen eşdeğer GŞF değerleri, çatlak kenarları için elde edilen GŞF değerlerine göre hesaplanmıştır. Tablo 4.1.'de, üç boyutlu mevcut kriterlere göre ve geliştirilen kriterlere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri ve her iki deneyden elde edilen kopma yükü değerleri verilmiştir. Şekil 4.27.'de ise, bu değerlerin karşılaştırıldığı grafik verilmiştir.



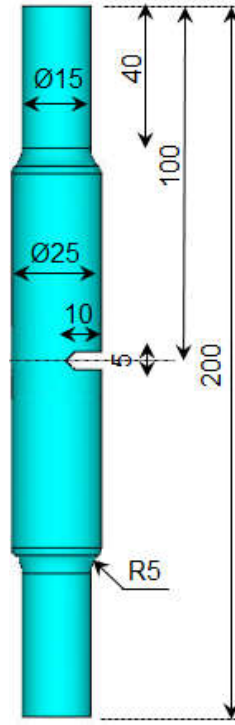
Şekil 4.27. Mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin, deneysel kopma yükleri ile karşılaştırılması.

Şekilde görüldüğü gibi, deneysel sonuçlara en yakın değerler, geliştirilen kritere göre elde edilen kopma yükü değerleridir. Geliştirilen kriter, ilk numune için elde edilen kopma yükü değerini %9,1 hata oranı ile, ikinci numune için elde edilen kopma yükü değerini ise %14,1 hata oranı ile tahmin etmiştir. Deneysel kopma yüklerine en yakın tahmini yapan ikinci kriter (Irwin kriteri), ilk numune için %35,9 ve ikinci numune için %42 hata oranları ile deneysel sonuçlara yaklaşmaktadır.

#### 4.5. 25mm Çapa Sahip Alüminyum Alaşım (Al-7075 T-651) Silindirik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yükleme Altında Kırılma ve Çatlak İlerleme Analizi

Bu çalışmada, tez kapsamında alımı gerçekleştirilen alüminyum alaşım plakalardan (Al-7075 T-651) 25 mm çapında silindirik numuneler üretilerek, karışık mod yükleme altında numunelere kırılma ve çatlak ilerleme testi gerçekleştirilmiştir. Bir önceki çalışmadan farklı olarak, numuneler için çatlak ilerleme deneyleri ve farklı kriterlere göre çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen yüzeyler, deneysel yüzey ile karşılaştırılmıştır.

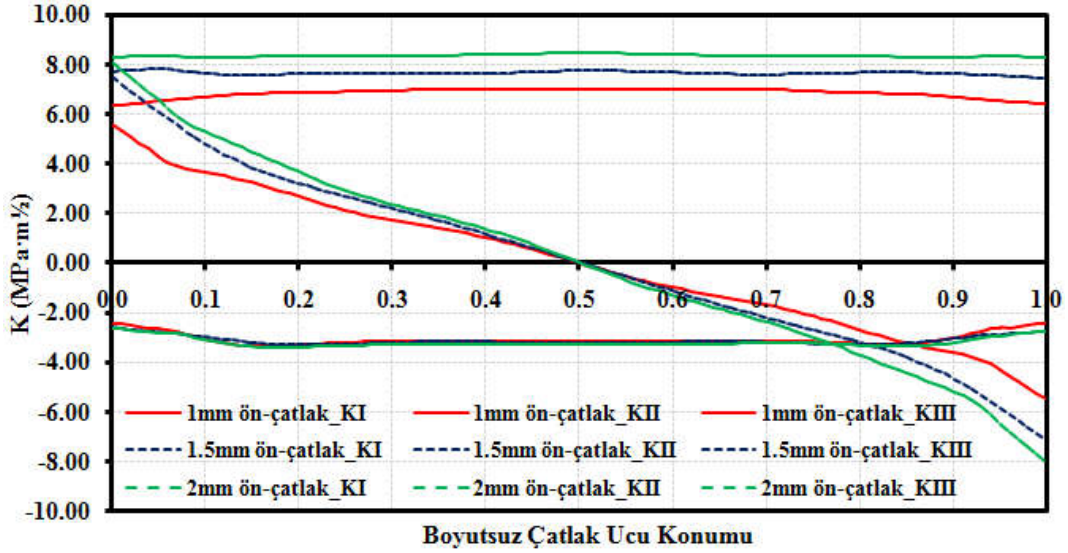
İlk olarak numunelere kırılma testleri gerçekleştirilmiştir. Kırılma deneyleri ve çatlak ilerleme analizlerinde izlenen yol, bir önceki çalışmayla aynıdır. Üretilen numunelere kenar çentiği açılarak, mod-I yüklemesi ile ön çatlak oluşturulmuş ve aynı anda hem aksenal hem de torsiyonel yüklemeyi orantılı bir hızda vererek numuneler kırılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler birebir simüle edilerek kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen GŞF değerleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlere göre eşdeğer GŞF değeri hesaplanarak kritik kopma yükü tahmin edilmiştir. Son olarak, kriterlere göre yapılan tahminler deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.28.'de deney ve simülasyonlarda kullanılan numune boyutları verilmiştir.



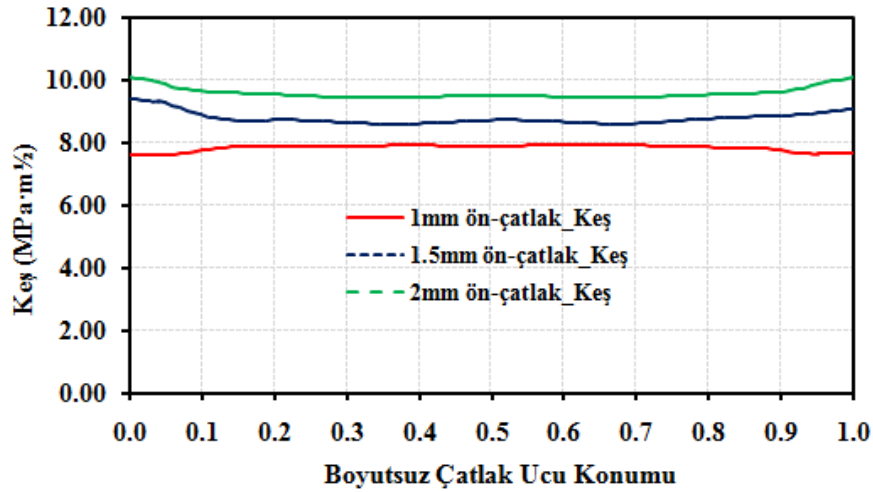
Şekil 4.28. Deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları.

Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, 10 kN aksenal yüke ve 80 Nm tork değerine karşılık gelen hızlarda testlerin gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Deney esnasında, aksenal yükleme hızı 1,5 kN/s, ve torsiyonel yükleme hızı 12 Nm/s olacak şekilde yükleme yapılarak numuneler kırılmıştır. Numune kalınlığı artırıldığı için, çentiğin derinlik yönündeki uzunluğu 10 mm olacak şekilde çentik oluşturulmuştur. Net çatlak uzunluğuna karşılık gelen GŞF değerlerinin tespiti için, 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm ön çatlak uzunlukları için kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Aksenal yük

10 kN ve burulma momenti değeri 80 Nm için kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri ve bu değerler kullanılarak geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine (Denklem 2.31) göre hesaplanan eşdeğer GŞF dağılımı Şekil 4.29. ve Şekil 4.30.'da sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.29. Farklı ön-çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen eşdeğer GŞF değerleri.



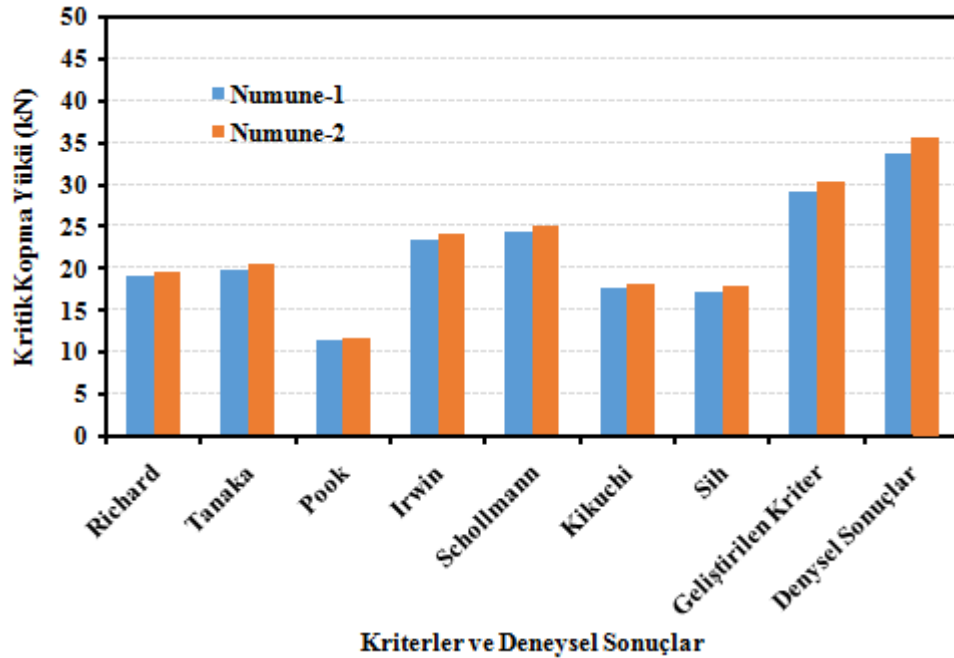
Şekil 4.30. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı.

Şekilde yer alan eşdeğer GŞF değerleri, çatlak kenarları için elde edilen GŞF değerlerine göre hesaplanmıştır. Tablo 4.2.'de, üç boyutlu mevcut kriterlere göre ve geliştirilen kritere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri ve her iki deneyden

elde edilen kopma yükü değerleri verilmiştir. Şekil 4.31.'de ise, bu değerlerin karşılaştırıldığı grafik verilmiştir.

Tablo 4.2. Üç boyutlu mevcut ve geliştirilen kriterlere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri.

Kriterler (3 boyutlu)	Numune-1		Numune-2		Deneysel Kopma Yükü (kN)
	Keş (MPa*m <sup>1/2</sup> )	Kritik Kopma Yükü (kN)	Keş (MPa*m <sup>1/2</sup> )	Kritik Kopma Yükü (kN)	
Geliştirilen Kriter	10,45	27,75	10,11	28,67	
Richard	15,24	19,03	14,73	19,69	
Tanaka	14,66	19,78	14,14	20,50	
Pook	25,49	11,38	24,62	11,78	33,73
Irwin	12,40	23,40	12,00	24,18	35,70
Schöllmann	11,87	24,44	11,51	25,20	
Kikuchi	16,39	17,70	15,87	18,27	
Sih	16,79	17,27	16,24	17,86	



Şekil 4.31. Mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin, deneysel kopma yükleri ile karşılaştırılması.

Şekilde görüldüğü gibi, literatürdeki birçok modeli göz önüne alarak, bu yükleme açısı için de deneysel sonuçlara en yakın tahmin, geliştirilen üç boyutlu kriter gere yapılan tahmin olmuştur. Geliştirilen kriter dışında diğer yakın tahminler, Irwin ve Schöllmann kriterine göre yapılan tahminlerdir. Ancak deneysel kopma yükleri ile aralarında yaklaşık 10 kN yük farkı vardır.

Kırılma tokluğu çalışmalarına ek olarak, bu numuneler için çatlak ilerleme deneyleri ve analizleri de gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme deneylerinde, kırılma analizi sonuçlarına göre belirlenen yüklere uygun olarak yükleme değerleri belirlenmiştir. Eksenel yük değeri, kırılma analizlerindeki eksenel yük değerinin 1,7 katı olan 17 kN ( $10 \text{ kN} \cdot 1,7$ ) ve tork değeri ise kırılma analizlerinde kullanılan değer 1,7 katı olan 136 Nm ( $80 \text{ Nm} \cdot 1,7$ ) olacak şekilde çatlak ilerleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. R-oranı her iki yükleme için de 0,1 alınmış ve 1 Hz frekans değerinde testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.32.'de, gerçekleştirilen test sonrası kırılan numune yüzeyinin üstten görünümü verilmiştir.

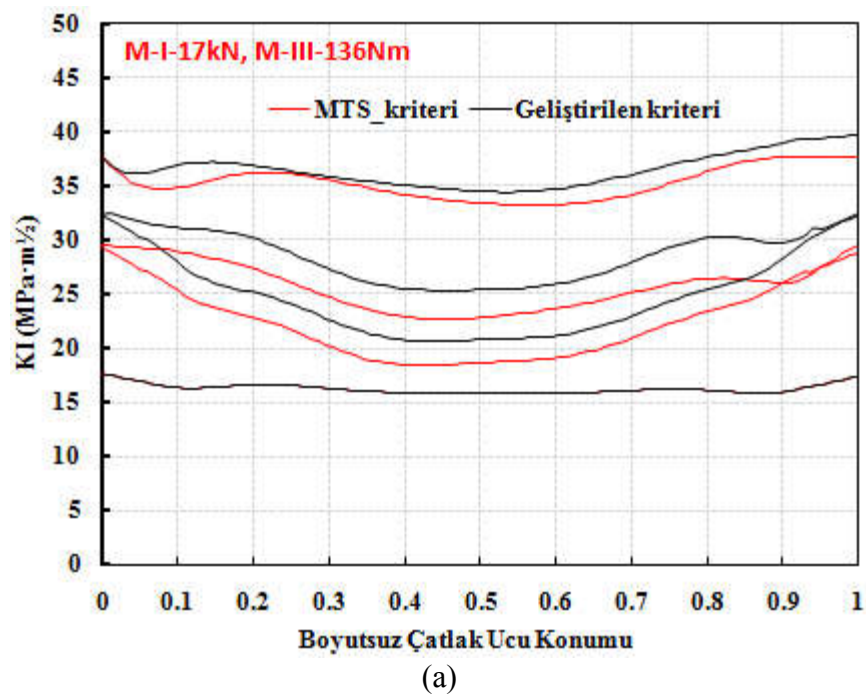


Şekil 4.32. 17 kN eksenel yük ( $R=0,1$ ) ve 136 Nm ( $R=0,1$ ) burulma momenti etkisinde kırılan numune yüzeyinin üstten görünümü.

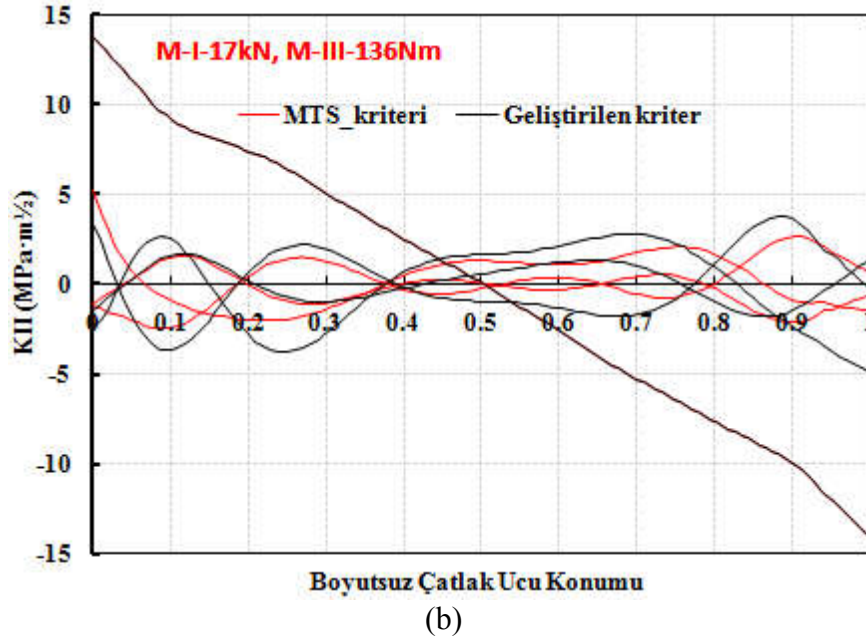
Çatlak ilerleme deneyleri sonrasında şekilde verilen ön çatlak uzunluğu birebir modellenerek, çatlak sapma açısı tahmini için tez kapsamında geliştirilen iki boyutlu çatlak sapma açısı kriteri (Denklem 2.29) ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için ise tez kapsamında geliştirilen üç boyutlu kırılma kriteri (Denklem 2.31) kullanılarak çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Aynı analizler MTS kriteri

kullanılarak da gerçekleştirilmiş ve elde edilen GŞF değerleri, kriterlere göre yapılan eşdeğer GŞF hesaplamaları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çatlak ilerleme analizleri, Bölüm 3.6.3.'te silindirik çelik numune için gerçekleştirilen analizlerde uygulanan yöntem ve sınır şartları aynı şekilde uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

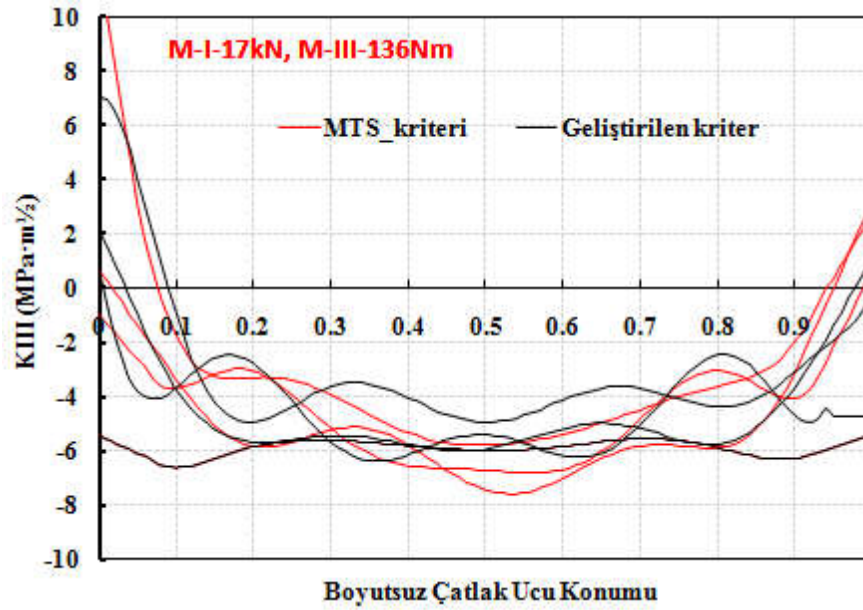
Her iki kritere göre de gerçekleştirilen analizler sonrası, çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri,  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  ve bu değerlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF dağılımı Şekil 4.33.'te verilmiştir.



Şekil 4.33. MTS kriteri ve geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$ , (d) Keş değerleri.



(b)

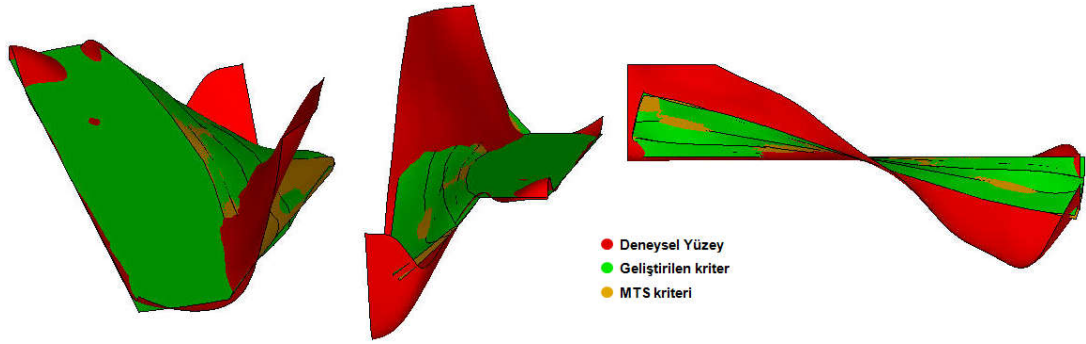


(c)

Şekil 4.33. MTS kriteri ve geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$ , (d) Keş değerleri. (Devamı)

Şekilde görüldüğü üzere, her iki kriter için benzer GŞF dağılımları elde edilmiştir. Şekil 4.34.'te, her iki kritere göre gerçekleştirilen analizlerden elde edilen çatlak yüzeyleri verilmiştir.





Şekil 4.34. MTS kriteri ve geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen çatlak yüzeyleri.

Analizlere göre elde edilen yüzeyler incelendiğinde, geliştirilen kritere göre elde edilen çatlak yüzeyinin, MTS kriterine göre elde edilen çatlak yüzeyi ile örtüştüğü verilen şekilden görülmektedir. Başlangıç çatlaklığının ilk saptığı durum için kriterlerin deneye yakın tahminde bulunduğu, ancak çatlak ilerledikçe kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin, deneysel yüzeyden uzaklaştığı görülmektedir. Soldaki perspektif resimde verilen deneysel yüzey (kırmızı), numunenin üç boyutlu yüzey taramasından elde edilen yüzey olup, yüzey üzerindeki ani zıplama kısmı, numunenin silindirik yüzey sınırlarının tam olarak taranamaması ve yüzey modelleyici programının otomatik yüzey uydurması sonucu oluşmaktadır.

#### 4.6. Mod-I/III Yükleri Altında CTT Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Geliştirilen Üç Boyutlu Kriter)

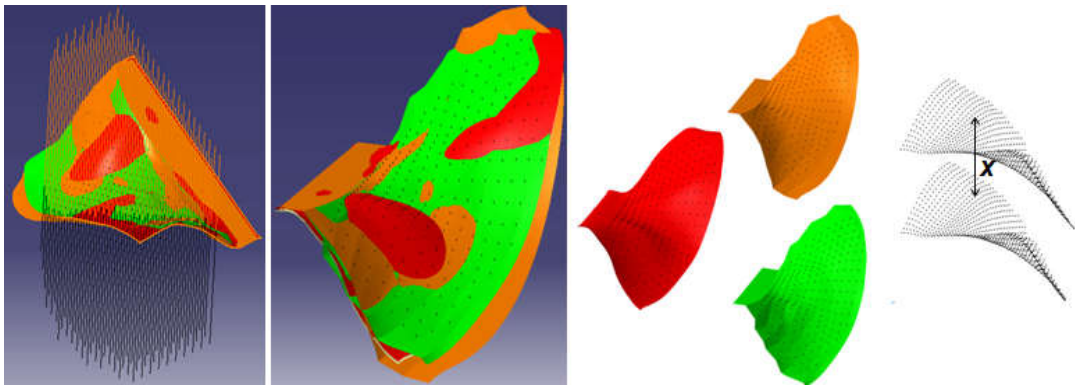
Bu çalışmada, daha önce Bölüm 3.4.'te, mod-I/III 45°, 60° ve 75° yükleme açıları için MTS kriteri, Denklem (2.4) ve (2.5) kullanılarak gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, tez kapsamında geliştirilen üç boyutlu kriter kullanılarak tekrar edilmiş ve kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeyleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinde, çatlak sapma açısı tahmini için Denklem (2.29) ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için ise Denklem (2.31) kullanılmıştır. Bazı yükleme açılarında, geliştirilen kritere ve mevcut kriterlere göre ömür tahminleri de yapılmıştır. Geliştirilen kritere göre yapılan ömür tahminlerinin mevcut kriterler ile örtüştüğü ancak kriterlerin tamamının deneysel verilere nispeten uzak tahminlerde bulunduğu görülmüştür. Literatürdeki kriterlerden elde edilen yorulma ömrü sonuçları birbirine yakın, ancak deneysel sonuçlardan

nispeten uzak olmakla beraber, yorulma yükü altında ani kırılma durumunu temsil eden kritik çatlak uzunluğu, dolayısıyla, kırılma anı gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilebilmektedir.

Çatlak yüzeylerinin sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için temel bir yöntem geliştirilmiş ve aşağıda kısaca açıklanmıştır.

MTS kriterine ve geliştirilen kritere göre elde edilen çatlak yüzeyleri ile deneysel yüzeyler üst üste çakıştırılarak, yüzeylerin içinden numunenin yüksekliği yönünde çizgiler demeti geçirilmektedir. Daha sonra bu çizgi demetinin yüzeyleri kestiği noktalar belirlenerek noktaların koordinatları listelenmektedir. Çizgi demeti yüzeyleri dikey kestiği için, sadece bir çizginin üç yüzeyi kesmesi sonucu oluşan üç noktanın sadece dikey eksendeki koordinatları farklı olmaktadır. Böylece noktalar arasındaki mesafe ölçülerek, aşağıda Denklem (4.1)'de verilen eşitlik kullanılarak, farkların ortalama karekökü alınmaktadır. Bu şekilde kriterlere göre elde edilen yüzeylerin, deneysel yüzeylerden ne kadar saptığı sayısal olarak ifade edilmektedir. Şekil 4.35.'te, gerçekleştirilen işlemlerin görsel hali verilmiştir.

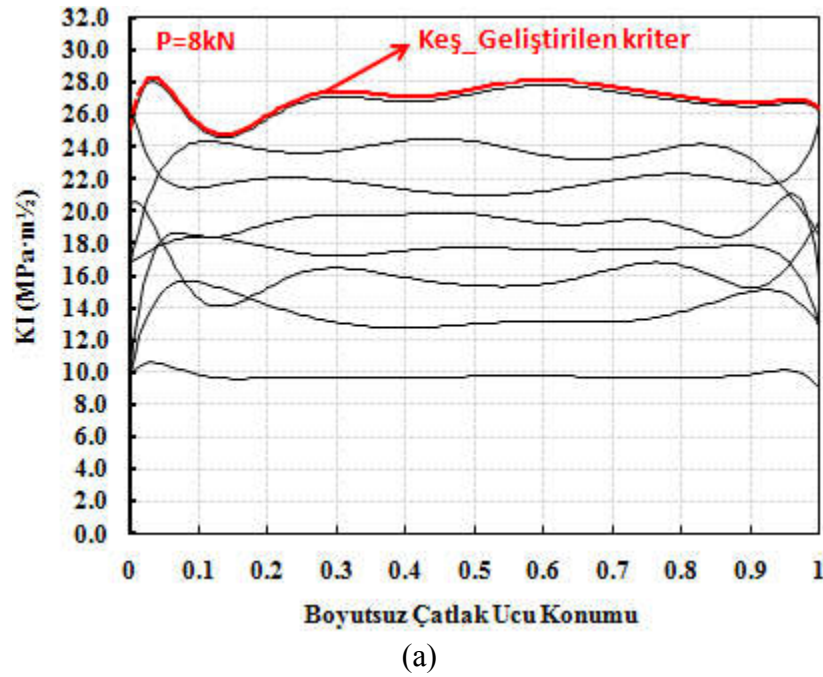
$$x_{ort} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad (4.1)$$



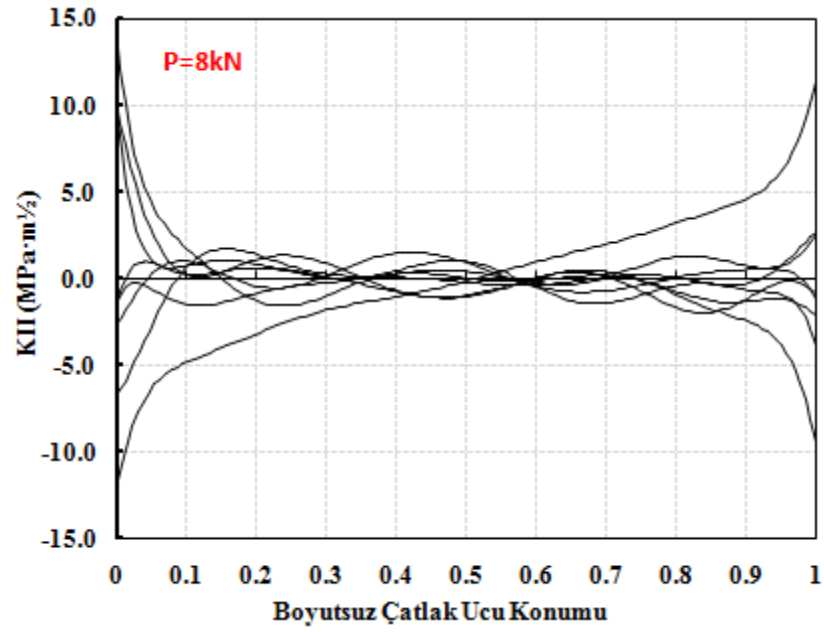
Şekil 4.35. Çatlak yüzeylerinin sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için uygulanan yöntem.

#### 4.6.1. Mod-I/III 45° yüklemesi açısında CTT numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri

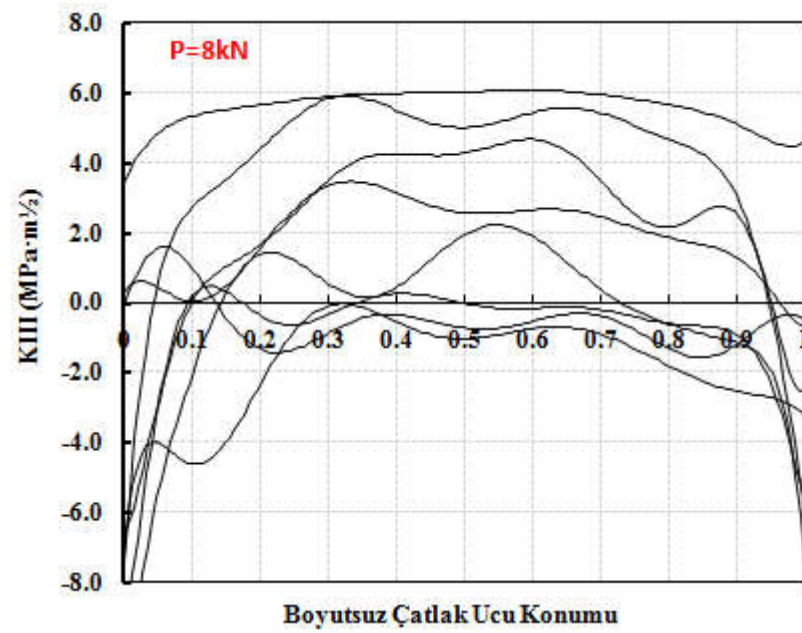
Bölüm 3.4.1.'de, mod-I/III 45° yüklemesi açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kritere göre de tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çatlak ilerleme analizleri Bölüm 3.5.1.'de verilen yöntem ile çatlak ucu boyunca tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çatlak ilerleme simülasyonları sonrasında her bir çatlak adımında çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri, Şekil 4.36.'da sırasıyla verilmiştir. Son çatlak adımı için geliştirilen kritere göre eşdeğer GŞF değeri ayrıca hesaplanarak Şekil 4.36.a'da çizdirilmiştir. Çatlak ilerleme deneyi, 8 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için 8 kN yük değerine karşılık gelen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.36. Mod-I/III 45° yüklemesi açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.



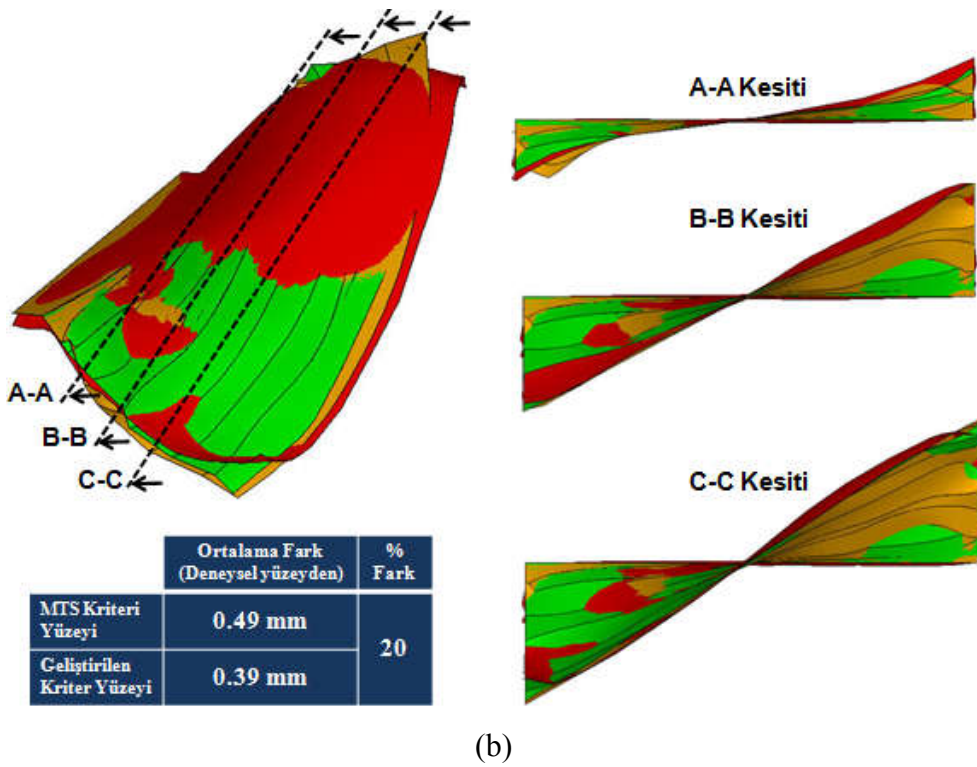
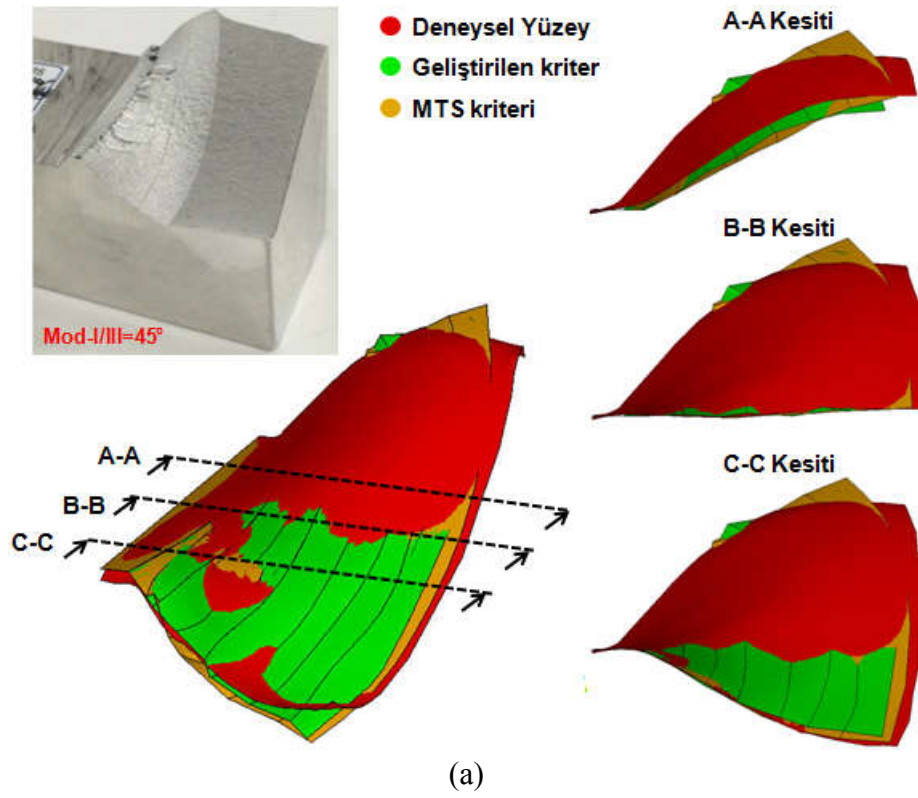
(b)



(c)

Şekil 4.36. Mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

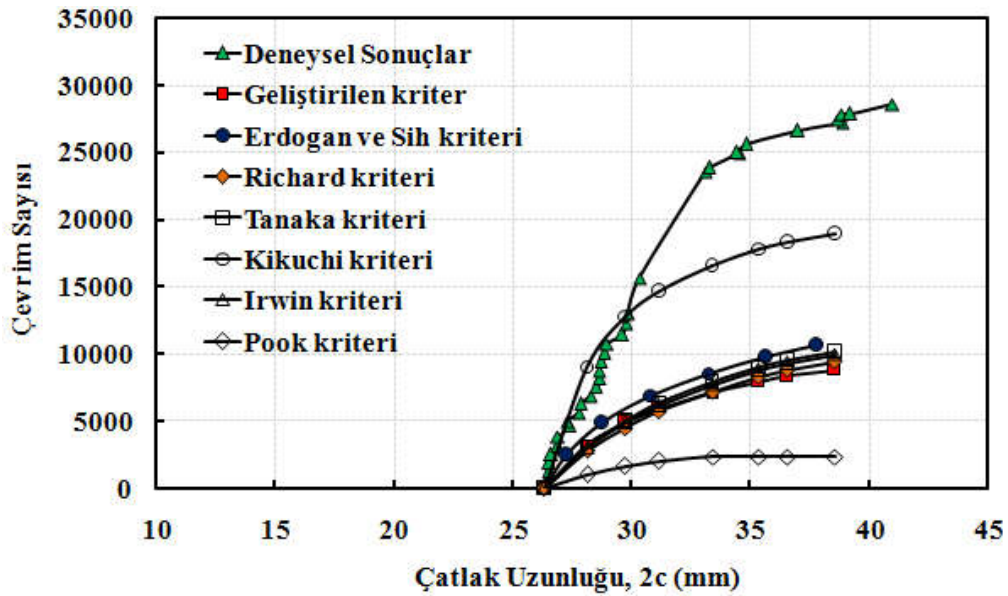
Geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, Bölüm 3.4.1.'de, MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 4.37.'de verilmiştir.



Şekil 4.37. Mod-I/III 45° yükleme açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

Şekilde görüldüğü gibi her iki kritere göre de tahmin edilen yüzeyler, deneysel yüzeyler ile örtüşen bir sonuç vermiştir. Geliştirilen kritere göre tahmin edilen yüzey, MTS kriterine oranla %20 daha iyi tahminde bulunmuştur. Ancak, geliştirilen kriter ile deneysel yüzey arasındaki ortalama fark 0,49 mm iken, MTS kriteri ile deneysel yüzey arasındaki ortalama fark 0,39 mm'dir. Aradaki fark değerleri çok düşük mertebededir.

Şekil 4.38.'de, mod-I/III 45° yükleme açısı için, geliştirilen üç boyutlu kritere ve literatürdeki mevcut üç boyutlu kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin, deneyden elde edilen ömür verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, Kikuchi ve Pook kriteri dışında diğer kriterlerin birbirleri ile tutarlı tahminde bulunduğu ancak tüm kriterlerin deneysel ömür verisinin altında tahminde bulunduğu görülmektedir. Kikuchi kriteri, deneysel ömür verisine en yakın tahminde bulunmasına rağmen kritere göre yapılan tahmin ile deneysel ömür verisi arasında yaklaşık %50 oranında büyük bir fark bulunmaktadır.

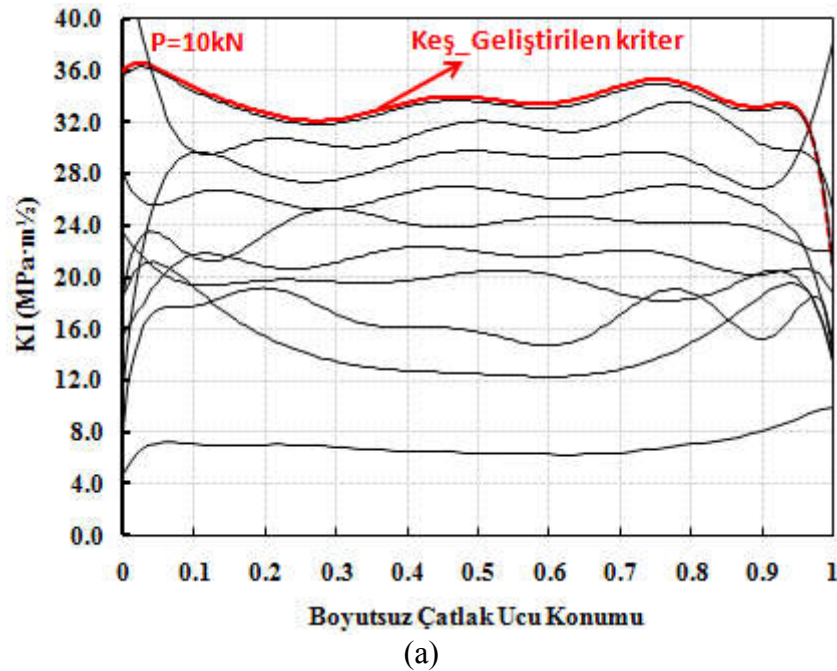


Şekil 4.38. Mod-I/III 45° yükleme açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması.

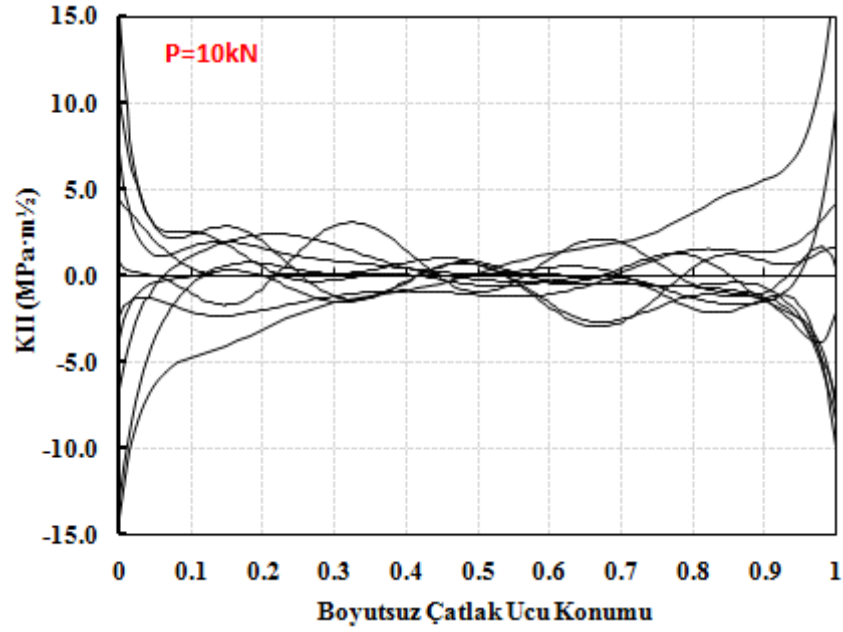


#### 4.6.2. Mod-I/III 60° yükleme açısında CTT numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri

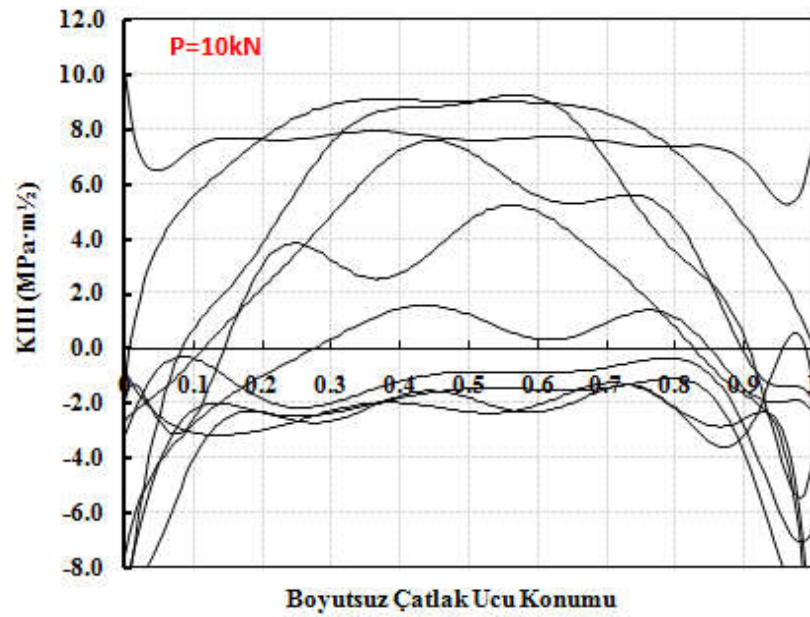
Bölüm 3.4.2.'de, mod-I/III 60° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kritere göre de tekrar edilerek çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri Şekil 4.39.'da sırasıyla verilmiştir. Bu yükleme açısı için de, Bölüm 3.5.1.'de verilen yöntem ile çatlak ucu boyunca tetrahedral elemanlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme deneyi, 10 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için 10 kN yük değerine karşılık gelen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.39. Mod-I/III 60° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.



(b)

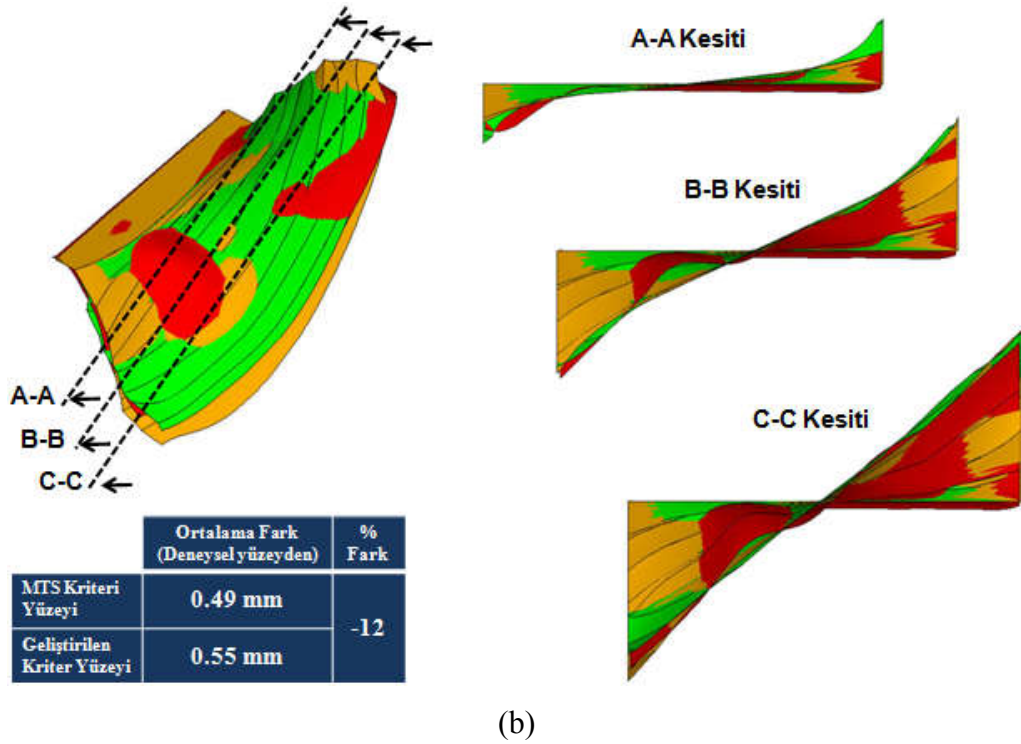
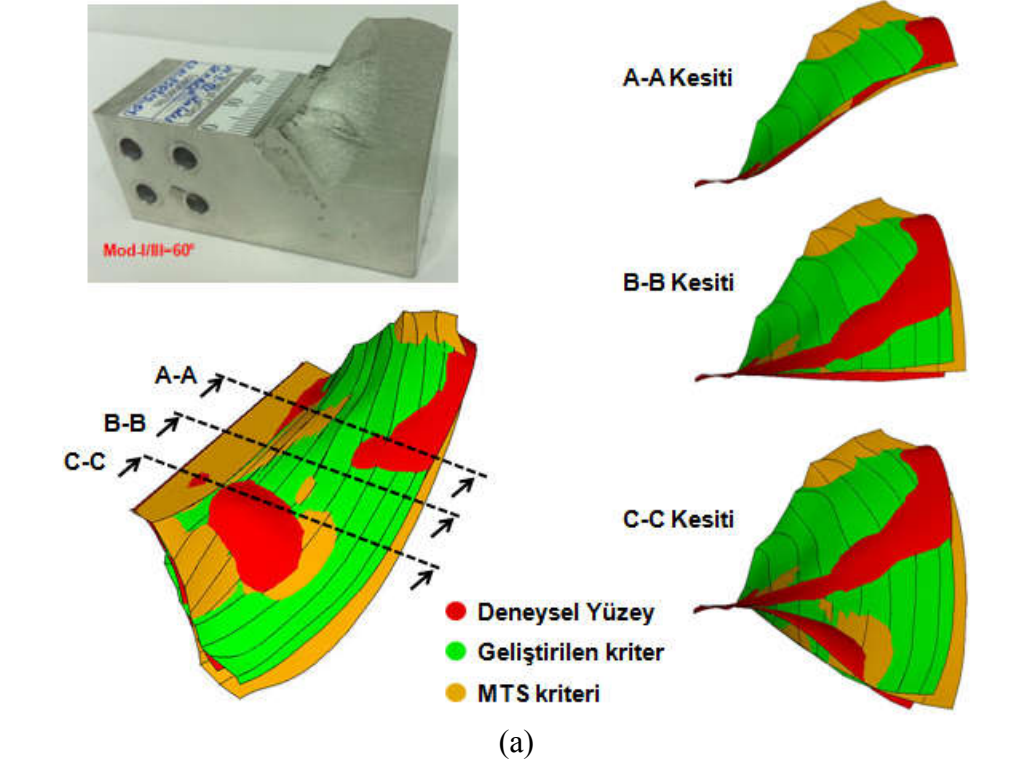


(c)

Şekil 4.39. Mod-I/III 60° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

Geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, Bölüm 3.4.2.'de MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 4.40.'da verilmiştir.

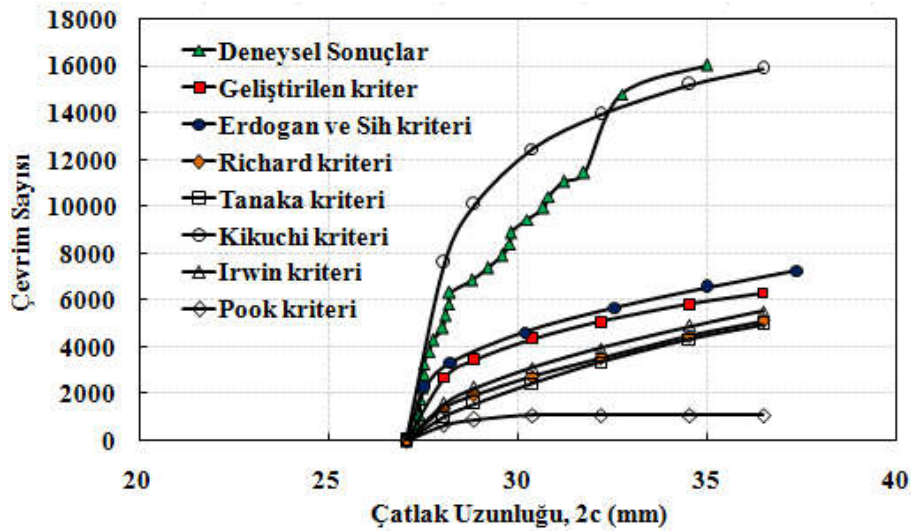




Şekil 4.40. Mod-I/III 60° yüklem açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

Bu yükleme açısı için de her iki kriterden deneysel yüzeylere yakın yüzeyler elde edilmiştir. MTS kriteri, geliştirilen kritere oranla %12 daha iyi tahminde bulunmuştur. Ancak, mod-I/III 45° yükleme açısında olduğu gibi deneysel yüzey ile aralarındaki ortalama fark değerleri (Geliştirilen kriter=0,55 mm, MTS kriteri=0,49 mm) çok düşük mertebededir.

Şekil 4.41.'de, mod-I/III 60° yükleme açısı için, geliştirilen üç boyutlu kritere ve literatürdeki mevcut üç boyutlu kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin, deneyden elde edilen ömür verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. Mod-I/III 45° yükleme açısı için elde edilen ömür grafiklerinde olduğu gibi, Kikuchi ve Pook kriteri dışında diğer kriterlerin birbirleri ile yakın tahminde bulunduğu ancak Kikuchi kriteri dışında tüm kriterlerin deneysel ömür verisinin altında tahminde bulunduğu görülmektedir. Kikuchi kriteri, deneysel ömür verisi ile örtüşen bir eğilim göstermektedir.

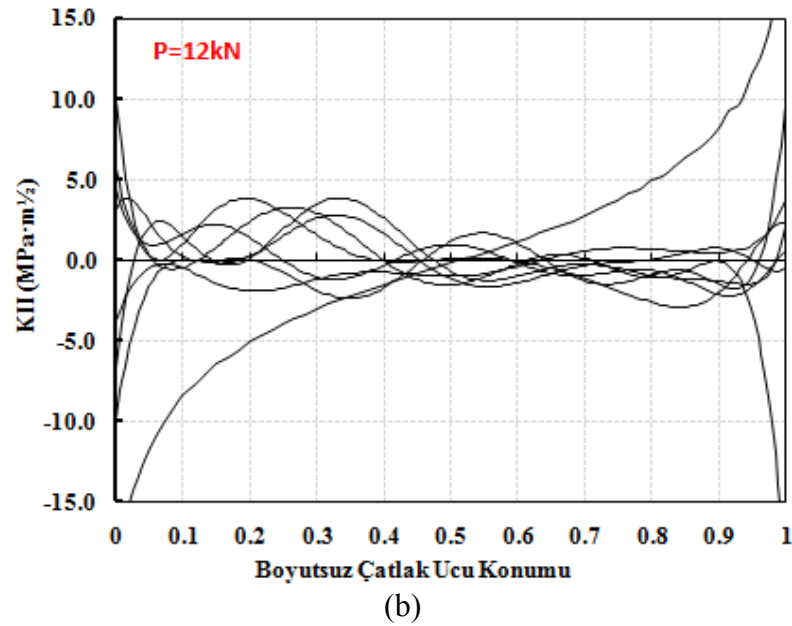
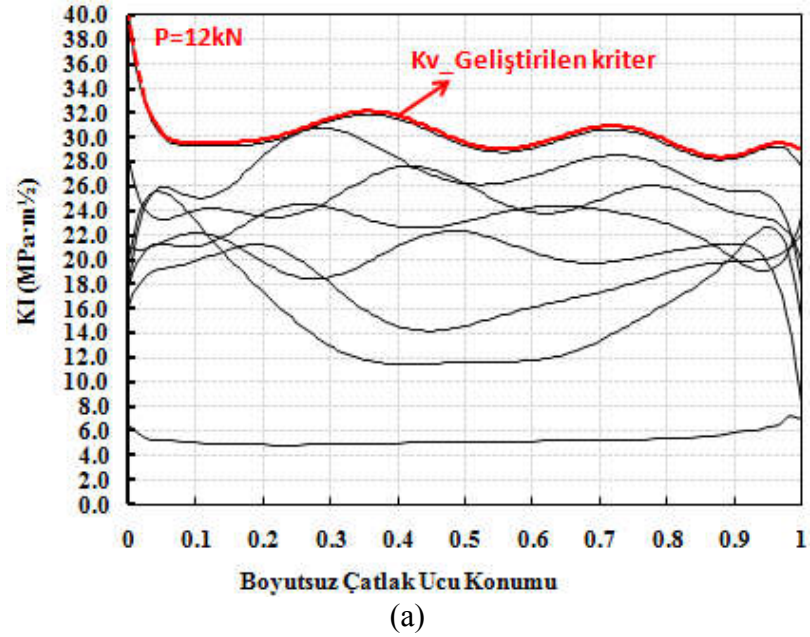


Şekil 4.41. Mod-I/III 60° yükleme açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması.

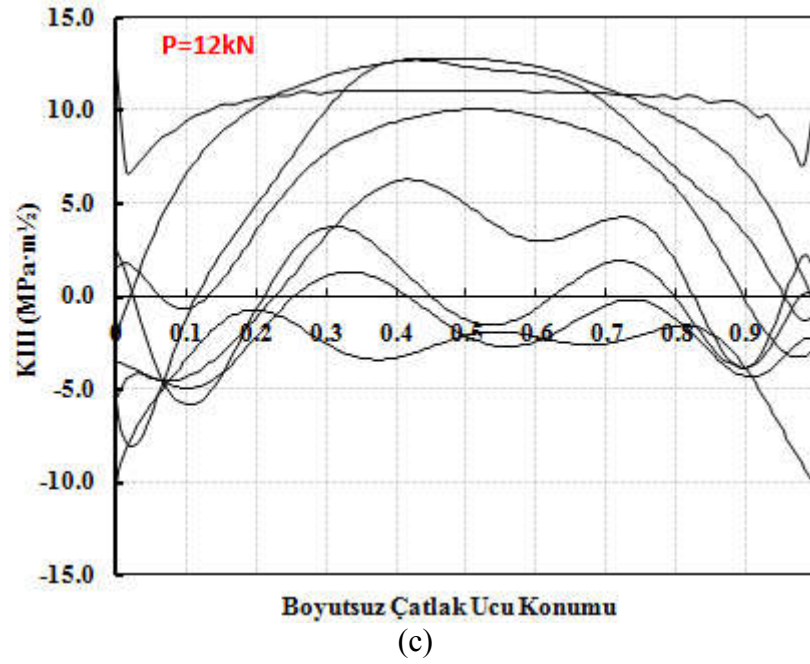
#### 4.6.3. Mod-I/III 75° yükleme açısında CTT numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri

Bölüm 3.4.3.'te, mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kritere göre de tekrar edilerek çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri

Şekil 4.42.'de sırasıyla verilmiştir. Bu yükleme açısı için de, Bölüm 3.5.1.'de verilen yöntem ile çatlak ucu boyunca tetrahedral elemanlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme deneyi, 12 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için 12 kN yük değerine karşılık gelen analiz sonuçları verilmiştir.

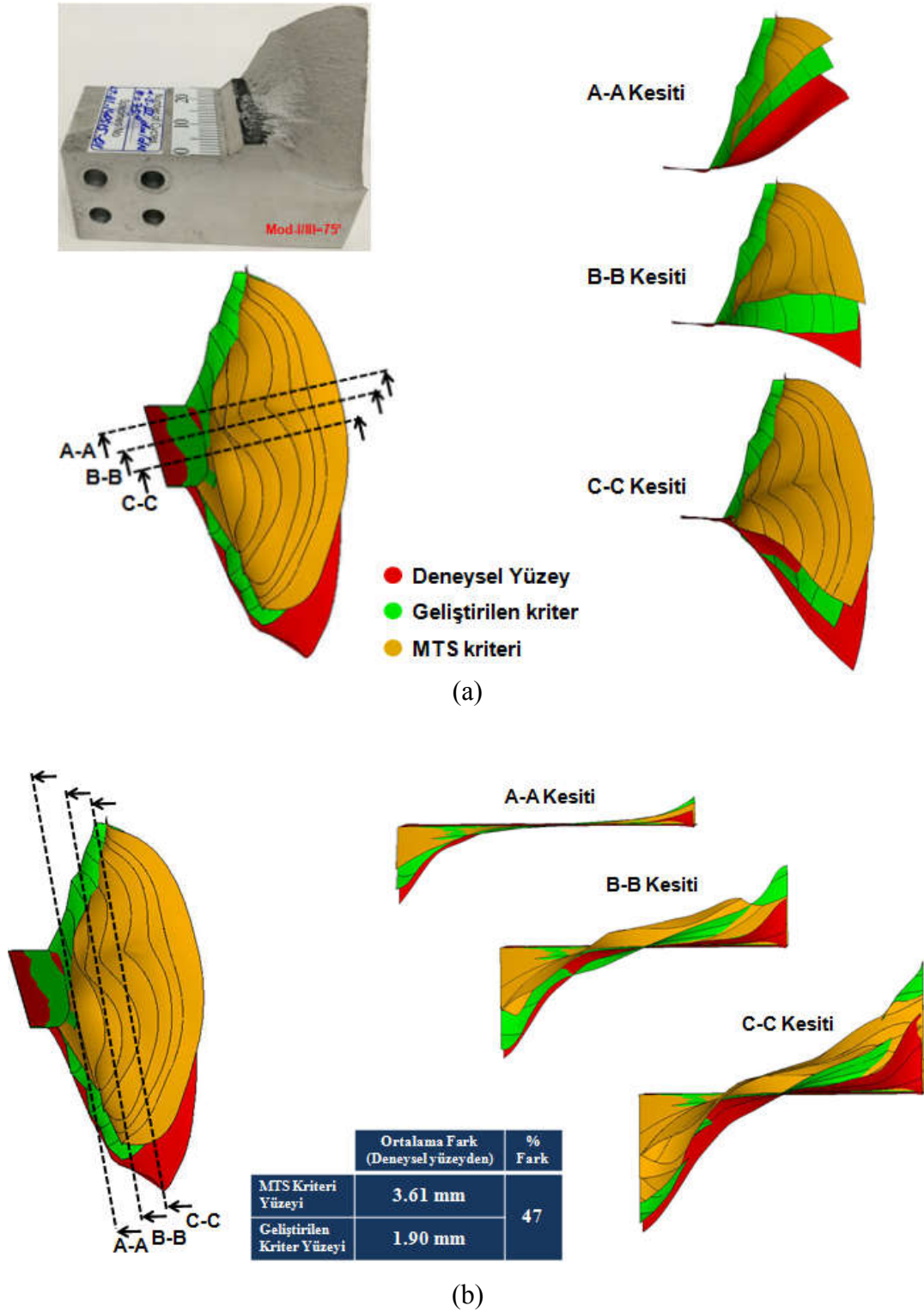


Şekil 4.42. Mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GSF değerleri.



Şekil 4.42. Mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTT numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

Geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, Bölüm 3.4.3.'te MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 4.43.'te verilmiştir.



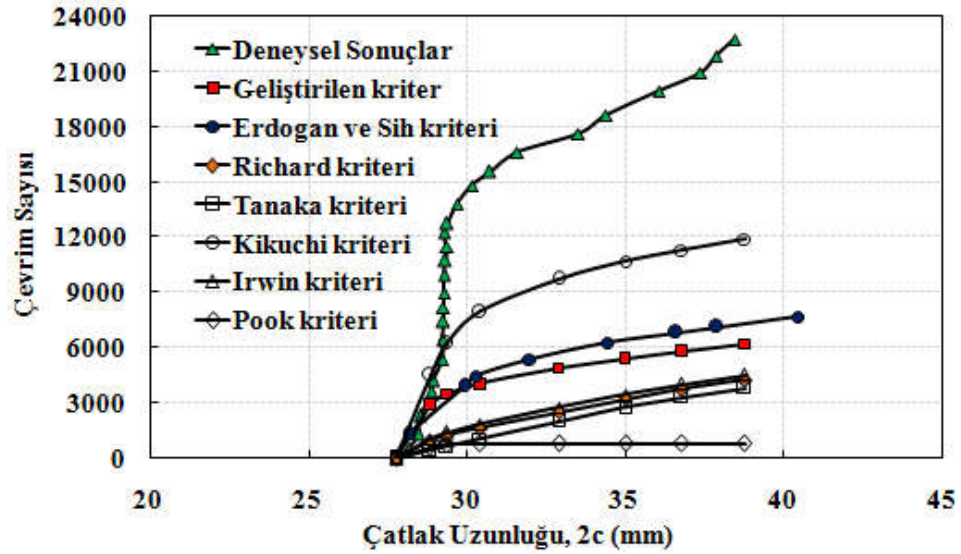
Şekil 4.43. Mod-I/III 75° yüklenme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

Karışık mod yüklemenin oldukça yüksek olduğu bu yüklenme açısında, geliştirilen kriter ile MTS kriterinin yüzey tahminleri arasında %47 oranında büyük bir fark

oluşmuştur. Kırılma test sonuçlarında da 75° yükleme açısı için, mevcut kriterlere göre yapılan kopma yükü tahminlerinde büyük farkların oluştuğu belirtilmişti. MTS kriteri ile deneysel yüzey arasındaki ortalama yüzey farkı 3,61 mm iken, geliştirilen kriter ile deneysel yüzey arasındaki ortalama fark 1,90 mm'dir. Şekil 4.42.'de verilen analiz sonuçları incelendiğinde, başlangıç çatlakları için gerçekleştirilen analiz sonucunda,  $K_I$ 'in yaklaşık 3 katı  $K_{II}$  ve 2 katı  $K_{III}$  GŞF değerleri elde edilmiştir. Mod-II ve mod-III'ün çok baskın olduğu bir yükleme durumu mevcuttur. Yüzeylerde bu baskın modlardan dolayı, literatürde "factory roof" olarak isimlendirilen keskin köşeli tepecikler oluşmakta ve deney sonucunda girintili çıkıntılı bir yüzey elde edilmektedir. Bu yüzeylerin taranarak bilgisayar ortamına aktarılması, bu yüzey bozukluklarından dolayı zorlaşmaktadır. Bilgisayar programlarında, bu şekilde karmaşık yüzeylerle çalışılması zor olduğu için, taranan yüzeylerde iyileştirme yapıldıktan sonra yüzeyler karşılaştırılmaktadır. Geliştirilen kriter ile deneysel yüzey arasındaki 1,9 mm'lik farkın sebeplerinden bir tanesi de budur.

Şekil 4.44.'te, mod-I/III 75° yükleme açısı için, geliştirilen üç boyutlu kritere ve literatürdeki mevcut üç boyutlu kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin, deneyden elde edilen ömür verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. Diğer yükleme açıları için elde edilen ömür grafiklerinde olduğu gibi, Kikuchi ve Pook kriteri dışında diğer kriterlerin birbirleri ile yakın tahminde bulunduğu ancak tüm kriterlerin deneysel ömür verisinin çok altında ömür tahmininde bulunduğu görülmektedir. Kikuchi kriteri deneysel ömür verisine en yakın tahminde bulunan kriter olmasına rağmen, deneysel ömür verisi ile arasında yaklaşık %90 oranında bir fark bulunmaktadır.





Şekil 4.44. Mod-I/III 75° yüklem açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması.

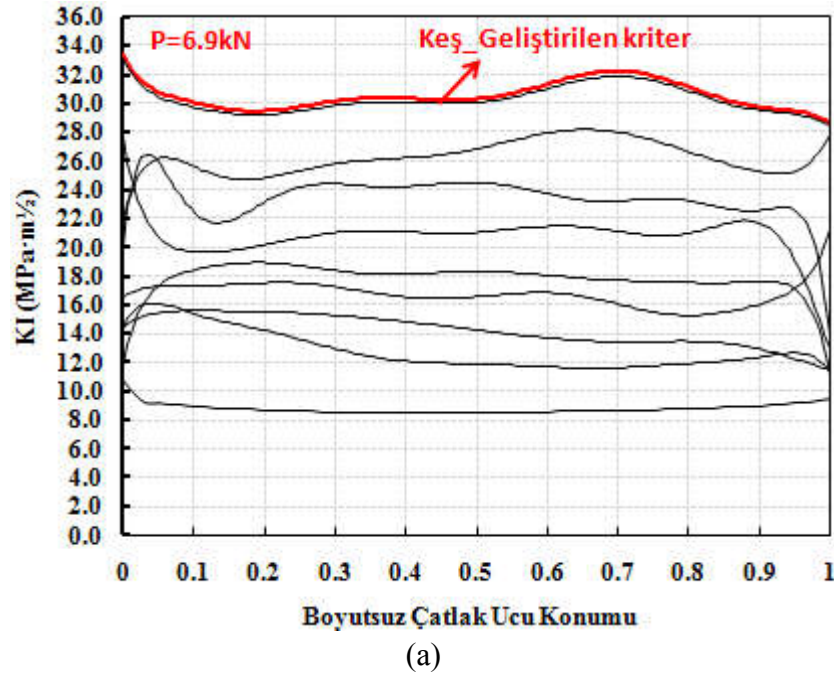
Mod-I/III test sonuçları için mevcut ve geliştirilen kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinde, deneysel sonuçların çok uzağında ömür tahminleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen ilave çalışmalar ile bunun sebebi araştırılmış ve sonucunda elde edilen bulgular Bölüm 5.'te detaylı olarak verilmiştir.

#### 4.7. Mod-I/II/III Yükleri Altında CTST Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Geliştirilen Üç Boyutlu Kriter)

Bu çalışmada, daha önce Bölüm 3.5.'te üç farklı yüklem durumu için MTS kriteri, Denklem (2.4) ve (2.5) kullanılarak gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, tez kapsamında geliştirilen üç boyutlu kriter kullanılarak tekrar edilmiş ve kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeyleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinde, çatlak sapma açısı tahmini için Denklem (2.29) ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için ise Denklem (2.31) kullanılmıştır.

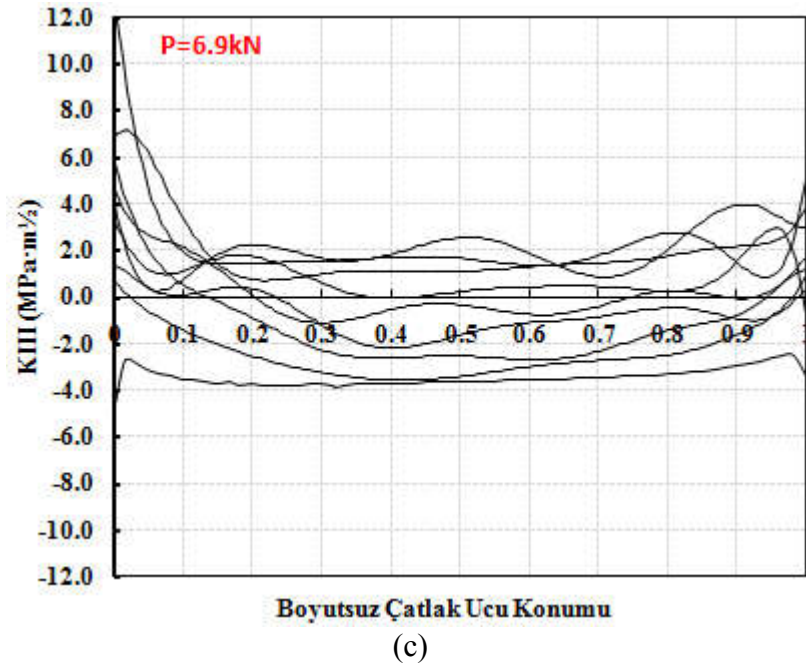
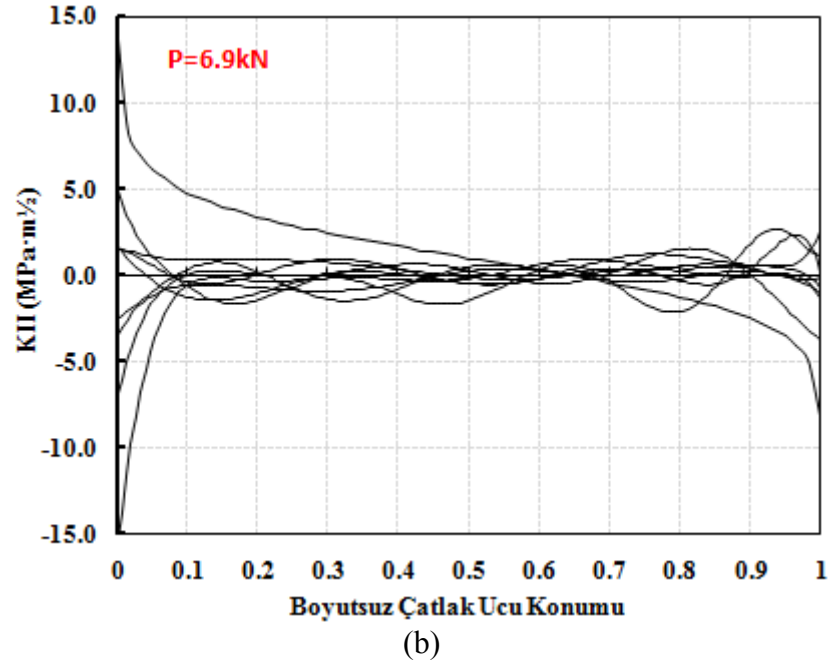
#### 4.7.1. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yükleme açısında CTST numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri

Bölüm 3.5.2.'de, mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° üç eksenli yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kritere göre gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çatlak ilerleme analizleri, çatlak ucu boyunca tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çatlak ilerleme simülasyonları sonrasında her bir çatlak adımında çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri Şekil 4.45.'te sırasıyla verilmiştir. Çatlak ilerleme deneyi, 6,9 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için 6,9 kN yük değerine karşılık gelen analiz sonuçları verilmiştir.



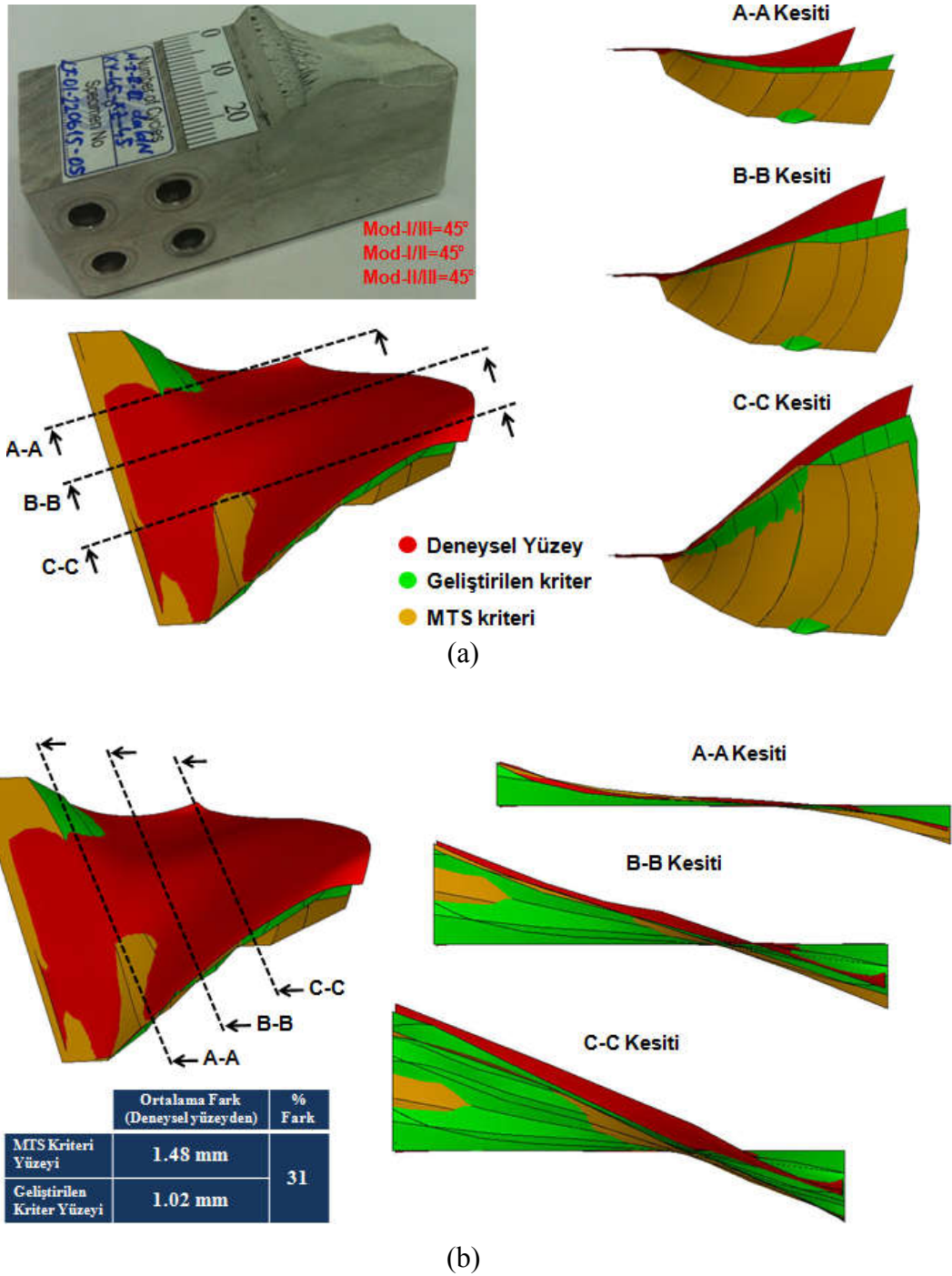
Şekil 4.45. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.





Şekil 4.45. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

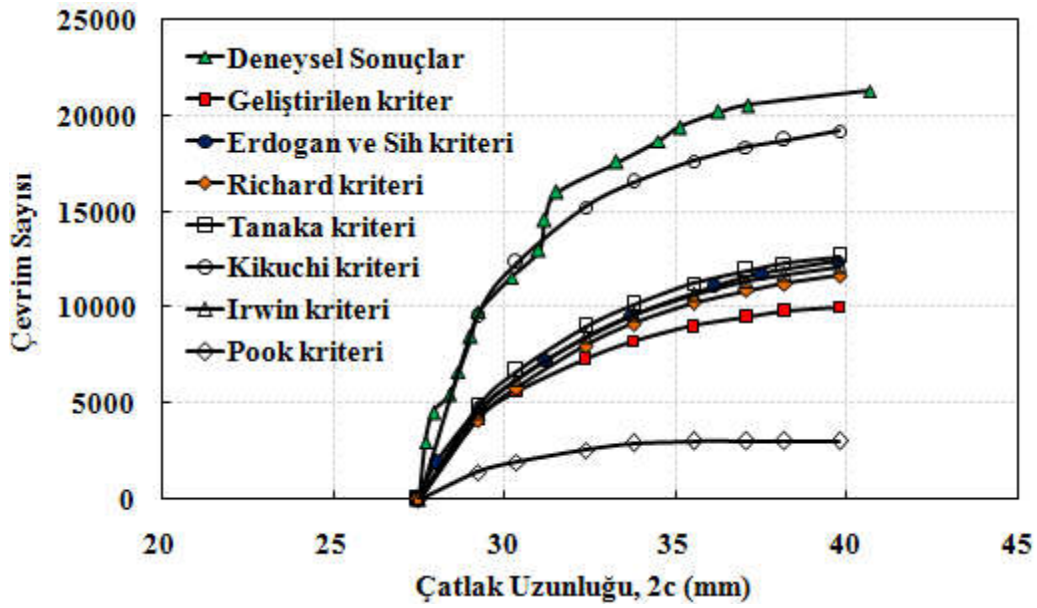
Geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, Bölüm 3.5.2.'de MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 4.46.'da verilmiştir.



Şekil 4.46. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklem açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

MTS kriteri kullanılarak elde edilen yüzey ile deneysel yüzey arasında ortalama 1,48 mm fark elde edilirken, geliştirilen kriter gere ortalama 1,02 mm fark elde edilmiştir. Geliştirilen kriter yaklaşık %31'lik bir oranla deneysel yüzeyi daha iyi tahmin etmiştir.

Şekil 4.47.'de, mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklem açısı için, geliştirilen üç boyutlu kritere ve literatürdeki mevcut üç boyutlu kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin, deneyden elde edilen ömür verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, mod-I/III testleri için yapılan ömür tahminlerinde olduğu gibi, Kikuchi ve Pook kriteri dışında diğer kriterlerin birbirleri ile tutarlı tahminde bulunduğu ancak Kikuchi kriteri dışında diğer kriterlerin deneysel ömür verisine uzak tahminlerde bulunduğu görülmektedir.

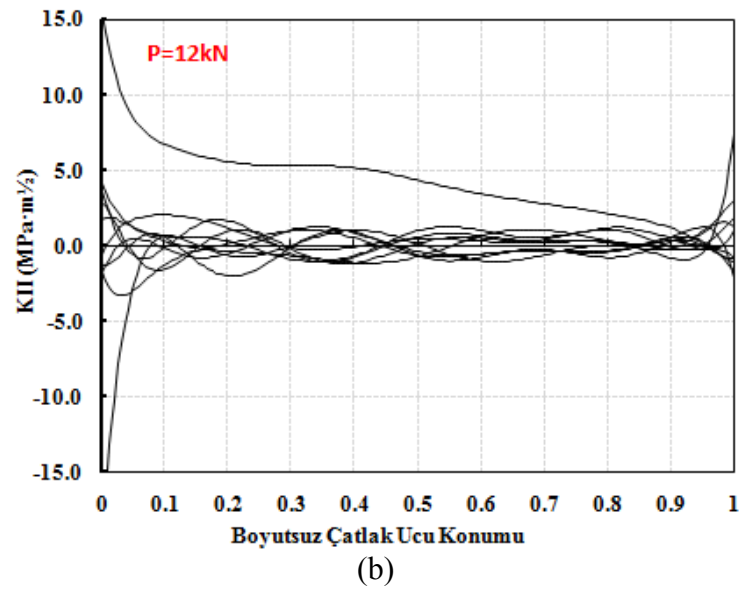
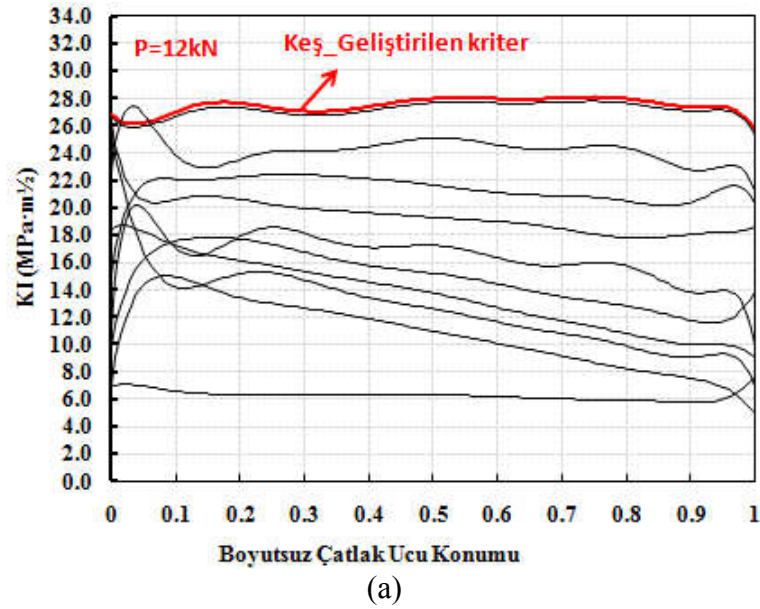


Şekil 4.47. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yüklem açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması.

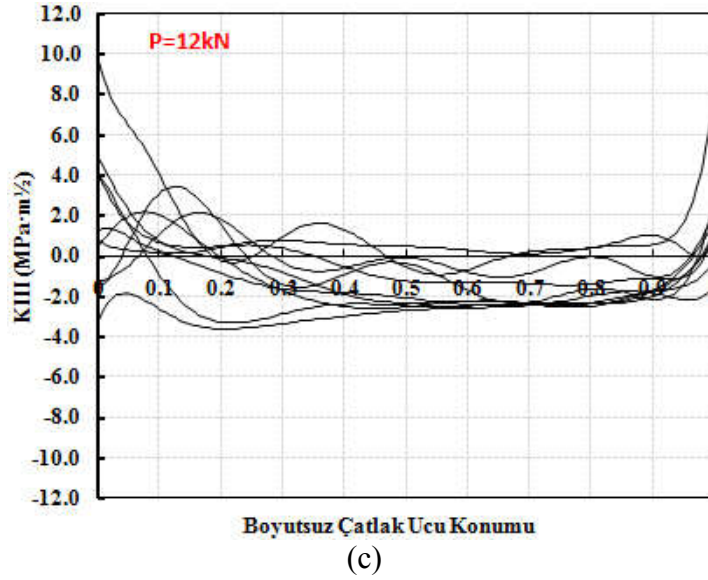
#### 4.7.2. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklem açısında CTST numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri

Bölüm 3.5.3.'te, mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° üç eksenli yüklem açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kritere göre de tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çatlak ilerleme analizleri, çatlak ucu boyunca tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çatlak ilerleme simülasyonları sonrasında her bir çatlak adımında çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri Şekil 4.48.'de sırasıyla verilmiştir. Çatlak ilerleme deneyi,

12 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için, 12 kN yük değerine karşılık gelen analiz sonuçları verilmiştir.

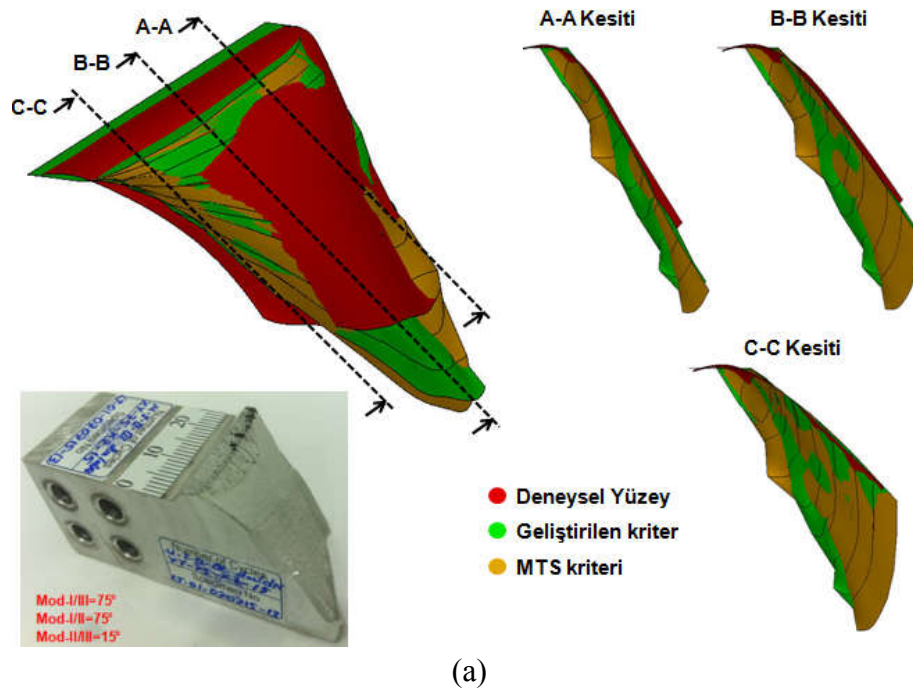


Şekil 4.48. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.

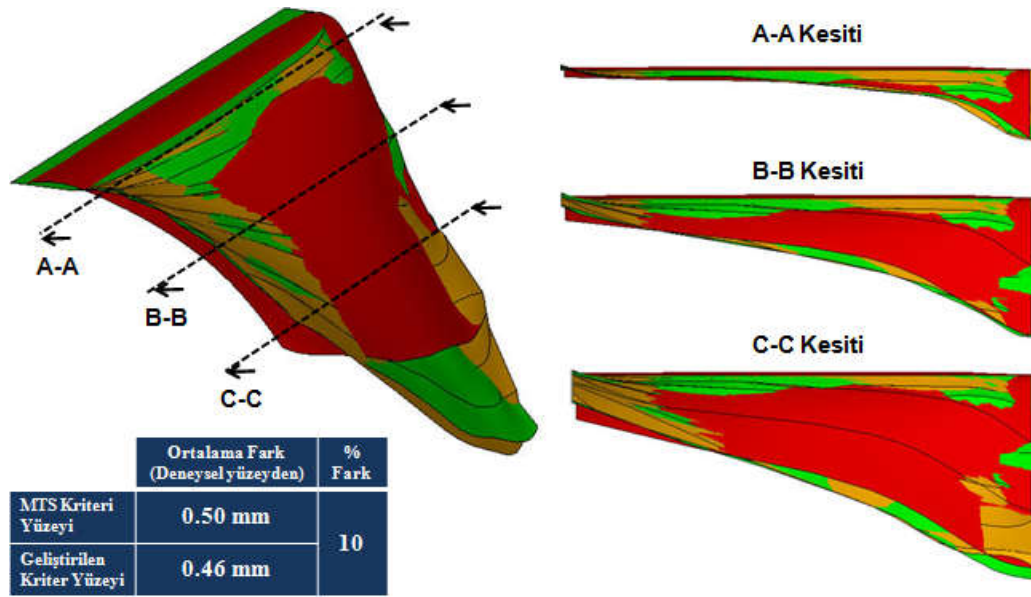


Şekil 4.48. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

Geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste çakıştırılarak, yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 4.49.'da verilmiştir.



Şekil 4.49. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.



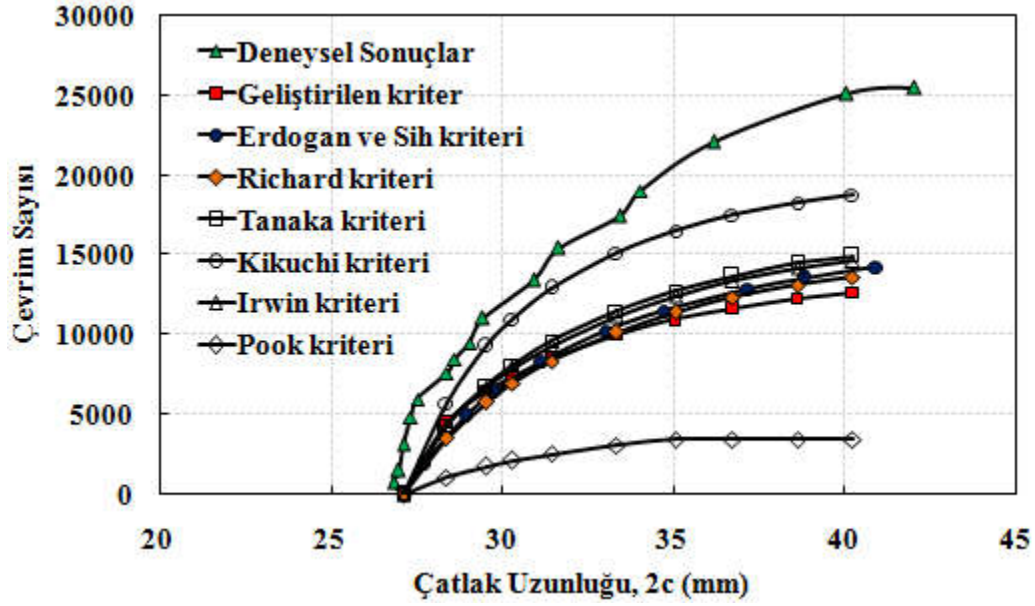
(b)

Şekil 4.49. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit. (Devamı)

Bu yükleme açısında her iki kriterde, deneysel yüzeylere çok yakın yüzey tahmininde bulunmuştur. MTS kriterine göre elde edilen yüzey ile deneysel yüzey arasında ortalama 0,5 mm, geliştirilen kriter ile deneysel yüzey arasında da ortalama 0,46 mm fark hesaplanmıştır. %10'luk bir farkla geliştirilen kriter daha iyi yüzey tahmininde bulunmuştur.

Şekil 4.50.'de, mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme açısı için, geliştirilen üç boyutlu kriter ve literatürdeki mevcut üç boyutlu kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin, deneyden elde edilen ömür verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. Bu yükleme açısı için de, Kikuchi ve Pook kriteri dışında diğer kriterler birbirleri ile tutarlı bir eğilim göstermiş, ancak tüm kriterler deneysel ömür verisinin aksine numunenin daha önce kırılacağı tahmininde bulunmuşlardır. Kikuchi kriteri, yaklaşık %35 hata oranı ile deneysel ömür verisine en yakın tahminde bulunmuştur.

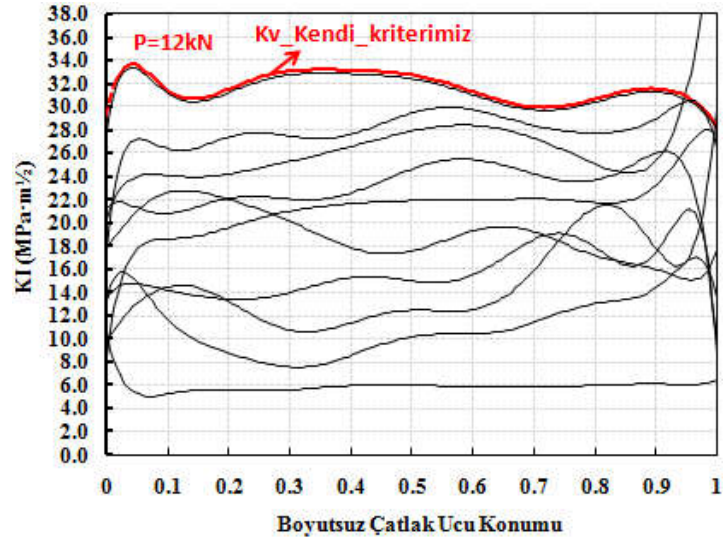




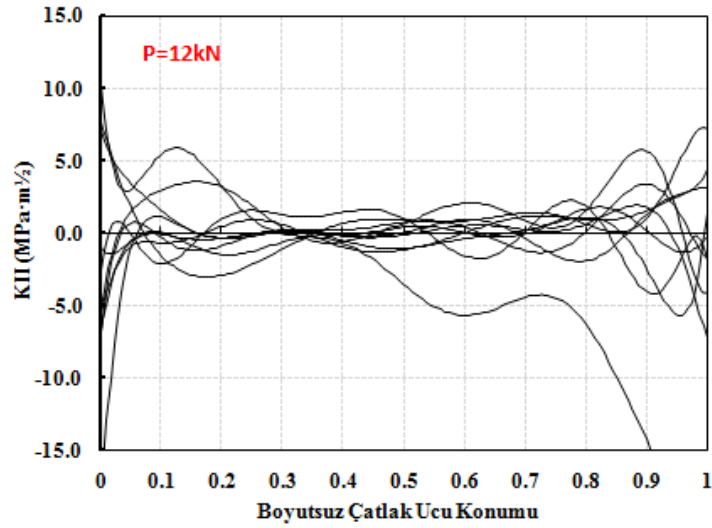
Şekil 4.50. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması.

#### 4.7.3. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yüklemeye açısında CTST numunesinin geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri

Son olarak mod-II ve mod-III yükünün çok baskın olduğu, mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75°, üç eksenli yüklemeye açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kritere göre de tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu yüklemeye durumu için de gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinde çatlak ucu boyunca tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Çatlak ilerleme simülasyonları sonrasında her bir çatlak adımında çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri Şekil 4.51.'de sırasıyla verilmiştir. Çatlak ilerleme deneyi, 12 kN yük altında ve R-oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için, 12 kN yük değerine karşılık gelen analiz sonuçları verilmiştir.



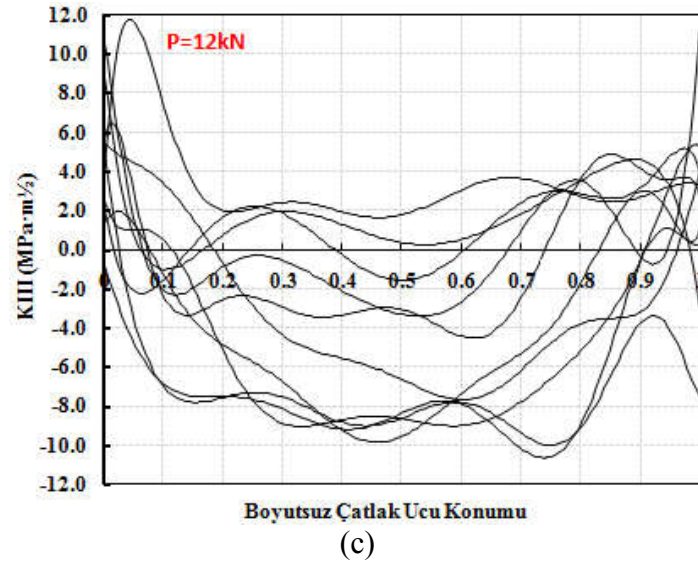
(a)



(b)

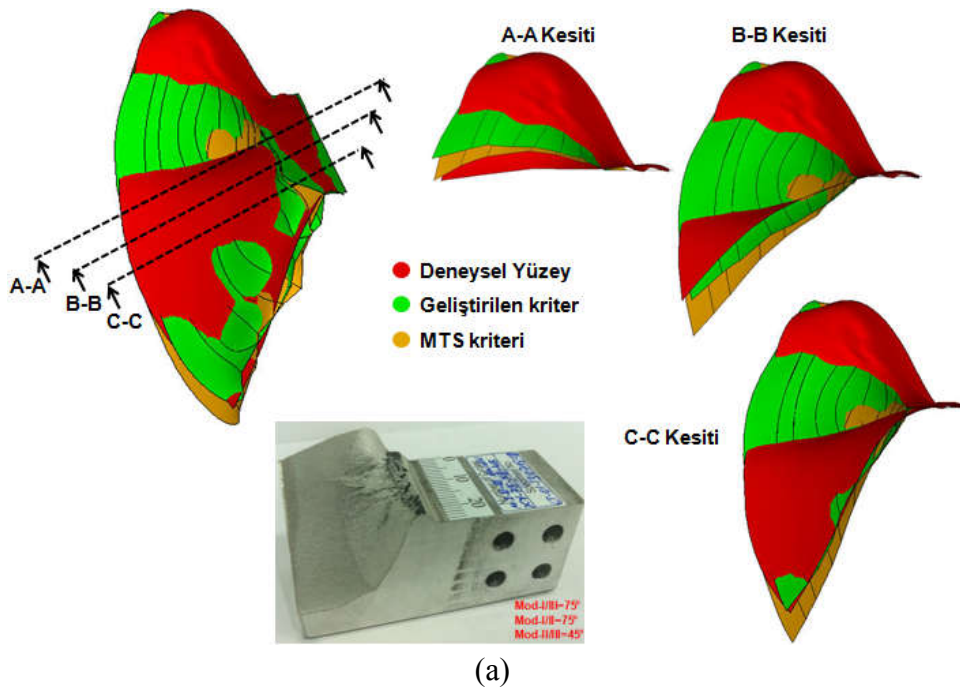
Şekil 4.51. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.



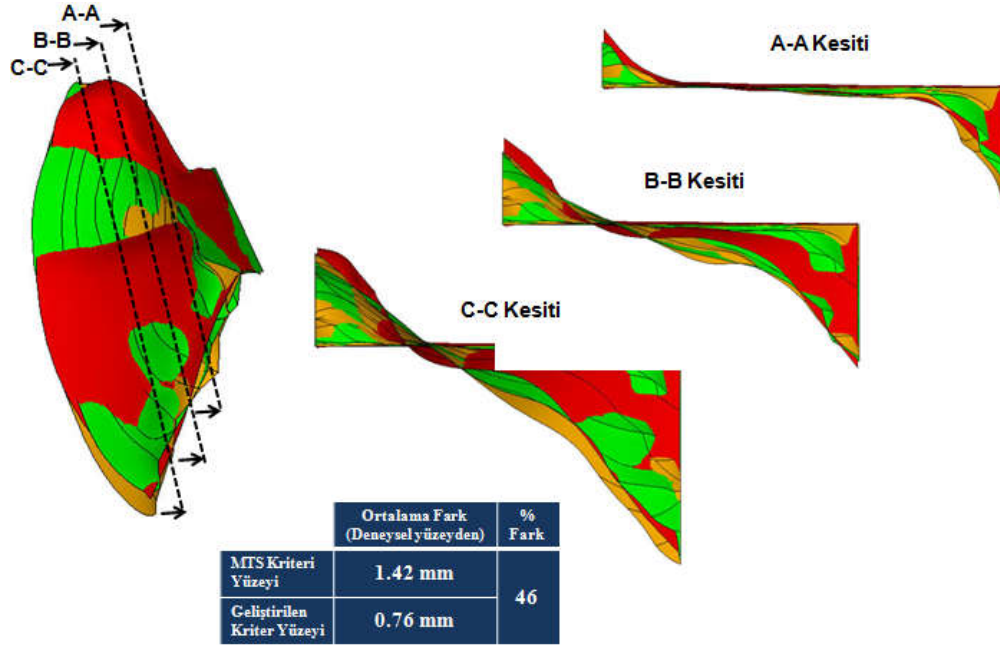


Şekil 4.51. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yüklem açısında, 25 mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri. (Devamı)

Geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 4.52.'de verilmiştir.



Şekil 4.52. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yüklem açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

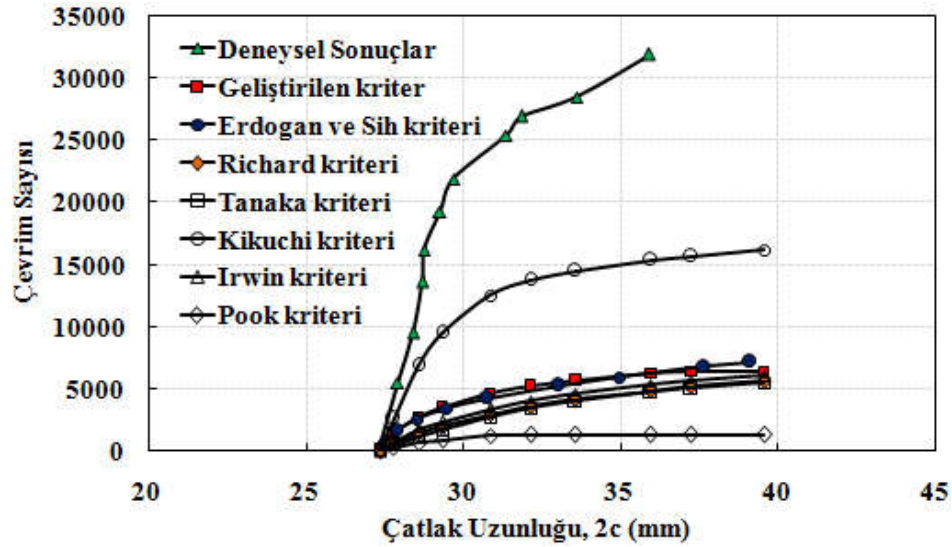


(b)

Şekil 4.52. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yüklem açısı için, kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin ve deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit. (Devamı)

Yüksek oranda mod-II ve mod-III'ün baskın olduğu bu yüklem durumu için geliştirilen kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeyleri, deneysel yüzey ile ortalama 0,76 mm fark ile örtüşmüştür. MTS kriterine göre elde edilen yüzey ile deneysel yüzey arasındaki ortalama fark değeri ise 1,76 mm olarak hesaplanmıştır. Bu yüklem açısında iki kriterin tahminleri arasında büyük fark oluşmuş ve geliştirilen kriter, deneysel sonuçlara MTS kriterinden %46 oranında daha yakın tahminde bulunmuştur.

Şekil 4.53.'te, mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yüklem açısı için, geliştirilen üç boyutlu kriterlere ve literatürdeki mevcut üç boyutlu kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin, deneyden elde edilen ömür verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. Diğer yüklem açıları için elde edilen ömür grafiklerinde olduğu gibi, Kikuchi ve Pook kriteri dışında diğer kriterlerin birbirleri ile yakın tahminde bulunduğu ancak tüm kriterlerin deneysel ömür verisinin çok altında ömür tahmininde bulunduğu görülmektedir. Kikuchi kriteri deneysel ömür verisine en yakın tahminde bulunmasına rağmen, deneysel ömür verisi ile aralarında yaklaşık %100 oranında bir fark vardır.



Şekil 4.53. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yüklem açısı için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verileri ile karşılaştırılması.

Bu bölümde yedi adet sağlama problemi verilmiştir. Ayrıca, Bölüm 3.2.'de verilen ve burada tekrar edilmeyen, geliştirilen iki boyutlu kırılma kriteri kullanılarak, CTS numunesi çatlak ilerleme deneyleri için yapılan ömür tahminlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmaları da sağlama problemleri kapsamında olup, bu problemlere ek olarak düşünülmelidir.

Mod-I/III ve mod-I/II/III çatlak ilerleme testleri için, mevcut ve geliştirilen üç boyutlu kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin, deneysel ömür verilerinin çok uzağında olduğu verilen grafiklerde görülmektedir. Ömür değerlerinde bu denli yüksek farklılıkların oluşmasının en önemli sebebinin, hadde yönünden kaynaklı olabileceği düşünülmüştür. Çünkü, başlangıçta LT hadde yönüne dik doğrultuda olan ön-çatlak, farklı açılardaki mod-I/III ve mod-I/II/III yüklemeleri ile birlikte, yüklemeye açısına bağlı olarak yön değiştirerek farklı doğrultularda ilerlemektedir. Kriterlere göre elde edilen ömür tahminleri, LT hadde yönündeki numuneler için mod-I yüklemesi altında elde edilen "C" ve "n" malzeme sabitlerini kullanarak yapılmıştır. Bu durumun da, kriterlere göre yapılan ömür tahminleri ile deneysel ömür değerleri arasında farklılıklara neden olacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda, hadde yönünün malzeme ömrüne olan etkisi araştırılmış ve detayları bir sonraki bölümde verilmiştir.

## **BÖLÜM 5. HADDE YÖNÜNÜN KIRILMA TOKLUĞU ve ÇATLAK İLERLEME DAVRANIŞINA ETKİSİ (Ayhan, 2016b)**

Bu çalışmada, hadde yönünün kırılma tokluğuna ve çatlak ilerleme davranışına olan etkisini araştırmak için farklı hadde yönüne sahip numuneler işlenerek, kırılma ve çatlak ilerleme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak Al 7075-T651 malzemesi için TS hadde yönüne sahip numunelerin, hem mod-I (CT numunesi) hem de mod-I/II (CTS-Richard numunesi) yükleme durumları için kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar LT hadde yönüne sahip numuneler için gerçekleştirilen testlerin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Daha sonra, TS hadde yönüne sahip numuneler için gerçekleştirilen mod-I ve mod-I/II çatlak ilerleme testleri, aynı şekilde LT hadde yönüne sahip numunelerin test sonuçları ile karşılaştırılarak, LT ve TS hadde yönünün kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme ömrü üzerine etkisi incelenmiştir.

Bu bölümün yazımında, 113M407 numaralı, "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi-Aşama 2" isimli, TÜBİTAK destekli araştırma projesinin sonuç raporundan (Ayhan, 2016b) yararlanılmıştır.

### **5.1. Mod-I ve Mod-I/II Kırılma Tokluğu Test Sonuçları (TS Hadde Yönü)**

Testler, Bursa Teknik Üniversitesi'nde bulunan 100 kN kapasiteli Shimadzu marka hidrolik yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. CT ve CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test düzeneği aşağıda Şekil 5.1.'de sunulmuştur.



Şekil 5.1. CT ve CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden bir kesit.

Literatürde, oda sıcaklığında yapılan kırılma tokluğu ölçümleri için LT ve TS hadde yönleri ile ilgili bir karşılaştırma çalışması bulunamamıştır. Ancak, diğer hadde yönleri için yapılan karşılaştırmalar mevcuttur. Örneğin, Campbell (2008) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, LT ve SL hadde yönlerindeki Al 7075 malzemesi için sırasıyla  $32 \text{ MPa.m}^{1/2}$  ve  $21 \text{ MPa.m}^{1/2}$  kırılma tokluğu değeri elde edilmiştir.

TS hadde yönündeki CT numunesinin, mod-I kırılma tokluğu değerini ( $K_{IC}$ ) belirlemek için 3 adet 25 mm kalınlıktaki CT numunelerine kırılma tokluğu testi gerçekleştirilmiştir. LT hadde yönündeki numuneler için gerçekleştirilen testlerde izlenen test prosedürleri birebir uygulanmış ve burada tekrar edilmemiştir. Testler sonrasında kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü Şekil 5.2.'de verilmiştir.

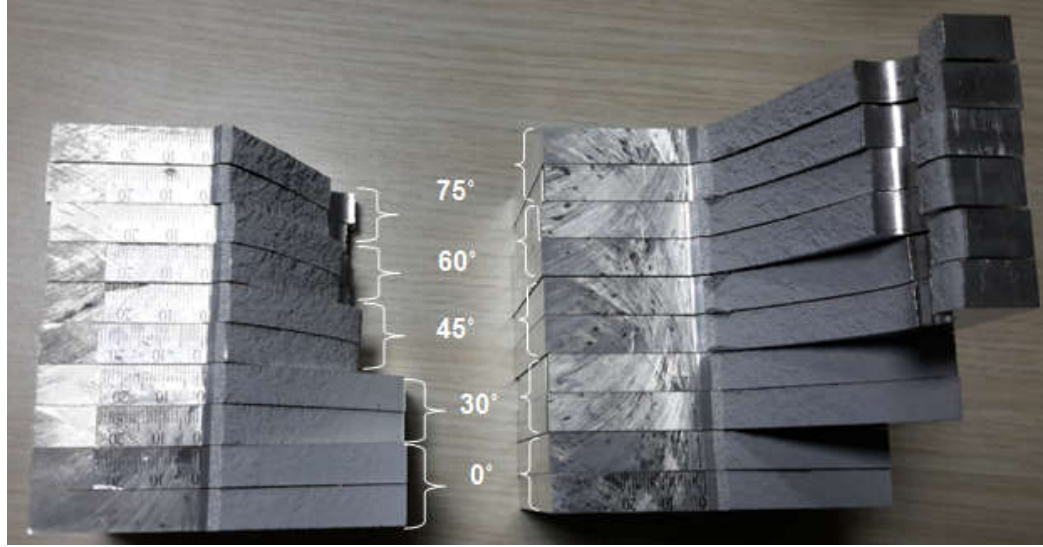


Şekil 5.2. TS hadde yönündeki CT numuneleri için gerçekleştirilen mod-I kırılma tokluğu testleri sonrası kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü.

Gerçekleştirilen testler sonrasında, TS hadde yönündeki CT numuneleri için, kırılma tokluğu değeri ortalama  $30,40 \text{ MPa.m}^{1/2}$  olarak elde edilmiştir. LT hadde yönündeki CT numuneleri için, ortalama  $29,11 \text{ MPa.m}^{1/2}$  kırılma tokluğu değeri elde edilmiş ve sonuçları Bölüm 2.2.2.'de verilmiştir. Bu değerlere göre, TS numunenin kırılma tokluğu, LT numunenin kırılma tokluğundan % 4,4 daha fazladır. Ancak bu farkın anlamlı bir fark olduğunu söylemek oldukça zordur. Çünkü deneylerde kullanılan ölçümler ve kırılma tokluğu hesaplamaları belli oranda hata içermektedir. Özet olarak, testler sonrasında elde edilen veriler ışığında, LT ve TS hadde yönündeki numunelerin kırılma tokluğu değerleri arasında önemli bir fark olmadığı söylenebilir.

TS hadde yönündeki numuneler için farklı açılarda karışık mod-I/II kırılma tokluğu testleri gerçekleştirmek için, LT hadde yönündeki karışık mod-I/II testlerinde kullanılan CTS (Richard) numuneleri 10 mm kalınlıkta işlenmiştir.  $\theta=0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme açılarında ve  $0^\circ$  yükleme açısında ikişer adet, diğer yükleme açılarında üçer adet olmak üzere toplam 14 adet numune için kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında kırılan numunelerin genel görünümü Şekil 5.3.'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, birbirini tekrar eden tutarlı yüzeyler elde edilmiştir.





Şekil 5.3. TS hadde yönündeki CTS numuneleri için gerçekleştirilen mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrası kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü.

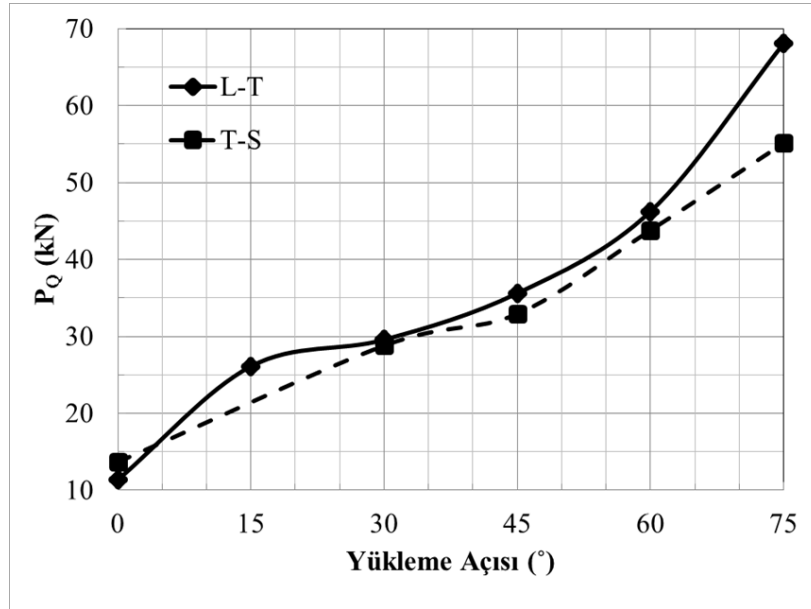
Tablo 5.1.'de ise tüm yükleme açıları için gerçekleştirilen testler sonrasında elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir. Kırık numune yüzeylerinde olduğu gibi birbirini tekrar eden, tutarlı kopma yükleri deneylerden elde edilmiştir.

Tablo 5.1. TS hadde yönündeki CTS numunesi mod-I/II kırılma tokluğu test sonuçları.

Numune No	Yükleme Açısı (°)	Kalınlık (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	Deneysel Kopma Yüğü (kN)
TS-01	0	10,00	45,44	14,37
TS-02	0	10,00	45,31	13,67
TS-03	30	10,00	45,40	29,19
TS-04	30	10,00	45,18	28,52
TS-05	30	10,00	45,03	28,80
TS-06	45	10,00	45,34	33,91
TS-07	45	10,00	45,39	33,76
TS-08	45	10,00	45,24	32,92
TS-09	60	10,00	45,20	42,27
TS-10	60	10,00	45,08	43,80
TS-11	60	10,00	45,27	43,30
TS-12	75	10,00	45,15	51,79
TS-13	75	10,00	45,07	55,12
TS-14	75	10,00	45,20	52,59



LT hadde yönündeki CTS numuneleri için gerçekleştirilen ve sonuçları Bölüm 2.3.3.'te verilen mod-I/II kırılma tokluğu test sonuçları ile TS hadde yönü için elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak Şekil 5.4.'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Mod I-II yüklemesi altında, LT ve TS hadde yönü için elde edilen kırılma yük değerlerinin açıya bağlı olarak karşılaştırılması.

Şekilde görüldüğü gibi, 0° için (Mod I) TS hadde yönüne sahip numune daha yüksek bir yük değerinde kırılırken, 15° ve üstü değerlerde, TS hadde yönüne sahip numune LT numuneye kıyasla daha düşük yük değerlerinde kırılmaktadır. Ayrıca açı değeri arttıkça, yani mod II daha baskın bir yüklemeye haline geldikçe, TS ve LT arasındaki fark açılmaktadır. Ancak genel olarak bakıldığında, kırılma yüklerinin LT ve TS yüklemelerde çok farklı değerler almadığı görülmektedir. Bu durum, mod-I için kırılma tokluğu ölçümlerinden elde edilen sonuca benzer bir sonuçtur.

## 5.2. Mod-I ve Mod-I/II Çatlak İlerleme Test Sonuçları (TS Hadde Yönü)

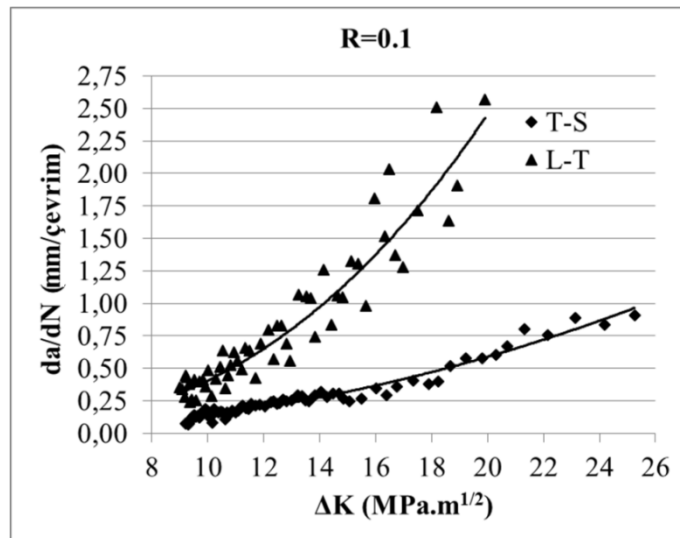
Bu bölümde, Al 7075-T651 malzemesi için TS hadde yönüne sahip numunelerin, hem mod-I, hem de mod-I/II yüklemeye durumları için çatlak ilerleme testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar LT hadde yönüne sahip numuneler için gerçekleştirilen testlerin sonuçları ile kıyaslanmıştır.

TS hadde yönündeki CT numunesi için mod-I çatlak ilerleme testleri gerçekleştirmek için, 25 mm kalınlıkta 4 adet CT numunesi işlenmiştir. LT hadde yönündeki numuneler için gerçekleştirilen testlerde izlenen test prosedürleri birebir uygulanmış ve burada tekrar edilmemiştir. Testler sonrasında kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü Şekil 5.5.'te verilmiştir.



Şekil 5.5. TS hadde yönündeki CT numuneleri için gerçekleştirilen mod-I çatlak ilerleme testleri sonrası kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü.

Elde edilen verilere göre, Paris-Erdoğan bölgesindeki  $\Delta K$ -da/dN eğrisi hem TS hem de LT numuneler için aynı grafikte çizdirilerek Şekil 5.6.'da verilmiştir.



Şekil 5.6. TS ve LT hadde yönleri için elde edilen  $\Delta K$ -da/dN eğrileri.

Şekilde görüldüğü gibi, TS hadde yönünde çatlak, LT hadde yönüne kıyasla, çok daha yavaş olarak ilerlemektedir. Her iki numunede, düşük  $\Delta K$  değerlerinde birbirine yakın çatlak ilerleme hızı gösterirken,  $\Delta K$  arttıkça aralarındaki fark da artmaktadır. Paris-Erdoğan bölgesinde, LT numunesi için  $\Delta K$  değerleri 10 ile 20 MPa.m<sup>1/2</sup> arasında değişirken, TS numunesi için 10 ile 26 MPa.m<sup>1/2</sup> arasında değişmektedir.

Şekilde verilen eğriler üstel fonksiyona fit edildiğinde elde edilen C ve n malzeme sabitleri aşağıdaki Tablo 5.2.'de verildiği gibidir.

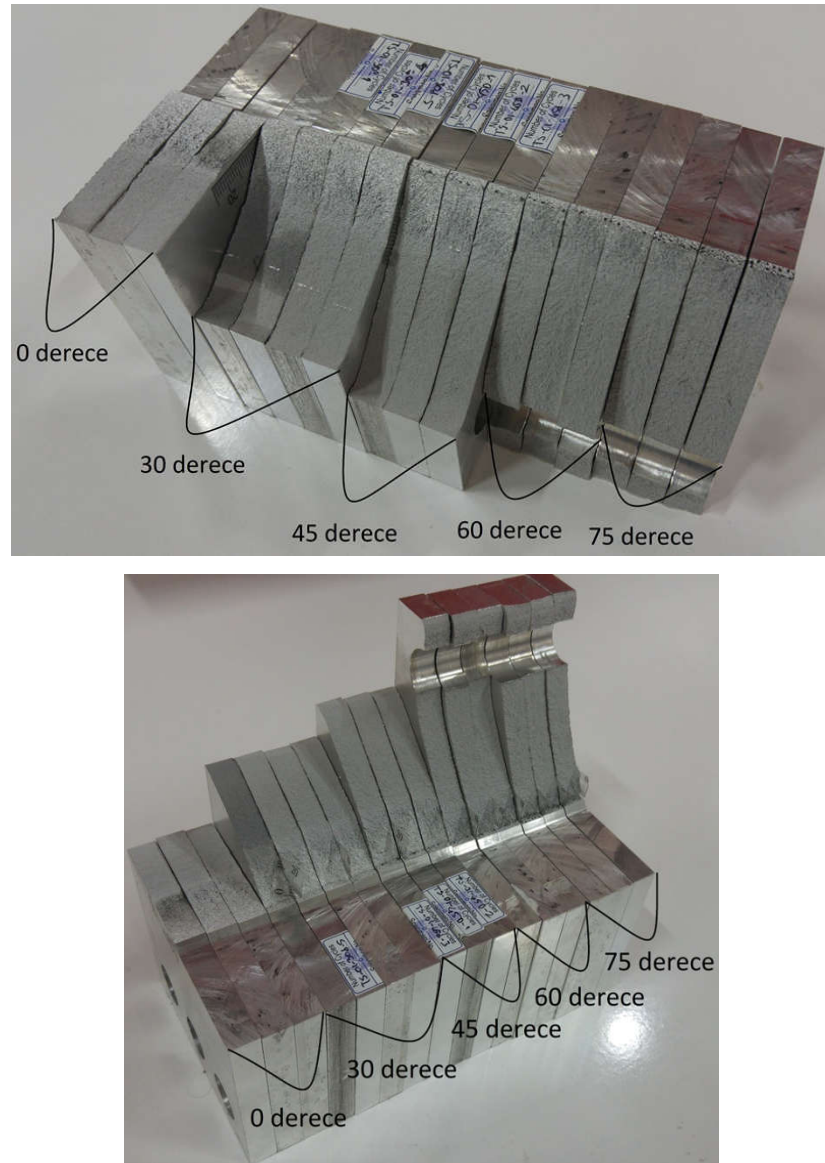
Tablo 5.2. LT ve TS hadde yönleri için Paris-Erdoğan malzeme sabitleri.

	C	n
L-T	1,4619(10) <sup>-6</sup>	2,4392
T-S	1,0446(10) <sup>-6</sup>	2,1147

Aynı malzeme için, korozyon koşulları altında elde edilen da/dN- $\Delta K$  eğrileri, LT, TS ve birçok hadde yönü için Scütze ve arkadaşları (2010) tarafından verilmiştir. LT ve TS arasındaki fark, Şekil 5.6.'da verilen farka yakındır.

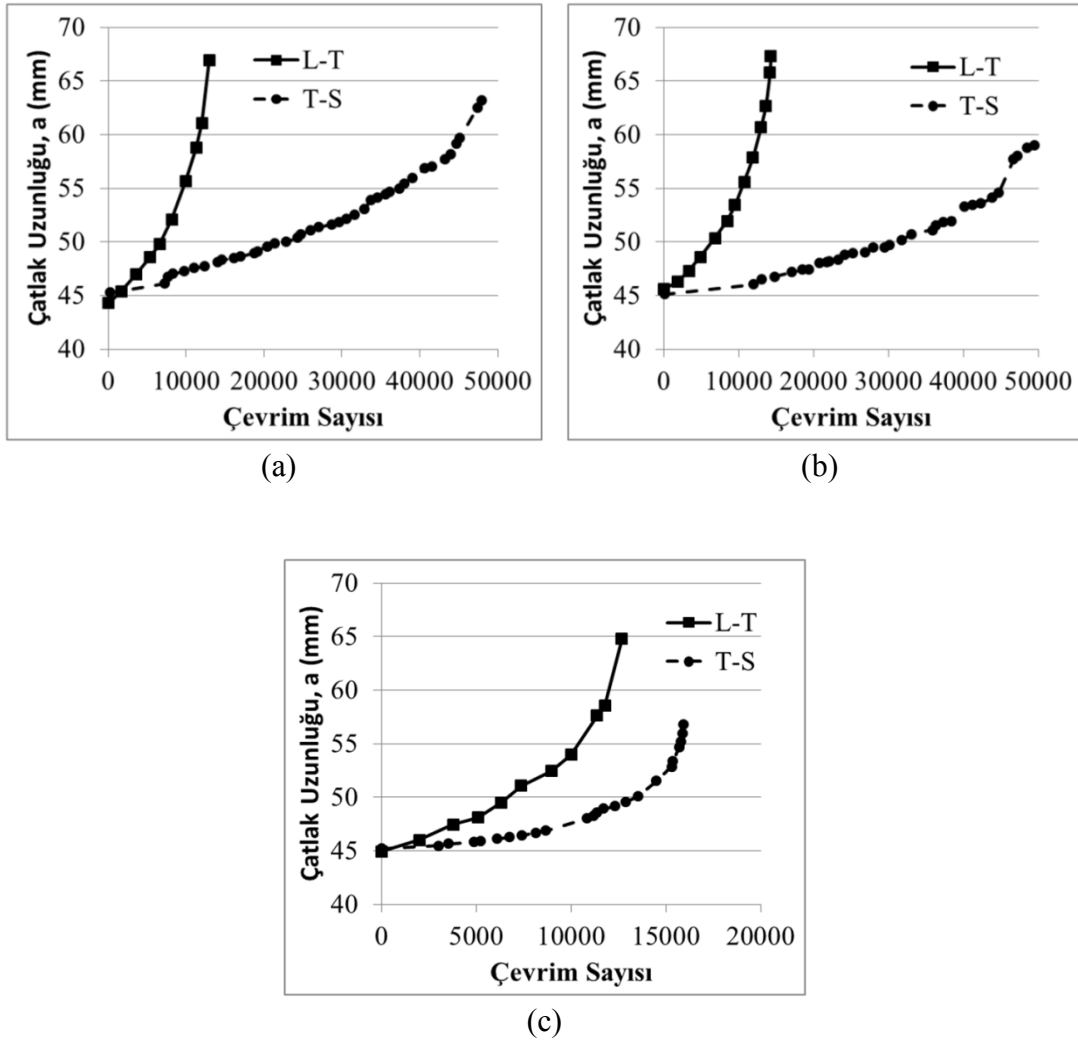
Kırılma toklukları arasında önemli bir fark olmamasına rağmen, çatlak ilerleme hızı davranışları arasında oluşan yüksek farklılıkla ilgili bazı nedenler olabilmekte beraber tanecik yönelmesi bu farklılığın ana nedenlerinden biri olabilir. LT hadde yönündeki numunede çatlak, ince uzun taneleri yarararak ilerlemeye çalışırken, TS hadde yönünde daha ince yapılı ve eş boyutlu taneleri ayırarak büyümeye çalışacaktır. Bu sebeple, LT yönünde daha az bir direnç varken, TS yönünde daha yoğun bir direnç olacaktır. Kırılma tokluğu deneyleri daha fazla yük altında ve daha hızlı bir şekilde gerçekleştiğinden, bahsedilen direnç unsuru olarak ikinci faz parçacıklarının ve tane yönelimlerinin etkisi daha az olacaktır. Bu sebeple kırılma tokluğu değerleri arasında çok büyük bir fark oluşmayacaktır. Ancak, da/dN testlerinde, küçük yük değerlerinde ve tekrarlı olarak uygulanan yüklemelerde, bu ikinci fazlar yeni çatlak üretme ve direnci zayıflatma potansiyeline kavuşacaktır.

TS hadde yönündeki numuneler için farklı açılarda karışık mod-I/II çatlak ilerleme testleri gerçekleştirmek için, CTS (Richard) numuneleri 10 mm kalınlıkta işlenerek,  $\theta=0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yüklemeye açılarında çatlak ilerleme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında kırılan numunelerin genel görünümü Şekil 5.7.'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, birbirini tekrar eden tutarlı yüzeyler elde edilmiştir.



Şekil 5.7. TS hadde yönündeki CTS numuneleri için gerçekleştirilen mod-I/II çatlak ilerleme testleri sonrası kırılan numune yüzeylerinin genel görünümü.

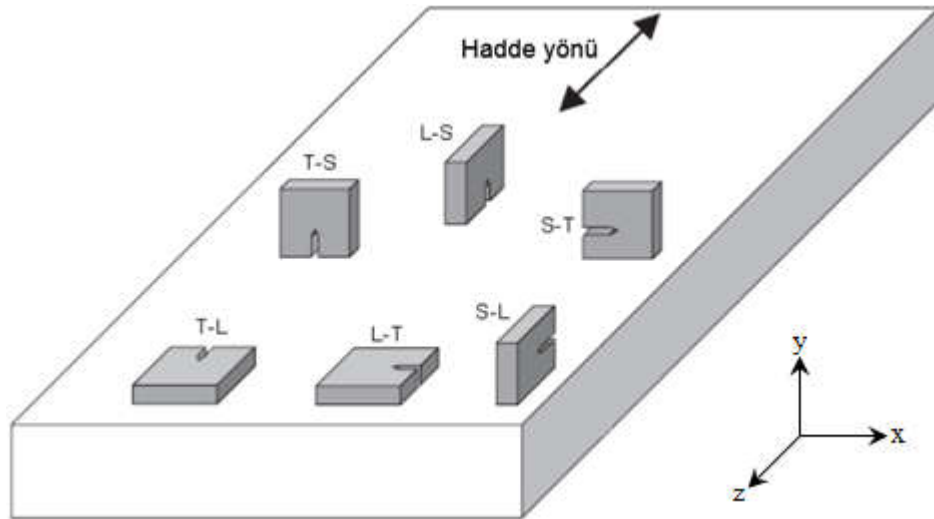
LT ve TS hadde yönlerindeki CTS numuneleri için gerçekleştirilen karışık mod-I/II çatlak ilerleme testlerinde, çatlak ilerleme davranışlarına bakıldığında, mod-I çatlak ilerleme davranışına benzer bir durum söz konusudur. Aşağıda Şekil 5.8.'de,  $\theta=30^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $60^\circ$  lik yükleme açıları için çatlak uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi hem LT, hem de TS hadde yönleri için gösterilmiştir.



Şekil 5.8. TS ve LT hadde yönlerine sahip numunelerin karışık mod-I/II yükleme durumlarında, çatlak uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi (a)  $30^\circ$  (b)  $45^\circ$  (c)  $60^\circ$ .

Şekil 5.8.'de görüldüğü gibi, mod-I yükleme durumuna benzer şekilde, TS hadde yönüne sahip numunede çatlak daha yavaş bir ilerleme göstermektedir. Ancak aradaki fark, yükleme açısı arttığında (mod-II etkisi daha baskın olduğunda) azalmaktadır. Ayrıca açı büyüdüğünde, hem LT, hem de TS yönünde, kritik çatlak uzunluğuna daha az bir çevrimde ulaşılmaktadır.

Mod-I yükleme durumuna ilişkin yapılan yorumlara benzer yorumlar, mod-I/II yükleme için de yapılabilir. Yani, TS yönünde bulunan direnç unsurları daha fazla olduğundan çatlak daha yavaş ilerlemektedir. Ancak, mod-II yükleme durumu daha baskın olmaya başladığında bu direnç azalmaktadır. Aslında bu beklenen bir durumdur ve Şekil 5.8.'den görülmektedir. Çünkü, mod-II yüklemesi, LT hadde yönündeki numunede, çatlağın hadde yönüne ("z" eksenine) paralel ilerlemesini teşvik edecektir (Şekil 5.9). TS hadde yönündeki numunede ise mod-II yüklemesi, çatlağın "x" eksenine paralel ilerlemesini teşvik edecektir. Her ikisi de daha az dirençli yönlerdir. Yükleme açısı arttıkça, TS ve LT hadde yönlerine sahip numunelerde çatlak ilerleme ömür değerlerinin birbirine yaklaşması ise, "z" eksenine ve "x" eksenine paralel ilerlemelerin birbirine yakın olması ile izah edilebilir.



Şekil 5.9. Hadde yönlerine göre numunelerde çatlak yerleşimi.

Hadde yönüne bağlı olarak davranış özetlenecek olursa aşağıdaki listelen hususlar önem kazanmaktadır;

- a. Literatürde, TS hadde yönüne sahip numuneler ile ilgili çok kısıtlı bir veri bulunmaktadır.
- b. Mod-I kırılma tokluğu ve mod-I/II kritik kopma yükü değerleri, LT ve TS hadde yönleri için önemli bir fark göstermemektedir.

- c. Çatlak ilerleme hızı, hem mod-I, hem de karışık mod-I/II yüklemelerinde, TS hadde yönündeki numunelerde daha azdır ve dolayısıyla çatlak ilerlemesine daha dirençlidir. Bu durumun, malzemedeki ikincil faz partiküllerle ve tanelerin çatlak yönüne göre relatif yönelmeleri ile yakından ilgisi olduğu düşünülmektedir.
- d. Mod II yükleme etkisi baskın hale geldiğinde, çatlak ilerleme hızı hem LT hem de TS hadde yönü için artmaktadır ve iki durum birbirine yaklaşmaktadır.

Yukarıda özeti verilen hususlardan da görüldüğü üzere, hadde yönünün çatlak ilerleme davranışı üzerine çok önemli bir etkisi bulunmaktadır. Aynı kalınlıkta, aynı plakadan elde edilen ve aynı yükleme koşulları altında test edilen farklı hadde yönlerine sahip numunelerde, özellikle düşük yükleme açılarında yaklaşık 5 kata varan ömür farklılıkları elde edilmiştir. Bu fark çok yüksek ve dikkate alınması gereken bir parametredir.

### **5.3. Mod-I/III CTT Numunesi Çatlak İlerleme Davranışının LT ve TS Hadde Yönlerine Göre Değerlendirilmesi**

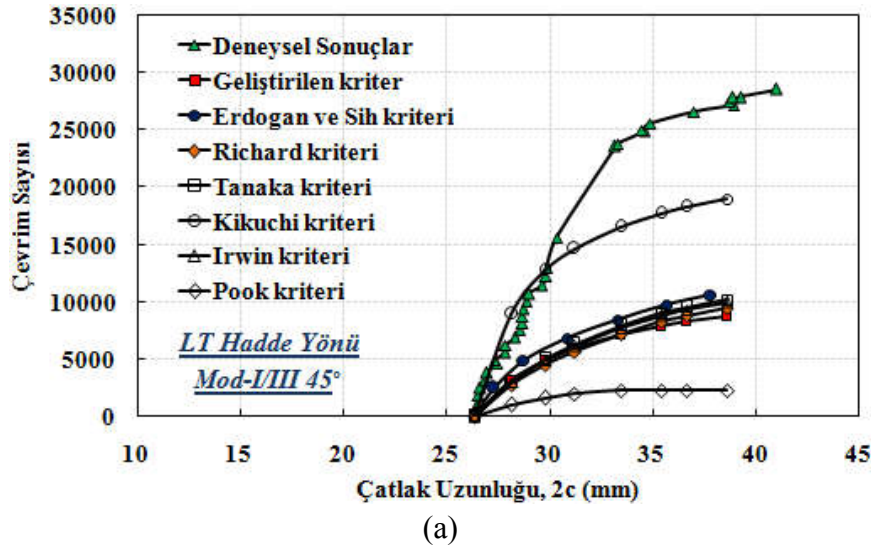
Karışık mod-I/III ve karışık mod-I/II/III çatlak ilerleme analiz ve test sonuçlarında, tez kapsamında geliştirilen kriterlere göre elde edilen çatlak sapma açısı, çatlak profilleri ve çatlak yüzeyleri, deneysel sonuçları ile yakın örtüşmesine ve çatlak ilerleme analizleri sonrasında, kopma anındaki son çatlak profili için, geliştirilen kriterlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri, beklendiği gibi  $K_{IC}$  değerine yakın elde edilmesine rağmen, ömür değerleri arasında çok yüksek farklılıklar elde edilmiş ve bunun da sebebi yukarıda açıklanan hususlar ve verilen sonuçlardan anlaşılmıştır.

Bu bölümde, farklı yükleme açılarında gerçekleştirilen ve sonuçları Bölüm 4.6.'da verilen karışık mod-I/III çatlak ilerleme analizlerinde, hadde yönünün çatlak ilerleme ömrüne olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, çatlak ilerleme analizlerinde kullanılan Paris-Erdoğan denklemine (2.2), Tablo 5.2.'de verilen, TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" malzeme sabitleri kullanılarak, LT hadde yönüne sahip

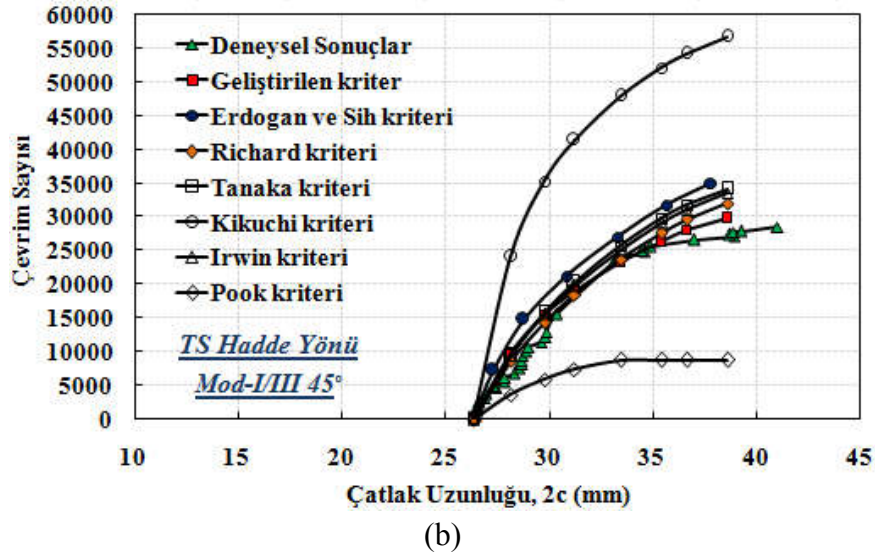


numunelerin çatlak ilerleme ömür tahminleri, mevcut ve geliştirilmiş kriterlere göre yapılarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çünkü, başlangıçta LT hadde yönüne dik doğrultuda olan ön-çatlak, farklı açılardaki mod-I/III yüklemesi ile birlikte, yükleme açısına bağlı olarak yön değiştirmekte ve mod-III yüklemesi baskın hale geldikçe çatlağın ilerleme yönü ST hadde yönüne doğru yaklaşmaktadır (Şekil 5.9). Yani, LT hadde yönündeki numunede çatlak, ince uzun taneleri yararak ilerlemeye çalışırken, mod-III yüklemesi ile birlikte çatlak, daha ince yapılı ve eş boyutlu taneleri ayırarak büyümeye çalışmaktadır. Bu durumda, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinde, tüm yükleme açılarında, LT hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitlerini kullanmak doğru sonuç vermeyecektir.

Şekil 5.10.a'da, mod-I/III 45° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip CTS numunelerinin, LT hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, Şekil 5.10.b'de ise, LT hadde yönüne sahip numunelerin, TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir.



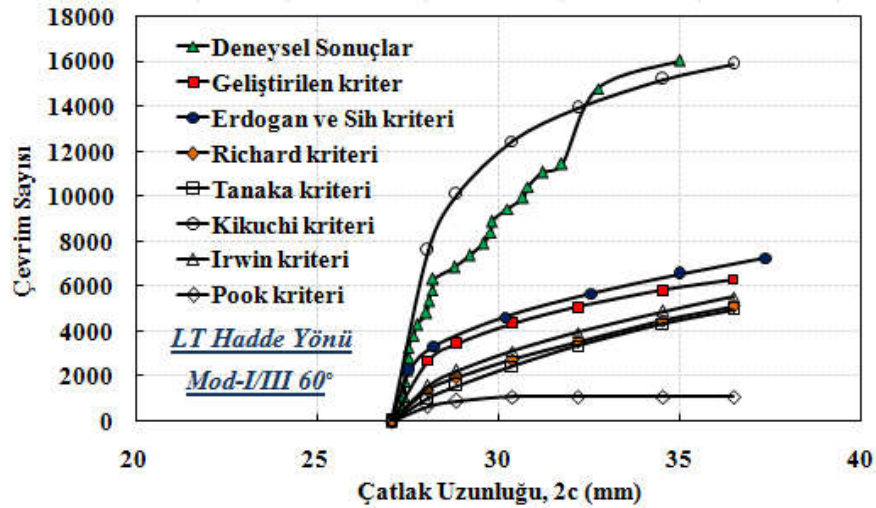
Şekil 5.10. Mod-I/III 45° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönleri için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.



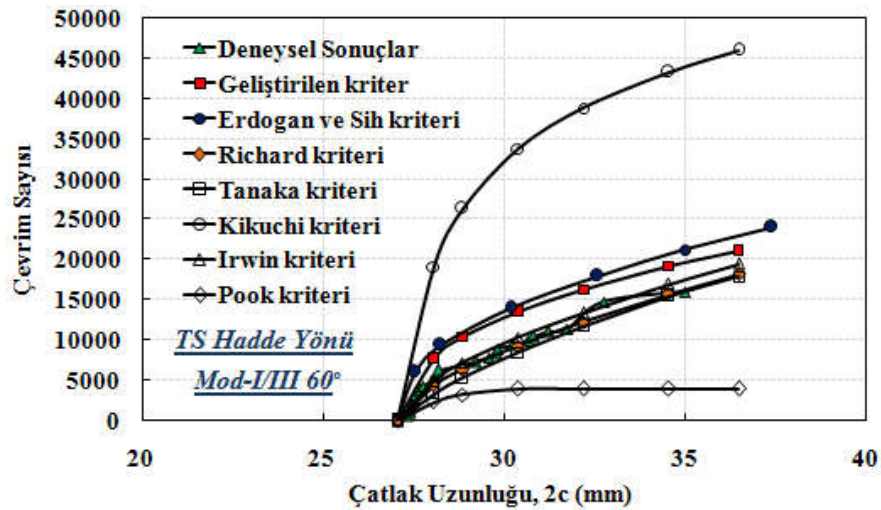
Şekil 5.10. Mod-I/III 45° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönleri için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması. (Devamı)

Şekillerde görüldüğü üzere, başlangıçta LT hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan tahminlerde, mevcut ve geliştirilen kriter ile deneysel sonuçlar arasında çok büyük farklılıklar mevcut iken, aynı analizlerde TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitlerinin kullanılması ile, Kikuchi ve Pook kriteri dışındaki diğer kriterlere ve Denklem (2.30) ve (2.31) de geliştirilen üç boyutlu kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verisine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuç, örtüşen deneysel yüzey ve elde edilen tutarlı eşdeğer GŞF değerlerini doğrular niteliktedir.

Şekil 5.11.'de, aynı yaklaşımla, mod-I/III 60° yükleme durumu için yapılan karşılaştırmalar verilmiştir.



(a)

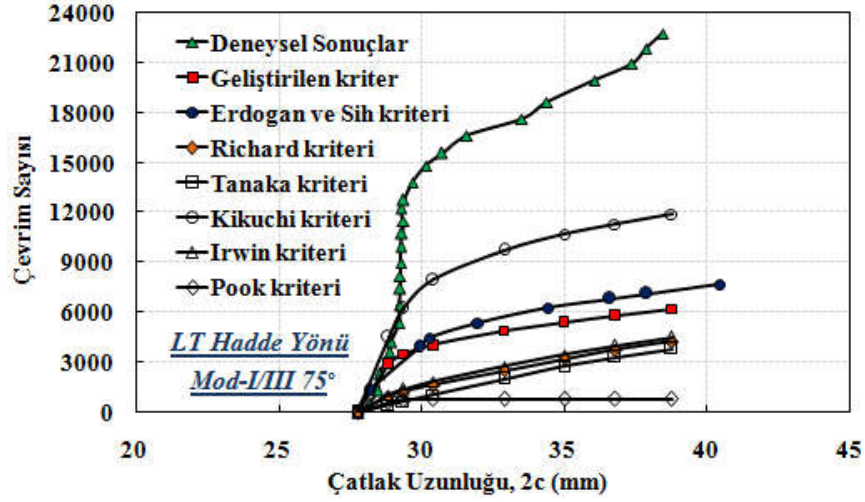


(b)

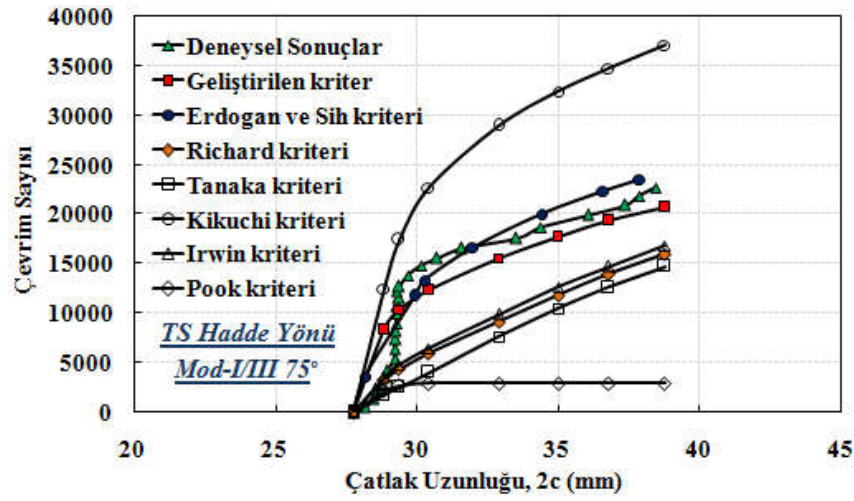
Şekil 5.11. Mod-I/III 60° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönleri için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.

Bu yükleme açısı için de, bir önceki yükleme durumuna benzer bir sonuç elde edilmiştir. LT hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan tahminlerde, mevcut ve geliştirilen kriter ile deneysel sonuçlar arasında çok büyük farklılıklar mevcut iken (Şekil 5.11.a), aynı analizlerde TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitlerinin kullanılması ile, Kikuchi ve Pook kriteri dışındaki diğer kriterlere ve geliştirilen üç boyutlu kritere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür verisine çok yakın olduğu görülmektedir (Şekil 5.11.b).

Şekil 5.12.'de ise, mod-I/III  $75^\circ$  yükleme durumu için yapılan karşılaştırmalar verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.12. Mod-I/III  $75^\circ$  yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönleri için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.

Bu yükleme açısında, LT hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan tahminler ile deneysel ömür verisi arasında oldukça yüksek farklılıkların oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.12.a). Örneğin, geliştirilen kritere göre yapılan ömür tahminine göre malzemenin yaklaşık 6000 çevrim sonrasında kırılacağı öngörülürken, gerçekleştirilen deneysel çalışmada malzeme yaklaşık 23000 çevrim

sonunda kırılmıştır. Ancak, TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan tahminde, geliştirilen kriter ile deneysel ömür verisinin birbiriyle örtüşen bir eğilim gösterdiği Şekil 5.12.b'de görülmektedir. Diğer mod-I/III yükleme açısı sonuçlarında olduğu gibi, Kikuchi ve Pook kriteri, TS hadde yönü için elde edilen ömür tahminlerine göre, deneysel ömür verisine en uzak tahminlerde bulunmuşlardır (Şekil 5.12.b). Deneysel sonuçlara en yakın eğilim, geliştirilen kritere ve Erdoğan ve Sih kriterine göre yapılan tahminlerden elde edilmiştir.

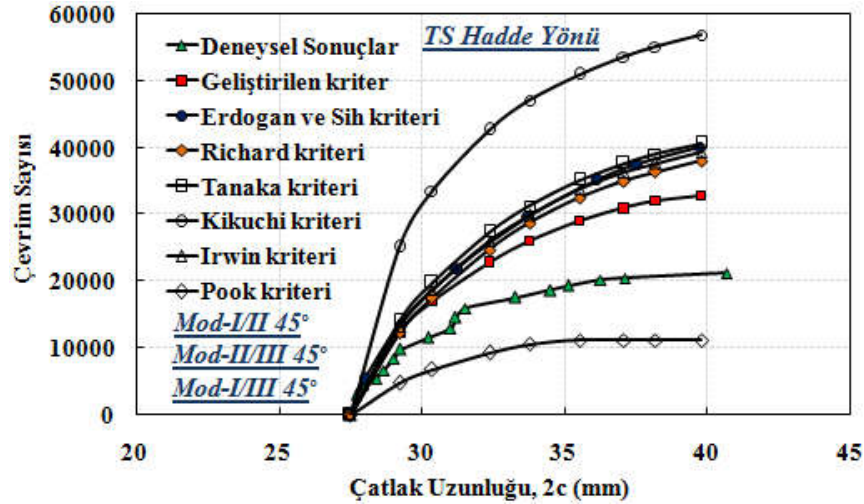
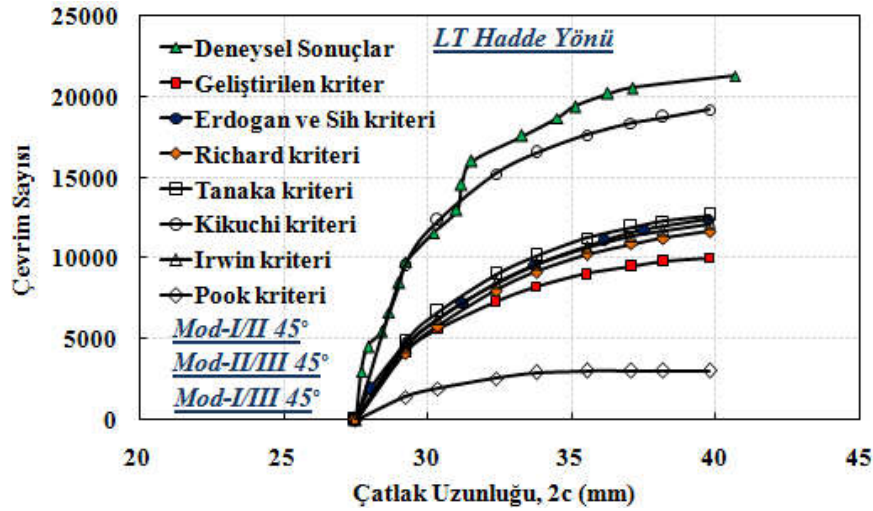
Sonuç olarak, mod-I/III,  $\theta = 45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  yükleme durumları için yapılan karşılaştırmalardan da görüldüğü gibi, LT hadde yönündeki CTS numuneleri için kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinde, TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitlerinin kullanılması ile deneysel ömür verisiyle örtüşen ömür dağılımları elde edilmiştir.

#### **5.4. Mod-I/II/III CTST Numunesi Çatlak İlerleme Davranışının LT ve TS Hadde Yönlerine Göre Değerlendirilmesi**

Mod-I/II/III yükleme durumunda çatlak ilerlemesi, hem mod-I/II, hem de mod-I/III yüklemesinin farklı kombinasyonlarını içermesinden dolayı, mod-I/II ve mod-I/III yükleme durumlarından daha farklı ve karmaşıktır. Herhangi bir açılı yükleme durumunda, baskın olan yükleme tipine göre çatlak ilerlemesinin yönü değiştiği için ve çatlak, üç boyutlu uzayda düzlemsel olmayan bir şekilde ilerlediği için, ömür tahminlerinde tek bir hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitlerinin kullanılması, bir önceki bölümde verilen sonuçlardan da görüldüğü gibi hatalı sonuçların elde edilmesine neden olacaktır.

Bu kapsamda, bir önceki bölümde mod-I/III yükleme durumları için yapılan karşılaştırmalar, farklı yükleme açılarında gerçekleştirilen ve sonuçları Bölüm 4.7.'de verilen, karışık mod-I/II/III çatlak ilerleme analizleri için de yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Şekil 5.13.a'da, mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yükleme açısında, LT hadde yönüne sahip CTST numunelerin, LT hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, Şekil 5.13.b'de ise, LT hadde yönüne sahip numunelerin, TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir.

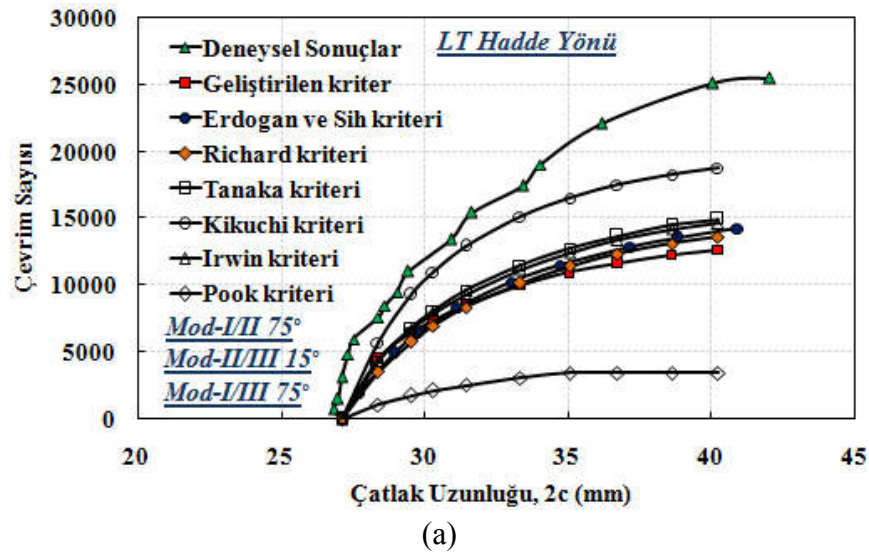


Şekil 5.13. Mod-I/II 45°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 45° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.



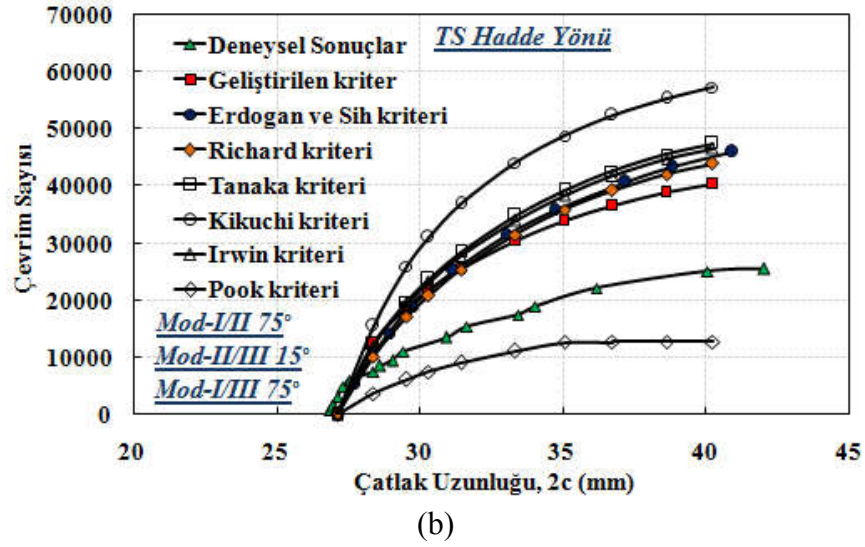
Bu yükleme açısında, LT hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan tahminlerde, Kikuchi kriteri hariç diğer kriterlerin, deneysel ömür verisinin çok altında kaldığı görülmektedir (Şekil 5.13.a). Kikuchi ve Pook kriteri, diğer kriterlerden farklı bir eğilim göstermekte ve Kikuchi kriterine göre yapılan ömür tahmininin, deneysel ömür verisine çok yakın bir eğilimde olduğu görülmektedir. Ömür tahminlerinde, TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitlerinin kullanılması durumunda ise, Pook kriteri dışında mevcut ve geliştirilen kriterlere göre yapılan tahminler, deneysel ömür verisinin çok üstündedir (Şekil 5.13.b). İlk duruma göre, kriterlerin çoğu deneysel sonuca kıyasla, numunenin daha önce kırılacağı tahmininde bulunurken, ikinci duruma göre ise, daha geç kırılacağı tahmininde bulunmaktadırlar.

Şekil 5.14.'te, aynı yaklaşım kullanılarak, mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme durumu için yapılan karşılaştırmalar verilmiştir.



Şekil 5.14. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.

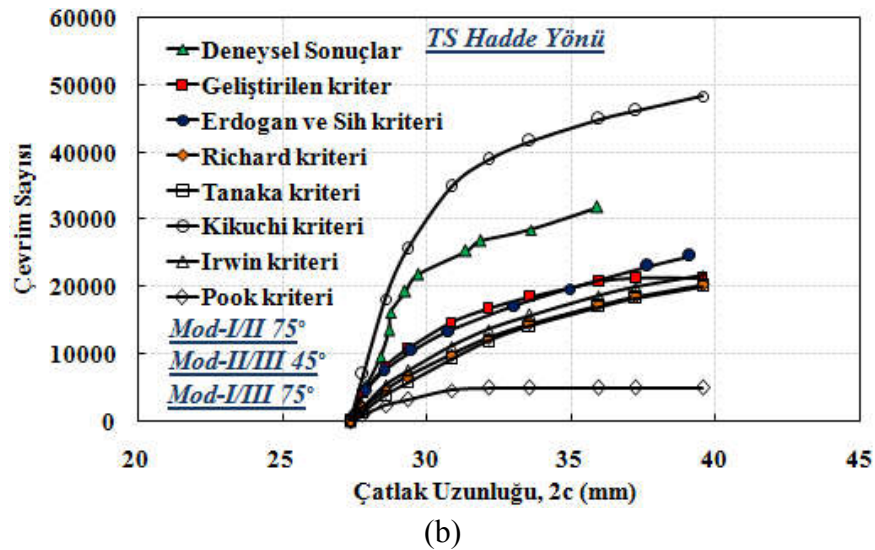
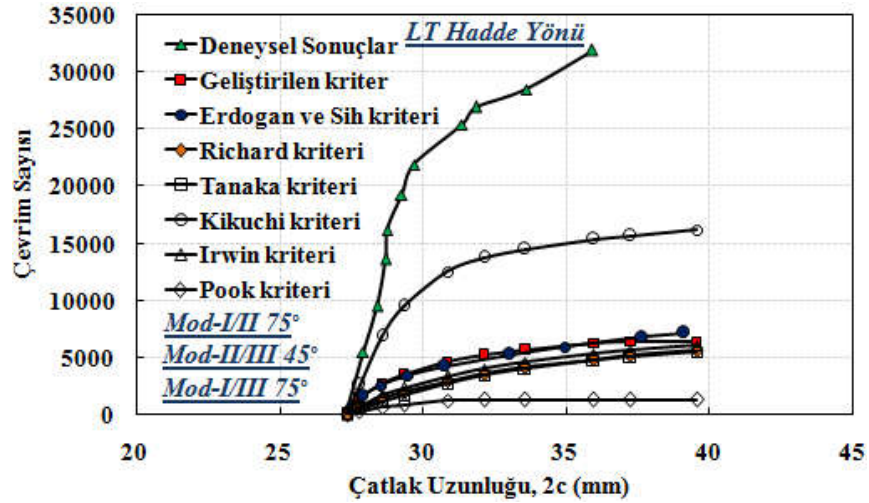




Şekil 5.14. Mod-I/II 75°, mod-II/III 15° ve mod-I/III 75° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması. (Devamı)

Bu yükleme durumunda, bir önceki yükleme durumu için elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yükleme açıları ve bunun sonucunda elde edilen çatlak yüzeyleri (Şekil 4.46.a ve Şekil 4.48.a) birbirinden çok farklı olmasına rağmen, farklı durumlar için benzer ömür eğrilerinin elde edilmesi dikkat çekmektedir.

Son olarak, mod-II/III etkisi 30° daha artırılarak, mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme durumu için yapılan karşılaştırmalar Şekil 5.15.'te verilmiştir. Sadece mod-II/III yükleme açısının 30° değişmesi ile birbirinden çok farklı ömür dağılımları elde edilmiştir. LT hadde yönü için, kriterlere göre yapılan ömür tahminlerinin deneysel ömür değerlerinin çok uzağında olduğu görülmektedir (Şekil 5.15.a). Örneğin geliştirilen kritere göre numunenin yaklaşık 6000 çevrim sonrasında kırılacağı tahmin edilirken, gerçekleştirilen deneyde numune yaklaşık 32000 çevrim sonrasında kırılmıştır. TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan ömür tahminine göre (Şekil 5.15.b) ise numunenin yaklaşık 21000 çevrim sonrası kırılacağı öngörülmektedir.



Şekil 5.15. Mod-I/II 75°, mod-II/III 45° ve mod-I/III 75° yükleme durumunda, LT hadde yönüne sahip numunelerin, (a) LT, (b) TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahminlerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.

Mod-I/III ve mod-I/II/III yükleme durumları için yapılan karşılaştırmalardan da görüldüğü gibi, açılı yükleme durumlarında çatlak, yükleme açısına bağlı olarak yön değiştirdiği için, ömür tahminlerinde kullanılan "C" ve "n" değerleri kritik önem kazanmaktadır. Deneysel ömür verisine yakın tahminlerin yapılabilmesi için çatlakın ilerleme doğrultusu göz önünde bulundurularak, o doğrultu için elde edilen "C" ve "n" değerlerinin kullanılması gerekmektedir.

## **BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER**

Karışık modlu yükler altında üç boyutlu çatlak ilerleme modelleriyle ilgili sınırlı sayıdaki çalışma arasında, mod-I/II ve mod-I/II/III yükleme tipiyle ilgili geliştirilmiş yaygın ve standartlaştırılmış bir modelin olmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, gerçekleştirilen tez çalışmasında, genel üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin doğru bir şekilde modellenmesi ve güvenilir sonuçların elde edilmesi için, karışık modlu çatlak ilerleme konularında farklı yükleme açıları ve yükleme koşulları (Mod-I/II, Mod-I/III, Mod-II/III ve Mod-I/II/III) için numune ve yükleme aparatı tasarımı, karışık modlu çatlak ilerleme analiz ve testlerinin gerçekleştirilmesi, özellikle şu ana kadar yaygın olarak geliştirilmemiş olan mod-II/III yüklemesi altında üç boyutlu düzlemsel olmayan çatlak ilerleme modeli önerilmesi, mevcut çatlak ilerleme modellerinin değerlendirilerek tekrar ele alınması ve mümkünse elde edilen deneysel verileri en doğru şekilde temsil eden yeni/geliştirilmiş çatlak ilerleme modellerinin önerilerek literatüre katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen kazanım ve sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

### **6.1. Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Deney Kabiliyeti Geliştirilmesi**

Karışık modlu yükleme altında düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlaklar için deneysel yöntem ve kırılma kriterleri geliştirmek amacıyla, literatürde benzerleri bulunan iki boyutlu test sistemleri üzerinde, geniş spektrumlu yükleme şartları içeren analiz ve deneysel çalışmalar yapılarak deneysel analiz kabiliyetleri kazanılmıştır. Literatürde bulunmayan iki boyutlu karışık modlu testler için yeni numune ve aparatları tasarlanmış ve doğrulamaları da yapılmıştır. Farklı numune tipleri için gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ile yeni bir iki boyutlu

kırılma ve çatlak ilerleme kriteri geliştirilmiştir. Son olarak, üç boyutlu test sistemleri üzerinde çalışmalar yapılarak literatürde bulunmayan yeni test sistemleri geliştirilerek, elde edilen veriler ile yeni bir üç boyutlu kırılma kriteri geliştirilmiştir.

### **6.2. Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Analiz Kabiliyeti Geliştirilmesi**

Karışık modlu yükleme altında düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlakların ilerleme yüzeyleri ve ömürlerinin doğru tahmin edilmesi için sayısal analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Yapılan analizlerin sonucunda, artırımlı bir şekilde birleştirilerek elde edilen düzlemsel olmayan çatlak yüzeyi ve ilgili ilerleme ömrü tahmin edilebilmektedir. Geliştirilen ve uygulanan analiz yöntemi, gerçekleştirilen birçok kırılma ve çatlak ilerleme deneylerine uygulanarak, kırılma/kopma yükü, çatlak ilerleme ömrü ve çatlak ilerleme yüzey profilinin doğru bir şekilde tahmin edilebildiği gösterilmiştir.

### **6.3. Üç Boyutlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Kabiliyetlerinin Uygulama Problemleri ile Sağlanması**

Literatürden farklı geometri ve yükleme koşullarına maruz, iki ve üç boyutlu karışık mod problemleri bulunmuş ve tez kapsamında geliştirilen iki ve üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme kriterleri literatürdeki problemlere uygulanarak, kırılma/kopma yükü, çatlak ilerleme ömrü ve çatlak ilerleme yüzey profilinin doğru bir şekilde tahmin edilebildiği gösterilerek, kriterlerin doğrulaması yapılmıştır. Ayrıca farklı çaplara sahip silindirik numuneler üretilerek, bu numunelere farklı yükleme koşulları altında karışık mod-I/II/III analiz ve deneyleri gerçekleştirilmiş ve farklı dörtgensel numune tipleri (CTS, CTST, T-numune) kullanılarak geliştirilen kriterler bu deneylere uygulanarak ilave doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Son olarak geliştirilen bu kriterler, tez kapsamında gerçekleştirilen mod-I/III ve mod-I/II/III çatlak ilerleme deneylerine uygulanarak, çatlak ilerleme yüzey profillerinin doğru bir şekilde tahmin edilebildiği gösterilmiştir.

#### 6.4. Hadde Yönünün Kırılma Tokluğu ve Çatlak İlerleme Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Hadde yönünün kırılma tokluğuna ve çatlak ilerleme davranışına olan etkisini araştırmak için, LT ve TS hadde yönüne sahip numuneler işlenerek, mod-I ve mod-I/II kırılma ve çatlak ilerleme testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Mod-I kırılma tokluğu ve mod-I/II kritik kopma yükü değerlerinin, LT ve TS hadde yönleri için önemli bir fark göstermediği görülmüştür. Ancak çatlak ilerleme hızının, hem mod-I, hem de karışık mod-I/II yüklemelerinde, TS hadde yönündeki numunelerde daha az olduğu ve dolayısıyla çatlak ilerlemesine daha dirençli olduğu görülmüştür. Aynı kalınlıkta, aynı plakadan elde edilen ve aynı yükleme koşulları altında test edilen farklı hadde yönlerine sahip numunelerde, özellikle düşük yükleme açılarında yaklaşık 5 kata varan ömür farklılıkları elde edilmiş ve hadde yönünün çatlak ilerleme davranışında çok önemli bir etkisinin olduğu gösterilmiştir. Daha sonra LT ve TS hadde yönü için elde edilen "C" ve "n" sabitleri, LT hadde yönüne sahip numunelerin çatlak ilerleme ömür tahminlerinde kullanılarak, aynı numune için elde edilen ömür tahminleri mod-I/III ve mod-I/II/III yükleme durumları için karşılaştırılmıştır. 6 farklı yükleme durumu için yapılan karşılaştırmaların sonucunda, çatlak, yükleme açısına bağlı olarak yön değiştirdiği için, ömür tahminlerinde kullanılan "C" ve "n" değerlerinin kritik önem kazandığı, dolayısıyla deneysel ömür verisine yakın tahminlerin yapılabilmesi için çatlağın ilerleme doğrultusu göz önünde bulundurularak, o doğrultu için elde edilen "C" ve "n" değerlerinin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

## **BÖLÜM 7. GELECEKTE YAPILABİLECEK BİLİMSEL ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER**

Tez kapsamında, karışık modlu yükler altında bulunan çatlakların yorulma yükü altında ilerleme simülasyonlarının yapılabilmesi veya kritik yük değerlerinin belirlenmesi konularında ciddi gelişmeler elde edilmiştir. Yapılan analizlerde, karışık modlu yükler altındaki çatlak problemlerinde çatlak ilerleme ömür ve profillerinin doğru bir şekilde tahmin edildiği ispat edilmiştir.

Yukarıda özetlenen problemin çözümleri, problem geometrisi, malzeme özellikleri ve etkiyen yükler gibi problemi tanımlayan temel parametrelerin değişkenlik göstermediği belirli (deterministik) şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan pratikte, problemi tanımlayan yukarıda belirtilen ve diğer başka parametrelerin değerleri çatlak içeren yapısal parçanın ömrü boyunca değişkenlik göstermektedir veya tam değeri bilinmemekle beraber belirli limitler arasında değişebilmektedir. Dolayısıyla, bu tür problemlerin çözümü için ihtimale dayalı hesaplamaların da yapılması gerekmektedir. Bunun için ise, problemi tanımlayan ve değişkenlik gösteren tüm parametreler belirli bir sıralamada veya kombinasyonda değiştirilerek deney tasarımı (design of experiments) kapsamında birçok analiz ile elde edilen bir transfer fonksiyonu şeklinde sistem davranışının önce belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için çok sayıda analiz gerekeceği için, analiz için geçen sürelerin mümkün olduğunca kısaltılması yerinde olacaktır. Bu kapsamda, mevcut halde FRAC3D içerisinde eleman rijitlik matrislerinin hesaplanması da OpenMP gibi programlama dili kullanılarak çok işlemcili hesaplamaya müsait hale getirilebilir ve çözüm sürelerinde ciddi oranda kısaltmalar sağlanabilir. Yapılan tüm bu analizler ihtimal hesaplama yöntemleri ile birleştirilerek, çatlak içeren yapıların yapısal sağlık takibi (structural health management) ve prognostik sağlık takibi (prognostic health management) yöntemleri geliştirilebilir. Böylece, özellikle havacılık ve enerji alanlarında kullanılan ve oldukça pahalı ileri teknoloji içeren ve değişken yüklerle

maruz kalan parçaların ihtimale dayalı ömür hesapları yapılarak, emniyetli işletme ve ekonomik sürdürülebilirlik için gerekli olan mekanik ömür tahminlerinde bulunulabilir.



## KAYNAKLAR

- Abelkis, P. R., Potter, J. M. 1979. Service Fatigue Loads Monitoring, Simulation, and Analysis. American Society For Testing And Materials, Race Street, Philadelphia, Pa. 19103.
- Amestoy, M., Bui, H. D., Dang Van, K. 1980. In: Advances in Fracture research. Francois, D. et al. (Eds.), Oxford, pp. 107-113.
- ANSYS Version 12.0. 2009. Ansys Inc., Canonsburg, PA, USA.
- ASTM International. 2013. E399-12, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials.
- ASTM International. E647-13, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.
- Ayhan, A. O. 1998. Nied HF. FRAC3D-Finite element based software for 3-D and generalized plane strain fracture analysis. SRC Technical Report.
- Ayhan, A. O. 1999. Finite element analysis of nonlinear deformation mechanisms in semiconductor packages (Ph.D. Dissertation). Lehigh University.
- Ayhan, A. O. 2002. Nied HF. Stress intensity factors for three-dimensional surface cracks using enriched elements. *Int. J. Numer. Method Engng.*, 54:899-921.
- Ayhan, A. O. 2004. Mixed-mode stress intensity factors for deflected and inclined surface cracks in finite-thickness plates. *Eng. Fract. Mech.*, 71:1059-1079.
- Ayhan, A. O. 2006. Kaya AC, Nied HF. Analysis of three-dimensional interface cracks using enriched finite elements. *Int. J. Fract.*, 142:255-276.
- Ayhan, A. O. 2007a. Mixed-mode stress intensity factors for deflected and inclined corner cracks in finite-thickness plates. *Int. J. Fract.*, 29:305-317.
- Ayhan, A. O. 2007b. Stress intensity factors for three-dimensional cracks in functionally graded materials using enriched finite elements. *Int. J. Solids Struct.*, 44:8579-8599.
- Ayhan, A. O. 2009. Three-dimensional mixed-mode stress intensity factors for cracks in functionally graded materials using enriched finite elements. *Int. J. Solids Struct.*, 46:796-810.
- Ayhan, A. O. 2014. Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi-Aşama 2. Proje No: 113M407, TÜBİTAK 1001, 1. Dönem Gelişme Raporu.
- Ayhan, A. O. 2015. Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi-Aşama 2. Proje No: 113M407, TÜBİTAK 1001, 2. Dönem Gelişme Raporu.

- Ayhan, A. O. 2016a. Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi-Aşama 2. Proje No: 113M407, TÜBİTAK 1001, 3. Dönem Gelişme Raporu.
- Ayhan, A. O. 2016b. Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi-Aşama 2. Proje No: 113M407, TÜBİTAK 1001, Proje Sonuç Raporu.
- Barlow, K. W., Chandra, R. 2005. Fatigue crack propagation simulation in an aircraft engine fan blade attachment. *Int. J. Fatigue*, 27:1661-8.
- BEASY™. Fatigue and crack growth software. <<http://www.beasy.com>>, Erişim Tarihi: 21.09.2016.
- Beretta, S., Carboni, M., Conte, A. L., Regazzi, D., Trasatti, S., Rizzi, M. 2011. Crack growth studies in railway axles under corrosion fatigue: Full-scale experiments and model validation. *Procedia Engineering*, 10, 3650-3655.
- Bordas, S., Moran, B. 2006. Enriched finite elements and level sets for damage tolerance assessment of complex structures. *Eng. Fract. Mech.*, 73:1176–1201.
- Bousquet, A., Marie, S., Bompard, P. 2012. Propagation and arrest of cleavage cracks in a nuclear pressure vessel steel. *Computational Materials Science*, 64, 17-21.
- Bozkurt, M. 2016. “Mod-I/III kırılma ve çatlak ilerleme analiz ve deneyleri ile mevcut üç boyutlu kriterlerin değerlendirilmesi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (yazım aşamasında).
- Buchholz, F. G., Chergui, A., Richard, H. A. 2001. Fracture analyses and experimental results on crack growth under general mixed mode loading conditions. *Advances in Fracture and Damage Mechanics II. Proceedings of the 2nd International Conference*, Milan, Italy, 451-6.
- Buchholz, F. G., Chergui, A., Richard, H. A. 2004. Fracture analyses and experimental results of crack growth under general mixed mode loading conditions. *Engineering Fracture Mechanics*, 71(4), 455-468.
- Campbell, F. C. 2008. *Elements of metallurgy and engineering alloys*. Ohio: ASM International, 238.
- Carter, B. J., Wawrzynek, P. A., Ingraffea, A. R. 2000. Automated 3-D crack growth simulation. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 47:229-53.
- Chang, K. J. 1981. On the maximum strain criterion-a new approach to the angled crack problem. *Engineering Fracture Mechanics*, 14(1), 107-124.
- Citarella, R., Lepore, M., Shlyannikov, V., Yarullin, R. 2014. Fatigue surface crack growth in cylindrical specimen under combined loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 131, 439-453.
- Cowles, B. A. 1996. High cycle fatigue in aircraft gas turbines-an industry perspective. *International Journal of Fracture*, 80(2-3), 147-163.
- DataFit 9. 2015. Oakdale Engineering, Oakdale, PA 15071.
- Demir, O., Sırıç, S., Ayhan, A. O., Lekesiz, H. 2016. Investigation of mixed mode-I/II fracture problems-Part 1: computational and experimental analyses. *Frattura ed Integritá Strutturale*, (35), 330.

- Desimone, H., Beretta, S. 2006. Mechanisms of mixed mode fatigue crack propagation at rail butt-welds. *International journal of fatigue*, 28(5), 635-642.
- Duflot, M. 2008. The extended finite element method in thermoelastic fracture mechanics. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 74:827–847.
- Dugdale, D. S. 1960. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 8 (2): 100–104.
- Earl, R. P. 1957. *Brittle Behavior of Engineering Structures*. National Academy of Sciences, National Research Council, John Wiley & Sons, New York.
- Erdogan, F., Sih, G. C. 1963. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *Journal of basic engineering*, 85(4), 519-525.
- Forman, R. G., Shivakumar, V., Cardinal, J. W., Williams, L. C., and McKeighan, P. C. 2005. *Fatigue Crack Growth Database for Damage Tolerance Analysis*. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- Fulland, M., Sander, M., Kullmer, G., Richard, H. A. 2008. Analysis of fatigue crack propagation in the frame of a hydraulic press. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(3), 892-900.
- Gagnon, M., Tahan, A., Bocher, P., Thibault, D. 2013. A probabilistic model for the onset of High Cycle Fatigue (HCF) crack propagation: Application to hydroelectric turbine runner. *International Journal of Fatigue*, 47, 300-307.
- Griffith, A. A. 1920. The phenomena of flow and rupture in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 221, 163-198.
- Griffith, A. A. 1924. The Theory of Rupture. In: *Proc. of the Int. Congress for Appl.* 55-63.
- Haile, M., Chen, T. K., Sediles, F., Shiao, M., Le, D. 2012. Estimating crack growth in rotorcraft structures subjected to mission load spectrum. *International Journal of Fatigue*, 43, 142-149.
- Hertzberg, R. W. 1996. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Hou, J., Goldstraw, M., Maan, S., Knop, M. 2001. An evaluation of 3D crack growth using ZENCRACK, DSTO-TR-1158. Defense Science and Technology Organization.
- [https://www.alcoa.com/mill\\_products/catalog/pdf/alloy7075techsheet.pdf](https://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7075techsheet.pdf), Erişim Tarihi:05.10.2016.
- <http://www.fracturemechanics.org/history.html>, Erişim Tarihi: 21.09.2016.
- Hu, D., Wang, R., Fan, J., Shen, X. 2012. Probabilistic damage tolerance analysis on turbine disk through experimental data. *Engineering Fracture Mechanics*, 87, 73-82.

- Huang, J. Y., Yeh, J. J., Kuo, R. C., Jeng, S. L., Young, M. C. 2008. Fatigue crack growth behavior of reactor pressure vessel steels in air and high-temperature water environments. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(11), 772-781.
- Hussain, M. A., Pu, S. L., Underwood, J. 1974. Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II. In *Fracture Analysis: Proceedings of the 1973 National Symposium on Fracture Mechanics, Part II*. ASTM International.
- Hyde, T. H., Warrior, N. A. 1993. Mixed-mode stress intensity factors for inclined cracks in round bars. *J. Strain. Anal.*, 28:257–262.
- Irwin, G. 1957. Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate. *Journal of Applied Mechanics*. 24, 361-364.
- Irwin, G. 1958. Fracture, in *Encyclopedia of Physics*. In: Flügge, S. (ed.) *Elasticity and Plasticity*. vol. IV, 551-590.
- Isobe, N., Nogami, S. 2009. Micro-crack growth behavior and life in high temperature low cycle fatigue of blade root and disc joint for turbines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86(9), 622-627.
- Jones, R., Pitt, S., Peng, D. 2008. The generalised Frost–Dugdale approach to modelling fatigue crack growth. *Engineering Failure Analysis*, 15(8), 1130-1149.
- Jones, R., Tamboli, D. 2013. Implications of the lead crack philosophy and the role of short cracks in combat aircraft. *Engineering Failure Analysis*, 29, 149-166.
- Jung, A., Schnell, A. 2008. Crack growth in a coated gas turbine superalloy under thermo-mechanical fatigue. *International Journal of Fatigue*, 30(2), 286-291.
- Kikuchi, M., Wada, Y., Ohdama, C. 2012. Effect of KIII on fatigue crack growth behavior. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 134(4), 041009.
- Kim, J. K., and Shim, D. S. 1998. A Probabilistic Analysis on Variability of Fatigue Crack Growth Using the Markov Chain. *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1135-1142.
- Kirkpatrick, G. W. 1990. *Fretting Fatigue Analysis and Palliatives*. Case Western Reserve University, PhD thesis.
- Koo, J. M., Choy, Y. S. 1991. A new mixed mode fracture criterion: maximum tangential strain energy density criterion. *Engineering fracture mechanics*, 39(3), 443-449.
- Lan, W., Deng, X., Sutton, M. A. 2007. Three-dimensional finite element simulations of mixed-mode stable tearing crack growth experiments. *Eng. Fract. Mech.*, 74:2498–2517.
- Larsen, J. M., Worth, B. D., Annis Jr, C. G., Haake, F. K. 1996. An assessment of the role of near-threshold crack growth in high-cycle-fatigue life prediction of aerospace titanium alloys under turbine engine spectra. *International journal of fracture*, 80(2-3), 237-255.

- Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., Maier, H. J. 2013. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue*, 48, 300-307.
- Liaw, P. K., Yang, C. Y., Palusamy, S. S., Ren, W. 1997. Fatigue crack initiation and propagation behavior of pressure vessel steels. *Engineering fracture mechanics*, 57(1), 85-104.
- Mi, Y., Aliabadi, M. H. 1994. Three-dimensional crack growth simulation using BEM. *Comput. Struct.*, 52(5):871-8.
- Misak, H. E., Perel, V. Y., Sabelkin, V., Mall, S. 2013. Crack growth behavior of 7075-T6 under biaxial tension–tension fatigue. *International Journal of Fatigue*, 55, 158-165.
- Moes, M., Gravouil, A., Belytschko, T. 2002. Non-planar 3D crack growth by the extended finite element and level sets-Part I: Mechanical model. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 53:2549–2568.
- Molent, L., Barter, S. A. 2007. A comparison of crack growth behaviour in several full-scale airframe fatigue tests. *International Journal of Fatigue*, 29(6), 1090-1099.
- Molent, L., Barter, S. A. 2010. The lead fatigue crack concept for aircraft structural integrity. *Procedia Engineering*, 2(1), 363-377.
- Molent, L., Barter, S. A., Wanhill, R. J. H. 2011. The lead crack fatigue lifing framework. *International Journal of Fatigue*, 33(3), 323-331.
- Natsume, M., Hayashi, Y., Akebono, H., Kato, M., Sugeta, A. 2010. Fatigue properties and crack propagation behavior of stainless cast steel for turbine runner of hydraulic power generation. *Procedia Engineering*, 2(1), 1273-1281.
- Newman, Jr. J.C., Anagnostou, E.L., Rusk, D. 2014. Fatigue and crack-growth analyses on 7075-T651 aluminum alloy coupons under constant- and variable-amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, 62; 133–143.
- Nicholas, T., Zuiker, J. R. 1996. On the use of the Goodman diagram for high cycle fatigue design. *International Journal of Fracture*, 80(2-3), 219-235.
- Nicholson, G. L., Davis, C. L. 2012. Modelling of the response of an ACFM sensor to rail and rail wheel RCF cracks. *NDT & E International*, 46, 107-114.
- Nuismer, R. J. 1975. An energy release rate criterion for mixed mode fracture. *International journal of fracture*, 11(2), 245-250.
- Oliver, J., Huespe, A. E., Sanchez, P. J. 2006. A comparative study on finite elements for capturing strong discontinuities: E-FEM vs X-FEM. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 195:4732–4752.
- Padula Li, S. A., Shyam, A., Ritchie, R. O., Milligan, W. W. 1999. “High frequency fatigue crack propagation behavior of a nickel-base turbine disk alloy”. *International journal of fatigue*, 21(7), 725-731.

- Pang, H. T., Reed, P. A. S. 2003. Fatigue crack initiation and short crack growth in nickel-base turbine disc alloys—the effects of microstructure and operating parameters. *International Journal of Fatigue*, 25(9), 1089-1099.
- Peng, D., Jones, R., Constable, T. 2012a. A study into crack growth in a railway wheel under thermal stop brake loading spectrum. *Engineering Failure Analysis*, 25, 280-290.
- Peng, D., Jones, R., Constable, T., Lingamanaik, S. N., Chen, B. K. 2012b. The tool for assessing the damage tolerance of railway wheel under service conditions. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 57(1), 1-13.
- Peng, D., Jones, R., Constable, T. 2013. An investigation of the influence of rail chill on crack growth in a railway wheel due to braking loads. *Engineering Fracture Mechanics*, 98, 1-14.
- Pook, L. P. 1980. In: *Fracture and Fatigue: Elasto-Plasticity, Thin Sheet and Micromechanism Problems*, Radon, J.C. (Ed.) Pergamon Press, Oxford. pp. 143-153.
- Pook, L. P. 1985. *Multiaxial Fatigues*, pp. 249-263 In: Miller, K.J., Brown, M.W. (Eds.), ASTM STP853, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Pook L. P. 1989. The significance of mode I branch cracks for mixed mode fatigue crack growth threshold behaviour. In: Brown MW, Miller KJ (eds) *Biaxial and multiaxial fatigue*. Mech. Eng. Publ. London. 247-263.
- Prasad, K., Babu, N. C., Kumar, V. 2012. Effect of frequency and orientation on fatigue crack growth behavior of forged turbine disc of IN 718 superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 544, 83-87.
- Price, R. J., Trevelyan, J. 2014. Boundary element simulation of fatigue crack growth in multi-site damage. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 43, 67-75.
- Rannou, J., Gravouil, A., Baidetto-Dubourg, M. C. 2009. A local multigrid X-FEM strategy for 3-D crack propagation. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 77:581–600.
- Rannou, J., Limodin, N., Rethore, J., Gravouil, A., Ludwig, W., Baidetto-Dubourg, M. C., Buffiere, J. Y., Combescure, A., Hild, F., Roux, S. 2010. Three dimensional experimental and numerical multiscale analysis of a fatigue crack. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 199:1307–1325.
- Rayas, M., Darwish, S. 2006. *Effect of Heat Treatment on Fatigue and Toughness Properties of Steel*, King Saud University College of Engineering Research Center.
- Reuter, W. G., Underwood, J. H., Newman, J. C. 1995. *Fracture Mechanics*. West Conshohocken: ASTM, 26- 662.
- Rice, J. R. 1968. A Path Independent Integrals and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. *Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME*. 35:379-386.
- Richard, H. A. 1985. *Fracture mechanical predictions for cracks with superimposed normal and shear loading*. Düsseldorf: VDI-Verlag [in German].

- Richard, H. A. 1987. In: Structural failure, product liability and technical insurance. Rossmanith (Ed.), Inderscience Enterprises Ltd., Genf.
- Richard, H. A., Schöllmann, M., Fulland, M., Sander, M. 2001. Experimental and numerical simulation of mixed mode crack growth. In: Proc of 6th int conf of biaxial/ multiaxial fatigue and fracture, vol. 2, p. 623–30.
- Richard, H. A. 2003. Theoretical crack path determination. Int. Conf. on Fatigue Crack Paths, Parma (Italy).
- Richard, H. A., Sander, M., Fulland, M. 2003. Fatigue Crack Paths under Complex Loading. International Conference on Fatigue Crack Paths, FCP2003, Parma, Italy, 18-20 September.
- Richard, H. A., Fulland, M., and Sander, M. 2004. Theoretical crack path prediction. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 28, 3–12, 2004.
- Richard, H. A., Fulland, M., Sander, M., Kullmer, G. 2005. Fracture in a rubber-sprung railway wheel. Engineering Failure Analysis, 12(6), 986-999.
- Richard, H. A., Sander, M., Fulland, M., Kullmer, G. 2008. Development of fatigue crack growth in real structures. Engineering Fracture Mechanics, 75(3), 331-340.
- Richard, H.A., Sander, M. 2011. Investigations on fatigue crack growth under variable amplitude loading in wheelset axles. Engineering Fracture Mechanics, 78, 754–763.
- Richard, H. A., Schirmeisen, N., Eberlein, A. 2012. Experimental investigations on mixed-mode-loaded cracks. The 4th International Conference on Crack Paths, 19-21 September, Gaeta, Italy, 219-226.
- Richard, H.A., Sander, M., Schramm, B., Kullmer, G., Wirxel, M. 2013. Fatigue crack growth in real structures. International Journal of Fatigue, 50, 83–88.
- Richard, H. A., Schramm, B., Schirmeisen, N. H. 2014. Cracks on mixed mode loading—theories, experiments, simulations. International Journal of Fatigue, 62, 93-103.
- Riddell, W. T., Ingraffea, A. R., Wawrzynek, P. A. 1997. Experimental observations and numerical predictions of three-dimensional fatigue crack propagation. Eng. Fract. Mech., 58(4):293-310.
- Rikards, R., Buchholz, F. G., Wang, H., Bledzki, A. K., Korjakin, A., Richard, H. A. 1998. Investigation of mixed mode I/II interlaminar fracture toughness of laminated composites by using a CTS type specimen. Engineering Fracture Mechanics, 61(3), 325-342.
- Ritter, S., Seifert, H. P. 2008. Effect of corrosion potential on the corrosion fatigue crack growth behaviour of low-alloy steels in high-temperature water. Journal of Nuclear Materials, 375(1), 72-79.
- Salam, I., Tauqir, A., Khan, A. Q. 2002. Creep-fatigue failure of an aero engine turbine blades. Engineering Failure Analysis, 9(3), 335-347.
- Sander, M., Richard, H. A. 2003. Lifetime predictions for real loading situations—concepts and experimental results of fatigue crack growth. International journal of fatigue, 25(9), 999-1005.

- Sander, M., Richard, H. A. 2005. Finite element analysis of fatigue crack growth with interspersed mode I and mixed mode overloads. *International Journal of Fatigue*, 27(8), 905-913.
- Sander, M., Richard, H. A. 2006. Experimental and numerical investigations on the influence of the loading direction on the fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*, 28(5), 583-591.
- Sander, M. 2015. Comparison Of Fatigue Crack Growth Concepts With Respect To Interaction Effects. Ecf15.
- Schütze, M., Wieser, D., Bender, R. 2010. Corrosion resistance of aluminium and aluminium alloys. Frankfurt: John Wiley & Sons.
- Schöllmann, M., Kullmer, G., Fulland, M., Richard, H. A. 2001. A new criterion for 3D crack growth under mixed-mode (I+ II+ III) loading. In *Proceedings of the 6th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture*, Lisbon, Portugal, June (pp. 25-28).
- Schöllmann, M., Richard, H. A., Kullmer, G., Fulland, M. 2002. A new criterion for the prediction of crack development in multiaxially loaded structures. *International Journal of Fracture*, 117(2), 129-141.
- Schöllmann, M., Fulland, M., Richard, H. A. 2003. Development of a new software for adaptive crack growth simulations in 3D structures. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(2), 249-268.
- Seifert, H. P., Ritter, S. 2008. Corrosion fatigue crack growth behaviour of low-alloy reactor pressure vessel steels under boiling water reactor conditions. *Corrosion Science*, 50(7), 1884-1899.
- Shlyannikov, V. N., Iltchenko, B. V., Stepanov, N. V. 2001. Fracture analysis of turbine disks and computational-experimental background of the operational decisions. *Engineering Failure Analysis*, 8(5), 461-475.
- Sih, G. C., Macdonald, B. 1974. Fracture mechanics applied to engineering problems-strain energy density fracture criterion. *Engineering Fracture Mechanics*, 6(2), 361-386.
- Sih, G. C. 1974. Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems. *International Journal of fracture*, 10(3), 305-321.
- Sriharsha, H. K., Pandey, R. K., Chatterjee, S. 1999. Towards standardising a sub-size specimen for fatigue crack propagation behaviour of a nuclear pressure vessel steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 64(5), 607-624.
- Steigemann, M., Specovius-Neugebauer, M., Fulland, M., Richard, H. A. 2010. Simulation of crack paths in functionally graded materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(11), 2145-2157.
- Svoboda, J. 1982. Fatigue and Fracture Toughness of Five Carbon or Low Silloy Cast Steels at Room or Low Climate Temperature. Carbon and Low Alloy Steel Technical Research Committee Steel Founders' Society of America, (94A).
- Tanaka, K. 1974. Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis. *Engineering Fracture Mechanics*, 6(3), 493-507.



- Uslu, M., Demir, O., Ayhan, A.O. 2014. Surface cracks in finite thickness plates under thermal and displacement-controlled loads-Part 1: Stress intensity factors. *Engineering Fracture Mechanics*, 115:284–295.
- Wang, H., Buchholz, F. G., Richard, H. A., Jägg, S., Scholtes, B. 1999. Numerical and experimental analysis of residual stresses for fatigue crack growth. *Computational Materials Science*, 16(1), 104-112.
- Wei, Z., Deng, X, Sutton, M. A., Yan, J., Cheng, C. S., Zavattieri, P. 2011. Modeling of mixed-mode crack growth in ductile thin sheets under combined in-plane and out-of-plane loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 78:3082–3101.
- Wells, A. A. 1961. Unstable crack propagation in metals: cleavage and fast fracture. *Proceedings of the Crack Propagation Symposium*. Vol. 1:210.
- Xiang, Y., Lu, Z., Liu, Y. 2009. Crack growth-based fatigue life prediction using an equivalent initial flaw model. Part I: Uniaxial loading. *International Journal of Fatigue*.
- Xiaoping, H., Moan, T., Weicheng, C. 2008. An engineering model of fatigue crack growth under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue* 30:2–10.
- Yee, R. K., Sidhu, K. S. 2005. Innovative laser heating methodology study for crack growth retardation in aircraft structures. *International journal of fatigue*, 27(3), 245-253.
- Zencrack, <http://www.zentech.co.uk>, Erişim Tarihi: 05.10.2016.
- Zentech, Zencrack. 2008. 3D fracture mechanics simulation. UK: Zentech Int. Ltd.
- Zhang, H., Toda, H., Qu, P. C., Sakaguchi, Y., Kobayashi, M., Uesugi, K., Suzuki, Y. 2009. Three-dimensional fatigue crack growth behavior in an aluminum alloy investigated with in situ high-resolution synchrotron X-ray microtomography. *Acta Mater.*, 57:3287–3300.
- Zhao, T. 2008. Fatigue Of Aluminum Alloy 7075-T651. University of Nevada, Reno, PhD thesis, December.
- Zhao, J., Guo, W. 2012. Three-parameter  $K-T-T_z$  characterization of the crack-tip fields in compact-tension-shear specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 92, 72-88.
- Zhuang, W., Barter, S., Molent, L. 2007. Flight-by-flight fatigue crack growth life assessment. *International Journal of Fatigue*, 29(9), 1647-1657.
- Zhuang, W., Molent, L. 2010. Analytical study of fatigue crack growth in AA7050 notched specimens under spectrum loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(11), 1884-1895.

## ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan DEMİR, 12.07.1986'da Konya'nın Çumra ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Konya'da tamamladı. 2005 yılında, Konya Lisesi Yabancı Dil Ağırlıklı programdan mezun oldu. 2005 yılında başladığı Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2009 yılında bitirdi. Aynı yıl içerisinde Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2010 yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nde, Araştırma Görevlisi olarak göreve başladığı için, yüksek lisans eğitimine Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nde devam ederek 2012 yılında tamamladı. Aynı yıl içerisinde Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde doktora eğitimine başladı. Halen Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.