

Kırılma ve atlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 2

Program Kodu: 1001

Proje No: 113M407

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Ali Osman AYHAN

Araştırmacılar:

Yrd. Doç. Dr. Sedat İRİ

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ

Bursiyerler:

Oğuzhan DEMİR

M. Faruk YAREN

Hakan DÜNDAR

Mürsel DERYA

Emre KURT

Murat BOZKURT

AĞUSTOS 2016

SAKARYA

ÖNSÖZ

2008-2011 yılları arasında yapılan ve tamamlanan 108M283 nolu ve “Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 1” adlı birinci aşama projesinde, lisansüstü çalışmaları boyunca Dr. Ali Osman Ayhan tarafından geliştirilen üç boyutlu kırılma analiz programı FRAC3D mod-I yüklemesi altında levha ve silindir gibi basit geometrilere yorulmalı çatlak ilerleme problemlerine uygulanarak doğrulamaları yapılmış ve analizlerin doğru, tutarlı ve daha verimli bir şekilde yapılabilmesi için kullanıcı ara yüzü geliştirilmiştir. Birinci aşama projesinin devamı niteliğinde olan 113M407 nolu ve “Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 2” adlı bu projede ise, mod-I yorulma çatlak ilerleme analiz kabiliyetlerinin enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma gibi önemli alanlarda karşılaşılan ve daha karmaşık geometrilere sahip olan mühendislik problemlerine uygulanması ve doğrulanması, üç boyutlu ve karışık modlu yüklemeler altındaki kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için deneysel analiz, sayısal analiz kabiliyetleri ve daha doğru kırılma kriterlerinin geliştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, proje kapsamında elde edilen bilimsel gelişmeler için kullanıcı ara yüzünün güncellenmesi de sağlanmıştır. 108M283 ve 113M407 numaralı her iki proje de finansal olarak TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Yüksek derecede detay içeren modelleme ve deneysel analizlerin yapıldığı proje çalışmalarımızın bütüncül bir ortam içerisinde gerçekleştirebilmesi için, Sakarya Üniversitesi'nin desteği ile Hesaplamalı ve Deneysel Kırılma Mekaniği Laboratuvarı kurulmuş olup (<http://www.cefmlab.sakarya.edu.tr>), proje ekibimiz çalışmalarını laboratuvar ortamında gerçekleştirmiştir. Proje kapsamındaki bazı deneysel çalışmalar da, Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Havacılık ve Uzay teknolojileri için önemli bir alt alan olan “Kırılma Mekaniği” alanında güncel ve yeni üç-boyutlu modelleme, simülasyon ve deneysel tekniklerin kullanıldığı, oldukça geniş kapsamlı projenin bu sonuç raporu içeriğinde, gelecekte benzer çalışmaların da diğer araştırmacılar tarafından milli olarak yapılabilmesi ve daha da ilerletilebilmesi için gerekli detaylardan sakınılmamıştır.

Proje çalışmalarının finansal olarak desteklenmesinden dolayı TÜBİTAK'a, proje çalışmaları boyunca idari ve altyapı desteklerini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi ve Bursa Teknik Üniversitesi yönetimi ve personeline, projemize katkılarından dolayı TUŞAS ve TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.'ne içtenlikle teşekkür ederiz.

Proje çalışmalarımızın ve çıktılarının faydalar getirmesi dileklerimizle...

İçindekiler

ÖNSÖZ	ii
İçindekiler	iii
Tablo Listesi	viii
Şekil Listesi	xii
Özet	xxxiii
Abstract	xxxiv
1. GİRİŞ	1
2. ÜÇ-BOYUTLU KIRILMA MEKANİĞİ VE FCPAS – AŞAMA 2	4
2.1 Literatür Özeti	4
2.2 FCPAS – AŞAMA 2: Amaçlar, Yöntem Özeti, Avantajlar ve Kazanımlar	7
2.2.1 FCPAS – AŞAMA 1 Kabiliyetlerinin Pratik Uygulamalarla Sağlaması	7
2.2.2 Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Deney Kabiliyeti Geliştirilmesi	8
2.2.3 Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Analizi Kabiliyeti ve Kriter Geliştirilmesi	8
2.2.4 FCPAS – Aşama 2 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Geliştirilmesi ve Güncellemeler	9
2.2.5 FCPAS – Aşama 2 Avantajlar ve Kazanımlar	9
3. FCPAS – AŞAMA 2: GEREÇ VE YÖNTEM.....	11
3.1 FCPAS – AŞAMA 1 Kabiliyetlerinin Pratik Uygulamalarla Sağlaması.....	11
3.1.1 UIC 60 Ray Profili Çatlak İlerleme Analizleri	13
3.1.1.1 ANSYS ile UIC 60 Ray Modeline Makro İle Çatlak Yerleştirilmesi ve Sonlu Elemanlar Model Bilgilerinin Alınması	15
3.1.1.2 Geo Dosyasının Oluşturulması	18
3.1.1.3 Run Dosyasının Oluşturulması.....	19
3.1.1.4 FCPAS Çözücüsü FRAC3D ile Kırılma Analizi	19
3.1.1.5 Çatlağın İlerletilmesi ve Sonraki Çatlak Profilinin (Crack Front) Modellenmesi	19
3.1.1.6 Analiz sonuçları.....	20
3.1.2 Enerji Santralinde Kullanılan Boru Üzerinde Yüzey Çatlak İlerleme Analizi	22
3.1.3 Helikopter Kaldırma Çerçeve (Lift Frame) Parçası Çatlak İlerleme Analizi	25

3.1.4 Eksenel Çeki Yüğü Altında Çoğul Çatlakların Analizi	27
3.1.4.1 Çoklu Çatlak Numunesinin Kırılma Analizi ve Çatlak İlerleme Simülasyonu ...	27
3.1.4.2 Problem Tanımı	28
3.1.4.3 FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 Çatlaklı Numuneler için Kırılma Analizleri	29
3.1.4.4 FCPAS ile 4 ve 8 Çatlaklı Numuneler için Çatlak İlerleme Analizleri.....	34
3.1.4.5 FCPAS Parametreleri, Çözüm Aşaması, Çatlak İlerlemesi ve Elips Uydurma	35
3.1.4.6 Analiz Sonuçlarının Çizdirilmesi (Plot Edilmesi)	38
3.1.5 Eksenel Çeki Yüğü Altında İki Yüzey Çatlağı Analizi.....	43
3.1.6 Bağlantı Kulağı (Attachment Lug) Çatlak İlerleme Analizi	48
3.1.6.1 Bağlantı Kulağının Geometrisi, Problem Tanımı ve Sonlu Elemanlar Modeli..	49
3.1.6.2 FCPAS ile Bağlantı Kulağının Kırılma Analizleri	50
3.1.6.3 Bağlantı Kulağının Çatlak İlerleme Simülasyonu	51
3.1.6.4 Köşe Çatlağı için Çatlak Profili Değerlendirmesi	54
3.1.7 Bağlantı Kulağı (Attachment Lug) Çoklu Çatlak Kırılma Analizi.....	55
3.1.8 Bir Plakada İlerleyerek Birleşen Çoğul Çatlakların Analizi.....	58
3.1.9 Havşalı Delikli Plakada Çatlak İlerleme Analizi	61
3.1.10 Sabit Türbin Kanatçığında Çatlak İlerlemesi	65
3.1.11 İki Çatlaklı Plakada Düzlemsel Olmayan Çatlak İlerleme Analizi.....	70
3.1.12 Üç Kenar Çatlağı İçeren Delikli Plakada Düzlemsel Olmayan Çatlak İlerlemesi..	72
3.1.13 Küresel Kaplarda Eğik Çatlakların Üç Boyutlu Analizi	75
3.2 Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Deney Kabiliyeti Geliştirilmesi	83
3.2.1 Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Planlanması ve Malzeme Karakterizasyonu	83
3.2.2 Mod-I Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri	89
3.2.2.1 Mod-I Kırılma Tokluğu Testleri	89
3.2.2.2 Alüminyum Numunelerin Mod-I Kırılma Tokluğu Test Sonuçları.....	93
3.2.2.3 Çelik Numunelerin Mod-I Kırılma Tokluğu Test Sonuçları	94
3.2.2.4 Mod-I Çatlak İlerleme Testleri ve Sonuçları	96
3.2.3 Mod-II Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri	101
3.2.3.1 Mod-II CTS (Richard) Numunesi Tasarım ve Kırılma Analizleri	102
3.2.3.2 Mod-II CTS (Richard) Numunesi Strain-Gage Doğrulama Çalışması	112
3.2.3.3 Mod-II CTS (Richard) Numunesi Kırılma Tokluğu Testleri	114

3.2.3.4 Mod-I/II CTS (Richard) Numunesi Çatlak İlerleme Testleri	117
3.2.3.5 Mod-I/II T Numunesi (Yeni Numune)Tasarım ve Kırılma Analizleri.....	121
3.2.3.6 Mod-I/II T-Numunesi Strain-Gage Doğrulama Çalışması	126
3.2.3.7 Mod-I/II T-Numunesi Kırılma Tokluğu Testleri	129
3.2.3.8 Mod-I/II T-Numunesi Çatlak İlerleme Testleri	133
3.2.4 Mod-I/III Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri	135
3.2.4.1 Mod-I/III Kırılma Analizleri	135
3.2.4.2 Mod-I/III Kırılma Analizleri	136
3.2.4.3 Gerilme Analizi Sonuçları	138
3.2.4.4 Gerilme Şiddet Faktörü Değerleri.....	142
3.2.4.5 Mod-I/III Numunesi için Strain-Gage Doğrulama Çalışmaları	143
3.2.4.6 Mod-I/III Kırılma Testleri.....	146
3.2.4.7 Deneysel Yöntem.....	147
3.2.5 Mod-I/II/III Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri	153
3.2.5.1 Farklı Mod-I/II/III Numune Tutucusu Tasarım ve Analizleri	154
3.2.5.2 Mod-I/II/III CTST (Compact Tension Shearing and Tearing) Numunesi Tasarım ve Kırılma Analizleri	166
3.2.5.3 Mod-I/II/III CTST Numunesi Strain-Gage Doğrulama Çalışması.....	177
3.2.5.4 Mod-I/II/III CTST-Numunesi Kırılma Tokluğu Testleri	181
3.2.5.5 Mod-I/II/III CTST-Numunesi Çatlak İlerleme Testleri	188
3.2.6 Karışık Modlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Değerlendirilmesi ve Literatür Modelleri ile Karşılaştırılması.....	192
3.2.6.1 İki Boyutlu Karışık Mod Kırılma Kriterleri	193
3.2.6.2 Üç Boyutlu Karışık Mod Kırılma Kriterleri	196
3.2.6.3 Mod-I/II Karışık Modlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Değerlendirilmesi ve Literatür Modelleri ile Karşılaştırılması.....	199
3.2.6.4 Mod-I/III Karışık Modlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Değerlendirilmesi ve Literatür Modelleri ile Karşılaştırılması.....	206
3.2.6.5 Mod-I/II/III Karışık Modlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Değerlendirilmesi ve Literatür Modelleri ile Karşılaştırılması	211
3.2.7 İki Boyutlu Kırılma ve Çatlak Yüzeyi İlerleme Kriteri Geliştirilmesi.....	218

3.2.7.1 Mod-I/II CTS (Richard) Numunesi Sonuçlarını Kullanılarak Geliştirilen Kriter	218
3.2.7.2 CTS-Numune Verileri İle Geliştirilen Kriterin T-Numunesine Uygulanması ...	221
3.2.7.3 Mod-I/II CTS (Richard) ve T-Numunesi Sonuçlarını Kullanılarak Geliştirilen Kriter.....	222
3.2.7.4 Mod-I/II CTS (Richard) ve T-Numunesi Sonuçlarını Kullanılarak Geliştirilen Çatlak Sapma Açısı Kriteri	224
3.2.8 Üç Boyutlu Kırılma ve Çatlak Yüzeyi İlerleme Kriteri Geliştirilmesi.....	226
3.3 Karışık Modlu Yükleme Altında Üç-Boyutlu Çatlak İlerleme Analizi Kabiliyeti Geliştirilmesi	232
3.3.1 FRAC3D'de Karışık Mod Yükleme İçin Çatlak İlerleme Profili Tahmini ve Test Edilmesi	233
3.3.2 Mod-I/II Richard Numunesi Çatlak İlerleme Testlerinin Modellenmesi.....	239
3.3.3 Eğik Çatlak İçeren CT Modeli Analizi	249
3.3.4 Mod-I/III Yükleri Altında CTT Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Maksimum Teğetsel Gerilme Kriteri).....	253
3.3.4.1 Mod-I/III=45° Yükleme Açısında CTT Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri	253
3.3.4.2 Mod-I/III=60° Yükleme Açısında CTT Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri	256
3.3.4.3 Mod-I/III=75° Yükleme Açısında CTT Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri	259
3.3.5 Mod-I/II/III Yükleri Altında CTST Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Maksimum Teğetsel Gerilme Kriteri).....	263
3.3.5.1 Farklı Ağ Yapısı Kullanarak Gerçekleştirilen Üç Boyutlu Çatlak İlerleme Analiz Yöntemi	263
3.3.5.2 Mod-I/II=45°, Mod-II/III=45° Ve Mod-I/III=45° Yükleme Açısında CTST Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri	267
3.3.5.3 Mod-I/II=75°, Mod-II/III=15° Ve Mod-I/III=75° Yükleme Açısında CTST Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri	270
3.3.5.4 Mod-I/II=75°, Mod-II/III=45° Ve Mod-I/III=75° Yükleme Açısında CTST Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri	272
3.3.6 Üç Boyutlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Kabiliyetlerini Sağlama Problemleri	275

3.3.6.1 İki Adet Kenar Çatlağı İçeren Plakada Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod-I/II) Çatlak İlerleme Analizi	275
3.3.6.2 Eğik Çatlak İçeren Plakada Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod-I/III) Çatlak İlerleme Analizi	279
3.3.6.3 10 mm Çapa Sahip Silindirik Çelik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yükleme Altında Çatlak İlerleme Analizi.....	289
3.3.6.4 15 mm Çapa Sahip Alüminyum Alaşım (Al-7075 T-651) Silindirik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yükleme Altında Kırılma Analizi	293
3.3.6.5 25mm Çapa Sahip Alüminyum Alaşım (Al-7075 T-651) Silindirik Numunenin Eksenel Çekme ve -Burulma Momenti Yükleme Altında Kırılma ve Çatlak İlerleme Analizi.....	297
3.3.6.6 Mod-I/III Yükleri Altında CTT Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Geliştirilen Üç Boyutlu Kriter).....	304
3.3.6.7 Mod-I/II/III Yükleri Altında CTST Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Geliştirilen Üç Boyutlu Kriter).....	315
3.3.7 Hadde Yönünün Kırılma Tokluğu ve Çatlak İlerleme Davranışına Etkisi (LT ve TS)	324
3.4 FCPAS – Aşama 2 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Geliştirilmesi ve Güncellemeler.....	332
3.4.1 FCPAS Ara Yüzünün Karışık Modlu Çatlak İlerleme Modellemesi için Yapılan Güncellemeler	337
3.4.2 Ara Yüz Kullanılarak Karışık Modlu Çatlak İlerleme Analizi İçin Örnek Uygulama	340
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	342
4.1. Proje Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar ve Kazanımlar	342
4.1.1 FCPAS – AŞAMA 1 Kabiliyetlerinin Pratik Uygulamalarla Sağlanması	342
4.1.2 Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Deney Kabiliyeti Geliştirilmesi	343
4.1.3 Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Analizi Kabiliyeti ve Kriter Geliştirilmesi	343
4.1.4 FCPAS – Aşama 2 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Geliştirilmesi ve Güncellemeler	343
4.2. Gelecekte Yapılabilecek Bilimsel Çalışmalar.....	344
5. YAYINLAR, KONFERANSLAR VE SUNUMLAR	345
KAYNAKLAR.....	348

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1.1. Mod-I yükleme altında çatlak ilerleme analizi yapılan uygulamalar	12
Tablo.3.1.2. Çatlak parametrelerin değerleri (dış çap 10 mm sabit).....	76
Tablo 3.2.1. Proje kapsamında gerçekleştirilen kırılma testlerinin özeti.	84
Tablo 3.2.2. Alüminyum ve çelik numunelerin çekme testi sonucu elde edilen akma dayanımı değerleri.	88
Tablo 3.2.3. Çelik numunelere uygulanan sertlik testi sonucu elde edilen sertlik değerleri....	88
Tablo 3.2.4. Al 7075 T-651 malzemesinin kırılma tokluğu ölçümü test sonuçları ve minimum kalınlık hesabı.	93
Tablo 3.2.5. Çelik malzemelerinin kırılma tokluğu ölçümü test sonuçları ve minimum kalınlık hesabı.	95
Tablo 3.2.6. Mod-I çatlak ilerleme testlerinden ve literatürden elde edilen "C" ve "n" malzeme sabitleri.....	100
Tablo 3.2.7. $\theta= 0^{\circ}-15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-60^{\circ}-75^{\circ}-90^{\circ}$ açılarda gerçekleştirilen analizlerin sonuçları..	110
Tablo 3.2.8. $\theta=0, 15, 30, 45, 60, 75$ ve 90° yükleme açılarında 43.5, 45 ve 47 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucunda elde edilen KI, KII ve KIII değerleri (Demir vd. 2016).....	111
Tablo 3.2.9. CTS numunesi için simülasyondan ölçülen birim şekil değiştirme değerleri ile deneyde strain-gagelerden okunan birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması.	114
Tablo 3.2.10. CTS numunesi kırılma tokluğu test sonuçları.	117
Tablo 3.2.11. $\theta=0, 15, 30, 45, 60, 75$ ve 90° yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizlerinden elde edilen KI, KII ve KIII değerleri. .	124
Tablo 3.2.12. T numunesi için simülasyondan ölçülen birim şekil değiştirme değerleri ile deneyde strain-gagelerden okunan birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması.	129
Tablo 3.2.13. T numune kırılma tokluğu test sonuçları.	132
Tablo 3.2.14. Farklı kontak tipleri için yapılan analizler.....	138

Tablo 3.2.15. Mod-I/III CTT numune için deneyde ölçülen strain-gage ortalama direnç ve birim şekil değişimi değerleri	145
Şekil 3.2.16. Kırılma tokluğu test matrisi.....	148
Tablo 3.2.17 Çatlak ilerleme test matrisi.....	151
Tablo 3.2.19. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu merkezi için elde edilen KI, KII ve KIII değerleri.	171
Tablo 3.2.20. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için çatlak ucu arka kenarından elde edilen KI, KII ve KIII değerleri.	173
Tablo 3.2.21. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için çatlak ucu ön kenarından elde edilen KI, KII ve KIII değerleri.	175
Tablo 3.2.23. CTST-numunesi kırılma tokluğu test sonuçları.....	187
Tablo 3.2.24. $\theta=0^{\circ}-15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-60^{\circ}-75^{\circ}$ yükleme açılarında CTS-numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti.	199
Tablo 3.2.25. CTS-numuneleri için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF değerleri ve bu değerlere göre değişik kriterler kullanılarak hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.....	200
Tablo 3.2.26. CTS-numuneleri için değişik kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.	200
Tablo 3.2.27. CTS-numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları.	202
Tablo 3.2.28. $\theta=0^{\circ}-15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-60^{\circ}-75^{\circ}$ yükleme açılarında T-numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti.....	203
Tablo 3.2.29. T-numuneleri için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.	203
Tablo 3.2.30. $\theta=0^{\circ}-15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-60^{\circ}-75^{\circ}$ yükleme açılarında T numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.	204
Şekil 3.2.119. T-numuneleri için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açalarına göre değişim grafiği.....	205
Tablo 3.2.31. $\theta=0^{\circ}-15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-60^{\circ}-75^{\circ}$ yükleme açılarında T-numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları.	205
Tablo 3.2.32. $\theta=0^{\circ}-15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-60^{\circ}-75^{\circ}-90^{\circ}$ yükleme açılarında CTT-numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti.	207

Tablo 3.2.33. CTT-numuneleri <i>çatlak ucu merkezi</i> için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.	207
Tablo 3.2.34. CTT-numuneleri <i>çatlak ucu kenarı</i> için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.	208
Tablo 3.2.35. CTS-numuneleri <i>çatlak ucu merkezi</i> için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.	209
Tablo 3.2.36. CTT-numuneleri <i>çatlak ucu kenarı</i> için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.	209
Tablo 3.2.37. CTST-numunesi kırılma tokluğu testleri ile ilgili test matrisi tablosu.	211
Tablo 3.2.38. CTST-numunesi kırılma tokluğu test verileri ve FCPAS çözümleri.	212
Tablo 3.2.39. Richard, Tanaka ve Pook kriterine göre elde edilen eşdeğer GŞF değerleri.	213
Tablo 3.2.40. Kırılma tokluğu deneylerinden ve Richard, Tanaka ve Pook kriterlerinden elde edilen kopma yükü değerleri.	213
Tablo 3.2.41. CTS-numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin katsayıları.	219
Tablo 3.2.42. Geliştirilen kritere göre CTS-numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF ile hesaplanan kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.	220
Şekil 3.2.126. CTS-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği.	220
Tablo 3.2.43. Geliştirilen kriterin (1) T-numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF kullanılarak hesaplanan kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.	221
Tablo 3.2.44. CTS ve T-numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin katsayıları.	222
Tablo 3.2.45. CTS ve T-numune verileri kullanılarak geliştirilen çatlak sapma açısı kriterinin katsayıları.	224
Tablo 3.2.46. Geliştirilen kritere ve mevcut kriterlere göre CTS-numunesi için elde edilen çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.	224
Tablo 3.2.47. Geliştirilen kritere ve mevcut kriterlere göre T-numunesi için elde edilen çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.	225
Tablo 3.2.48. Mod-I/III ve mod-I/II/III test verilerini kullanılarak geliştirilen eşdeğer gerilme şiddet faktörü kriterinin katsayıları.	229
Tablo 3.2.49. Geliştirilen üç boyutlu kritere göre CTT-numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF ile kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.	230

Tablo 3.3.1. Üç boyutlu mevcut ve geliştirilen kriterlere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri.	296
Tablo 3.3.2. Üç boyutlu mevcut ve geliştirilen kriterlere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri.	300
Tablo 3.3.3 L-T ve T-S yönleri için Paris-Erdoğan çatlak ilerleme hızı parametreleri	328

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1.1. TUSAŞ-TAI tarafından gönderilen ve havacılık sektöründe yaygın olarak karşılaşılan kırılma problemleri şeması, TUSAŞ-TAI (2014)	12
Şekil 3.1.2. 4-Noktalı eğme deneyinin test şeması, Kotsikos ve Grasso (2012)	14
Şekil 3.1.3. Ray üzerinde oluşan eğilme gerilmesi dağılımı	14
Şekil 3.1.4. FCPAS çatlak ilerleme analizi iş akış şeması	15
Şekil 3.1.5. UIC 60 ray modelinin sonlu elemanlar modeli	16
Şekil 3.1.6. Çatlak ucu bölüntü yapısı	16
Şekil 3.1.7. Ray modeline uygulanan sınır şartları ve yüklerin genel gösterimi	17
Şekil 3.1.8. Simetri sınır şartı uygulanan yüzeyler (mavi), kopmuş çatlak yüzeyleri (yeşil)	17
Şekil 3.1.9. Çatlak ucu düğüm noktaları (node) seçimi	18
Şekil 3.1.10. Çatlak ucu elemanlarının seçimi	18
Şekil 3.1.11. UIC 60 ray modeli analizinden elde edilen çatlak ilerleme profilleri	20
Şekil 3.1.12. Çatlak ilerleme profillerinin Kotsikos ve Grasso (2012) ile karşılaştırılması	21
Şekil 3.1.13. Çatlak ilerleme analizindeki son yedi adımın GŞF dağılımları	21
Şekil 3.1.14. 4-Noktalı eğme deneyinin şeması	22
Şekil 3.1.15. Boru üzerindeki eğilme gerilmesi dağılımı	22
Şekil 3.1.16. Yüzey çatlakları içeren boru modeli bölüntüsü	23
Şekil 3.1.17. Yüzey çatlakları içeren borunun çatlak ucu bölgesi bölüntüsü	23
Şekil 3.1.18. Yüzey çatlaklı boru için elde edilen çatlak ilerleme profilleri	24
Şekil 3.1.19. Yüzey çatlaklı boru için FCPAS ile elde edilen ömür grafiğinin Agora vd. (2011) çalışmasındaki sonuç ile karşılaştırılması	24
Şekil 3.1.20. Kırılmadan önceki son yedi çatlak adımı için GŞF ve kırılma tokluğu karşılaştırması	25
Şekil 3.1.21. Taşıyıcı çerçeve modeli için sonlu elemanlar modeli	26
Şekil 3.1.22. FCPAS analizleri ile elde edilen çatlak ilerleme profilleri	26

Şekil 3.1.23. Literatür çalışmasında deneysel olarak elde edilen çatlak ilerleme profilleri, Tiong ve Jones (2009).....	27
Şekil 3.1.24. Literatür çalışmasında Zencrack analizleri ile elde edilen çatlak ilerleme profilleri, Tiong ve Jones (2009)	27
Şekil 3.1.25. Çoklu çatlak numunesinin önden görünüşü, ölçüleri ve 4 ile 8 çatlaklı numunelerin çatlak düzleminde (X-X) kesit görünüşleri, Nishimura vd. (1990).....	28
Şekil 3.1.26. Çoklu çatlak numunesinin yükleme ve sınır şartları	29
Şekil 3.1.27. FCPAS çoklu çatlak ilerleme analizlerinin akış şeması.....	30
Şekil 3.1.28. Çoklu çatlak numunesinin sonlu elemanlar modelinin genel görünüşü	31
Şekil 3.1.29. Çoklu çatlak numunesi için çatlak numaralandırması	31
Şekil 3.1.30. FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı numunelerin $a=c= 1.0$ mm çatlak uzunlukları için GŞF değerleri.....	32
Şekil 3.1.31. FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı numunelerin $a=c= 4.0$ mm çatlak uzunlukları için GŞF değerleri.....	32
Şekil 3.1.32. FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı numuneler için $c/a=2$ ve $a=2.0$ mm değerlerindeki çatlak için GŞF değerleri	33
Şekil 3.1.33. FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı numuneler için $c/a=4$ ve $a=2.0$ mm değerlerindeki çatlak için GŞF değerleri	34
Şekil 3.1.34. Çoklu çatlak numunesinin sonlu elemanlar modeli	37
Şekil 3.1.35. Çatlağın sonlu elemanlar modeli (solda) ve yük altında iken deformasyonu ile gerilme dağılımının yakın görünüşü (sağda).....	37
Şekil 3.1.36. 8 çatlaklı numunedeki çatlakların ilerleyerek plaka kalınlığı boyunca uzanan çatlaklar haline geldikleri durumdaki geometrik görünüşleri, yük altındaki deformasyonları ve gerilme dağılımları	38
Şekil 3.1.37. FCPAS analiz sonuçlarını otomatik olarak plot eden Flash_Plot.xlsm (VBA kodları ile otomatikleştirilmiş Microsoft Excel dosyası) başlangıç ekranı	39
Şekil 3.1.38. 8 çatlaklı numune için FCPAS ile elde edilen ömür grafiği.....	40
Şekil 3.1.39. 4 çatlaklı numune için FCPAS ile elde edilen ömür grafiği.....	40
Şekil 3.1.40. 8 çatlaklı numunenin ilk 10 çatlak ilerleme adımı için GŞF grafikleri.....	41
Şekil 3.1.41. 8 çatlaklı numunenin 41-46 çatlak ilerleme adımları için GŞF grafikleri	42
Şekil 3.1.42. Dört çatlaklı numune için FCPAS ile elde edilen çatlak profilleri	43

Şekil 3.1.43. Sekiz çatlaklı numune için FCPAS ile elde edilen çatlak profilleri	43
Şekil 3.1.44. Farklı uzunluklarda iki adet yüzey çatlağı içeren numunenin genel görünümü (simetrik olduğu için yarısı gösterilmiştir), ölçüleri (numune kalınlığı 2 mm'dir), yükleme durumu ve sınır şartları.....	44
Şekil 3.1.45. Numunenin sonlu elemanlar modeli ve çatlak etrafındaki elemanların yakından görünümü.....	44
Şekil 3.1.46. Numune yük altındayken çatlak bölgelerindeki deformasyon hali.....	45
Şekil 3.1.47. Çatlak ilerleme analizi boyunca çatlakların durumları	46
Şekil 3.1.48. Çatlak profilleri	47
Şekil 3.1.49. Çatlak ilerleme analizi sonucunda adım 61-65 için elde edilen gerilme şiddet faktörleri	47
Şekil 3.1.50. Çatlak ilerleme analizi sonucunda elde edilen ömür grafiğı	48
Şekil 3.1.51. Bağlantı kulağına şeması, yükleme durumu ve sınır şartları	49
Şekil 3.1.52. Bağlantı kulağına ANSYS ile oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli.....	49
Şekil 3.1.53. Pim deliğı kenarındaki köşe çatlağına bölüntü detayının yakından görünüşü (solda), geometri çekme yükü altında iken çatlağına deforme olmuş hali ve çatlak ucu boyunca gerilme dağılımı (sağda).....	50
Şekil 3.1.54. $a=b=3.4$ mm ölçülerindeki köşe çatlağı için FCPAS analiz sonuçlarının referans çalışmadaki sonlu elemanlar analizi ve analitik sonuçlarla karşılaştırması.....	51
Şekil 3.1.55. FCPAS ömür tahmini sonuçlarının Boljanovic ve Maksimovic (2013)'in sonuçları ile karşılaştırılması (FCPAS analizinden yüzey tarafındaki düğüm noktaları için elde edilen GŞF değerleri kullanılarak hesaplanmıştır).....	52
Şekil 3.1.56. Bağlantı kulağı için 1-10 adımlarındaki KI GŞF değerleri	53
Şekil 3.1.57. Bağlantı kulağı için 21-26 adımlarındaki KI GŞF değerleri	53
Şekil 3.1.58. FCPAS ile köşe çatlağı ilerleme simülasyonundan elde edilen bazı çatlak profillerinin literatür sonuçları ile karşılaştırılması.....	55
Şekil 3.1.59. Bağlantı kulağı için boyut adları, yükleme durumu ve sınır şartları	56
Şekil 3.1.60. Bağlantı kulağı için tek ve iki çatlaklı durumlar için gerilme şiddet faktörleri.....	57
Şekil 3.1.61. Tek çatlaklı durumlar için gerilme şiddet faktörleri	57
Şekil 3.1.62. Çift çatlaklı durumlar için gerilme şiddet faktörleri.....	58

Şekil 3.1.63. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılan plakanın ölçüleri (mm), yük ve sınır şartları	59
Şekil 3.1.64. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılan plakanın başlangıç çatlak ölçüleri (mm) ..	59
Şekil 3.1.65. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılan plakanın sonlu elemanlar modeli.....	59
Şekil 3.1.66. FCPAS analizi ile tahmin edilen çatlak ilerleme profillerinin literatür test sonuçları ile karşılaştırması	60
Şekil 3.1.67. “Maksimum çatlak derinliğinin plaka kalınlığına oranı”na karşılık çevrim sayısı açısından FCPAS analiz sonuçları ile literatür deneysel çalışmasının karşılaştırılması	61
Şekil 3.1.68. Çatlak ilerleme analizi yapılan modelin sonlu elemanlar modeli (solda), yükleme koşulu ve sınır şartları (sağda)	62
Şekil 3.1.69. FCPAS ile elde edilen çatlak ilerleme profilleri	62
Şekil 3.1.70. Referans çalışmada elde edilen çatlak ilerleme profilleri, Park vd. (2006)	63
Şekil 3.1.71. FCPAS ile elde edilen 1-10 (üstte) ve 61-70 (altta) çatlak adımları için GŞF değerleri	63
Şekil 3.1.72. Havşalı delikli plaka için çatlak uzunluğu - çevrim sayısı grafiği karşılaştırması	64
Şekil 3.1.73. Normalize edilmiş Gerilme Şiddet Faktörü (GŞF) karşılaştırması	65
Şekil 3.1.74. Kanatçık modelinin yorulma test sınır şartları.....	66
Şekil 3.1.75. Yükleme anında oluşan gerilme dağılımı; tahliye kanalının dış yüzeydeki köşesinin kesit görüntüsü (solda), tahliye kanalının iç yüzeydeki kesit görüntüsü (sağda)	67
Şekil 3.1.76. Yük kaldırıldıktan sonra kalıcı gerilme dağılımı, tahliye kanalının dış yüzeydeki köşesinin kesit görüntüsü (solda), tahliye kanalının iç yüzeydeki kesit görüntüsü (sağda)	67
Şekil 3.1.77. Çatlak içeren kanatçık modelinin bölüntüsü	68
Şekil 3.1.78. Deplasman kontrollü model için çatlak ilerleme profilleri.....	68
Şekil 3.1.79. Yük kontrollü model için çatlak ilerleme profilleri	69
Şekil 3.1.80. Deplasman kontrollü model için çatlak ucu boyunca KI GŞF dağılımları	69
Şekil 3.1.81. Yük kontrollü model için çatlak ucu boyunca KI GŞF dağılımları	70
Şekil 3.1.82. Düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesi yapılan modelin genel görünüşü.....	71
Şekil 3.1.83. FCPAS ile literatürdeki çalışmanın çatlak ilerleme profillerinin karşılaştırması .	71
Şekil 3.1.84. FCPAS ile elde edilen eşdeğer GŞF değerlerinin karşılaştırılması	72

Şekil 3.1.85. 3 çatlaklı plakanın geometrisi, yükleme durumu ve sınır şartları (uzunluklar mm birimindedir)	73
Şekil 3.1.86. FCPAS ile literatürdeki çalışmanın çatlak ilerleme profillerinin karşılaştırması .	74
Şekil 3.1.87. FCPAS ile literatürdeki çalışmanın eşdeğer GŞF değerlerinin karşılaştırması..	75
Şekil 3.1.88. Basıncılı küresel kaplarda dış yüzeyde çatlak bulunması durumu için model kesiti (solda) ve çatlak geometrisi(sağda).....	76
Şekil 3.1.89. Basıncılı küresel kaplarda iç yüzeyde çatlak bulunması durumu için model kesiti (solda) ve çatlak geometrisi(sağda).....	77
Şekil 3.1.90. Basıncılı küresel kapta dış yüzeyde çatlak olması durumu için sonlu elemanlar modeli ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.....	78
Şekil 3.1.91. Basıncılı küresel kapta iç yüzeyde çatlak olması durumu için sonlu elemanlar modeli ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.....	78
Şekil 3.1.92. Basıncılı küresel kapta dış yüzeyde çatlak olması durumu için sonlu elemanlar modeli, sınır şartları ve çatlakın yük altında deformasyonu	78
Şekil 3.1.93. Basıncılı küresel kapta iç yüzeyde çatlak olması durumu, $R_o/R_i = 1.1$	79
Şekil 3.1.94. Basıncılı küresel kapta iç yüzeyde çatlak olması durumu, $R_o/R_i = 1.5$	79
Şekil 3.1.95. Dış yüzeyde çatlak olduğu durumda $R_o/R_i=1.25$, $a/c=1.0$ ve $\theta=0^\circ$ için a/t oranı değişiminin normalize edilmiş gerilme şiddet faktörüne etkisi	80
Şekil 3.1.96. Normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörleri - dış yüzey çatlaklığı, $R_o/R_i=1.1$, $a/t=0.25$, $a/c=0.25$	81
Şekil 3.1.97. Normalize edilmiş mod-II gerilme şiddet faktörleri - dış yüzey çatlaklığı, $R_o/R_i=1.1$, $a/t=0.25$, $a/c=0.25$	82
Şekil.3.1.98. Normalize edilmiş mod-III gerilme şiddet faktörleri - dış yüzey çatlaklığı, $R_o/R_i=1.1$, $a/t=0.25$, $a/c=0.25$	82
Şekil 3.2.1. 30x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri.	85
Şekil 3.2.2. 70x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri.	86
Şekil 3.2.3. 90x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri.	86
Şekil 3.2.4. Temin edilen çelik malzemesinin kimyasal özellikleri.	87
Şekil 3.2.5. Temin edilen çelik malzemesinin kimyasal özellikleri.	87
Şekil 3.2.6. Çekme testi sonrası alüminyum ve çelik malzemelerinin görünüşü.	88
Şekil 3.2.7. Yorulma ön çatlaklarının oluşturulması için imal edilen yorulma cihazı.	90

Şekil 3.2.8. Test esnasında ön çatlak oluşumunu görüntülemek için kullanılan yüksek çözünürlüklü kamera	91
Şekil 3.2.9. (a) Çekme cihazına bağlanan CT numunesi ve üzerine yapıştırılan milimetrik grid, (b) Temsili çatlak derinlik değerleri, a_1 , a_2 ve a_3	91
Şekil 3.2.10. Zwick marka 50 kN kapasiteli çekme cihazı.	92
Şekil 3.2.11. Kırılma tokluğu testi sonucunda Alüminyum malzemelerin perspektif görünüşü.	93
Şekil 3.2.13. Schimadzu 100 kN kapasiteli aksenal yorulma cihazı.	96
Şekil 3.2.14. Çatlak ilerleme davranışının üç bölgesini gösteren temsili yorulmalı çatlak ilerleme ömür grafiği.	97
Şekil 3.2.15. Otomatikleştirilmiş ekran görüntü alma program ara yüzü	98
Şekil 3.2.16. Mod-I çatlak ilerleme testi için hazırlanan numunelerin perspektif görünümü. ..	98
Şekil 3.2.17. Mod-I çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numunelerin yüzey görünüşleri. 99	
Şekil 3.2.18. Deneyler sonucu elde edilen $da/dN-\Delta K$ grafiğinin literatür verileri ile karşılaştırılması.	99
Şekil 3.2.19. Farklı "C" ve "n" değerleri için çizdirilen $da/dN-\Delta K$ grafiklerinin karşılaştırılması.	101
Şekil 3.2.20. Karışık modlu yüklemeler için modellenen (a) CTS numunesi ve (b) test konfigürasyonu.	103
Şekil 3.2.21. ANSYS ve FCPAS programında gerçekleştirilen CTS numunesi analizlerinin proses şeması.	104
Şekil 3.2.22. Lineer yük artışına bağlı olarak GŞF değerlerinin lineer değişimi.	105
Şekil 3.2.23. Temas tipinin çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri üzerine etkisi... 105	
Şekil 3.2.24. Sürtünme katsayısının çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri üzerine etkisi.	106
Şekil 3.2.25. $\theta=45^\circ$, 10 kN yükleme durumunda burç, pim, tutucular ve numunede oluşan gerilmelerin dağılımı.	107
Şekil 3.2.26. $\theta=45^\circ$, 10 kN yükleme durumunda çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri.	107
Şekil 3.2.27. $\theta=90^\circ$ 'lik yükleme durumunu temsil etmek için numuneye uygulanan yüklerin gösterimi.	108

Şekil 3.2.28. $\theta=90^\circ$ 'lik yükleme durumunda KIII etkisinin görsel olarak gösterilmesi – yükleme öncesi ve sonrası çatlak yüzeylerinin üst görünüşü.	108
Şekil 3.2.29. Farklı yükleme açıları için gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizleri sonrasında çatlak ucunda oluşan gerilme ve GŞF dağılımları.	109
Şekil 3.2.30. $\theta=45^\circ$ yükleme durumunda $t=25$ ve 10mm kalınlıktaki CTS numuneleri için gerçekleştirilen kırılma analiz sonuçları.	110
Şekil 3.2.31. Farklı ön çatlak uzunluklarının analiz modelinde gösterimi.	111
Şekil 3.2.32. $\theta=45^\circ$ yükleme açısı ve 10 kN yükleme durumu için strain-gagelerin yerleştirileceği bölgeler.	112
Şekil 3.2.33. $\theta=45^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü.	113
Şekil 3.2.34. Richard numunesi için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği.	113
Şekil 3.2.35. Schimadzu 200 kN kapasiteli aksenal çekme cihazı.	115
Şekil 3.2.36. CTS mod-I/II kırılma tokluğu testleri için kullanılan ekipmanların ve gerçekleştirilen deneylerin genel görünümü.	116
Şekil 3.2.37. Farklı açılarda kırılan numune yüzeylerinin perspektif görünümü.	116
Şekil 3.2.38. Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrasında $\theta=45^\circ$ yükleme açısı için elde edilen kuvvet-uzama eğrileri.	117
Şekil 3.2.39. Çatlak ilerleme testinden bir görünüm.	119
Şekil 3.2.40. Çevrim sayısına göre çatlak uzunluk değerlerinin değişimi, (a) $\theta=30^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ ve (c) $\theta=60^\circ$	120
Şekil 3.2.41. Deney sonucu numunelerin kırılan yüzeylerinin perspektif ve üst görünüşleri sırasıyla verilmiştir.	121
Şekil 3.2.42. Tasarlanan yeni numune ve uygun tutucu modeli.	121
Şekil 3.2.43. Detaylı ölçüleri verilen (a) numune ve (b) tutucu modeli.	122
Şekil 3.2.44. ANSYS ve FRAC3D programında gerçekleştirilen T-numune analizlerinin proses şeması.	123
Şekil 3.2.45. T-numune için gerçekleştirilen kırılma analizlerinden elde edilen çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörlerinin dağılımları.	123
Şekil 3.2.46. Karşılaştırma analizlerinde kullanılan numunelerin detaylı ölçüleri.	125

Şekil 3.2.47. Kırılma analizlerinden üç numune için elde edilen GŞF değerleri.	125
Şekil 3.2.48. CTS-10mm (Richard) ve T-25mm kalınlık ve farklı yükleme açıları için gerçekleştirilen kırılma deneylerinden elde edilen kopma yükü değerleri.	126
Şekil 3.2.49. Mod-I yüklemde 10 kN yüklemde gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numunede oluşan asal gerilmeler ve strain-gagelerin yerleştirildiği yerler.	127
Şekil 3.2.50. Mod-I yüklemesi altında 10 kN' ye kadar değişen yüklerde gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü. ...	128
Şekil 3.2.51 T-numune için gerçekleştirilen deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği.	128
Şekil 3.2.52. T-numune kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kullanılan cihaz ve test sisteminin genel görünümü.	130
Şekil 3.2.53. T-numune kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kullanılan numune ve tutucuların genel görünümü.	130
Şekil 3.2.54. Farklı açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra T-numunelerinin genel görünümü ve oluşan çatlak sapma açıları.	131
Şekil 3.2.55. Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrasında $\theta=45^\circ$ yükleme açısı için elde edilen kuvvet-uzama eğrileri.	132
Şekil 3.2.56. T-numune çatlak ilerleme deneyleri sonrasında numunelerin kırılan yüzeylerinin genel görünümleri.	134
Şekil 3.2.57. $\theta=45^\circ$ yükleme açısında çevrim sayısına göre çatlak uzunluk değerlerinin değişimi.	134
Şekil 3.2.58. Mod-I/III numunesi.	135
3.2.59. Mod-I/III numune tutucusu.	136
3.2.60. Mod-I/III analiz modeli detayı.	136
Şekil 3.2.61. Mod-I/III analiz prosedürü.	137
Şekil 3.2.62. 25 mm et kalınlığı ve 0 derece yükleme durumu için gerilme analizi sonuçları	139
Şekil 3.2.63. 25 mm et kalınlığı ve 45 derece yükleme durumu için gerilme analizi sonuçları	140
Şekil 3.2.64. 25 mm et kalınlığı ve 90 derece yükleme durumu için gerilme analizi sonuçları	141

Şekil 3.2.65 . Farklı yükleme açılarında KI gerilme şiddet faktörü değerleri	142
Şekil 3.2.66 . Farklı yükleme açılarında KII gerilme şiddet faktörü değerleri.....	142
Şekil 3.2.67 . Farklı yükleme açılarında KIII gerilme şiddet faktörü değerleri.....	143
Şekil 3.2.68. 6 kN Mod-I/III (45°) yüklemeye gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numunede oluşan 1. asal gerilmeler ve strain-gagelerin yerleştirildiği yerler.	144
Şekil 3.2.69. 45° mod-I/III yüklemesi altında 6 kN'a kadar değişen yüklerde gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü...144	
Şekil 3.2.70. Mod-I/III CTT numune için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana (yüke) bağlı değişim grafiği.....	145
Şekil 3.2.71. 12.5 mm kalınlıktaki mod-I/III CTT numunesi.	146
Şekil 3.2.72. Mod I-III CTT numune tutucusu. Wei vd. (2011), Deng X vd. (2014)	147
Şekil 3.2.73. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kuvvet-yer değiştirme grafikleri (t = 25mm). ..	149
Şekil 3.2.74. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kuvvet-yer değiştirme grafikleri (t = 12.5mm).150	
Şekil 3.2.75. Farklı açılarda yapılan da/dN testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri.....	151
Şekil 3.2.76. Farklı açılarda yapılan da/dN testleri kırılma yüzeyleri (sırt görünüşü).....	152
Şekil 3.2.77. Mod-I/III ve Mod-II/III testlerinde kullanılan tüm numuneler – üst görünüş.	153
Şekil 3.2.78. Mod-I/II/III yüklemesi için tasarlanan T-numune tutucusu ve aparatları.	155
Şekil 3.2.79. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarının kırılma analizleri için hazırlanan sonlu eleman modelleri.	155
Şekil 3.2.80. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında tutucu, numune ve pimde oluşan gerilme dağılımının genel görünümü.	156
Şekil 3.2.81. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında tutucularda oluşan gerilme dağılımları.	156
Şekil 3.2.82. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında pimlerde oluşan gerilme dağılımları.	157
Şekil 3.2.83. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında numunelerde oluşan gerilme dağılımları.	157
Şekil 3.2.84. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme çatlak ucunda elde edilen gerilme şiddet faktörlerinin dağılımı.	157
Şekil 3.2.85. Mod-I/II/III yüklemesi yapabilen CTST numune tutucusu ve aparatları.	159

Şekil 3.2.86. 15 derecelik aralıklarla uygulanabilen yükleme tiplerinin gösterimi, (a) mod-I/II, (b) mod-I/III, (c) mod-II/III yükleme durumları.....	160
Şekil 3.2.87. Mod-I/II-90°, mod-I/III-90° ve mod-II/III-15° yükleme durumu ve bunun etkisinde oluşacak kırılma modlarının birbirlerine göre etkinliği.	161
Şekil 3.2.88. Mod-I/II-45°, mod-I/III-45° ve mod-II/III-45° yükleme durumu ve bunun etkisinde oluşacak kırılma modlarının birbirlerine göre etkinliği.	161
Şekil 3.2.89. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda civatalı ve civatasız konfigürasyonlarda oluşan gerilme dağılımları.	163
Şekil 3.2.90. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda pim ve civatalarda oluşan gerilme dağılımları.	163
Şekil 3.2.91. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda tutucularda oluşan gerilme dağılımları.	164
Şekil 3.2.92. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda tutucu civatalarında oluşan gerilme dağılımları.	164
Şekil 3.2.93. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri.....	165
Şekil 3.2.94. Mod-I/II/III tutucusu için tasarımı tamamlanan nihai konfigürasyon.....	166
Şekil 3.2.95. Nihai mod-I/II/III konfigürasyonunu oluşturan parça ve modellerin perspektif görünümü.....	166
Şekil 3.2.96. Mod-I/II açılı yüklemeyi sağlayan tutucu modelinin detaylı boyutları ve perspektif görünümü.....	167
Şekil 3.2.97. Tutucu ile kulak arasındaki bağlantıyı sağlayan bağlantı elemanının ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü.	167
Şekil 3.2.98. Mod-II/III yüklemesinin verilmesini sağlayan modelin ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü.....	168
Şekil 3.2.99. Mod-I/II/III-CTST numunesinin ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü.	168
Tablo 3.2.18. Mod-I/II/III test ve analizleri için belirlenen yükleme açıları.	169
Şekil 3.2.100. 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.	170

Şekil 3.2.101. 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°.....	172
Şekil 3.2.102. 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°.....	174
Şekil 3.2.103. 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°.....	176
Şekil 3.2.104. 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.....	178
Şekil 3.2.105. Strain-gage deneyleri esnasında cihazın ve test sisteminin genel görünümü.	179
Şekil 3.2.106. Her iki yükleme açısı için numuneye yapıştırılan strain-gagelerin görünümleri.	179
Şekil 3.2.107. 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.....	180
Tablo 3.2.22. 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.	181
Şekil 3.2.108. CTST-numunesi ve tasarım boyutlarına uygun olarak üretilen tutucu aparatlarının genel görünümü.....	182
Şekil 3.2.109. 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...182	
Şekil 3.2.110. 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.	184
Şekil 3.2.111. 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.	185

Şekil 3.2.112. Farklı açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra CTST-numunelerinin kırılan yüzeylerinin (a) ön açıdan, (b) yan açıdan, (c) üstten genel görünümü.	187
Şekil 3.2.113. Gerçekleştirilen Mod-I/II/III da/dN testlerinden bir kesit görünümü.....	189
Şekil 3.2.114. Farklı yükleme 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° yükleme açıları.....	191
Şekil 3.2.115. Mod-I/II=45°, mod-I/III=45° ve mod-II/III=45° yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testi esnasında çatlak numune ön yüzeyinde bulunan uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi.....	192
Şekil 3.2.116. Üç boyutlu çatlak önünde silindirik koordinat sistemi ve gerilme bileşenleri, (Richard vd. 2012).....	196
Şekil 3.2.117. CTS-numuneleri için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açalarına göre değişim grafiği.	201
Şekil 3.2.118. CTS-numuneleri için elde edilen çatlak sapma açıları ile kriterlerden elde edilen sapma açılarının, K_{II}/K_I oranına göre değişim grafiği.	202
Şekil 3.2.120. T-numuneleri için elde edilen çatlak sapma açıları ile kriterlerden elde edilen sapma açılarının, K_{II}/K_I oranına göre değişim grafiği.	206
Şekil 3.2.121. CTT-numuneleri <i>çatlak ucu merkezi</i> için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açalarına göre değişim grafiği.	210
Şekil 3.2.122. CTT-numuneleri <i>çatlak ucu kenarı</i> için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açalarına göre değişim grafiği.	210
Şekil 3.2.123. Mod-I/II=15, mod-I/III=15° yükleme durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açalarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı.	215
Şekil 3.2.124. Mod-I/II=45, mod-I/III=45° yükleme durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açalarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı.	216
Şekil 3.2.125. Mod-I/II=75, mod-I/III=75° yükleme durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=45°, 60° ve 75° yükleme açalarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı.	217

Şekil 3.2.127. T-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği.....	222
Şekil 3.2.128. CTS-numunesi, deneysel kopma yükleri ile mevcut kriterler ve geliştirilen ikinci kriterden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği.	223
Şekil 3.2.129. T-numunesi, deneysel kopma yükleri ile mevcut kriterler ve geliştirilen ikinci kriterden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği.	223
Şekil 3.2.130. 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.	226
Şekil 3.2.131. T-numunesi için, deneysel çatlak sapma açıları ile mevcut kriterler ve geliştirilen kriterden elde edilen sapma açılarının K_{II}/K_I oranına göre değişim grafiği.	226
Şekil 3.2.132. Çatlak ilerleme başlangıç noktasının tespiti için, mod-I/III yükleme açısında CTT-numunesi için gerçekleştirilen testten bir kesit.	227
Şekil 3.2.133. Çatlak başlangıcının tespiti için, mod-I/III yükleme açısında CTT-numunesi için gerçekleştirilen test sonrası kırılan numunenin yüzey görünümü.	228
Şekil 3.2.134. CTT-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği.	230
Şekil 3.2.135. CTT-numunesi kopma yüklerinin mevcut ve geliştirilen kriterler ile kıyaslanması, (a) $\text{mod-I/II}=15$, $\text{mod-I/III}=15^\circ$, (b) $\text{mod-I/II}=45$, $\text{mod-I/III}=45^\circ$, (c) $\text{mod-I/II}=75$, $\text{mod-I/III}=75^\circ$	232
Şekil 3.3.1. Düzlem dışı yönde eğik çatlak yerleştirilen CT numunesinin önden ve yandan görünümü.....	233
Şekil 3.3.2. Yük ve sınır şartları uygulanan numunenin sonlu eleman modeli, (a) modelin tamamı, (b) çatlak yüzeyinden sonraki üst bölümü.	234
Şekil 3.3.3. 5. çatlak ilerleme adımı için oluşturulan modelde çatlak yüzeyinin önden görünümü.....	234
Şekil 3.3.4. Çatlak profilini çevreleyen tünel hacmin modellenmesinde gerçekleşen işlem adımları.	235
Şekil 3.3.5. Modelin çatlak yüzeyi ile ayrıştırılarak çatlak profilinin tanımlanması.....	236
Şekil 3.3.6. Hexahedral elemanlar ile bölüntülenen tünel hacim.	236
Şekil 3.3.7. Sonlu eleman modelinin perspektif ve çatlak ucu civarının yakın görünümü. ...	237
Şekil 3.3.8. 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.....	238

Şekil 3.3.9. $\theta=30^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 9 adım çatlak ilerlemesi modellenerek gerçekleştirilen analizler sonrasında (a) numunenin çatlak ucunda oluşan K_I dağılımının temsil edildiği yerler, (b) çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği.	240
Şekil 3.3.10. $\theta=30^\circ$ 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.	242
Şekil 3.3.11. $\theta=45^\circ$ 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.	242
Şekil 3.3.12. $\theta=45^\circ$ 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.	244
Şekil 3.3.13. $\theta=60^\circ$ 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.	244
Şekil 3.3.14. $\theta=60^\circ$ 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.	246
Şekil 3.3.15. $\theta=30^\circ$ yükleme açısında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin (a) 11kN (R=0.1), (b) 8.8kN (R=0.1) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması.	247
Şekil 3.3.16. $\theta=45^\circ$ yükleme açısında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin, 11.4kN (R=0.1) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması.	248
Şekil 3.3.17. $\theta=60^\circ$ yükleme açısında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin, 13.65kN (R=0.1) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması.	249
Şekil 3.3.18. Tüm çatlak profilleri için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrası elde edilen gerilme şiddet faktörlerinin çatlak ucu boyunca değişimi (a) K_I , (b) K_{II} ve (c) K_{III}	251

Şekil 3.3.19. 21. adım sonunda modellenen çatlak profilinin üst kısmının yarı model görünümü.....	251
Şekil 3.3.20. 21. çatlak profilinin sonlu eleman modelinin farklı açılarda görüntüleri.	252
Şekil 3.3.21. Mod-I/III=45° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan yorulma çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.	253
Şekil 3.3.22. 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.	255
Şekil 3.3.23. 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.	256
Şekil 3.3.24. Mod-I/III=60° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.	257
Şekil 3.3.25. 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} GŞF değerleri.	258
Şekil 3.3.26. 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.	259
Şekil 3.3.27. Mod-I/III=75° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.	260
Şekil 3.3.28. 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.	261
Şekil 3.3.29. Mod-I/III=75° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması.	262
Şekil 3.3.30. Çatlak ucu boyunca sıralanan (a) tetrahedral, (b) hexahedral elemanlar.....	264
Şekil 3.3.31. Tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen bir analizden çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerlerinin dağılımı.	265
Şekil 3.3.32. 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.....	266

Şekil 3.3.33. Mod-I/III 45° yükleme açısı için, hexahedral ve tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen her iki analiz sonuçlarından elde edilen yüzeyler.....	266
Şekil 3.3.34. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısında 25mm kalınlıkta CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.	267
Şekil 3.3.35. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısında 25mm 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.	269
Şekil 3.3.36. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması.	269
Şekil 3.3.37. 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.	270
Şekil 3.3.38. 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.	271
Şekil 3.3.39. 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.	272
Şekil 3.3.40. 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.	272
Şekil 3.3.41. 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.	274
Şekil 3.3.42. 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.	274
Şekil 3.3.43. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılacak olan ve iki adet kenar çatlağı barındıran plakanın geometrisi, ölçüleri ve çatlakların konumları.	276

Şekil 3.3.44. FCPAS ile yapılan çoğul çatlak ilerleme analizi sonucu elde edilen GŞF değerlerinin literatürdeki veriler ile kıyaslaması (değerler uzun olan çatlaktan alınmıştır).	277
Şekil 3.3.45. FCPAS ile yapılan çoğul çatlak ilerleme analizi sonucu elde çatlak profillerinin literatürdeki veriler ile karşılaştırılması.	278
Şekil 3.3.46. Düzlemsel olmayan çoğul çatlak ilerlemesinin olduğu plakanın ANSYS ile bölüntü oluşturulmuş hali.	278
Şekil 3.3.47. Düzlemsel olmayan çoğul çatlak ilerlemesinin olduğu plakanın çekme yükü altında deforme olmuş hali.	279
Şekil 3.3.48. Mod-I yüklemesi altında ön çatlak oluşturulmasının ardından belirli açılarda plakalar kesilerek çatlağın plaka kenarlarına açılı olarak yerleştirilmesinin sağlanması.	280
Şekil 3.3.49. Yatayla 15°, 30° ve 45° açı yapan ön çatlağa sahip plakalara uygulanan dört nokta yorulmalı eğme test düzeneği ve oluşturulan çatlak profili boyutları.	280
Şekil 3.3.50. 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.	282
Şekil 3.3.51. Yatayla 15° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi.	282
Şekil 3.3.52. Yatayla 15° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.	283
Şekil 3.3.53. Yatayla 30° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.	284
Şekil 3.3.54. Yatayla 30° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi.	284
Şekil 3.3.55. Yatayla 30° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.	285
Şekil 3.3.56. Yatayla 45° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.	285
Şekil 3.3.57. Yatayla 45° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi.	286
Şekil 3.3.58. Yatayla 45° açı yapan ön çatlağa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.	286

Şekil 3.3.59. 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.	288
Şekil 3.3.60. Deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları.	289
Şekil 3.3.61. Gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen çatlak ucu boyunca GŞF, (a) K _I , (b) K _{II} , (c) K _{III} değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması.	291
Şekil 3.3.62. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması.	292
Şekil 3.3.63. Gerçekleştirilen 13 adım çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyleri.	292
Şekil 3.3.64. Gerçekleştirilen kritere göre elde edilen ömür verilerinin literatürden alınan veriler ile karşılaştırılması.	293
Şekil 3.3.65. Deney ve analizlerde kullanılan numune ve çatlak boyutları.	294
Şekil 3.3.66. Farklı ön-çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri.	295
Şekil 3.3.67. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı.	295
Şekil 3.3.68. Deneylerde kullanılan numuneler ve gerçekleştirilen deneyden bir kesit.	296
Şekil 3.3.69. Mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin, deneysel kopma yükleri ile karşılaştırılması.	297
Şekil 3.3.70. Deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları.	298
Şekil 3.3.71. Farklı ön-çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri.	299
Şekil 3.3.72. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı.	299
Şekil 3.3.73. Mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin, deneysel kopma yükleri ile karşılaştırılması.	300
Şekil 3.3.74. 17 kN eksenel yük (R=0.1) ve 136 Nm (R=0.1) burulma momenti etkisinde kırılan numune yüzeyinin üstten görünümü.	301
Şekil 3.3.75. MTS kriteri ve geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF, (a) K _I , (b) K _{II} , (c) K _{III} , (d) Keş değerleri.	303

Şekil 3.3.76. MTS kriteri ve geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen çatlak yüzeyleri.	303
Şekil 3.3.77. Çatlak yüzeylerinin sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için uygulanan yöntem.	305
Şekil 3.3.78. 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.	307
Şekil 3.3.79. Mod-I/III=45° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.	308
Şekil 3.3.80. 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.	310
Şekil 3.3.81. Mod-I/III=60° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.	311
Şekil 3.3.82. 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.	313
Şekil 3.3.83. Mod-I/III=75° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.	314
Şekil 3.3.84. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısında 25mm 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.	316
Şekil 3.3.85. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.	317
Şekil 3.3.86. Mod-I/II=75°, mod-II/III=15° ve mod-I/III=75° yükleme açısında 25mm 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.	319
Şekil 3.3.87. Mod-I/II=75°, mod-II/III=15° ve mod-I/III=75° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.	320

Şekil 3.3.88. Mod-I/II=75°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=75° yükleme açısında 25mm 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.....	322
Şekil 3.3.89. Mod-I/II=75°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=75° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.	323
Şekil 3.3.90 CT ve Richard Numuneleri Kırılma Tokluğu Testi Görüntüleri	325
Şekil 3.3.91 Mod I-II yüklemesi altında, L-T ve T-S çatlak yönü için kırılma yük değerlerinin açığa bağlı olarak karşılaştırılması	326
Şekil 3.3.92 TS Hadde yönünde mod I çatlak ilerleme davranışının tespiti için kullanılan CT numunelerin kırılmış halleri.....	327
Şekil 3.3.93 T-S ve L-T haddeleme yönleri için ΔK -da/dN değerleri.....	327
Şekil 3.3.94 T-S Hadde yönü karışık modlu çatlak İlerleme testinde kırılmış olan numuneler	329
Şekil 3.3.95 T-S ve L-T Haddeleme Yönlerine göre karışık modlu yükleme için çatlak uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi (a) 30° (b) 45° (c) 60°.....	330
Şekil 3.3.96 Hadde yönlerine göre numunelerde çatlak yerleşimi	331
Şekil 3.4.1. FCPAS ana ekranı.	332
Şekil 3.4.2. “Using ANSYS FE Model” butonuna tıklandığında açılan ara yüz penceresi. ...	333
Şekil 3.4.3. Bazı temel geometriler ANSYS makrolarına erişim penceresi.	333
Şekil 3.4.4. Otomatik çatlak ilerlemesi için veri giriş ekranı.	334
Şekil 3.4.5. FCPAS Post-Processor ana ekranı.	335
Şekil 3.4.6. Çatlak ilerleme adımları.	335
Şekil 3.4.7. Gerilme Şiddet Faktörleri.	336
Şekil 3.4.8. Çatlak uzunluğuna karşılık çevrim sayısı grafiği.	336
Şekil 3.4.9. Çatlak ilerleme animasyonu sekmesi.	337
Şekil 3.4.10. Karışık modlu kırılma mekaniği kriterlerine göre eş değer GŞF hesaplanması.	338
Şekil 3.4.11. Karışık modlu yük altında düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlak yüzeyi.	338
Şekil 3.4.12. Karışık modlu çatlak ilerlemesi için çatlak profili.	339

Şekil 3.4.13. Karışık modlu çatlak ilerlemesi için farklı kriterlere göre profil tahmini.	339
Şekil 3.4.14. Karışık modlu düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesi için yardımcı doküman. ..	340

ÖZET

2008-2011 yılları arasında gerçekleştirilen 108M283 nolu ve “Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 1” adlı projede, lisansüstü çalışmaları boyunca Dr. Ali O. Ayhan tarafından geliştirilmiş olan FRAC3D programı, mod-I yüklemesi altında levha ve silindir gibi basit geometrilerdeki yorulmalı çatlak ilerleme problemlerine uygulanmış ve analizlerin doğru bir şekilde yapılabilmesi için kullanıcı ara yüzü geliştirilerek tüm sistem FCPAS.(Fracture and Crack Propagation Analysis System) olarak adlandırılmıştı.

Bu projede, FCPAS içerisinde mevcut olan yetenekler yeni endüstriyel problemlere uygulanmış ve karışık modlu yüklemeler altında üç boyutlu kırılma olgusunun deneysel olarak incelenmesi ve sayısal olarak modellenmesi için yeni çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, aşağıda verilen dört temel kategoride gruplandırılmaktadır;

1. FCPAS mod-I analiz kabiliyetlerinin enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma alanlarında karşılaşılan kırılma ve çatlak ilerleme problemlerine uygulanması ve doğrulamalarının yapılması. Bu kapsamda, değişik uygulamalar yapılarak çatlak ilerleme profilleri ve ömürleri açısından FCPAS tarafından tahmin edilen çatlak ilerleme davranışları doğrulanmıştır.
2. Üç boyutlu karışık modlu yükler altında kırılma ve çatlak ilerleme deneysel kabiliyetlerinin geliştirilmesi. Basit karışık modlu kırılma problemlerinden başlayarak, en genel hal olan mod-I, II ve III yüklerinin tamamının aktif olduğu durumlar için deneysel kabiliyetler ve yeni test sistemleri geliştirilmiştir.
3. Üç boyutlu karışık modlu yükler altında kırılma ve çatlak ilerleme sayısal analiz kabiliyetlerinin ve iyileştirilmiş kırılma kriterlerinin geliştirilmesi. Karışık modlu yükler altında ve düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlakın sayısal olarak FRAC3D ve FCPAS ile analizleri gerçekleştirilmiş, iyileştirilmiş kırılma kriterleri oluşturulmuş ve deneylerle doğrulamaları yapılmıştır.
4. FCPAS grafiksel kullanıcı ara yüzünün (GUI) güncellenmesi. Yukarıda tanımlanan gelişmeler çerçevesinde kullanıcı ara yüzünde güncellemeler yapılmıştır.

Proje kapsamında yapılan çalışmalar ile FCPAS'ın enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma alanlarındaki kırılma problemlerine uygulanabilir bir program olduğunun ispatı yapılmış ve projenin 3. aşaması olarak planlanan Prognostik/Yapısal Sağlık Kontrolü alanlarında yeni çalışmalar yapılabilmesinin zemini hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yorulma çatlak ilerlemesi, karışık mod, gerilme şiddet faktörü, sonlu elemanlar yöntemi.

ABSTRACT

In the 108M283 project (Fracture and Crack Propagation Analysis System – Phase 1, 2008-2011), FRAC3D, which had been developed by Dr. Ali O. Ayhan during his graduate studies, was applied to mode-I fatigue crack propagation problems on simple geometries such as plates and cylinders, a graphical user interface was developed to perform the analyses correctly and more efficiently, and the whole system was named as FCPAS. (Fracture and Crack Propagation Analysis System).

In this project, the capabilities existing within FCPAS were applied to new industrial problems. Moreover, new studies were performed to experimentally analyze and numerically model three-dimensional fracture problems under mixed mode loading conditions. These studies are grouped into four categories given below;

1. Applications of mode-I analysis capabilities of FCPAS to fracture problems seen in energy, transportation, aviation and defense areas and their validations. In this context, various applications are performed and crack propagation behaviors predicted by FCPAS were validated in terms of crack propagation profiles and lives.
2. Development of experimental capabilities for three-dimensional fracture and crack propagation problems. Starting with simple mixed-mode fracture problems, for the most general case, in which all mode-I, II and III loads are active, experimental capabilities and new test systems were developed.
3. Development of numerical analysis capabilities and improved fracture criteria for three-dimensional fracture and crack propagation problems. Analyses of cracks under mixed-mode loads, propagating in a non-planar manner were performed using FRAC3D and FCPAS, improved fracture criteria were developed and experimental validations were performed.
4. Updating of FCPAS graphical user interface (GUI). Updates were made on the graphical user interface based on the developments defined above.

Based on the studies performed on this project, applicability of FCPAS's capabilities in energy, transportation, aviation and defense areas was proved and foundation of new studies using FCPAS in the Prognostic/Structural Health Management area was prepared.

Keywords: Fatigue crack propagation, mixed-mode, stress intensity factor, finite element method.

1. GİRİŞ

Her geçen gün hızla ilerleyen teknolojiler sayesinde üretilen ürünlerde kullanılan temel ve detay seviye mühendislik teknolojileri de aynı oranda artmaktadır. Onlarca yıl önce, çatlak başlangıcı ömrüne göre tasarlanıp üretilen, sahadaki performansları ile ilgili kararları da buna göre yönetilen birçok ürün arasından, son zamanlarda özellikle enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma gibi alanlarda kullanılan yüksek teknoloji ve maliyetli ürünler için, çatlak ilerleme ömürleri de tahmin edilerek, hem güvenilirlik hem de ekonomik nedenlerle hesaba katılır olmuş ve Kırılma Mekaniği alandaki teknolojik gelişmeler de hızla artmıştır.

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, önemi giderek artan Kırılma Mekaniği Bilimi, başlangıçta değişik şekil ve yükler altındaki çatlak içeren geometriler için gerilme yığılması ve gerilme şiddet faktörlerinin analitik ve analitik/sayısal yöntemler ile tanımlanmaları, temel kırılma ve çatlak ilerleme deneylerinin tasarlanarak gerilme şiddet faktörü ile ilişkisinin kurulması gibi temel adımlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle son otuz yıl içerisinde ise, kırılma ve çatlak ilerleme olgusunun sayısal analiz ve modelleme yöntemleri ile irdelenmesinde ciddi mesafeler kat edilmiştir.

Sayısal analiz ve modellemeler, mod-I ve düzlem içi karışık modlu (mod-I/II) iki-boyutlu problemler ile başlayıp, özellikle son yirmi yıl içerisinde de karmaşık yük ve sınır şartları altında ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler ile çoğul malzemeler gibi değişik malzeme özellikleri içeren sistemlerdeki çatlakların üç-boyutlu kırılma ve ilerleme analizleri ile devam etmiştir. Literatürde, değişik yöntemler bulunabilmekte beraber, hem iki, hem de üç-boyutlu problemler için en çok kullanılan yöntemler, sırasıyla, sonlu elemanlar ve sınır elemanlar yöntemleri olmuştur.

Bu proje çalışmasında, zenginleştirilmiş elemanlar yöntemi ile çalışan ve lisansüstü çalışmaları boyunca Dr. Ali Osman Ayhan tarafından geliştirilen FRAC3D adlı bağımsız sonlu elemanlar programı temel alınarak hem mod-I hem de en genel karışık modlu üç-boyutlu kırılma problemleri için sayısal analiz ve deneysel yöntemler geliştirilmiş ve doğrulamaları yapılmıştır.

Bu projeden önce yapılan Aşama 1 projesinde, FRAC3D programı levha ve silindir gibi basit geometrilere görülen üç boyutlu yüzey ve köşe çatlaklarının mod-I yükleri altındaki yorulma davranışlarının analizlerine uygulanmış ve ilgili doğrulamalar yapılmıştır. Ayrıca, belirtilen problemler ile ilgili modellerin otomatik olarak oluşturulabilmesi için gerekli makro programları da geliştirilmiş ve tüm sistem FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System) adı ile bir kullanıcı ara yüzü programı altında toplanmıştır. Bu projede yapılan çalışmalar, aşağıda verilen dört ana grup altında özetlenmekte olup, ilgili ana çalışmaların tüm bilimsel ve teknik detayları 3. Bölüm'de verilmektedir.

1. FCPAS mod-I analiz kabiliyetlerinin enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma alanlarında görülen kırılma ve çatlak ilerleme problemlerine uygulanması ve doğrulamalarının yapılması. Bu kapsamda, proje önergesinde beş uygulama yapılması hedeflenmekle beraber, proje çalışmaları boyunca dokuz adet uygulama yapılmıştır. FCPAS kullanarak, belirtilen endüstriyel alanlarda yapılan uygulamalar ile, çatlak ilerleme profilleri ve ömürleri hesaplanmış, tahmin edilen çatlak ilerleme davranışları deneysel/saha veya literatür verileri ile doğrulanmıştır. Böylece, 1. Aşama projesinde, FRAC3D ile ortaya konularak levha ve silindir gibi basit geometrilere uygulanan mod-I çatlak ilerleme analizi süreçleri, daha genel nitelikli endüstriyel problemlere uygulanmış ve doğrulamaları yapılmıştır.
2. Üç boyutlu karışık modlu yükler altında kırılma ve çatlak ilerleme deneysel kabiliyetlerinin geliştirilmesi. Bu kapsamda yapılan çalışmalar ile, basit düzlemsel karışık modlu kırılma problemlerinden başlayarak, en genel hal olan mod-I, II ve III yüklerinin tamamının aktif olduğu durumlar için deneysel kabiliyetler ve yeni test sistemleri geliştirilmiştir. Bölüm 3'te detayları ile verildiği üzere, yapılan tüm deneyler için tüm deney sisteminin sonlu eleman modellemeleri yapılmış, numune ve numune tutuculardaki gerilmeler incelenerek nihai tasarımları gerçekleştirilmiş, temas mekaniği dâhil olmak üzere sisteme etki eden fizik detaylı bir şekilde modellenmiştir. Nihai tasarımı belirlenen deneysel sistem ile üç boyutlu kırılma ve yorulma çatlak ilerleme analizleri de gerçekleştirilmiştir.
3. Üç boyutlu karışık modlu yükler altında kırılma ve çatlak ilerleme sayısal analiz kabiliyetlerinin ve iyileştirilmiş kırılma kriterlerinin geliştirilmesi. Karışık modlu yükler altında bulunan bir çatlak için kritik kopma yükünün tahmin edilebilmesi için, değişik test sistemleri tasarlanmış ve analizleri yapılarak karışık modlu gerilme şiddet faktörlerine bağlı eşdeğer gerilme şiddet faktörleri belirlenerek mevcut kırılma kriterleri incelenmiş ve iyileştirilmiş kriterler geliştirilmiştir. Ayrıca, karışık modlu yükler altında bulunan iki boyutlu bir çatlak eğrisel, başlangıçta düzlemsel olan üç-boyutlu bir çatlak ise düzleminden

saparak düzlemsel olmayan bir şekilde ilerlemektedir. Bu durum, hem ani çatlak ilerlemesi, hem de yorulmalı çatlak ilerlemesi durumları için geçerlidir. Düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlağın geometrik olarak modellenmesi ve artırılmış adımların sayısal olarak FRAC3D ile analizlerinin yapılabilmesi ve bir sonraki üç-boyutlu çatlak profilinin tahmin edilebilmesi için yöntemler üzerinde çalışılmış ve tahmin edilen yorulma çatlak ilerleme yüzeyleri deneysel yüzeyler ile sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Geliştirilen iyileştirilmiş kriterler, farklı problemler ile ayrıca doğrulanmıştır.

4. FCPAS grafiksel kullanıcı ara yüzünün (GUI) güncellenmesi. Yukarıda tanımlanan gelişmeler çerçevesinde kullanıcı ara yüzünde güncellemeler yapılmıştır. Bu güncellemeler, gerilme şiddet faktör dağılımları ve çatlak ilerleme profilleri gibi mod-I çatlak ilerleme analizleri sonuçlarının daha verimli bir şekilde son işleme tabi tutulması ve karışık modlu yükler altında kırılma analizleri için bazı görsel analiz grafiklerinin geliştirilmesi ve ilgili kılavuz dokümanın ara yüze eklenmesi konularında yoğunlaşmıştır.

Bu raporun içeriği ve sırası da, yukarıda belirtilen ana çalışmalar doğrultusunda oluşturulmuştur. Bölüm 2'de, ilgili çalışmalar konusunda literatür özeti, proje kapsamında yapılan çalışmaların amacı, her bir ana çalışma için kullanılan veya geliştirilen yöntemlerin özeti ve proje sonucunda elde edilen tüm çıktılar ile ortaya konulabilecek avantajlar verilmektedir. Bölüm 3, proje kapsamında yapılan tüm bilimsel çalışmaların yöntem ve sonuçları açısından detaylarını içermektedir. Bölüm 4'te, elde edilen tüm sonuçların özeti ve genel değerlendirmeleri verilmekte olup, Bölüm 5'te ise, proje kapsamında yapılan çalışmalar ile yapılan bilimsel yayın ve sunumlar özetlenmektedir.

2. ÜÇ-BOYUTLU KIRILMA MEKANİĞİ VE FCPAS – AŞAMA 2

Bu bölümde, proje içeriği ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalar özetlenmekte ve projede temel çalışmalar için kullanılan veya geliştirilen yöntemler kısaca açıklanmaktadır. Bölüm sonunda, bu proje çalışmaları sonucunda elde edilen çıktılarının sağlamış olduğu avantajlar da belirtilmektedir.

2.1 Literatür Özeti

Proje çalışmaları ile ilgili literatür özeti, projenin ana başlıkları olan üç-boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin modellenmesi ve karışık modlu yükleme altında kırılma ve çatlak ilerlemesi için deneysel ve analiz kabiliyetleri ana grupları halinde aşağıda verilmektedir.

Kırılma mekaniği ve uygulamaları, ileri teknoloji ürünler üreten gelişmiş ülkelerde, 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 (Haile vd. 2012; Jones ve Tamboli, 2013; Molent ve Barter, 2007; 2010; Zhuang vd. 2007; Yee ve Sidhu, 2005; Jones vd. 2008; Molent vd. 2011; Zhuang ve Molent, 2010; Salam vd. 2002; Larsen vd. 1996; Nicholas ve Zuiker, 1996; Cowles, 1996) oluşan çatlak ve kırılma problemleri olduğu görülmektedir. Enerji alanında karşılaşılan en yaygın saha problemlerinden birkaçı, reaktör basınç kazanlarında (Seifert ve Ritter, 2008; Huang vd. 2008; Sriharsha vd. 1999; Ritter ve Seifert 2008; Liaw vd. 1997; Bousquet vd. 2012), enerji sektöründe önemli bir yeri olan türbinlerde, türbin disklerinin birleşme noktalarında ve disklerin kanat köklerinde (Gagnon vd. 2013; Jung ve Schnell, 2008; Natsume vd. 2010; Prasad vd. 2012; Pang ve Reed, 2003; Shlyannikov vd. 2001; Padula vd. 1999; Hu vd. 2012; Isobe ve Nogami, 2009) meydana gelen çatlak ve kırılma problemleridir. Ulaştırma ve Savunma alanlarında karşılaşılan saha problemleri ise, demiryolu tekerlekleri, rayları ve akslarında (Peng vd 2012;

2013; Nicholson ve Davis, 2012; Desimone ve Beretta, 2006; Beretta vd. 2011), askeri ve yolcu uçaklarının gövdelerinde, gaz türbin motorlarında ve türbin kanatlarında (Haile vd. 2012; Jones ve Tamboli, 2013; Molent ve Barter, 2007; 2010; 2011; Zhuang vd. 2007; Yee ve Sidhu, 2005; Jones vd. 2008; Zhuang ve Molent, 2010; Salam vd.2002; Larsen vd. 1996; Nicholas ve Zuiker, 1996; Cowles, 1996) oluşan çatlak ve kırılma problemleridir.

Literatürde mod-I yük altında kırılma ve çatlak ilerleme analizleri için başka çalışmalar da vardır. Bunlardan biri, Kotsikos ve Grasso (2012)'nin demiryolu rayında yaptıkları kırılma analizidir. Bu çalışmalarında, ray için kırılma testi yapmış ve KI gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerini elde etmişlerdir. Bir başka çalışmada Arora vd. (2011) nükleer santrallerde kullanılan bir boru geometrisinde çatlak ilerleme testleri gerçekleştirmişler ve çatlak uzunluğu-ömür grafiği değerlerini elde etmişlerdir. Tiong ve Jones (2009) çatlak ilerlemesini bir helikopter parçasında deneysel ve nümerik olarak analiz etmişler ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Çoğul çatlaklar konusunda Nishimura vd. (1990) havacılıkta sık kullanılan bir malzemeden (2024-T3 alüminyum alaşımı) numunede çoğul kenar ve köşe çatlaklarının ilerleme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Boljanovic ve Maksimovic (2013), havacılıkta sık kullanılan bir bağlantı şekli olan bağlantı kulağında çatlak ilerlemesini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Leek ve Howard (1996), bir plakada ilerleyerek birleşen çatlakların analizini deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Bu gibi örnekleri çoğaltmak mümkündür. Literatürdeki deneysel, analitik ve nümerik analiz çalışmaları, kırılma ve çatlak ilerleme analizlerinin önemli bir yere sahip olduğunu ve aktif olarak süren bir araştırma alanı olduğunu göstermektedir.

Yukarıda bahsedilen alanlarda karşılaşılan çatlak ve kırılma problemlerinin sebeplerinden biri, makine parçalarının 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.

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 bağlı olarak düz, eğri, 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. Çatlağın ilerlemesinde birbirini etkileyen ve tetikleyen farklı faktörler olduğundan dolayı, düzlem dışı üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerlemesi, anlaşılması ve yorumlanması 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 empirik 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 (Nuismer, 1975; Hussain ve Pu, 1974), 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. Empirik olarak geliştirilen iki boyutlu kriterler ise, Tanaka (1974) kriteri, Pook (1989) kriteri ve Richard (1985;1987) kriteridir.

Literatürde mevcut üç boyutlu kırılma kriterleri, minimum birim şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu (1974) kriteri, Irwin (1957) kriteri, Tanaka (1974) kriteri, Pook (1980; 1985) kriteri, Schöllmann (2001; 2002) kriteri, Richard (2012) kriteri ve Kikuchi (2012) kriteri olarak sıralanabilir. Richard vd. (2004) yapmış olduğu bir çalışmada, iki ve üç boyutlu karışık mod kriterleri karşılaştırıldığında, iki boyutlu kriterler arasından Erdogan ve Sih kriteri ve Richard kriteri, üç boyutlu kriterler arasından ise Schöllmann kriteri ve Richard kriteri çatlak ilerleme profilini tanımlayan en uygun kriterler olarak belirtilmiştir.

Karışık modlu çatlak ilerlemesi ile ilgili literatürdeki sınırlı sayıda çalışma arasında Richard ve ekibinin hem iki boyutlu hem de üç boyutlu karışık mod çatlak ilerlemesi ile ilgili birçok çalışma yaptığı gözlenmektedir. CTS (Compact Tension Shearing) numunesi kullanarak farklı açılarda yükleme yapmış ve elde ettiği sonuçlara göre iki ve üç boyutlu kriterler geliştirmiştir. Zhao ve Guo (2012) da, Richard ve ekibinin üzerinde çalıştığı CTS numunesi ile benzer fakat farklı boyutlarda CTS numunesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Proje kapsamında bu numune tipi ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilerek mevcut kriterler değerlendirilmiş ve yeni bir numune geliştirerek kırılma ve çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve yukarıda bahsedilen numune tipleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Mod-I/III kırılma testleri fiziksel bazı zorluklar içermektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için literatürde bazı yöntemler önerilmiştir. Karışık modlu kırılma testleri için standart bir numune tipi bulunmamaktadır. Richard (1989) yayınında karışık modlu kırılma testleri için literatürde kullanılan dokuz farklı numune tipini derlemiştir. Literatürde standart bir numune

tipi olmaması test sonuçlarının karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Rahman vd. (2013), Kamat vd.(1998), Kumar vd. (1994) çatlağı mod-I/III yüklemesine maruz bırakmak için numune üzerine açılmış eğik çentik kullanmıştır. Awaji vd. (1978), Aliha vd. (2015) ise çalışmalarında dairesel bir numune kullanarak çatlak ucunda mod-I/III etkisi oluşturmaya çalışmışlardır. Mod-I/III yüklemesi için kullanılan diğer bir yöntem ise numune üzerinde değişiklik yapılmadan tutucu yardımı ile karışık modlu yükleme şartının sağlanmasıdır. Literatürdeki çalışmalarda Wei (2011) ve Ayatollahi (2014) tutucu yardımı ile karışık modlu deneyler gerçekleştirmiştir.

Proje kapsamında yapılan çatlak ilerleme simülasyonu ve deneysel çalışmalarında, yukarıda belirtilen bazı çalışmalar ile muakayeseler ile de yapılmıştır.

2.2 FCPAS – AŞAMA 2: Amaçlar, Yöntem Özeti, Avantajlar ve Kazanımlar

Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 2 projesi, 2008-2011 yılları arasında yapılan Aşama 1 projesinin devamı olup, bu projede Aşama 1 projesinde geliştirilen mod-I çatlak ilerleme analiz kabiliyetlerinin daha karmaşık problemlere uygulanarak doğrulanması ve karışık modlu yükler altında çatlak ilerleme tahminleri için yeni analiz ve deneysel kabiliyetlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Aşağıdaki alt bölümlerde, bu alanlarda geliştirilen ve uygulanan yöntemlerin ve proje sonucunda elde edilen kazanım ve avantajların özeti verilmektedir.

2.2.1 FCPAS – AŞAMA 1 Kabiliyetlerinin Pratik Uygulamalarla Sağlanması

Aşama 1 projesinde, mod-I çatlak ilerleme problemlerinin otomatik analizi için yöntemler geliştirilmiş ve temel geometrik tanıma sahip plaka ve silindirik gibi yapılarıdaki yüzey ve köşe çatlaklarına uygulanmıştır. Bu çalışmada, Aşama 1 projesinde geliştirilen yöntemlerin, Enerji, Ulaştırma, Havacılık ve Savunma gibi teknolojik alanlarda karşılaşılan pratik ve daha karmaşık geometri içeren çatlak ilerleme problemlerine uygulanması ve doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda belirtilen alanlardaki kırılma problemini tanımlayan geometrinin katı modeline çatlak yerleştirme işlemi gerçekleştirilerek, kırılma analizi yapılmakta, çatlak ucu boyunca elde edilen gerilme şiddet faktörleri ve ilerleme modeline bağlı olarak bir sonraki çatlak profili tahmin edilmektedir. Daha sonra, ilerletilen yeni çatlak profiline uyan en iyi elips denklemi

bulunarak bir sonraki analiz için katı modele çatlak yerleştirme işleminde kullanılmaktadır. Bu çevrim, kritik çatlak uzunluğuna kadar devam ettirilmekte ve sonunda yorulma çatlak ilerleme ömrü hesaplanmaktadır.

2.2.2 Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Deney Kabiliyeti Geliştirilmesi

Kırılma Mekanikliği alanında kullanılan deneysel yöntemlerin büyük çoğunluğu, sadece açılma modunun olduğu mod-I yüklemesi altında yapılmakta ve dolayısıyla, çatlak kendi düzlemi içerisinde ilerlemektedir. Diğer yandan, pratikte görülen bir çok problemde çatlak içeren yapılar sadece açılma yüküne değil, karmaşık veya karışık modlu yüklere maruz kalabilmektedir. Bu durumda, çatlak başlangıçta düzlemsel bir yüzeye sahip olsa da, ilerleme sürecinde kendi düzleminden saparak düzlemsel olmayan bir şekilde ilerlemektedir. Bu durumda, çatlağın ne zaman veya hangi yük değerinde ilerlemeye başlayacağı ve hangi sapma açısı ile ilerleyeceği cevaplanması gereken temel sorulardır.

Yukarıda tanımlanan özellikler içeren çatlaklar için deneysel yöntem ve kırılma kriterleri geliştirmek amacıyla, literatürde benzerleri bulunan iki-boyutlu test sistemleri üzerinde analiz ve deneysel çalışmalar yapılarak deneysel analiz kabiliyetleri kazanılmıştır. Literatürde bulunmayan iki-boyutlu karışık modlu testler için yeni numune ve aparatları tasarlanmış ve doğrulamaları yapılmıştır. Son olarak, üç-boyutlu test sistemleri üzerinde çalışmalar yapılarak literatürde bulunmayan yeni test sistemleri geliştirilerek, elde edilen veriler ile iyileştirilmiş kırılma kriterleri oluşturulmuştur. Bu alanda yapılan tüm çalışmalarda, deneysel test sistemi önce sonlu elemanlar ile modellenmiş, gerekirse numune ve/veya tutucu aparatlarda tasarım iyileştirmeleri yapılmış ve numune üzerinde elde edilen asal gerilme dağılım ve yönleri irdelenerek, doğrulama çalışmaları için numune üzerine yerleştirilecek olan strain-gagelerin yerleri ve yönleri tespit edilmiştir. Böylece uygulanan strain-gage ve elde edilen ölçümler ile, kırılma analizlerinden önce sonlu eleman modellerinde numune üzerinde tahmin edilen yük ve gerilme dağılımının sağlanması yapılmıştır.

2.2.3 Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Analizi Kabiliyeti ve Kriter Geliştirilmesi

Yukarıda belirtildiği üzere, pratikte görülen karışık modlu yükler altında bulunan ve çatlak içeren yapıların güvenilirliği veya çatlak ilerleme ömürlerinin tahmin edilmesi büyük önem arz

etmektedir. Dolayısıyla, karışık modlu yükleme altında düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlakların ilerleme yüzeyleri ve ömürlerinin doğru tahmin edilmesi için sayısal analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde, çatlak içeren yapı önce ANSYS™ ortamında modellenmekte, FRAC3D programı ile üç-boyutlu kırılma analizi yapılarak karışık modlu gerilme şiddet faktörleri hesaplanarak, kullanılan çatlak ilerleme modeli ile birlikte bir sonraki çatlak profili belirlenmektedir. Daha sonra, yeni ve eski profiller birleştirilerek artırımlı olarak ilerlemiş çatlak yüzeyi elde edilmektedir. Güncellenmiş çatlak yüzeyi ile model tekrar sonlu eleman analizine tabi tutulmakta ve yeni modele dair kırılma parametreleri hesaplanarak analiz çevrimi bu şekilde kritik çatlak uzunluğuna kadar devam ettirilmektedir. Yapılan analizlerin sonucunda, artırımlı bir şekilde birleştirilerek elde edilen düzlemsel olmayan çatlak yüzeyi ve ilgili ilerleme ömrü tahmin edilebilmektedir.

2.2.4 FCPAS – Aşama 2 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Geliştirilmesi ve Güncellemeler

Kırılma ve çatlak ilerleme analizlerinin tutarlı ve daha verimli bir şekilde yapılabilmesi amacıyla, kullanılan alt programlar ve ana çözücü FRAC3D programını aynı ortam içerisinde toplayan FCPAS ara yüz geliştirilmesi çalışmalarına devam edilmiştir. Ara yüz, C# programlama dili kullanılarak proje kapsamındaki gelişmeleri de içerecek şekilde güncellenmiştir. Ara yüz ile ilgili detaylar Bölüm 3.4'te verilmektedir.

2.2.5 FCPAS – Aşama 2 Avantajlar ve Kazanımlar

Aşama 1 projesinde, temel geometrilerde mod-I çatlak ilerleme analizlerinin otomatik bir şekilde yapılabilmesi için kabiliyetler geliştirilmiş ve ilgili alt programlar FCPAS ara yüz yazılımı altında toplanmıştı. Projede herhangi bir deneysel çalışma yapılmamıştı. Üç-boyutlu modelleme ve deneysel analiz konularında, Mekaniğin diğer alanlarına göre nispeten daha az kabiliyet ve tecrübe birikiminin olduğu Ülkemizde, hem modelleme hem de, standart olmayan kapsamlı deneyler de dahil olmak üzere deneysel kabiliyetlerin geliştirilerek tecrübe birikimine katkıda bulunmayı hedeflediğimiz bu projede, yukarıda kısaca özetlenen çalışmalar sonucunda elde edilen temel kazanımlar maddeler halinde aşağıda verilmektedir:

- Genel Problemler için Mod-I Çatlak İlerleme Analiz Kabiliyeti: Enerji, Ulaştırma, Havacılık ve Savunma alanlarındaki kırılma ve çatlak ilerleme problemleri üzerinde yapılan uygulamalar ile geliştirilen yöntemlerin bu alanlarda karşılaşılan bazı

karmaşık problemlere uygulanabilirliği ispat edilmiştir. Bu uygulamalar ile bir adet Yüksek Lisans tezi tamamlanmış, iki adet yüksek lisans tezi de yazım aşamasındadır.

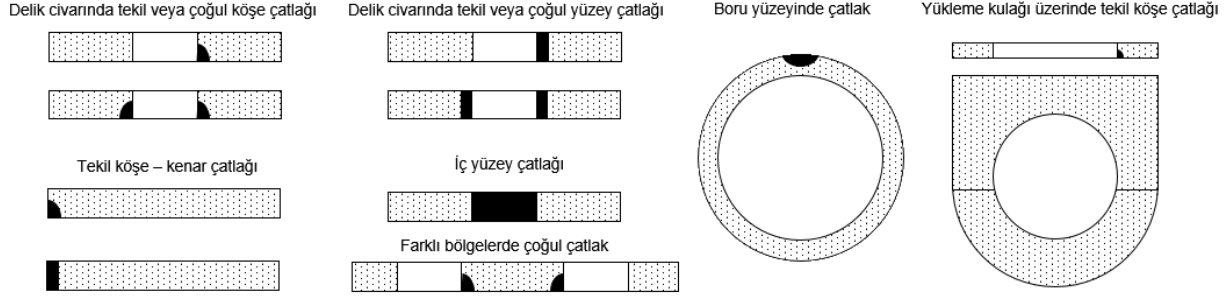
- Üç-Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Deneysel Kabiliyetler: Proje kapsamında yapılan çalışmalar ile, Ülkemizde sınırlı sayıda yerlede yapılan mod-I kırılma ve çatlak ilerleme deneylerine ek olarak, standart olmayan kırılma deney yöntem ve sistemleri de geliştirilmiş ve ilgili sağlama uygulamaları da gerçekleştirilmiştir.
- Üç-Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Modelleme ve Analiz Kabiliyetleri: Aşama 1 projesinde uygulanan düzlemsel çatlak ilerleme problemlerinden sonra, karışık modlu yükler altında düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlakların modellenmesi için yöntem geliştirilmiş ve ilgili bağımsız problemler ile sağlamaları gerçekleştirilmiştir. Yukarıdaki ve bu madde kapsamındaki çalışmalar, yazım aşamasında olan bir adet doktora tezine en büyük katkıyı yapmıştır.
- Lisansüstü Dereceli Araştırmacı Yetiştirilmesi: Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı üzere, projenin en büyük çıktısı ve kazanımlarından biri de Kırılma Mekaniği alanında analiz ve deneysel yöntemler konularında uzmanlaşmış araştırmacı yetiştirilmesidir.
- FCPAS Yazılımı Geliştirilmesi: Her ne kadar, ana çözücü program, FRAC3D, proje yürütücüsünün daha önceki çalışmaları boyunca geliştirilmiş olsa da, kullanılan diğer alt programlar ile beraber bir ara yüz ortamında derlenmesi ve çeşitli çatlak ilerleme problemlerine uygulanarak doğrulamalarının yapılmış olması, bu konularda analiz kabiliyeti ihtiyacı oluşan araştırmacı ve kurumlara bu tür analiz kabiliyetlerinin düzenli bir yazılım ortamı içerisinde verilmesine imkan sağlamaktadır.

3. FCPAS – AŞAMA 2: GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 FCPAS – AŞAMA 1 Kabiliyetlerinin Pratik Uygulamalarla Sağlaması

Bu çalışma ile, mevcut FCPAS programının uygulanabilirliğini test etmek için literatürden ve endüstriden çeşitli uygulamalar araştırılmış ve ilgili analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda enerji, savunma ve ulaştırma alanlarında, FCPAS programıyla yorulmalı çatlak ilerleme simülasyonlarının yapılacağı uygulamalar, gerek literatür araştırmaları ile gerekse bazı yerli endüstri kurumlarını ziyaret ederek belirlenmiştir. Bu kapsamda T.C.D.D. Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi (DATEM – Ankara), TUSAŞ-TAI (Ankara) ve TUSAŞ-TEI (Eskişehir) kurumları ziyaret edilmiştir. Yapılan ziyaretlerde, proje kapsamında yapılan çalışmaların tanıtımı yapılmış, bu kurumlarda bulunan ürünler arasında geometrisi ve yüklerin tanımlı olduğu mod-I yorulma çatlak oluşan problemlerin olup olmadığı ve projemizde uygulama olarak değerlendirilip değerlendirilemeyeceği görüşülmüştür.

Yapılan görüşmeler sonucunda, her ne kadar kendi ürünlerinde yorulma çatlak ilerleme verisi olan ürün bulunmasa da, bu problemin değerlendirilebileceği potansiyel ürün geometri ve paylaşabilecekleri ilgili diğer verileri TUSAŞ-TAI ve TUSAŞ-TEI tarafından iletilmiştir. TUSAŞ-TAI tarafından havacılık sektöründe kırılma ve çatlak ilerleme konularında yaygın kullanıma sahip problemlerinin listesi verilmiştir (Şekil 3.1.1). Bu problem türleri içerisinde literatürde ilgili karşılaştırma verileri bulunabilenler, bu çalışma kapsamında analiz edilmiş olup, detayları aşağıdaki alt bölümlerde verilmektedir. TUSAŞ-TEI tarafından ise, bir uçak motoru üzerindeki türbin içerisinde bulunan sabit kanatçıkta oluşabilecek yorulma çatlak üzerinde literatürden kullanılacak malzeme verileri ile uygulama yapılması için problemin geometrisi paylaşılmıştır.



Şekil 3.1.1. TUSAŞ-TAI tarafından gönderilen ve havacılık sektöründe yaygın olarak karşılaşılan kırılma problemleri şeması, TUSAŞ-TAI (2014)

Yukarıda belirtilen endüstriyel ziyaretler ve literatür araştırmaları sonucu, bu çalışma kapsamında toplam 12 adet uygulama (Tablo 3.1.1) yapılmıştır (proje önergesinde sadece 5 adet uygulama hedeflenmişti). Bu çalışmalar kapsamında, bursiyer yüksek lisans öğrencilerimiz ülkemizde çok az sayıda kişinin yapabildiği, Havacılık ve Uzay alanında oldukça önemli bir alt alan olan üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme simülasyonu analizlerinde tecrübeler kazanmıştır.

Tablo 3.1.1. Mod-I yükleme altında çatlak İlerleme analizi yapılan uygulamalar

Enerji-Ulaştırma-Havacılık Literatür	Uygulamaları	- Enerji-Ulaştırma-Havacılık Endüstri	Uygulamaları	-
3.1.1	UIC 60 Web Corner Ray Çatlakları	3.1.4	Eksenel Çeki Yüğü Altında Çoğul Çatlaklar	
3.1.2	Enerji Santrali Boru Yüzey Çatlakları	3.1.6	Yükleme Kulağı (Lug) Tekil Köşe Çatlakları	
3.1.3	Helikopter Lift-Frame Köşe Çatlakları	3.1.7	Yükleme Kulağı (Lug) Çoğul Köşe Çatlakları	
3.1.5	Eksenel Çeki Yüğü Altında İki Yüzey Çatlakları	3.1.10	Sabit Türbin Kanatçığı Çatlakları	
3.1.8	Plakada İlerleyerek Birleşen Çoğul Yüzey Çatlakları			
3.1.9	Havşalı Delikli Plakada Köşe Çatlakları			
3.1.11	Plakada Düzlemsel Olmayan İki Çatlak			
3.1.12	Plakada Düzlemsel Olmayan Üç Kenar Çatlakları			

3.1.1 UIC 60 ray profili probleminde, köşe çatlakları ile kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve çatlak ilerleme profilleri tahmin edilmiştir. 3.1.2 boru yüzey çatlakları probleminde, yüzey çatlakları simüle edilmiş ve ömür hesaplamaları yapılmıştır. 3.1.3 helikopter taşıyıcı-çerçeve probleminde, parçanın üzerindeki köşe çatlaklarının ilerleyerek kalınlık boyunca bir çatlak haline gelmesi analiz edilmiştir. 3.1.4 eksenel çeki yükü altında çoğul çatlaklar probleminde 4 ve 8 adet köşe çatlaklı iki farklı numunenin kırılma ve çatlak ilerleme analizleri yapılmıştır. 3.1.5 çoklu çatlak numunesi probleminde, farklı uzunluklarda iki adet yüzey çatlaklarının ilerleyerek birleşmesi ve tekil çatlak haline geldikten sonra ilerlemeye devam etmesi durumu analiz edilmiştir. 3.1.6 ve 3.1.7 yükleme kulağı problemlerinde, havacılık endüstrisinde sık kullanılan bir bağlantı şekli olan bağlantı kulağının kırılma analizleri ve çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. 3.1.8 probleminde plakada ilerleyerek birleşen çoğul yüzey çatlaklarının ilerleyerek birleşmesi durumu analiz edilmiştir. 3.1.9 probleminde havşalı delik içeren bir plakadaki köşe çatlakları ilerlemesi analizi yapılmıştır. 3.1.10 sabit türbin kanatçığı analizinde, TUSAŞ-TEI tarafından sağlanan kanatçık geometrisi üzerinde belirtilen yükler altında çatlak ilerleme simülasyonu yapılmıştır. 3.1.11 ve 3.1.12 problemlerinde ise plakalarda düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesi analizleri gerçekleştirilmiştir.

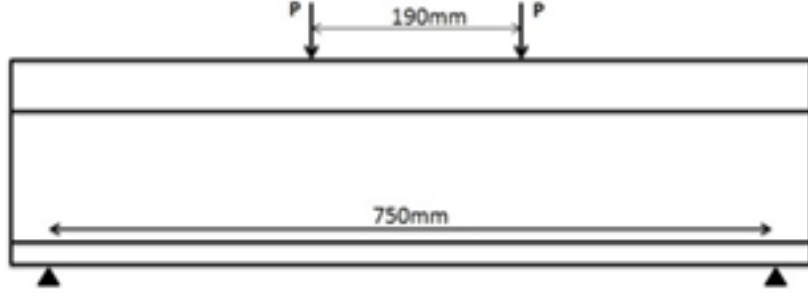
Bu çalışma kapsamında toplam 12 adet uygulama yapılmıştır. Yapılan analizler, çatlak yerleştirilen model geometrisinin karmaşıklığına bağlı olarak, uygulama ara yüzü (GUI – Graphical User Interface) ve makro dosyaları ile analizin tamamına yakını otomatik olarak yapılabilirken, bazı analizlerde çatlaklı geometriyi el ile modellemek gerekmiştir. Yapılan analizler ve sonuçları ile ilgili detaylar alt bölümlerde verilmiştir.

3.1.1 UIC 60 Ray Profili Çatlak İlerleme Analizleri

Literatürden, Kotsikos ve Grasso (2012) tarafından yapılan ve demir yolu ulaşımında yaygın olarak kullanılan UIC 60 ray profilinde çatlak analizini konu alan bir çalışma incelenmiştir. Bu çalışmada, köşe çatlaklarına sahip UIC 60 Ray profilinin dört noktalı eğme yorulma testleri yapılmış, bu testler sonucunda farklı kopma yüzeyleri tespit edilmiş ve bu kopma yüzeyleri için KI-gerilme şiddet faktörü hesaplanmıştır.

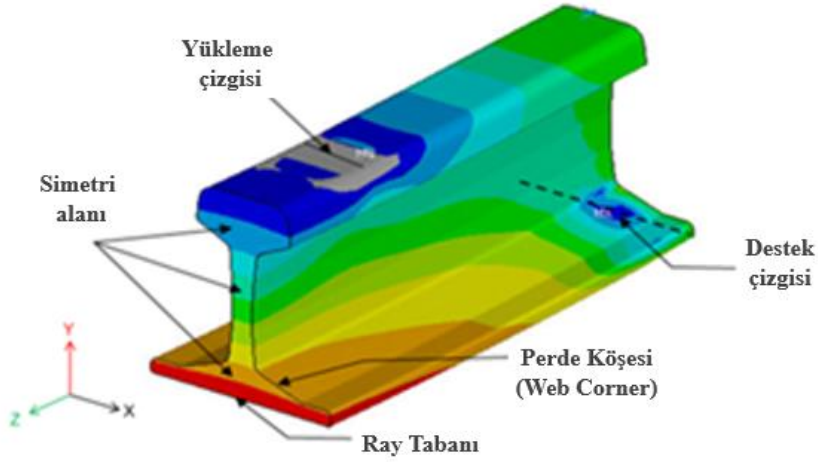
Bu çalışmada, UIC 60 ray modeli için Kotsikos ve Grasso (2012)'nin çalışmasındaki bilgiler kullanılarak, Şekil 3.1.2'de şeması gösterilen dört noktalı eğme testi simüle edilmiş, FCPAS programı kullanılarak başlangıç çatlaklarından kopma çatlaklarına kadar çatlak ilerleme profilleri tahmin edilmiş ve her bir profil için KI gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerleri hesaplanmıştır. Geometriye uygulanan toplam yük 512 kN ve Paris-Erdoğan çatlak ilerleme modelindeki malzeme sabitleri $C=3.3 \times 10^{-13}$ ve $m=2.63$ 'tür. Köşe çatlakları, rayın tabanından 27 mm

yukarıda, eğik yüzeyde (literatür çalışmasında web corner olarak adlandırılmıştır) konumlanmış olup, başlangıç yarıçapı 2 mm'dir. Malzemenin kırılma tokluğu ise $27 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 'dir.



Şekil 3.1.2. 4-Noktalı eğme deneyinin test şeması, Kotsikos ve Grasso (2012)

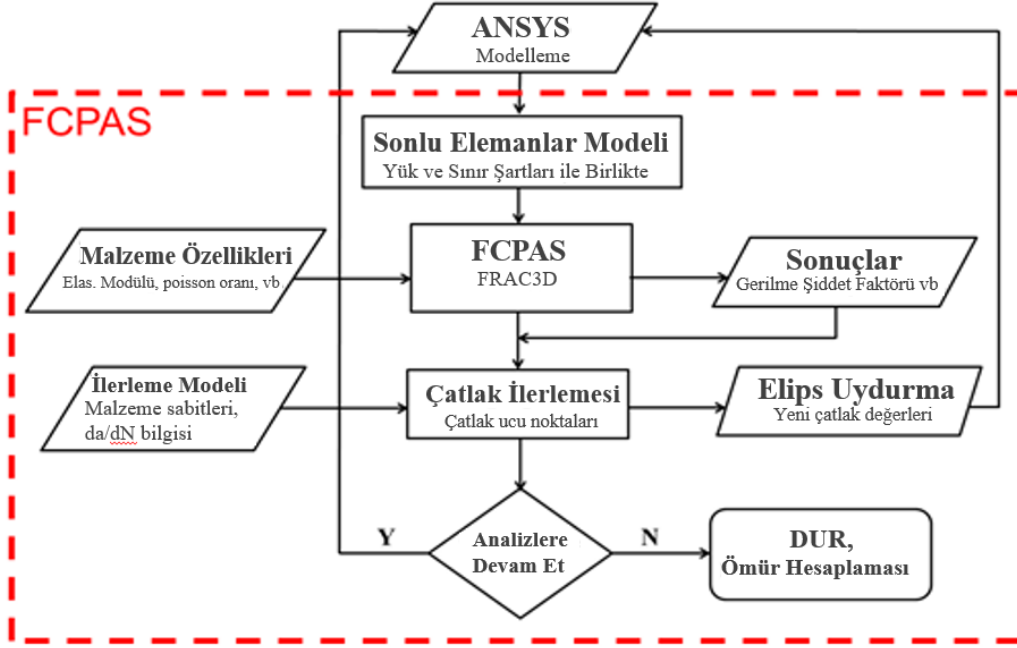
4-noktalı eğme yükü altında, çatlak içermeyen bir rayın gerilme dağılımı Şekil 3.1.3'te verilmiştir.



Şekil 3.1.3. Ray üzerinde oluşan eğilme gerilmesi dağılımı

FCPAS ile yapılan çatlak ilerleme analizlerinin iş akış şeması Şekil 3.1.4'te gösterilmektedir. Önce parçanın sonlu elemanlar modeli ANSYS™, ANSYS (2009) ticari sonlu elemanlar yazılımı ile oluşturulmaktadır. ANSYS'ten sonlu elemanlar modelinin eleman (element), düğüm noktası (node), sınır şartı ve yük verilerinin listeleri alınmakta ve FCPAS programına aktarılmaktadır. Bu veri listeleri, FCPAS'ın kullanacağı sonlu elemanlar model formatına (.geo uzantılı) dönüştürülmektedir. FCPAS'ın sonlu elemanlar çözücüsü FRAC3D, geo dosyasıyla birlikte, yine FCPAS ara yüzünden girilen malzeme ve analiz ayarları bilgilerini (.run dosyası) de kullanarak analizlerini gerçekleştirmektedir. Çözüm sonucunda elde edilen

gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerine göre mevcut çatlak ucu düğüm noktaları ilerletilmekte ve ilerletilen düğüm noktalarına elips uydurularak bir sonraki çatlak geometrisi elde edilmektedir. Bu işlemler, parçanın nihai kırılmaya uğrayacağı noktaya (gerilme şiddet faktörleri kırılma tokluğu değerine ulaşana) veya belirli bir çatlak uzunluğu değerine kadar tekrarlanmakta ve böylece yorulmalı çatlak ilerleme simülasyonu tamamlanmaktadır.



Şekil 3.1.4. FCPAS çatlak ilerleme analizi iş akış şeması

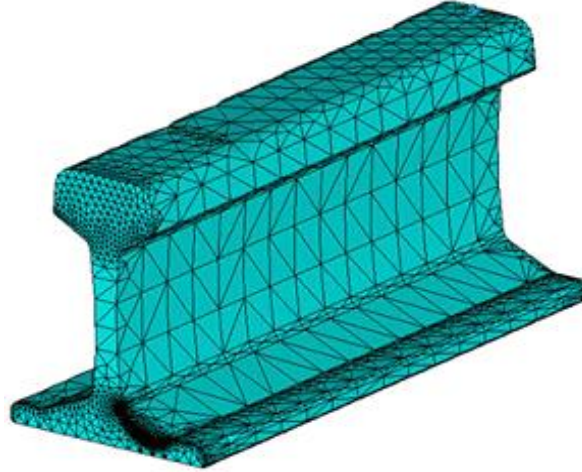
Çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilirken, çatlakın bir adım ilerleyebilmesi için birden fazla “.exe” uzantılı uygulama dosyasının sıralı bir şekilde çalışması gerekmektedir. Gerekli uygulama dosyalarını sırasıyla otomatik olarak çalıştıran “.bat” uzantılı toplu iş dosyası hazırlanmakta ve bu sayede önemli ölçüde zaman kazanılmaktadır.

3.1.1.1 ANSYS ile UIC 60 Ray Modeline Makro İle Çatlak Yerleştirilmesi ve Sonlu Elemanlar Model Bilgilerinin Alınması

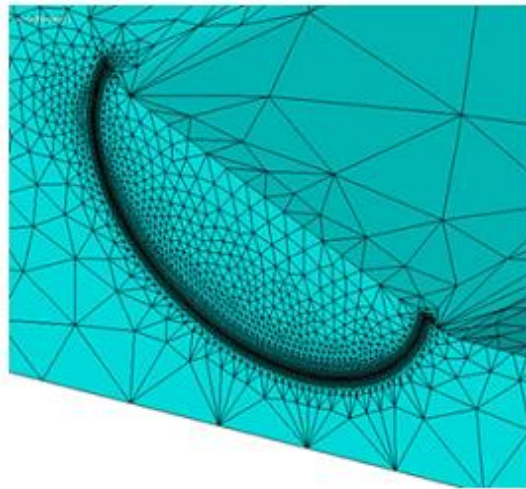
UIC 60 ray modeline köşe çatlaklarını her çatlak ilerleme adımında otomatik olarak yerleştirmek için parametrik bir ANSYS makro dosyası oluşturulmuştur. Dört noktalı eğilme deneyinin simetrik yükleme özelliğinden dolayı geometrinin yarısı modellenmiş ve böylece daha az eleman kullanılması ile çözüm süresi kısaltılmıştır.

Önce UIC 60 ray modeli çatlaksız olarak modellenerek, temel (base) model olarak kaydedilmiştir. Hazırlanmış olan ANSYS makrosu, her çatlak adımı analizinde bu temel modeli ANSYS ortamına çağırarak çatlak yerleştirmekte ve FCPAS için gerekli sonlu elemanlar model bilgilerini almaktadır.

Çatlaklı model hazırlandıktan sonra, bölüntüleme (mesh) işlemleri yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunu etkileyeceğinden dolayı, çatlak ucu bölgesi elemanlarının kaliteli (boyut, şekil oranı vb. uygunluğu) olması, önemlidir. Bu nedenle, çatlak ucunda gerekli geometrik bölümler yapılmış ve bu bölünmüş geometriye süpürme (sweep) yöntemi ile oldukça düzgün elemanlı bölüntüleme yapılabilmektedir. Çatlak ucu bölüntüleme işleminden sonra, geometrinin geriye kalan kısmına da, dört yüzlü elemanlar (tetrahedron) kullanarak serbest bölüntüleme yapılmıştır. Şekil 3.1.5'te ray modelinin tamamının bölüntüsü, Şekil 3.1.6'da ise çatlak bölgesi bölüntüsü gösterilmiştir.

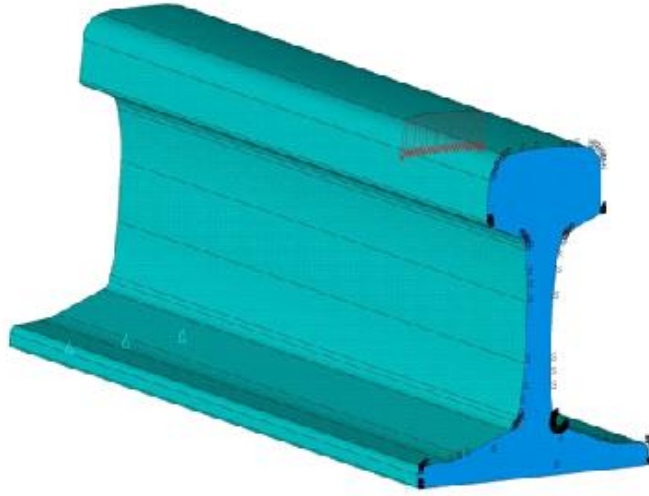


Şekil 3.1.5. UIC 60 ray modelinin sonlu elemanlar modeli

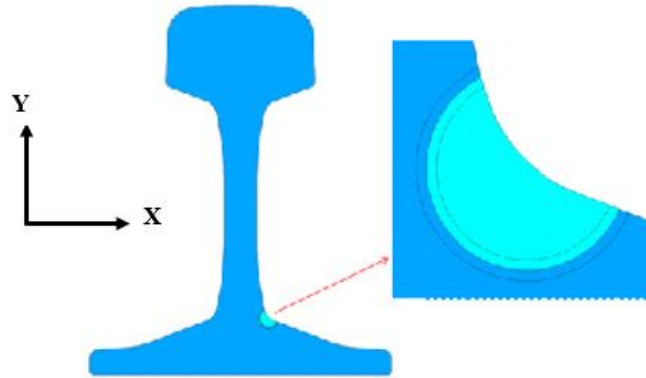


Şekil 3.1.6. Çatlak ucu bölüntü yapısı

Bölüntüleme işleminden sonra modele sınır şartları ve yükler uygulanmıştır. Model simetrik olduğundan dolayı, çatlak düzlemindeki ayrılmamış (kopmamış) yüzeylere simetri sınır şartı verilmiştir. Modele bir taraftan $u_y=0$ (dikey yönde sıfır yer değiştirme), simetri yüzeyinin tabanında bulunan çizginin bir noktasına da $u_x=0$ (raya yan yönde) sınır şartı uygulanmıştır. Rayın üst tarafındaki yükleme noktalarına aşağı yönlü (-y) toplam 256 kN kuvvet uygulanmıştır. Simetri şartından dolayı toplam yük 512 kN olmuştur. Şekil 3.1.7'de yükleme durumu, Şekil 3.1.8'de ise simetri sınır şartı uygulanan yüzeyler gösterilmektedir.



Şekil 3.1.7. Ray modeline uygulanan sınır şartları ve yüklerin genel gösterimi



Şekil 3.1.8. Simetri sınır şartı uygulanan yüzeyler (mavi), kopmuş çatlak yüzeyleri (yeşil)

Sınır şartları uygulandıktan sonra geo dosyasını oluşturabilmek için gerekli olan sonlu elemanlar modeli veri listeleri alınmıştır. Bu işlem için, çatlak ucu düğüm noktaları (çatlak ucuna değen noktalar) listesi "ray.crnodes" alınmıştır (Şekil 3.1.9).



Şekil 3.1.9. Çatlak ucu düğüm noktaları (node) seçimi

Daha sonra, çatlak ucu elemanlarının bulunduğu “ray.crelems” listesi oluşturulmuştur. Bu işlem için, ayrılmış çatlak kısmını temsil eden hacmin elemanları seçilmiştir. Bu elemanların arasından da önceden seçilmiş olan çatlak ucu düğüm noktalarına dokunan elemanlar seçilmiştir (Şekil 3.1.10). Uygulanan bu sıralı seçme işlemi ile çatlak ucu elemanlarının tek tek seçilmesine gerek kalmamaktadır.



Şekil 3.1.10. Çatlak ucu elemanlarının seçimi

Son olarak, tüm sonlu elemanlar modeli eleman listesi “ray.elis”, düğüm noktası listesi “ray.node”, sınır şartı listesi “ray.dlis”, kuvvetlerin listesi “ray.flis” dosyalarına kaydedilmiştir.

3.1.1.2 Geo Dosyasının Oluşturulması

ANSYS'ten alınan model listeleri, FCPAS ara yüzü ile FCPAS sonlu elemanlar model formatına çevrilerek kullanılmaktadır. Bahsedilen format değişikliği için FCPAS ara yüzünde “GEO FILE” sekmesi kullanılarak çalışma dizinindeki listeler FCPAS'e okutulmuştur. Sonra çatlak ucu düğüm noktalarının sıralanış eksenini seçilmiş ve “Generate GEO File” butonu

kullanılarak arka planda “Convert_ansys_frac3d_ansysbatch.exe” uygulaması çalıştırılmıştır. Bu uygulama ile veri listeleri FCPAS formatına çevrilmiş ve “.geo” uzantısı ile tek dosya olarak kaydedilmiştir.

3.1.1.3 Run Dosyasının Oluşturulması

Geo dosyası oluşturulduktan sonra FCPAS ara yüzündeki RUN FILE sekmesinde malzeme özellikleri girilmiştir. FCPAS programı ile yapılan analizlerde çatlak ucu elemanları ile normal elemanlar arasında geçiş elemanları (transition element) kullanımı bu sekmeden aktif hale getirilebilir. Gerekli bilgiler girildikten sonra “Generate RUN File” butonu ile “writerun_frac3d.exe” uygulaması arka planda çalıştırılmış ve “.run” uzantılı dosya oluşturulmuştur.

3.1.1.4 FCPAS Çözücüsü FRAC3D ile Kırılma Analizi

FCPAS ara yüzündeki “Fracture Analysis” sekmesi açıldığında ve önceden oluşturulmuş olan geo ve run dosyaları otomatik olarak tanınmış olmaktadır. “RUN” butonu ile analiz başlatılmaktadır.

FRAC3D ile yapılan çözüm sonunda “*.sum”, “*.stn”, “*.str”, “*.wct”, “*.out”, “*.prop1” ve “*.crk” dosyaları otomatik olarak oluşturulmaktadır. “*.sum” dosyası, modeldeki eleman ve düğüm noktası sayılarını, çatlak sayısını, analizde kullanılan zenginleştirilmiş eleman ve geçiş elemanı sayılarını içermektedir. “*.stn” dosyası analiz sonucunda oluşan birim şekil değişimi bilgilerini, “*.str” dosyası analiz sonucunda oluşan gerilme bilgilerini, “*.wct” dosyası çözüm işlemi sürelerini, “*.out” dosyası düğüm noktalarının yer değiştirme değerlerini, “*.prop1” dosyası ilerletilmemiş çatlak ucu bilgilerini ve “*.crk” dosyası ise analizi yapılan çatlak ucu düğüm noktalarının gerilme şiddet faktörü değerlerini içermektedir.

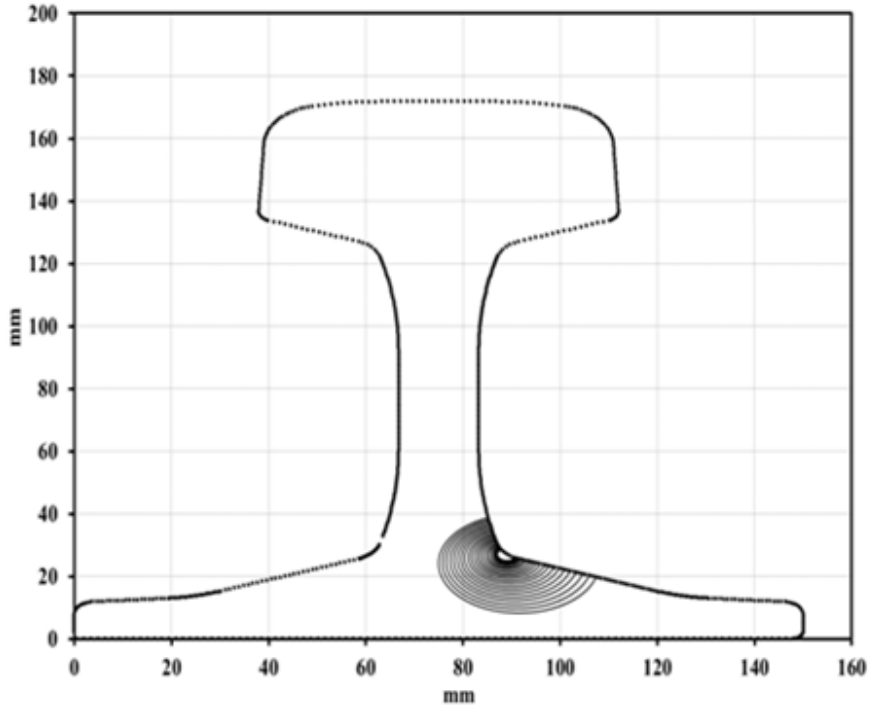
3.1.1.5 Çatlağın İlerletilmesi ve Sonraki Çatlak Profilinin (Crack Front) Modellenmesi

FRAC3D çözümünden sonra çatlak ucu düğüm noktalarının GŞF değerleri ve önceden belirlenmiş olan maksimum çatlak ilerleme miktarına (Δa_{max}) göre her bir düğüm noktası “crk_propagation.exe” uygulaması tarafından ilerletilmiş ve “*.prop2” dosyasına kaydedilmiştir. Çatlak ilerlemesi için Paris-Erdoğan kuralı malzeme sabitleri ve maksimum çatlak ilerleme miktarı, analiz öncesinde FCPAS ara yüzünden oluşturulmuş olan matprop uzantılı bir dosyadan okunmaktadır.

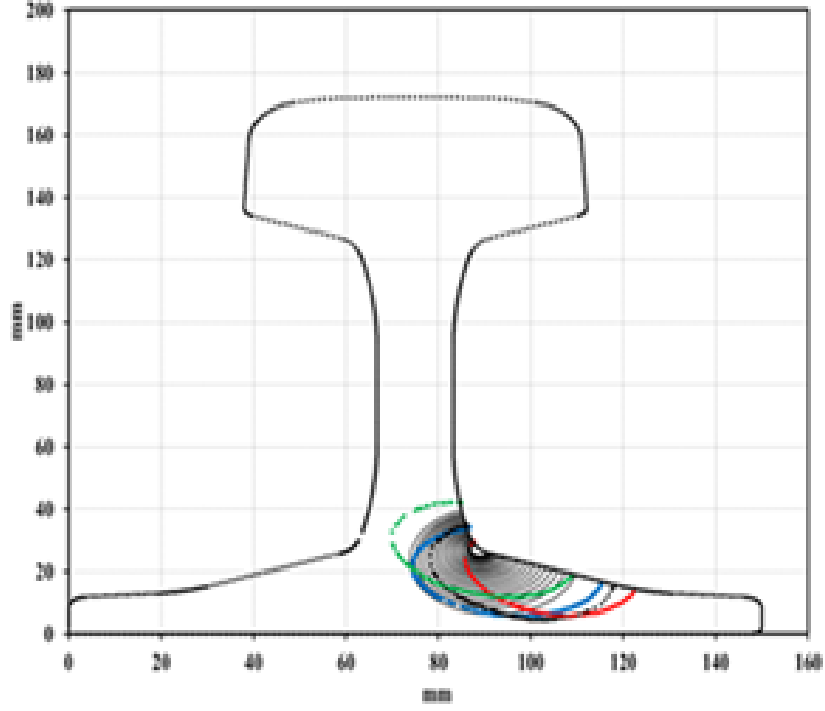
“*.prop2” dosyasında bulunan ilerletilmiş düğüm noktaları kümesini yeni çatlak ucu olarak modelleyebilmek için, noktaların üzerinden geçen bir elips yerleştirilmiştir. ANSYS’te ilerletilmiş çatlaklı model hazırlanırken bu elips ölçüleri, merkez koordinatları ve dönme açısı kullanılmaktadır. Noktalar kümesine elips uydurmak için 5 parametrelili (elipsin uzun ve kısa eksen ölçüleri, elips merkez x ve y koordinatları ile elips dönme açısı) elips uydurması yapabilen “EllipseFit_5.exe” uygulaması kullanılmıştır. Elips uydurulması sonucunda, “crack_values.inp” dosyasının içine yeni elipsin beş parametresi kaydedilmiştir. Bu sayede, bir sonraki çatlak adımında ANSYS makrosu çalışırken yeni “crack_values” değerlerini kullanarak ilerlemiş çatlaklı modeli hazırlamaktadır.

3.1.1.6 Analiz sonuçları

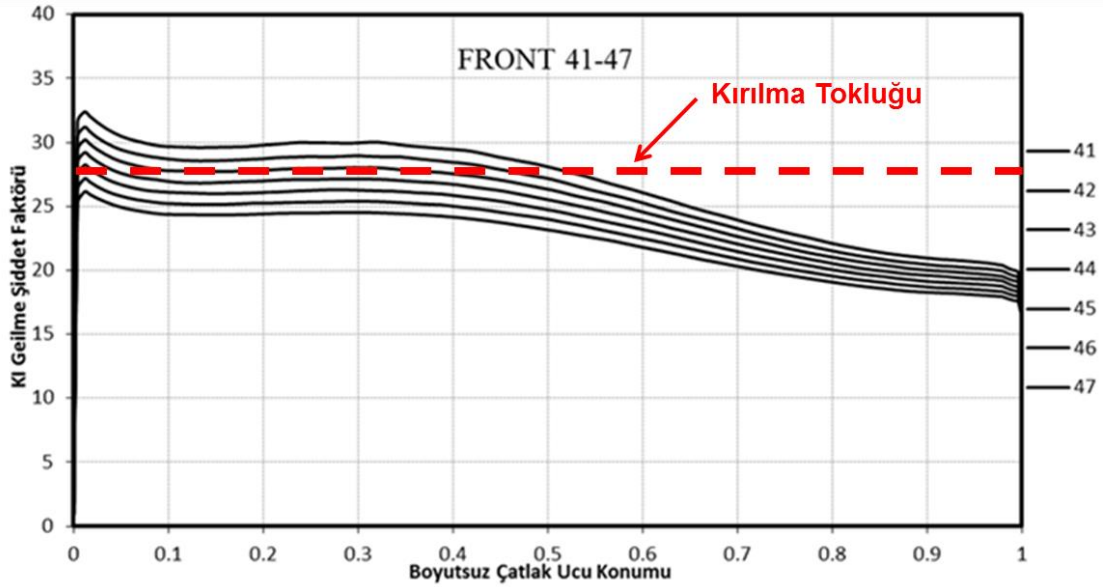
47 çatlak ilerleme adımından oluşan çatlak ilerleme analizi sonucunda UIC 60 ray profili için elde edilen çatlak ilerleme profilleri Şekil 3.1.11’de, ilerleme profillerinin referans kaynakta bulunan kopma profilleri (renkli profiller) sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 3.1.12’de ve son 7 çatlak adımının GŞF değerleri Şekil 3.1.13’te gösterilmektedir.



Şekil 3.1.11. UIC 60 ray modeli analizinden elde edilen çatlak ilerleme profilleri



Şekil 3.1.12. Çatlak ilerleme profillerinin Kotsikos ve Grasso (2012) ile karşılaştırılması



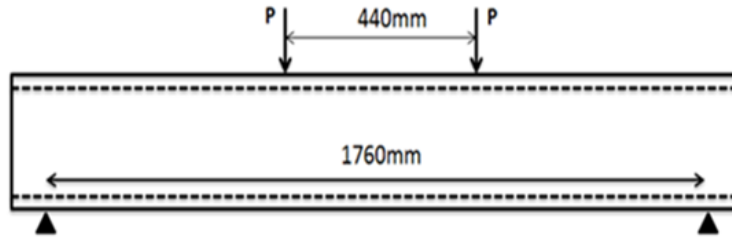
Şekil 3.1.13. Çatlak ilerleme analizindeki son yedi adımın GŞF dağılımları

FCPAS ile elde edilen son profillerin Kotsikos ve Grasso (2012)'nin çalışmasındaki deneylerdeki kopma profilleri ile benzerlik gösterdiği ve tahmin edilen son profillerin deneysel profillerin ortalaması şeklinde olduğu gözlemlenmektedir. FCPAS analizi sonucu elde edilen son çatlak profillerinin GŞF değerleri ise malzemenin kırılma tokluğuna oldukça yakındır.

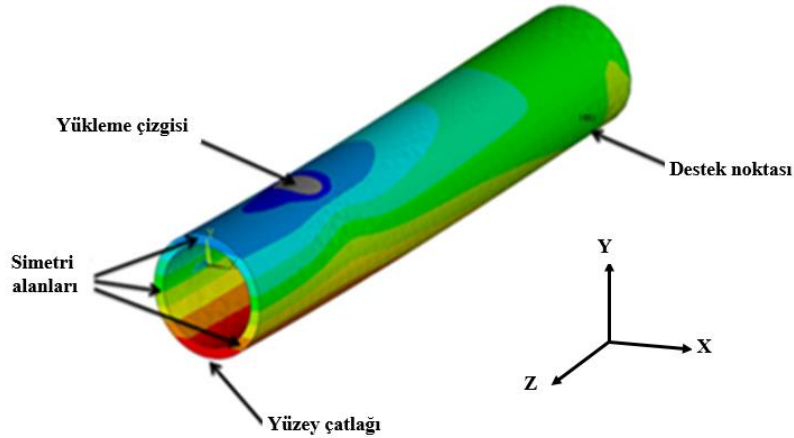
Dolayısıyla, FCPAS ile kırılma noktası ve profilinin de doğru şekilde tahmin edildiği sonucuna varılmıştır.

3.1.2 Enerji Santralinde Kullanılan Boru Üzerinde Yüzey Çatlak İlerleme Analizi

Çatlak ilerleme analizi yapılan bir diğer uygulama, literatür araştırması sonucu bulunmuştur ve nükleer santrallerde kullanılan bir borudaki yüzey çatlakları ile ilgilidir. Arora vd. (2011), yüzey çatlakları içeren boruda dört noktalı eğilme testi (Şekil 3.1.14) ile çatlak ilerleme testleri yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında, çatlak ilerleme analizlerinden önce yapılan statik analiz sonucunda en yüksek gerilmenin çatlak bölgesinde olduğu görülmüştür (Şekil 3.1.15). Dış çapı 168 mm ve et kalınlığı 14.8 mm olan borudaki yüzey çatlaklarının ilerleme analizi yapılmıştır. Dört noktalı eğilme deneyi için destek noktaları arasındaki mesafe 1760 mm, yükleme noktaları arasındaki mesafe ise 440 mm'dir ve uygulanan yük değeri 185 kN'dur. Başlangıç çatlakları, borunun ekseninin ortasında olup dış yüzeyden başlamaktadır. Başlangıç çatlaklarının derinlik ve yüzey uzunlukları sırasıyla, $a=3.6$ mm, $c=18$ mm ve Paris-Erdoğan kuralı malzeme sabitleri $C=1.917 \times 10^{-12}$ (ΔK MPa \sqrt{m} ve da/dN m/çevrim biriminde) ve $m=3.195$ 'tir. Borunun malzemesi çelik olup kırılma tokluğu 50 MPa \sqrt{m} 'dir, Arora vd. (2011).

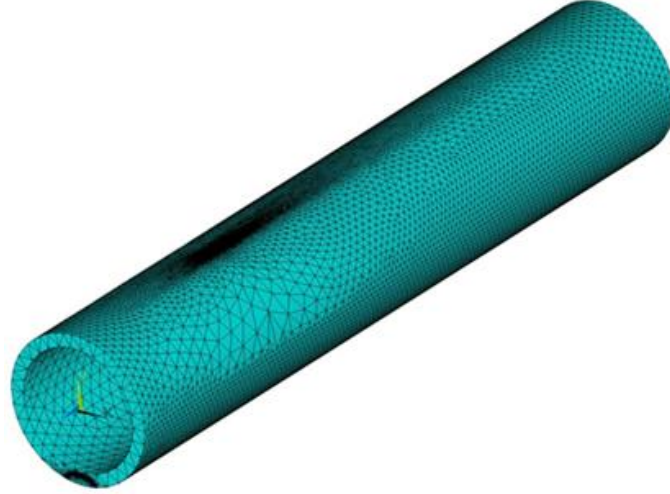


Şekil 3.1.14. 4-Noktalı eğilme deneyinin şeması

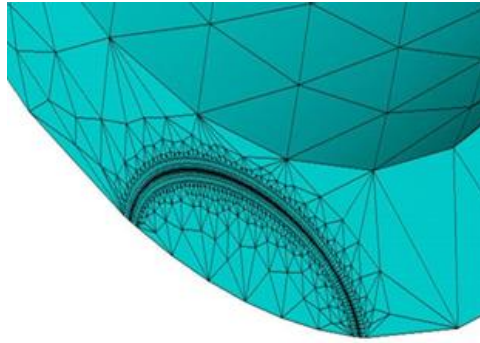


Şekil 3.1.15. Boru üzerindeki eğilme gerilmesi dağılımı

Bölüm 3.1.1’de verilen ray profili uygulamasındaki modelleme ve analiz prosedürleri bu uygulamada da kullanılmıştır. Parçanın ve çatlak bölgesinin bölüntü yapısı Şekil 3.1.16 ve 3.1.17’de gösterilmiştir.



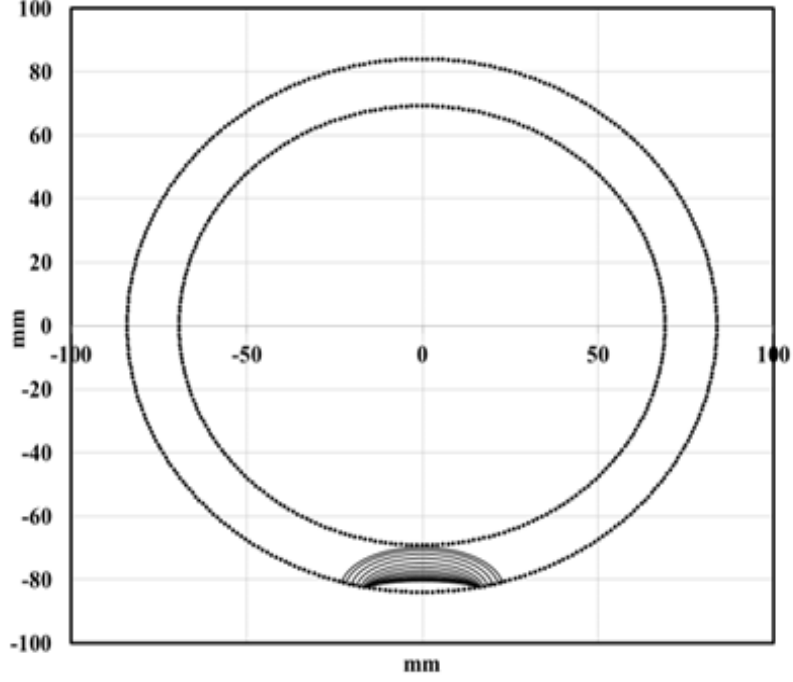
Şekil 3.1.16. Yüzey çatlağı içeren boru modeli bölüntüsü



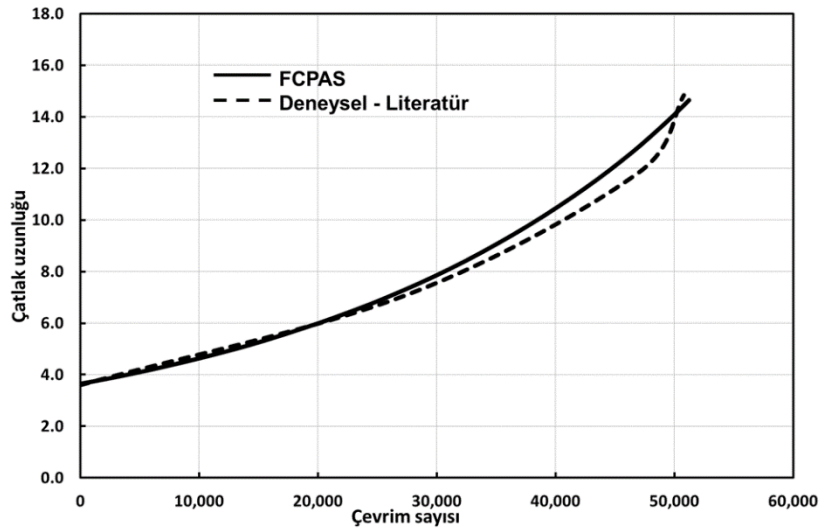
Şekil 3.1.17. Yüzey çatlağı içeren borunun çatlak ucu bölgesi bölüntüsü

Geometri simetrik olduğu için yarısı modellenerek model boyutu küçültülmüştür. Çatlağın bulunduğu yüzeydeki ayrılmamış (kopmamış) yüzeylere simetri sınır şartı uygulanmıştır. Şekil 3.1.15’te gösterilen destek çizgisine $u_y=0$, yine aynı çizginin bir noktasına $u_x=0$ sınır şartı uygulanmıştır. Yükleme çizgisi olarak gösterilen çizgi üzerindeki noktalara “-y” yönünde $F=92.5$ kN kuvvet uygulanmıştır. Simetri şartından dolayı tüm modele uygulanan kuvvet toplam 185 kN olmaktadır.

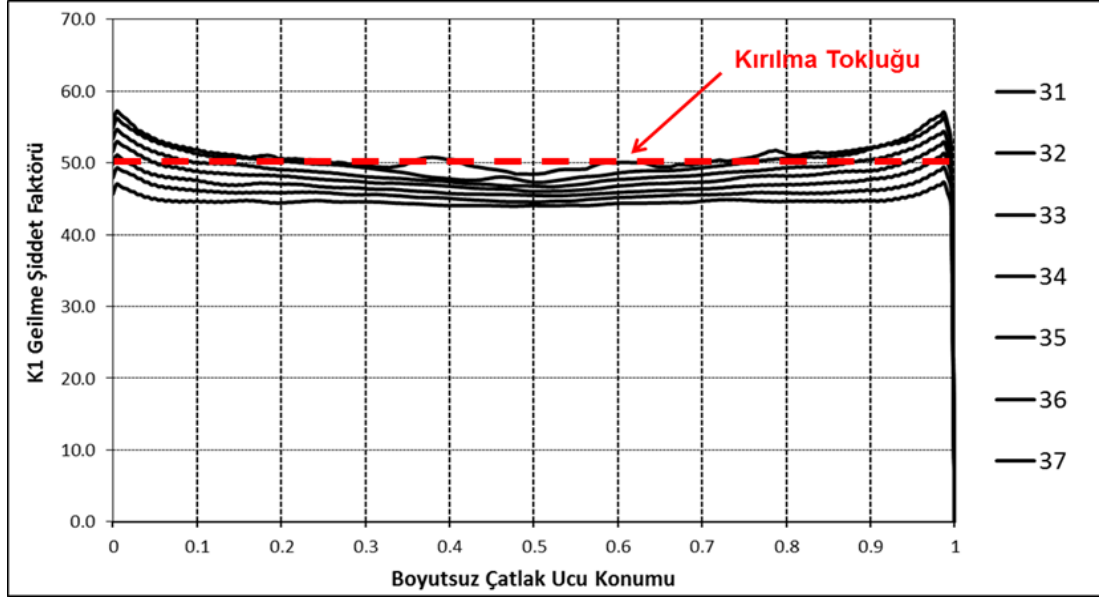
Çatlak ilerleme analizi sonucunda çıktı olarak çatlak profilleri, gerilme şiddet faktörleri ve ömür grafiği elde edilmiştir. Çatlak ilerleme profilleri Şekil 3.1.18, Agora vd. (2011) çalışması ile karşılaştırmalı olarak ömür grafiği Şekil 3.1.19, gerilme şiddet faktörleri ise Şekil 3.1.20'de verilmektedir.



Şekil 3.1.18. Yüzey çatlaklı boru için elde edilen çatlak ilerleme profilleri



Şekil 3.1.19. Yüzey çatlaklı boru için FCPAS ile elde edilen ömür grafiğinin Agora vd. (2011) çalışmasındaki sonuç ile karşılaştırılması



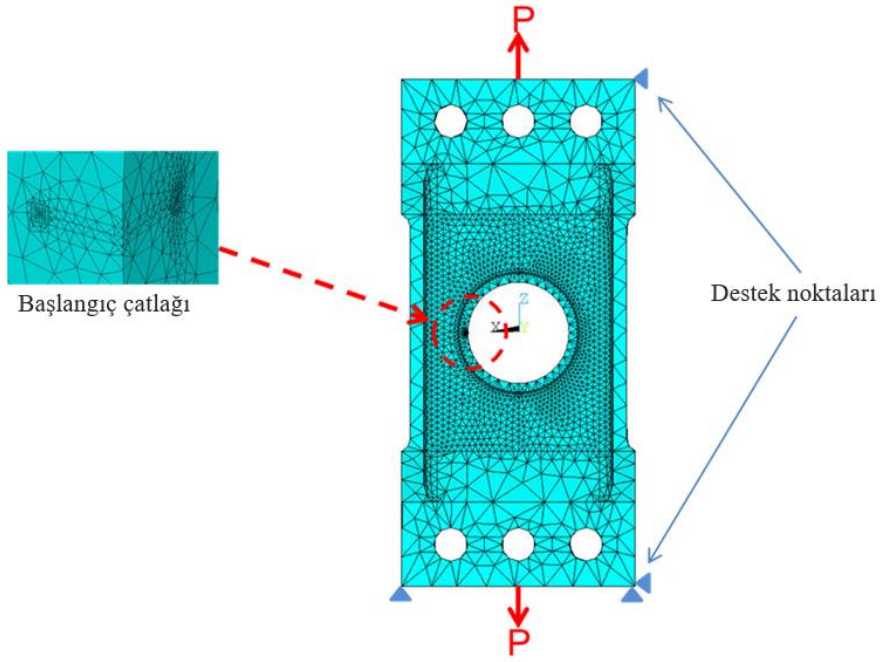
Şekil 3.1.20. Kırılmadan önceki son yedi çatlak adımı için GŞF ve kırılma tokluğu karşılaştırması

Sonuçlardan görüldüğü gibi FCPAS ömür tahmini Agora vd. (2011) çalışması ile oldukça benzerdir ve kopma anındaki gerilme şiddet faktörleri kırılma tokluğuna yakındır. Dolayısıyla yorulma çatlak ilerleme ömrü ve ani kırılma noktası doğru bir şekilde tahmin edilmiştir.

3.1.3 Helikopter Kaldırma Çerçeve (Lift Frame) Parçası Çatlak İlerleme Analizi

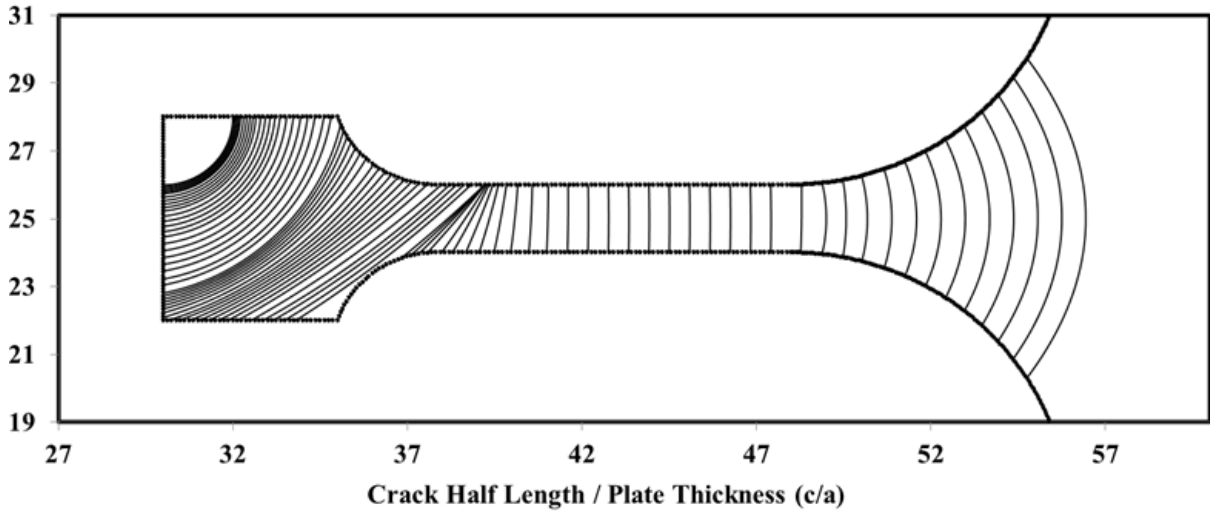
Literatürdeki bir başka çatlak ilerleme çalışması, Tiong ve Jones (2009) tarafından “helicopter lift frame” adı verilen geometride aksenel çeki yükü altında yapılmıştır. Bu proje kapsamında, aynı koşullar altında FCPAS ile de çatlak ilerleme analizleri yapılmış ve sonuçlar Tiong ve Jones (2009)’un çalışması ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 3.1.21’de sonlu elemanlar model görüntüsü verilen geometriye, çatlak düzleminde 1 MPa çeki yükü olacak şekilde yük uygulanmıştır ve geometri malzemesi olan AL-7010 için Paris-Erdoğan kuralı malzeme sabitleri $C=1.95E-6$ ve $m=1.95$ olarak alınmıştır, Tiong ve Jones (2009). Başlangıç çatlağının konumu, parçanın yarı yüksekliğindedir ve Şekil 3.1.21’de konumu “başlangıç çatlağı” olarak gösterilmiştir.

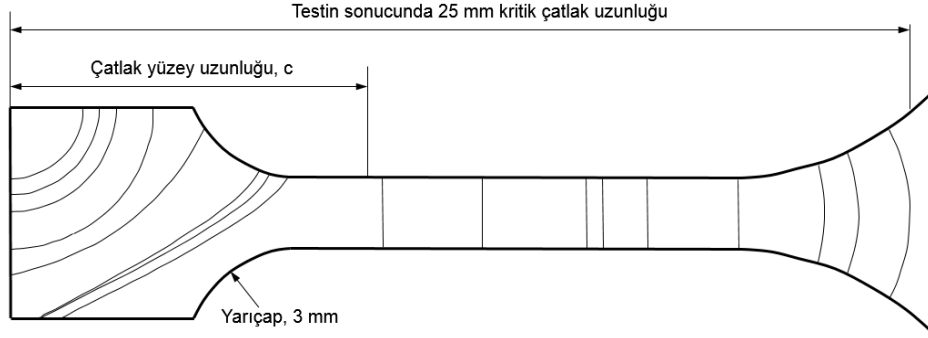


Şekil 3.1.21. Taşıyıcı çerçeve modeli için sonlu elemanlar modeli

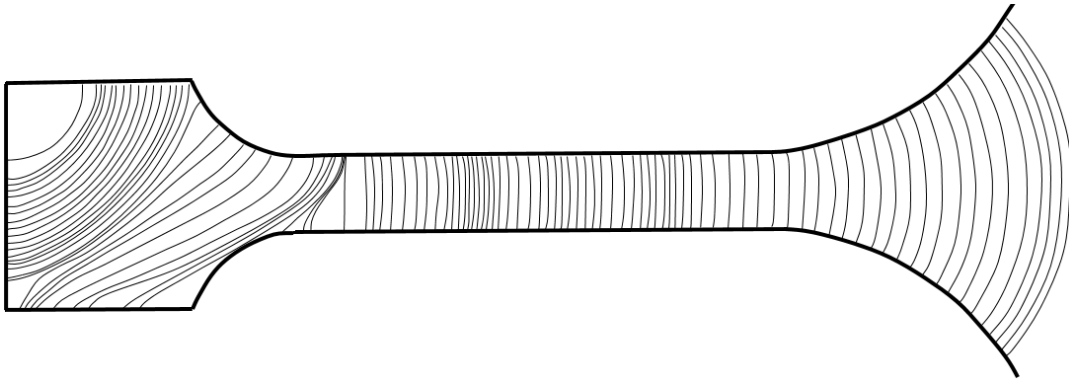
FCPAS ile çatlak ilerleme analizi yapılan geometrinin çatlak profilleri Şekil 3.1.22'de, Tiong ve Jones (2009)'un çalışmasındaki deneysel ve Zencrack™ yazılımı ile nümerik olarak elde edilen çatlak profilleri Şekil 3.1.23 ve Şekil 3.1.24'te verilmiştir.



Şekil 3.1.22. FCPAS analizleri ile elde edilen çatlak ilerleme profilleri



Şekil 3.1.23. Literatür çalışmasında deneysel olarak elde edilen çatlak ilerleme profilleri, Tiong ve Jones (2009)



Şekil 3.1.24. Literatür çalışmasında Zencrack analizleri ile elde edilen çatlak ilerleme profilleri, Tiong ve Jones (2009)

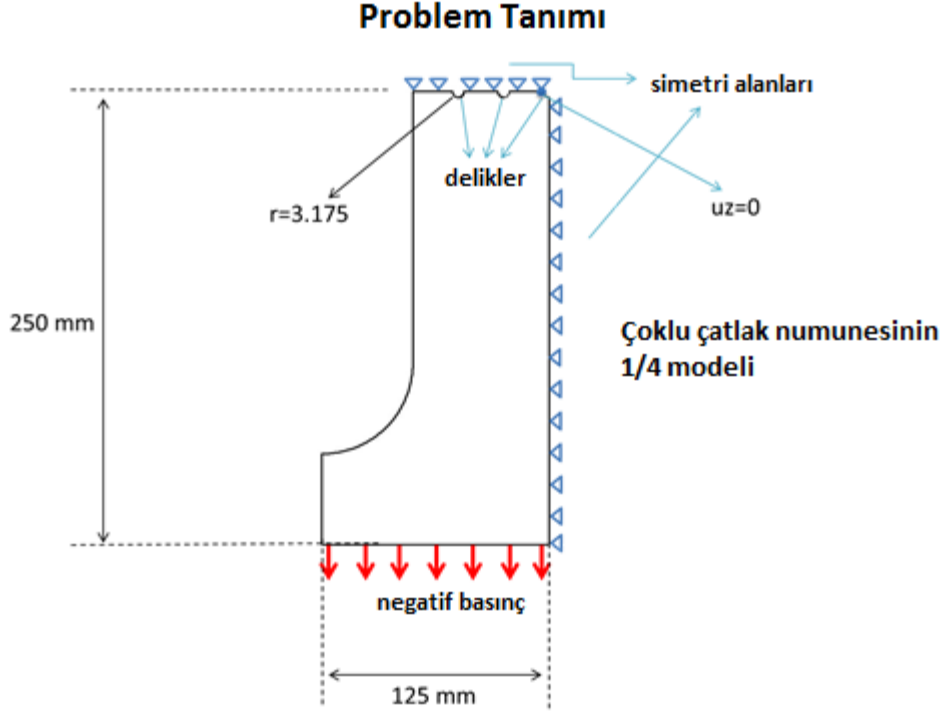
3.1.4 Eksenel Çeki Yüğü Altında Çoğul Çatlakların Analizi

3.1.4.1 Çoklu Çatlak Numunesinin Kırılma Analizi ve Çatlak İlerleme Simülasyonu

Havacılık, savunma ve enerji alanlarında kullanılan makine parçalarında birden fazla çatlakın oluşup birbiriyle etkileşim halinde ilerleyerek ve zamanla birleşerek kırılmaya yol açabildiği bilinmektedir. Özellikle türbin parçaları, paneller gibi ince yapılı elemanlarda bu durum oldukça yaygındır. Nishimura vd. (1990), yaptıkları çalışmada, çoklu çatlak içeren numuneler için bazı test ve analizler gerçekleştirilmiştir. Köşe çatlak (corner crack), numune kalınlığı boyunca oluşan çatlaklar (through the thickness crack) vb. çatlak tipleri için kırılma analizleri gerçekleştirilmiş, gerilme şiddet faktörü (GŞF – stress intensity factor-SIF) hesaplamaları yapılmış ve çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmişlerdir. 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı modeller için deneysel ve nümerik sonuçların kıyaslamaları sunulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, FCPAS yazılımı kullanılarak, söz konusu makalede kullanılan çoklu çatlak numunesi için kırılma analizleri ve çatlak ilerleme analizleri yapılmış ve sonuçlar

uygulanmıştır. Kırılma analizleri için çeki yükü oluşturacak şekilde alt yüzeye 1 MPa düzgün yayılı basınç uygulanmıştır. Çatlak ilerleme analizleri için başlangıç köşe çatlağı kenar uzunlukları $a=c=1.05$ mm ve çatlak düzlemindeki kesitte 117.7 MPa gerilme oluşturacak şekilde alt yüzeye uygulanan basınç yükü 70.72 MPa'dır.

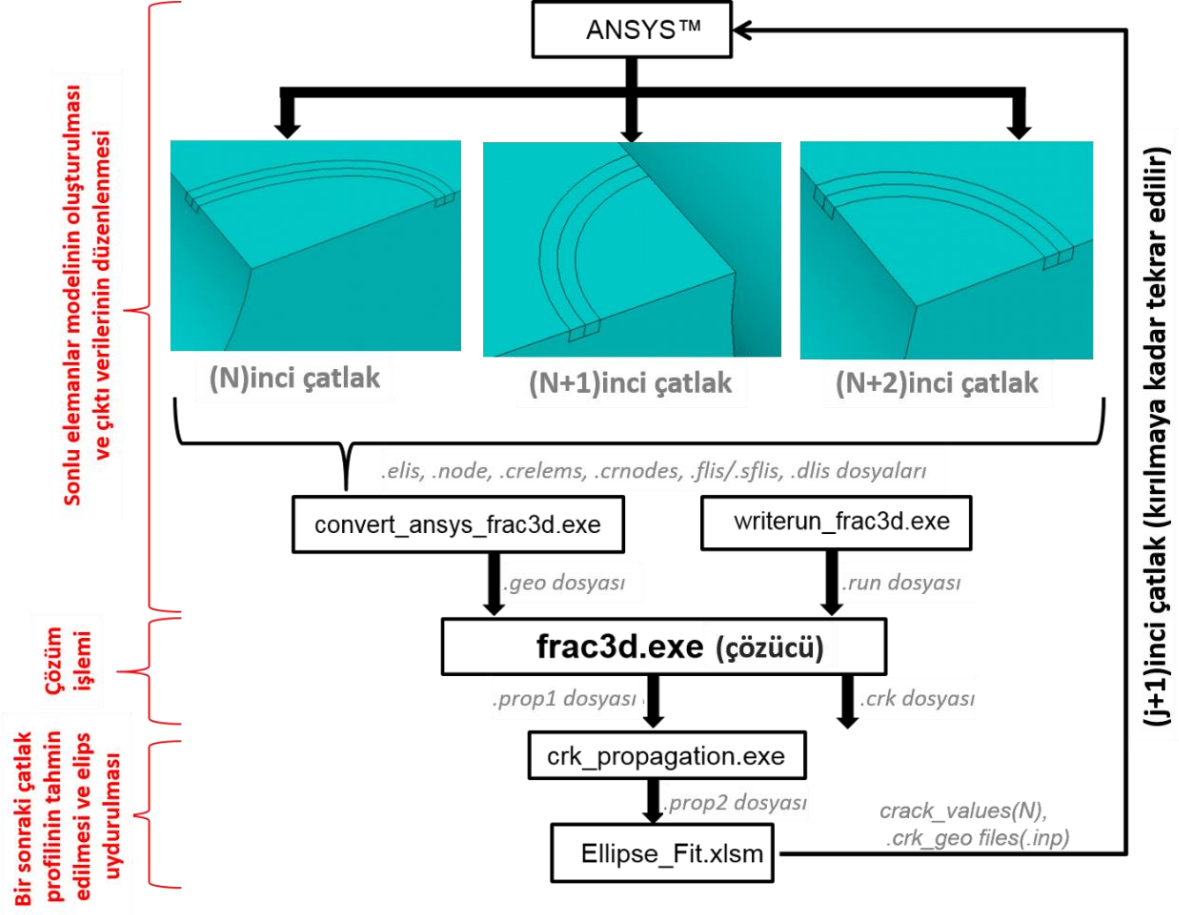


Şekil 3.1.26. Çoklu çatlak numunesinin yükleme ve sınır şartları

3.1.4.3 FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 Çatlaklı Numuneler için Kırılma Analizleri

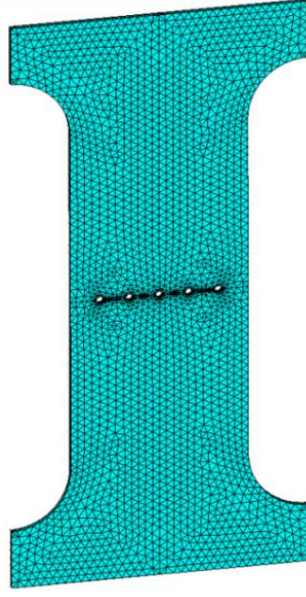
FCPAS ile kırılma analizi yapmak için önce ANSYS™ yazılımının sonlu eleman modelleme özelliği kullanılmaktadır. ANSYS ile geometri modellenmekte ve bölüntü (mesh) oluşturma işlemi yapılmaktadır. Sonra geometriye yük ve sınır şartlar uygulanmakta ve eleman, düğüm noktası (node), yük, deplasman, çatlak ucu elemanları ve çatlak ucu düğüm noktaları gibi veriler ayrı ayrı dosyalara kaydedilmektedir. Bu dosyalar, FCPAS uygulamalarından convert_ansys_frac3d_ansysbatch.exe aracılığıyla geo uzantılı bir dosyaya yazılmaktadır. FCPAS uygulamalarından writerun_frac3d.exe programı, malzeme özelliklerini, analiz türünü ve parametrelerini run uzantılı bir dosyaya yazar. Bundan sonra FCPAS çözücüsü frac3d.exe, geo ve run uzantılı dosyaları okuyarak kırılma analizini gerçekleştirir. Frac3d.exe'nin çıktıları arasında, gerilme şiddet faktörü ve enerji serbest kalma oranı (energy release rate) verilerini içeren crk uzantılı dosya ve çatlak ucu düğüm noktası koordinatlarını,

GŞF değerlerini vb. bilgileri içeren prop1 uzantılı dosya bulunmaktadır. Çoklu çatlaklar için FCPAS'ın çalışma şeması ve kullanılan dosya girdileri genel olarak Şekil 3.1.27'de gösterilmiştir.



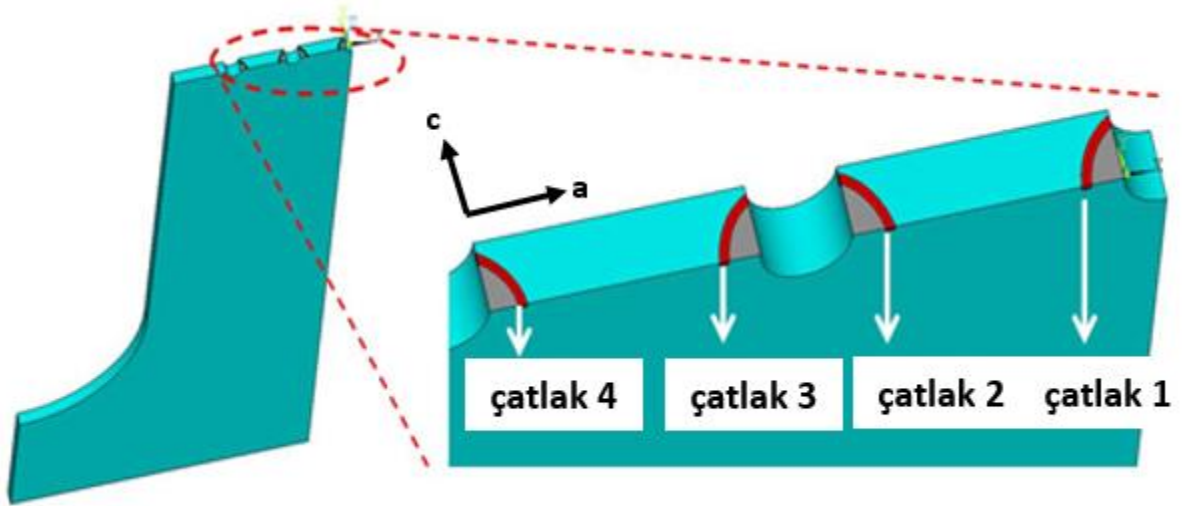
Şekil 3.1.27. FCPAS çoklu çatlak ilerleme analizlerinin akış şeması

Çoklu çatlak analizi için kullanılan numunenin sonlu elemanlar modeli Şekil 3.1.28'de gösterilmiştir.

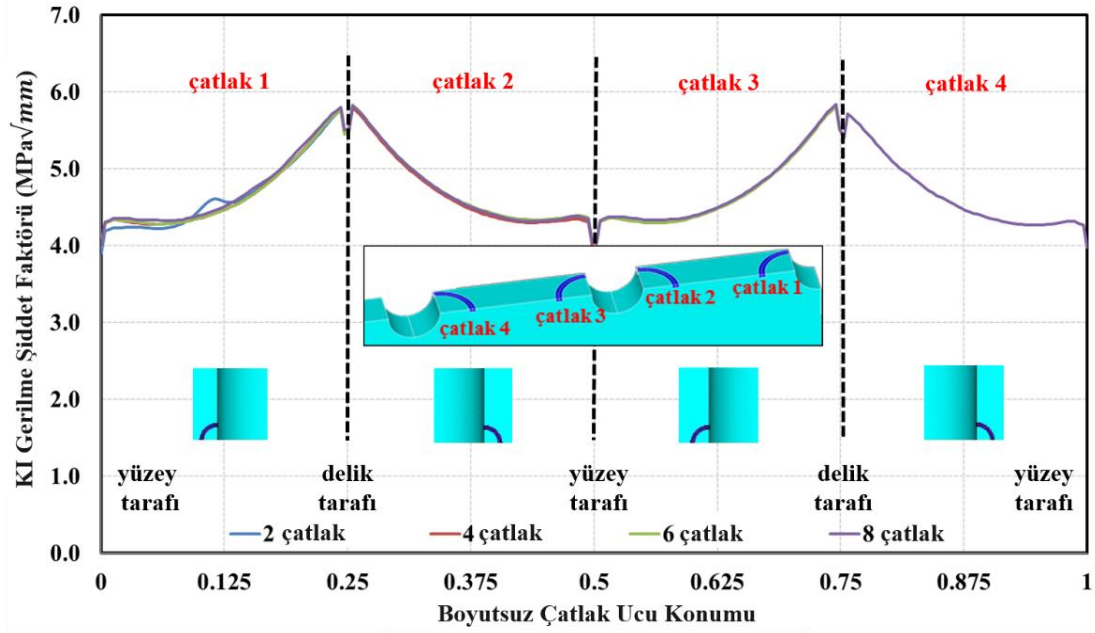


Şekil 3.1.28. Çoklu çatlak numunesinin sonlu elemanlar modelinin genel görünüşü

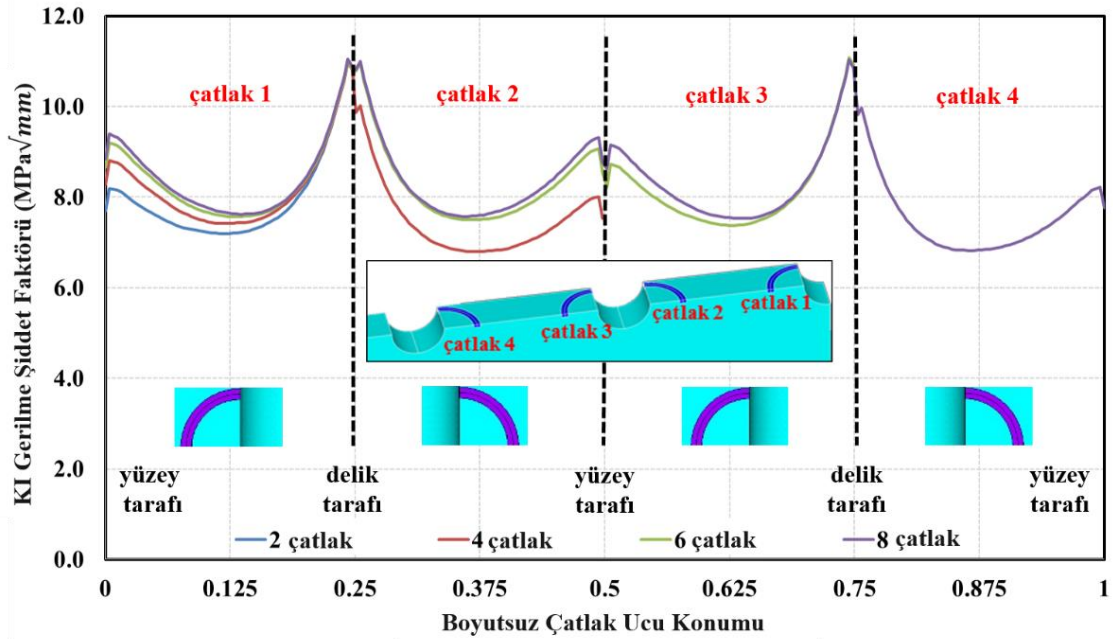
Numunenin çatlak numaralandırması Şekil 3.1.29'da gösterilmektedir. FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 çatlak içeren numunelerin kırılma analizinden elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.1.30 ve 3.1.31'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1.29. Çoklu çatlak numunesi için çatlak numaralandırması



Şekil 3.1.30. FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı numunelerin $a=c=1.0$ mm çatlak uzunlukları için GŞF değerleri

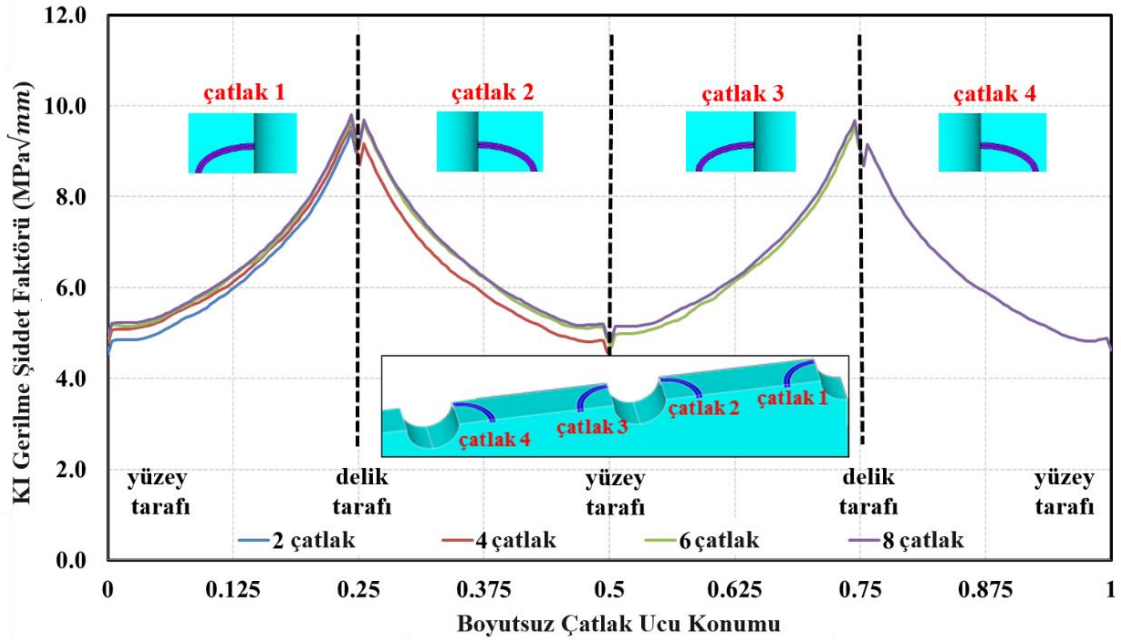


Şekil 3.1.31. FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı numunelerin $a=c=4.0$ mm çatlak uzunlukları için GŞF değerleri

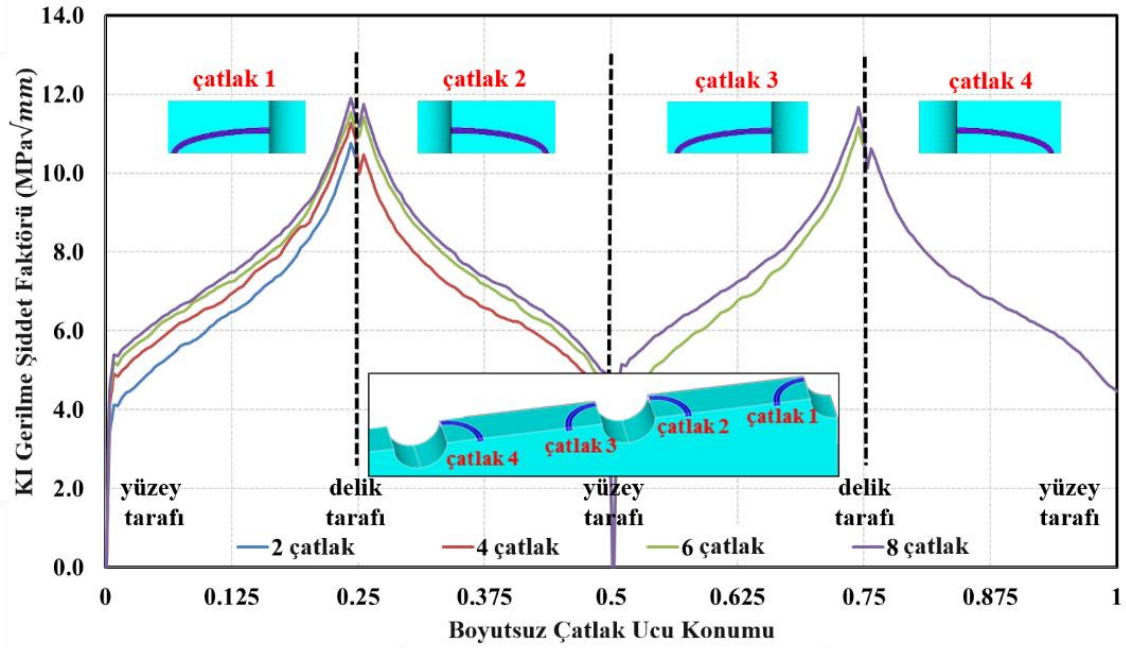
Şekil 3.1.30 ve 3.1.31'de görüldüğü gibi çatlak uzunlukları arttıkça 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı numuneler için GŞF değerleri arasındaki farklar da artmaktadır. Bunun sebebi, çatlak uzunlukları arttıkça numune kesitinin azalması ve GŞF değerlerinin artmasıdır. Aynı sebepten dolayı çatlak sayısının artması da GŞF değerleri arasındaki farkları artırmaktadır.

Grafiklerdeki GŞF değerleri çatlakların her iki tarafı için simetrik değildir. Delik tarafında bulunan düğüm noktalarının GŞF değerleri numune yüzeyindeki düğüm noktalarının GŞF değerlerine göre daha yüksektir. Bunun nedeni ise çatlakların başlangıç yeri olan deliklerden dolayı oluşan gerilme yığılmasıdır.

Şekil 3.1.32 ve 3.1.33'deki GŞF grafiklerine bakıldığında çatlaklar sığ hale geldikçe (çatlakların yüzeydeki uzunluğu çatlak derinliğine göre daha büyük hale geldikçe) çatlaklar arasındaki etkileşim daha belirgin hale gelmektedir. Çatlakların delik kenarındaki uçlarında daha yüksek GŞF değerleri oluşmaktadır.



Şekil 3.1.32. FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı numuneler için $c/a=2$ ve $a=2.0$ mm değerlerindeki çatlak için GŞF değerleri



Şekil 3.1.33. FCPAS ile 2, 4, 6 ve 8 çatlaklı numuneler için $c/a=4$ ve $a=2.0$ mm değerlerindeki çatlak için GŞF değerleri

3.1.4.4 FCPAS ile 4 ve 8 Çatlaklı Numuneler için Çatlak İlerleme Analizleri

Çatlak ilerleme analizi yapmak için ANSYS'in modelleme ve bölüntü oluşturma özellikleri kullanılmakta ve oluşturulan sonlu elemanlar modeli, frac3d.exe ile çözümlenip crack_propagation.exe ile Δa_{max} (maksimum çatlak ilerleme miktarı) ve C, m malzeme sabitlerine göre bir sonraki çatlak profili tahmin edilmektedir. Tahmin edilen çatlak profiline elips uydurulmakta ve elips ölçüleri ANSYS'e yeni çatlak profili olarak verilmektedir. Bu döngü çatlak kritik uzunluğa ulaşınca kadar otomatik olarak devam ettirilmektedir (Şekil 3.1.27).

ANSYS'te model oluşturma işlemini otomatik hale getirmek için ANSYS makrosu hazırlanmıştır. Bu makro ile verilen çatlak uzunluğu, çatlak koordinatları, geometri boyutu, yük miktarı ve malzeme özellikleri gibi değişkenlere bağlı olarak sonlu elemanlar modeli her bir döngüde (çatlak adımı) otomatik olarak oluşturulmaktadır. ANSYS makrosunu oluşturmak için sonlu elemanlar modeli ANSYS ortamında el ile oluşturulmuş ve makro kodları (işlem kayıtları) ANSYS yazılımından alınmıştır. Alınan kayıtlarda değişken olması istenilen yerler (çatlak uzunluğu, malzeme özellikleri, yük miktarı gibi) parametrik hale getirilmiş ve çatlak ilerleme analizi için kullanılmıştır. Bu makrolar sayesinde sonlu elemanlar modeli ANSYS ile otomatik olarak oluşturulabilmekte ve FCPAS'in çatlak ilerleme analizi yapabilmesi için

gerekli olan elis, node, sflis, flis, dlis, crelems, crnodes uzantılı ve eleman, düğüm noktası, sınır şart ve yük bilgilerini içeren dosyalar ANSYS'ten çıktı olarak alınabilmektedir.

Bu makrolar kullanılırken bazı durumlarda, bölüntü oluşturamama veya çatlakların ilerleyerek yüzey değiştirmesi nedeniyle makroda kullanılan geometrik birimlerin (hacimler, alanlar, kenarlar, noktalar gibi) numaralarının değişmesi nedeniyle model oluşturmada sorun çıkabilmektedir. Bu nedenle makrolarda geometri değişikliklerine göre manuel olarak güncellemeler ve eleman boyutunda ayarlamalar yapmak gerekebilmektedir.

ANSYS makrosunun çatlak boyutu ve konumu, geometri boyutları, malzeme özellikleri ve yük miktarı gibi değişkenleri okuyabilmesi için proje klasöründe "proje adı"_Cr.mac, "proje adı"_Cr2.mac ve "proje adı"_Cr3.mac gibi tanımlayıcı dosyalar vardır. Bu dosyalar, değişkenlerin hangi satır-sütun biçiminde (Fortran programlama dili dosya formatında) okunacağı gibi bilgileri içermektedir. Değişkenler, crack_values.inp, "proje adı"_Macro_parameter_"front_no".inp dosyalarında ve matprop ve inp uzantılı bazı dosyalarda bulunmaktadır.

Makronun ANSYS yazılımına verilmesi, crk_propagation.exe, ellipse_fit.exe vb. uygulamaların yürütülmesi ve bu işlemlerin tekrarlanması için ".bat" uzantılı komut satırı dosyası kullanılmaktadır. Bu dosya el ile oluşturulmaktadır ve belirli bir model için çatlak ilerleme işlemi uygulanabilir olduğunda ve güvenilirliği denendiğinde gerekli programlama yapılarak bir grafiksel ara yüz (GUI) aracılığıyla da oluşturulabilir. Komut dosyası çalıştırıldığında komut satırı ekranı açılır ve gerekli işlemler yürütülür.

3.1.4.5 FCPAS Parametreleri, Çözüm Aşaması, Çatlak İlerlemesi ve Elips Uydurma

ANSYS'ten elis, node, sflis, flis, dlis, crelems, crnodes uzantılı olan eleman, düğüm noktası, sınır şartı ve yük dosyaları alındıktan sonra convert_ansys_frac3d_ansysbatch.exe dosyası komut satırı aracılığı ile çalıştırılarak geo dosyası oluşturulur. Geo dosyası, yukarıda sıralanmış olan dosyaların içerdiği verilerin yeniden sıralanmış ve tek bir dosyada toplanmış halidir. Writerun_frac3d.exe ile run dosyası bilgileri (analiz ayarları ve malzeme özellikleri) yazılır ve frac3d.exe ile kırılma analizi yapılır. Bu uygulamalar çalıştırılırken gerekli giriş bilgileri (girdi ve çıktı dosyalarının adları, analiz parametreleri vb.) inp1.txt, inp2.txt, inp3.txt, inp10.txt, inp.20.txt dosyaları ile verilir. Inp1, 2 ve 3 sırasıyla geo dosyası oluşturulurken, run dosyası oluşturulurken ve çözücü frac3d.exe çalıştırılırken gerekli uygulamalara verilen giriş verileridir. Inp10 ve 20 dosyaları ise sırasıyla, crk_propagation ve elips uydurma uygulamalarına verilen bilgilerdir.

Frac3d.exe'nin girdi dosyaları ise geo ve run dosyalarıdır. Bu dosyalar, analizi yapılacak modelin çatlak bilgilerini, düğüm noktalarını, yüklerini, sınır şartlarını, elemanlarını ve çözme işlemi esnasında kullanılacak olan malzeme özelliği, analiz parametreleri gibi bilgileri içermektedir. Frac3d.exe'nin çıktıları crk ve prop1 uzantılı dosyalardır. Crk dosyası, çatlak ucu düğüm noktalarının GŞF değerleri ve gerilme enerjisi serbest kalma oranı (Stress energy release rate) verilerini içermektedir. Prop1 dosyası ise yine çatlak ucu düğüm noktalarının x, y, z koordinatları, GŞF (KI, KII, KIII) değerleri vb. verileri içermektedir. Eğer çoklu çatlak analizi yapılıyorsa tüm çatlak verileri aynı dosya içinde alt alta sıralanmış olmaktadır. Her bir çatlak için ayrıca crk, prop1 ve prop2 dosyaları oluşturulmamaktadır.

Daha sonra crk_propagation.exe, inp10.txt'yi (prop1 uzantılı dosyanın adını içerir) okur ve prop2 dosyasını oluşturur. Prop2 dosyası, mevcut çatlakların uçlarındaki düğüm noktaları ile ilerletilmiş çatlak uçlarındaki düğüm noktalarının x, y, z koordinatlarını içerir. Crk_propagation.exe bulunduğu klasördeki "proje adı".elis_3d.matprop dosyasını okur ve bu dosyanın içinde malzemenin C, m sabitleri ve çatlağın ilerletileceği Δa_{max} değeri bulunur. Eğer çoğul çatlak analizi yapılıyorsa çatlaklar ayırt edilmeksizin tüm çatlak ucu düğüm noktalarının ilerletilmesi en yüksek GŞF değerine sahip düğüm noktasından başlayarak diğerlerine Paris-Erdoğan kuralına göre oranlayarak yapılır. En yüksek GŞF değerine sahip olan düğüm noktasında en yüksek ilerleme miktarı, en düşük GŞF değerli düğüm noktasında ise en az ilerleme görülür. Bu sayede de çatlakların birbirleriyle olan etkileşimleri simüle edilebilmektedir.

İlerletilmiş çatlak ucu düğüm noktalarının bulunduğu prop2 uzantılı dosya prop2_to_ellipsefit.exe uygulamasıyla okunur ve koordinatlar input.prop2 isimli dosyaya yazılır. Daha sonra ellipse_fit.exe, prop_coords.inp adlı dosyadan çatlağın ilerletileceği eksenlerin numaralarını okuyarak ilerletilmiş çatlakların uçlarındaki düğüm noktalarına en iyi elipsi uydurur ve elips parametrelerini yeni çatlak profili olarak ANSYS'te modellenmesi için crack_values.inp dosyasına yazar. Elips uydurma işlemi 2 parametrelidir ise elipsin sadece a ve c uzunlukları, 4 parametrelidir ise, elipsin a, c uzunlukları ile x, y merkez koordinatları, 5 parametrelidir ise 4 parametreye ek olarak θ (theta) elips dönme açısı crack_values.inp içinde bulunmaktadır. Elips parametre sayısı arttıkça düzlemde dönerek ilerleyen çatlaklar için daha iyi bir profil elde edilebilmektedir.

Detayları verilen işlemler tekrarlanarak çatlak ilerleme analizi gerçekleştirilmektedir. ANSYS yazılımı sadece sonlu elemanlar modeli oluşturmada kullanılmaktadır. Kırılma analizi, çatlağın ilerletilmesi ve analiz sonrası sonuç işlemleri (post-processing) FRAC3D ve FCPAS ile yapılmaktadır.

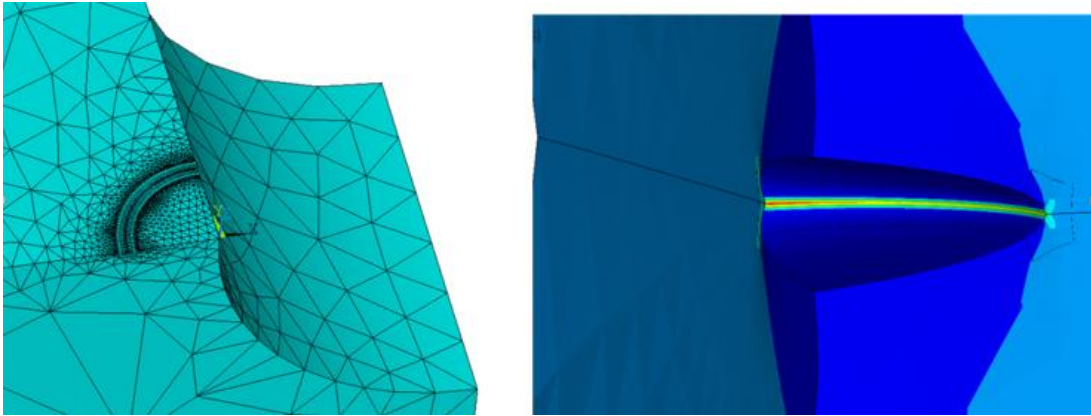
Analiz sonucunda elde edilen değerler çizdirilerek edilerek çatlak profilleri, GŞF grafikleri ve ömür grafikleri elde edilebilmektedir.

8 çatlaklı çoğul çatlak numunesinin ANSYS'te oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli Şekil 3.1.34'te gösterilmektedir.



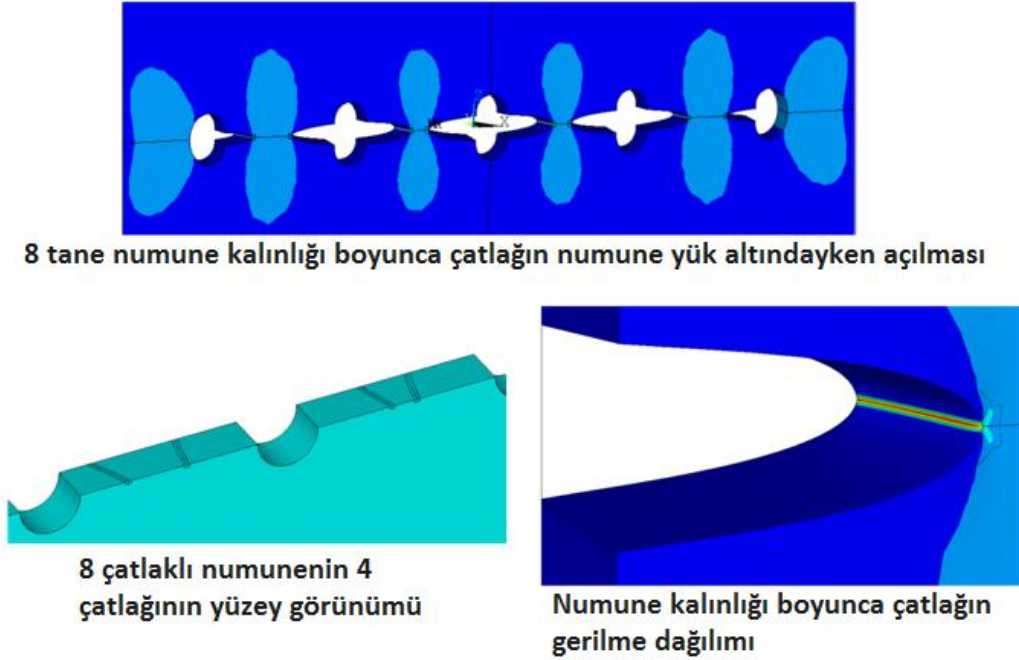
Şekil 3.1.34. Çoklu çatlak numunesinin sonlu elemanlar modeli

Çatlağın yakın görünüşü ve numune yük altında iken gerilme dağılımı Şekil 3.1.35'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1.35. Çatlağın sonlu elemanlar modeli (solda) ve yük altında iken deformasyonu ile gerilme dağılımının yakın görünüşü (sağda)

Çatlak bölgesindeki eleman yoğunluğunun, çatlak ucundaki gerilme ve GŞF değerlerine etkisi olduğu için deliklerin yüzeylerinde ve numunelerin üst simetri yüzeylerinde bölüntüleme iyileştirilmesi (mesh refinement) yapılmıştır.



Şekil 3.1.36. 8 çatlaklı numunedeki çatlakların ilerleyerek plaka kalınlığı boyunca uzanan çatlaklar haline geldikleri durumdaki geometrik görünüşleri, yük altındaki deformasyonları ve gerilme dağılımları

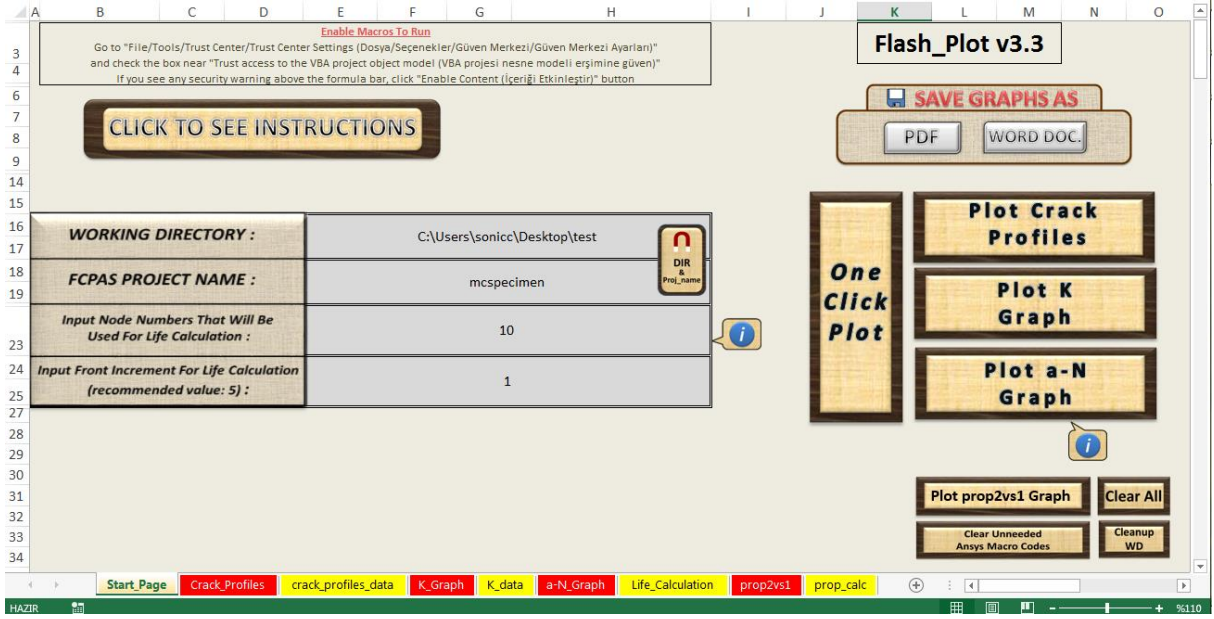
Çatlaklar, köşe çatlakları olarak başlamışlardır ve ilerledikçe kenar çatlakları (through the thickness = plaka kalınlığı boyunca) haline gelmişlerdir (Şekil 3.1.36). Daha yüksek gerilme ve GŞF değeri sebebiyle çatlakların delik yüzeyi tarafındaki kısımları, numune ön yüzeyi kısımlarına göre daha hızlı ilerlemektedirler. İlerleyen çatlaklar birbirlerine yaklaşmakta ve maksimum gerilme şiddet faktörü 2024 T3 alüminyum alaşımı için kırılma tokluğu (K_{Ic}) değeri olan $37\text{MPa}\sqrt{m}$ 'ye ulaşıncaya geometride kopmanın gerçekleştiği tahmin edilmektedir.

3.1.4.6 Analiz Sonuçlarının Çizdirilmesi (Plot Edilmesi)

FCPAS ile gerçekleştirilen çatlak ilerleme simülasyonlarının sonuçlarını görüntülemek için MS Excel kullanılarak VBA programlama diliyle hazırlanmış makrolar içeren bir Excel dosyası hazırlanmıştır. Bu makrolar sayesinde FCPAS'in çıktı dosyaları olan crk, prop1 ve prop2 uzantılı dosyaların içerdiği veriler otomatik olarak okunmakta ve ilgili Excel sayfa ve tablolarına yazılmaktadır. Bu sayede oldukça zahmetli olan analiz sonuçlarını görüntüleme

işlemi saniyeler içerisinde Flash_Plot adı verilmiş olan otomatikleştirilmiş Excel dosyası ile hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.

Kırılma analizleri yapıldıktan sonra Flash_Plot adlı Excel dosyası açılarak plot edilmesi istenilen veriler için ekrandaki butonlara tıklanarak ilgili makrolar çalıştırılır ve sonuçlar ekranda grafiklerle gösterilebilir hale gelir. Flash_Plot dosyası açıldığında karşılaşılan ana ekran Şekil 3.1.37’de gösterilmektedir.

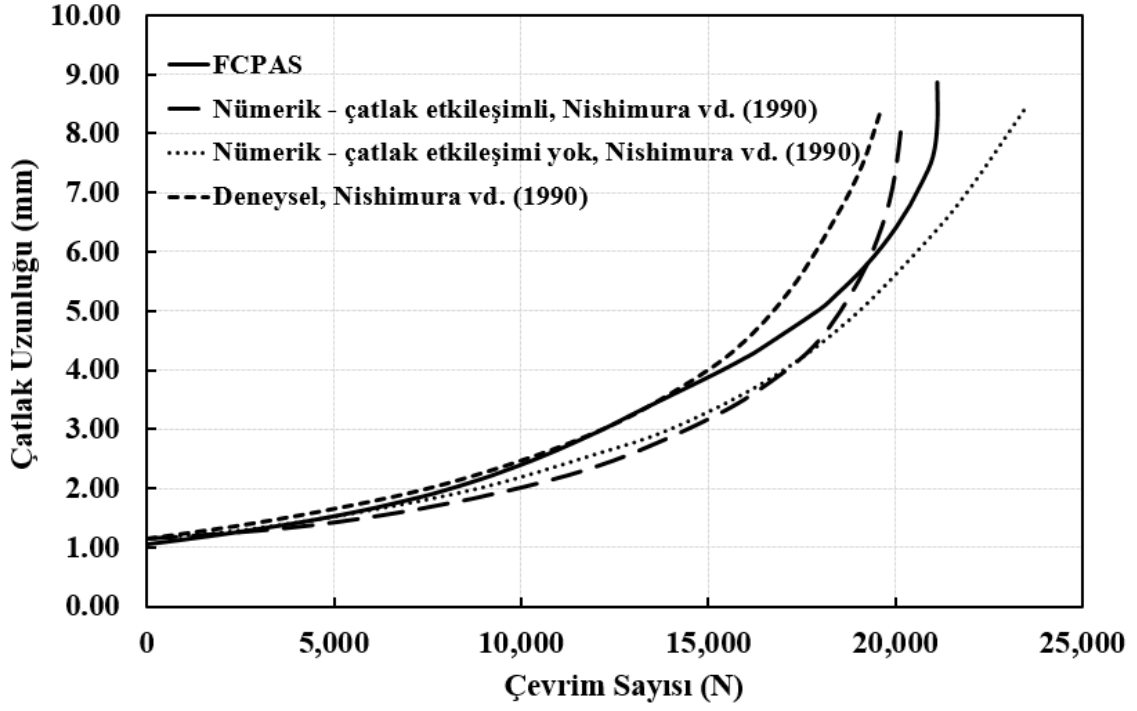


Şekil 3.1.37. FCPAS analiz sonuçlarını otomatik olarak plot eden Flash_Plot.xlsm (VBA kodları ile otomatikleştirilmiş Microsoft Excel dosyası) başlangıç ekranı

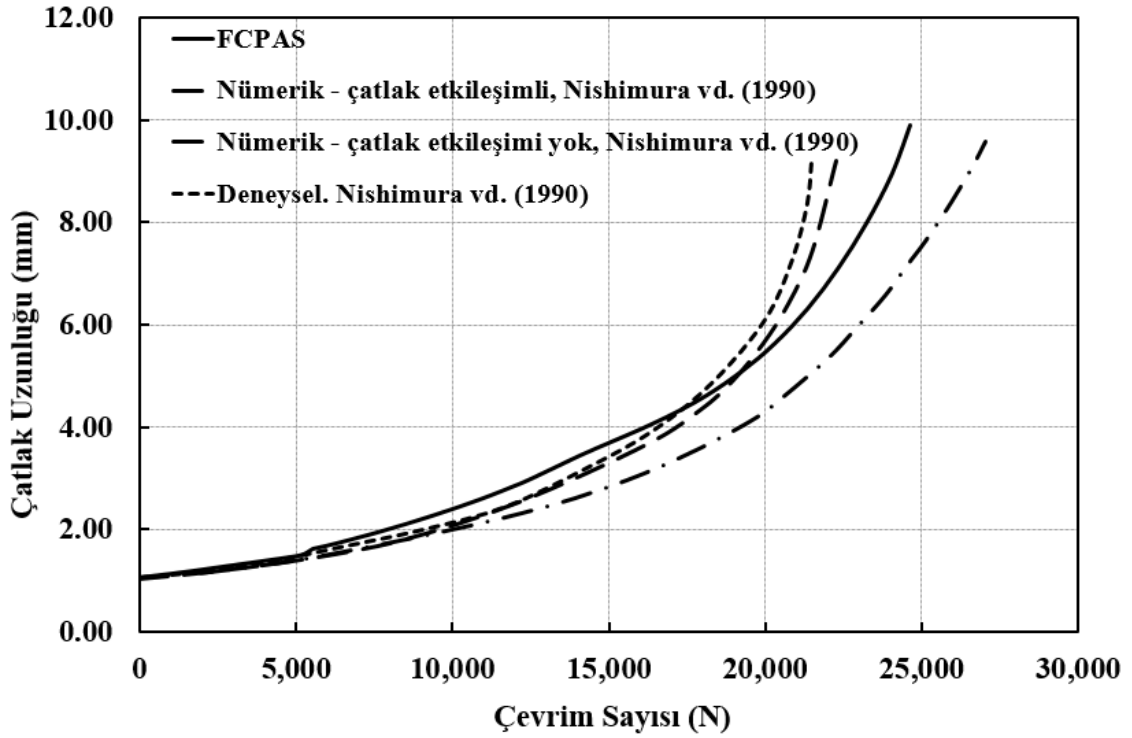
Şekil 3.1.37’de en altta gösterilen çalışma sayfalarından seçim yapılarak istenilen sonuçlar görüntülenebilmektedir. Bu sonuçlar, çatlak profilleri, GŞF grafikleri, ömür grafiği ve çatlak profilleri ile elips_fit karşılaştırması olarak sunulmaktadır.

Flash_Plot aracı, bulunduğu klasörün adını otomatik olarak alma ve bunu çalışma dizini olarak ayarlama, çalışma dizinindeki FCPAS proje adını otomatik olarak alma, çalışma dizinindeki Ansys makro dosyalarının içerisindeki ihtiyaç olmayan bazı komutları (yakınlaştırma ve geometrinin ekranda döndürülmesi vb. işlemleri sonucu oluşan komutlar) otomatik olarak silme, çalışma dizinindeki analiz sonucu dosyaları hariç diğer dosyaları silme gibi bazı özelliklere sahiptir. Tüm bu işlemler, ilgili fonksiyonun butonuna tıklayarak gerçekleştirilebilmektedir.

Çoklu çatlak numunesi için verilen FCPAS sonuçları Flash_Plot dosyası kullanılarak elde edilmiştir.



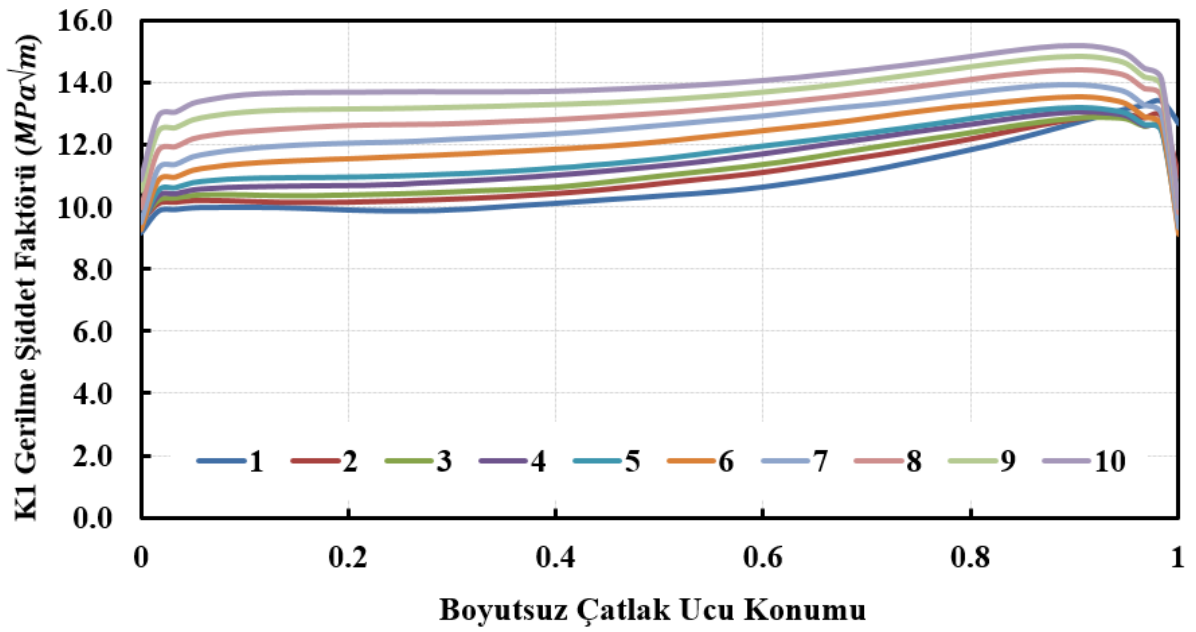
Şekil 3.1.38. 8 çatlaklı numune için FCPAS ile elde edilen ömür grafiği



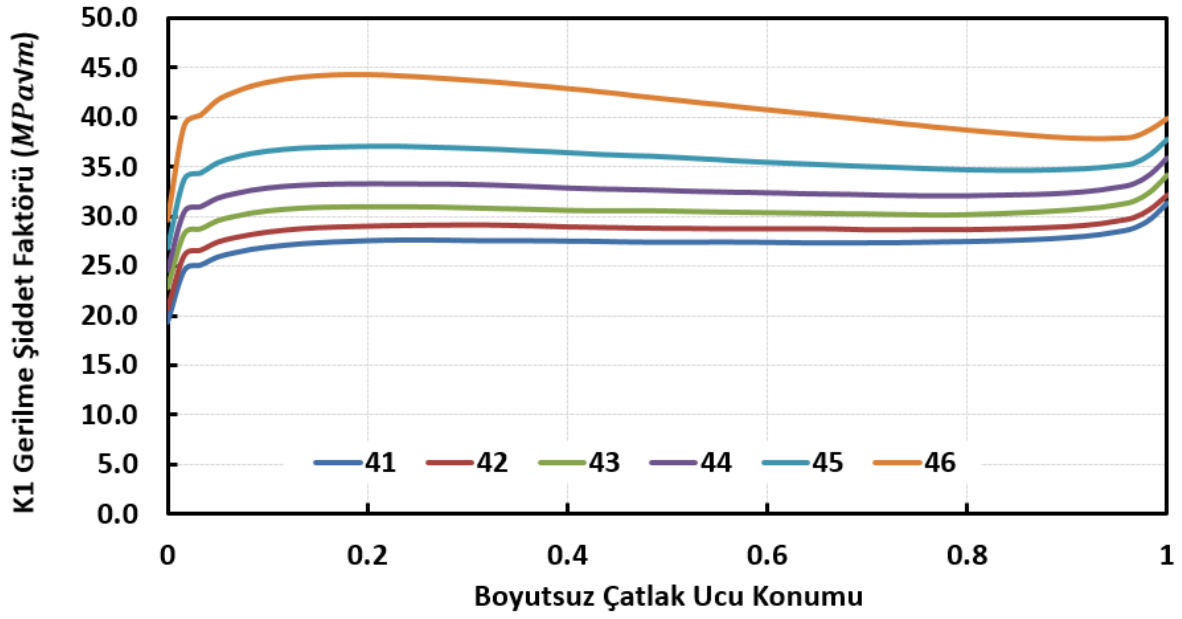
Şekil 3.1.39. 4 çatlaklı numune için FCPAS ile elde edilen ömür grafiği

Şekil 3.1.38 ve Şekil 3.1.39'da 4 ve 8 çatlaklı numuneler için çatlak ilerleme ömür grafikleri verilmiştir. 8 ve 4 çatlaklı numuneler için, simetri şartlarından dolayı sırasıyla, 4 ve 2 adet çatlak modellenmiştir. 8 adet çatlağı olan numune, fazla olan çatlak sayısından dolayı daha düşük kesit alanına ve daha yüksek gerilme değerine sahip olmuştur. Bu nedenle 8 çatlaklı numunedeki çatlaklar 4 çatlaklı numunedekilere oranla daha hızlı ilerlemişlerdir. FCPAS analiz sonuçlarının literatürden alınan ömür verileriyle oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 3.1.40 ve Şekil 3.1.41'de, 8 çatlaklı numune için FCPAS ile elde edilen GŞF değerleri 1-10 ve 41-46 çatlak ilerleme adımları için gösterilmiştir.



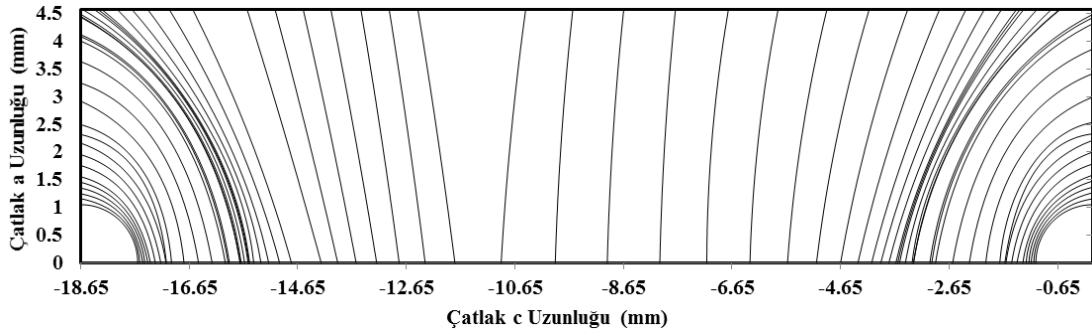
Şekil 3.1.40. 8 çatlaklı numunenin ilk 10 çatlak ilerleme adımı için GŞF grafikleri



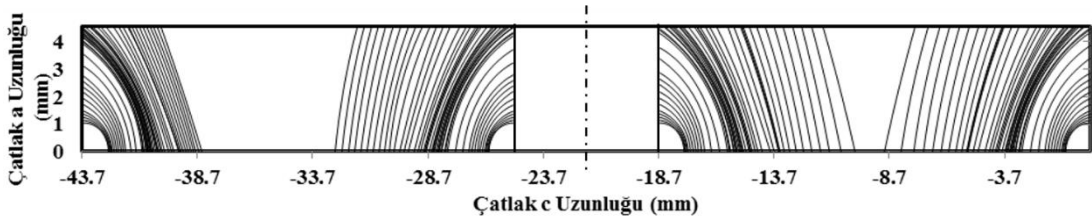
Şekil 3.1.41. 8 çatlaklı numunenin 41-46 çatlak ilerleme adımları için GŞF grafikleri

4 ve 8 çatlaklı modeller için kritik GŞF değeri olan $37\text{MPa}\sqrt{m}$ 'den sonra birkaç adım daha analizlere devam edilmiştir. Ancak, Flash_Plot adlı Excel uygulamasında, $K_{Ic}=37$ (kırılma tokluğu) olarak girildiğinde, ömür grafiği çizildiğinde kritik değer aşıldığı durumda bilgilendirme yapılmaktadır.

Şekil 3.1.42 ve Şekil 3.1.43'teki çatlak profillerinden anlaşıldığı gibi, çatlakın delik yüzeyindeki tarafı serbest yüzeydeki tarafına göre daha yüksek gerilme nedeniyle daha hızlı ilerlemiştir. Köşe çatlakları olarak başlayan çatlaklar bir süre sonra plaka kalınlığı boyunca uzanan çatlaklar haline gelmişlerdir. Numunenin ortasında bulunan çatlaklar (Şekil 3.1.42 ve 3.1.43'te simetri dolayısıyla sağ taraftaki çatlaklar) numune kenarındakilere göre daha hızlı ilerlemişlerdir. 8 çatlaklı modeldeki çatlaklar, çatlak sayısının çok olmasından kaynaklanan daha düşük net kesit alanı ve daha yüksek net kesit gerilmesi nedeniyle 4 çatlaklı modelden daha hızlı ilerlemişlerdir.



Şekil 3.1.42. Dört çatlaklı numune için FCPAS ile elde edilen çatlak profilleri



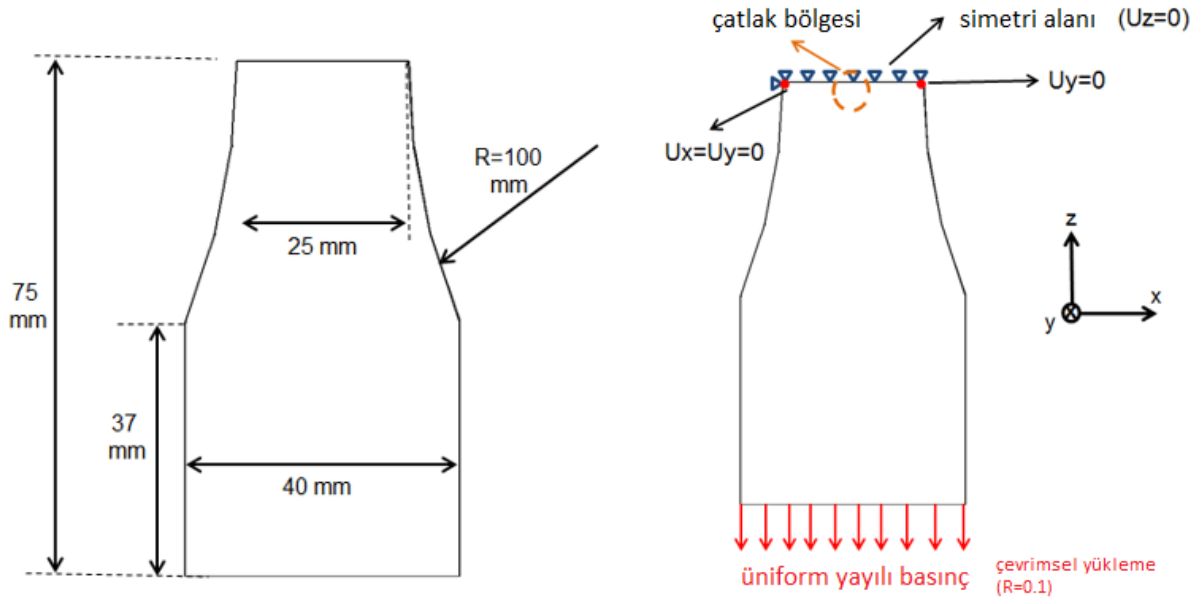
Şekil 3.1.43. Sekiz çatlaklı numune için FCPAS ile elde edilen çatlak profilleri

3.1.5 Eksenel Çeki Yükü Altında İki Yüzey Çatlağı Analizi

FCPAS ile analizi yapılan diğer bir çoğul çatlak analizi uygulaması için, Tan ve Chen (2012)'in, farklı uzunluklarda iki adet yüzey çatlağı bulunduran bir numunenin çatlak ilerlemesi ile ilgili çalışmasından faydalanılmıştır. Bu çalışmada, numunenin testlerini yapmış ve analitik çözümleri testlerle karşılaştırmışlardır.

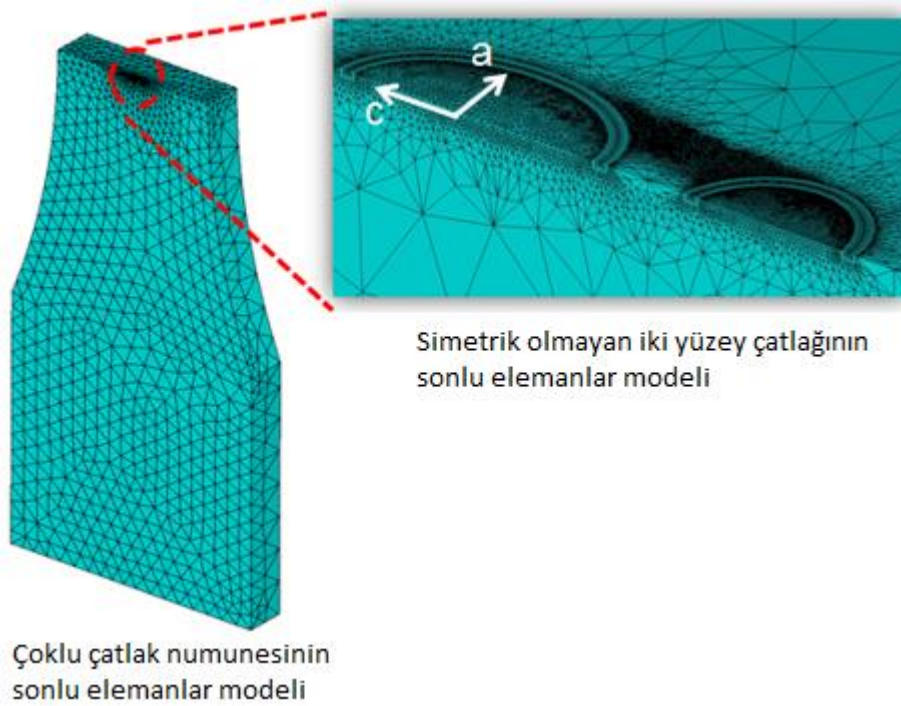
Malzemesi havacılıkta yaygın olarak kullanılan bir malzeme olan 7050-T7451 alüminyum olan numunenin ölçüleri, yükleme durumu ve sınır şartları Şekil 3.1.44'te gösterilmiştir (Numune $\frac{1}{2}$ simetrik olarak modellenmiştir). $E= 71.7$ GPa ve $\nu= 0.33$ 'tür, Tan ve Chen (2012).

Çatlak kesitinde 250 MPa yük oluşturmak için numunenin alt yüzeyine 156.25 MPa çeki yükü uygulanmıştır ve yükleme oranı $R= 0.1$ 'dir. Çatlak ilerlemesi için kullanılan malzeme sabitleri $C= 6.0E-10$ (ΔK 'nın birimi $MPa\sqrt{m}$ ve da/dN 'in birimi ise $m/\text{çevrim}$ dir) ve $m= 2$ 'dir. 7050-T7451 alüminyum alaşımı için kırılma tokluğu değeri $35 MPa\sqrt{m}$ 'dir, Tan ve Chen (2012).



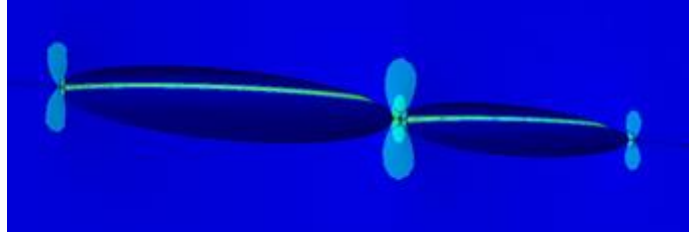
Şekil 3.1.44. Farklı uzunluklarda iki adet yüzey çatlaklı içeren numunenin genel görünümü (simetrik olduğu için yarısı gösterilmiştir), ölçüleri (numune kalınlığı 2 mm'dir), yükleme durumu ve sınır şartları

Numunenin sonlu elemanlar modeli Şekil 3.1.45'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1.45. Numunenin sonlu elemanlar modeli ve çatlak etrafındaki elemanların yakından görünümü

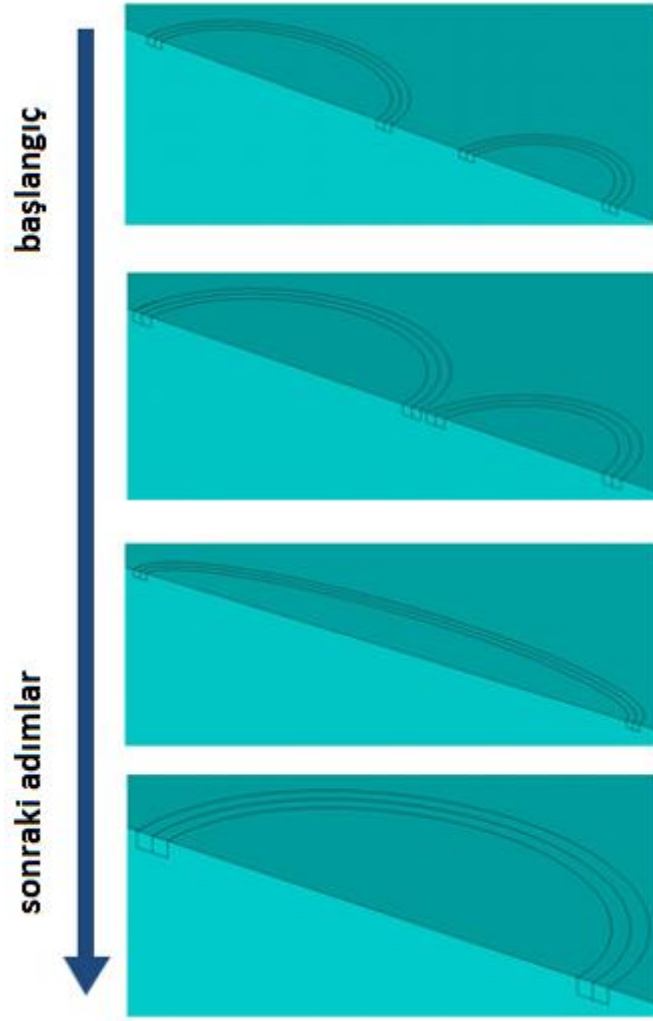
Numune çekme yükü altındayken çatlakların açılma durumu ve çatlak uçlarındaki yüksek gerilme durumu Şekil 3.1.46'da gösterilmiştir.



Şekil 3.1.46. Numune yük altındayken çatlak bölgelerindeki deformasyon hali

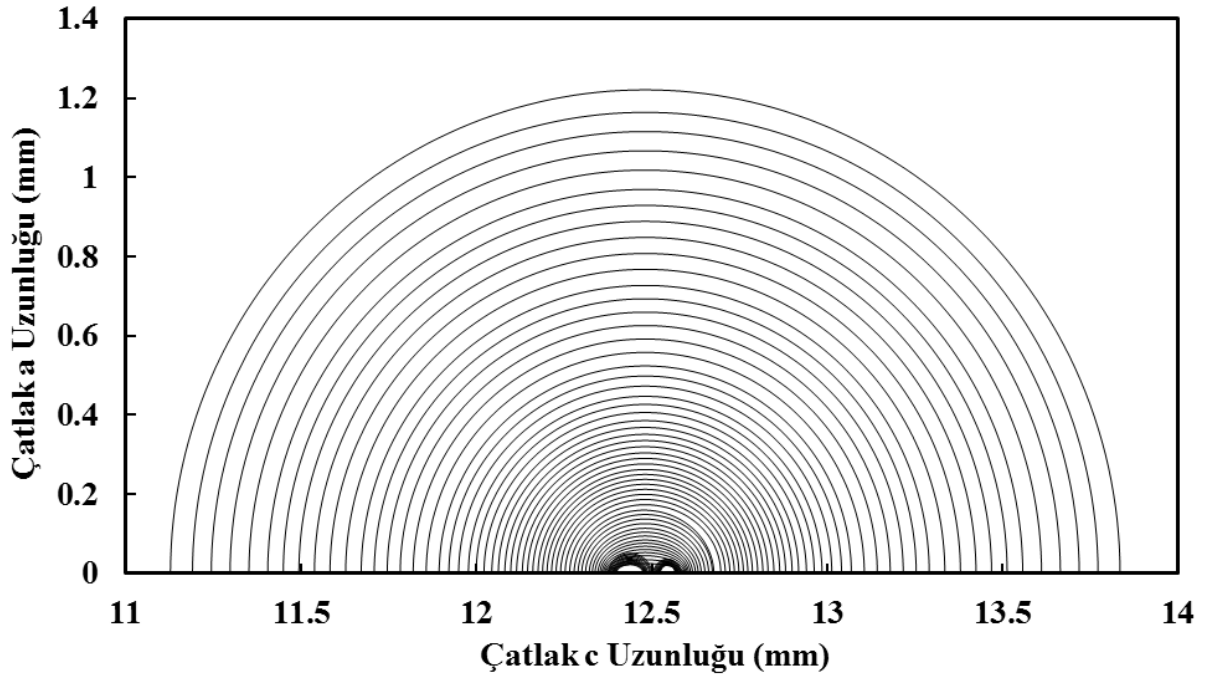
Başlangıçta farklı uzunluklarda iki yüzey çatlaklarının (numuneye önden bakıldığında solda bulunan $c=0.0375$ mm, $a=0.02$ mm boyutlarındaki büyük çatlak ve sağda bulunan $c=0.019$ mm ve $a=0.02$ mm boyutlarındaki küçük çatlak) birbirlerine yakın uçları arasındaki mesafe 0.05 mm'dir. Çatlaklar ilerleyerek birbirlerine yaklaşmakta ve sonra birleşmektedirler.

Çatlaklar numunenin yüzey tarafında birbirlerine dokunduktan sonra birleşme durumundaki yeni çatlak tanımlamak için daha sığ (a uzunluğu c uzunluğundan daha küçük olan yüzey çatlak) olarak yeni bir çatlak modellenmiştir. Birleşmiş durumdaki çatlakları temsil eden bu yeni çatlak ölçüleri referans çalışmadaki deneysel verilerden ve bir takım formüllerden yararlanılarak belirlenmiştir. Çatlak ilerleme analizi bu yeni çatlak ilerlemesi şeklinde devam etmiştir ve derinlik yönünde yüzey yönüne göre daha hızlı ilerlemiştir. Bunun sebebi ise çatlak derinlik tarafındaki uçlarında daha yüksek gerilme ve GŞF (gerilme şiddet faktörü) oluşmasıdır. İki yüzey çatlaklarının ilerleyip birbirine dokunma ve sonra yeni bir çatlak olarak ilerleme durumu Şekil 3.1.47'de verilmiştir. Çatlak, referans çalışmadaki boyutlara ulaştıncaya analiz sonlandırılmıştır.



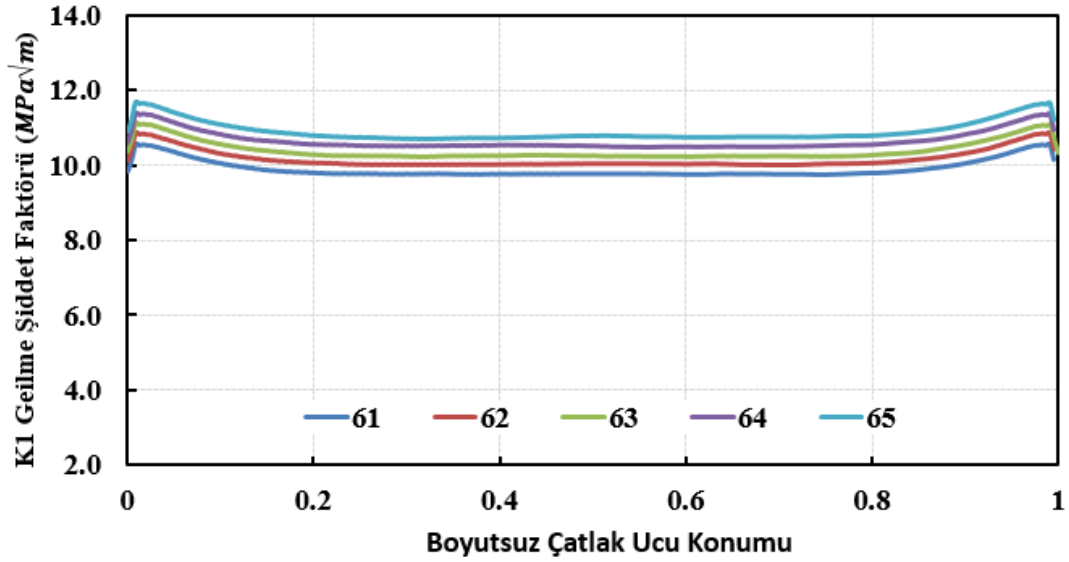
Şekil 3.1.47. Çatlak ilerleme analizi boyunca çatlakların durumları

Analiz sonucunda elde edilen çatlak profilleri Şekil 3.1.48'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1.48. Çatlak profilleri

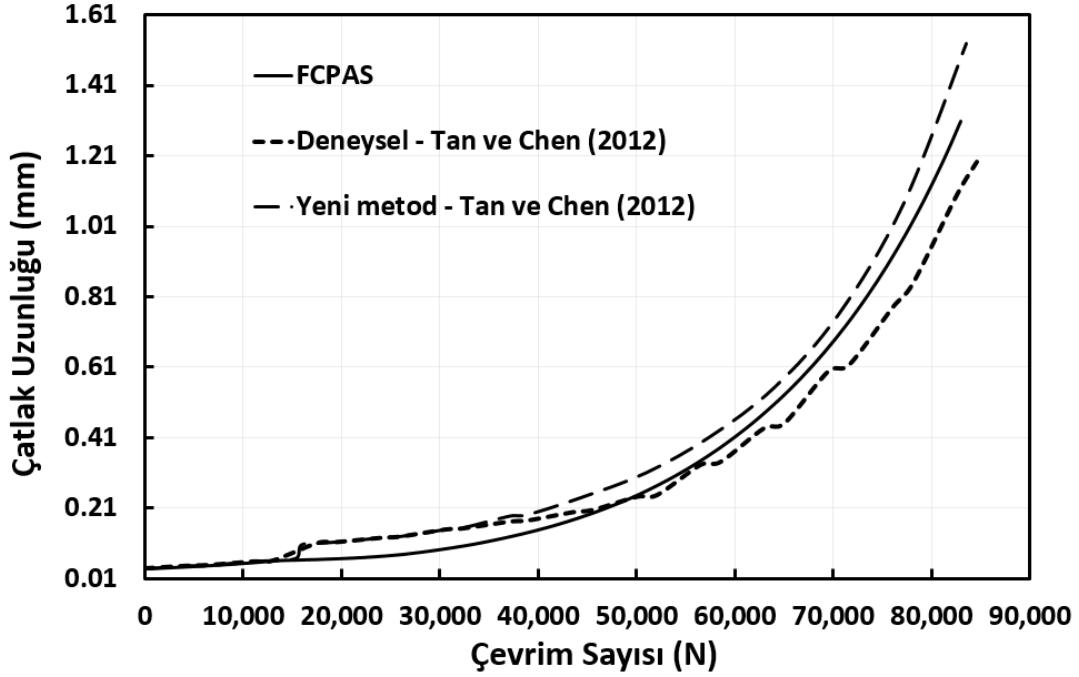
Toplam 65 adımda gerçekleşen çatlak ilerleme analizindeki çatlakların son 5 adımı için gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.1.49'da gösterilmiştir.



Şekil 3.1.49. Çatlak ilerleme analizi sonucunda adım 61-65 için elde edilen gerilme şiddet faktörleri

Çatlak ilerleme analizi sonucunda elde edilen ömür grafiği Şekil 3.1.50'de verilmiştir. Bu grafiğin oluşturulması için kullanılan gerilme şiddet faktörleri ve çatlak uzunlukları, büyük olan

çatlağın küçük çatlağa yakın kenarında yüzeyden itibaren 3. düğüm noktasından ve çatlaklar birleştikten sonra ise yeni çatlak için yüzeyden itibaren 3. düğüm noktasından alınmıştır.



Şekil 3.1.50. Çatlak ilerleme analizi sonucunda elde edilen ömür grafiği

Şekil 3.1.50'de de görüldüğü gibi, FCPAS analizi sonucu elde edilen çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluğu grafiği, referans çalışmadaki deneysel ve analitik (Yeni metod olarak belirtilmiştir) sonuçlar ile oldukça yakındır.

3.1.6 Bağlantı Kulağı (Attachment Lug) Çatlak İlerleme Analizi

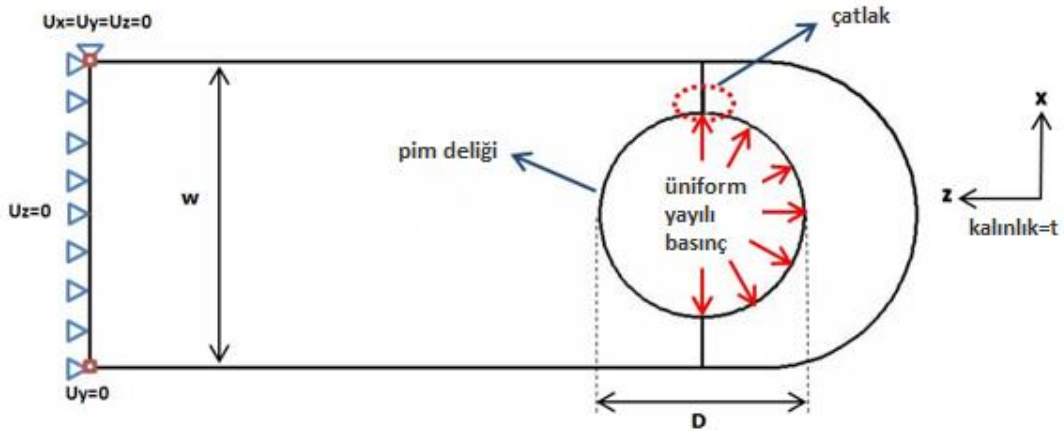
Bu uygulama kapsamında ilk olarak mod-I yüklemesi altındaki bağlantı kulağı (attachment lug) için literatür araştırması yapılmıştır ve bazı çalışmaların özeti aşağıda verilmiştir.

Bağlantı kulağı (attachment lug), havacılık alanında sık kullanılan bir bağlantı şeklidir ve uçaklardaki kanatçıklar, açılır kapanır kapaklar gibi döner hareketli elemanların bağlantılarını bu bağlantı şekliyle sağlamak mümkündür. Bağlantı kulakları içerdikleri pim delikleri nedeniyle gerilme yığılması oluşturmaktadırlar ve eğer geometride herhangi bir başlangıç kusuru (geometrik bozukluk, korozyon, dökümden kaynaklanan hava boşlukları vb.) var ise çatlak ilerlemesi oluşabilir. Literatürde bağlantı kulağı hakkında araştırma yapılmış ve Boljanovic ve Maksimovic (2013)'in çalışmadan faydalanılarak bağlantı kulağının yükleme,

geometri, malzeme vb. bilgileri kullanılarak FCPAS ile çatlak ilerleme simülasyonu ve bir takım kırılma (gerilme şiddet faktörleri hesaplaması) analizleri yapılmıştır.

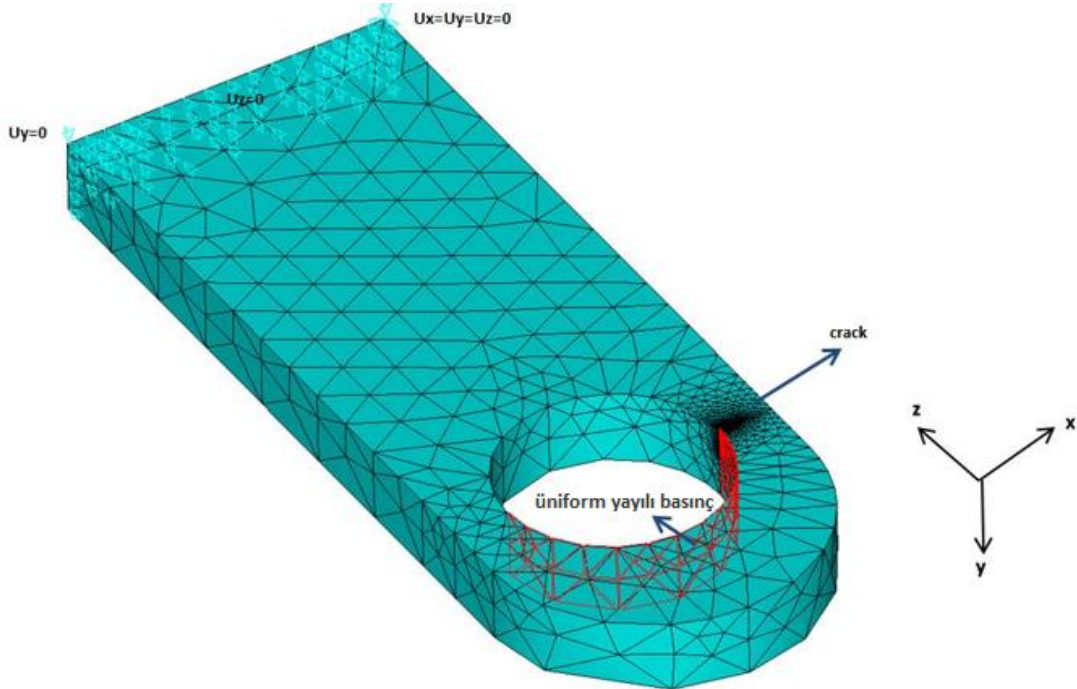
3.1.6.1 Bağlantı Kulağının Geometrisi, Problem Tanımı ve Sonlu Elemanlar Modeli

Şekil 3.1.51'de geometrisi ve yükleme durumu gösterilen bağlantı kulağında FCPAS ile köşe çatlakları kırılma analizleri ve çatlak ilerleme simülasyonu yapılmıştır ve bu modellerin yük miktarları farklı olup sınır şartları aynıdır.



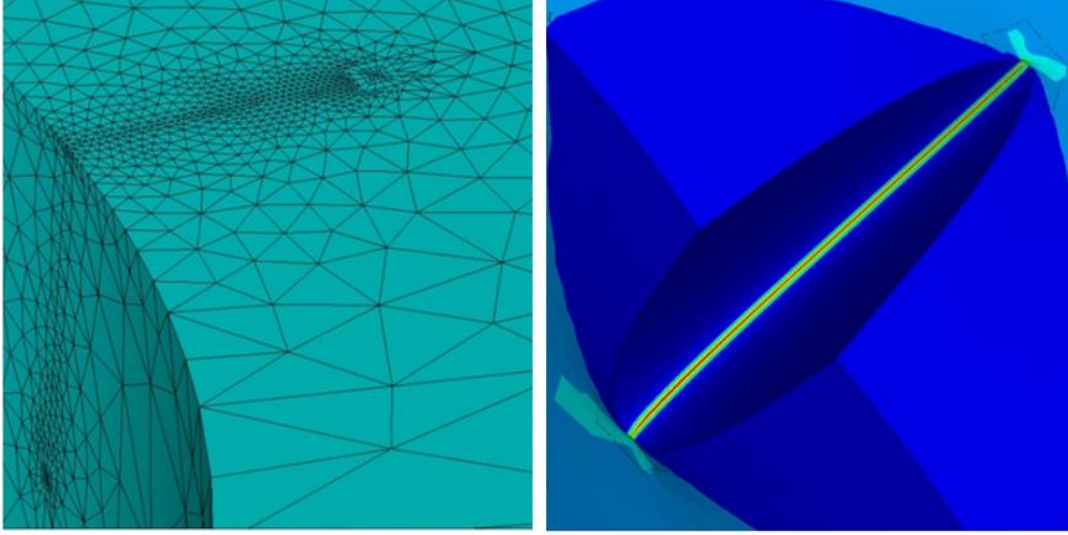
Şekil 3.1.51. Bağlantı kulağının şeması, yükleme durumu ve sınır şartları

Bağlantı kulağı sonlu elemanlar modeli Şekil 3.1.52'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1.52. Bağlantı kulağının ANSYS ile oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli

Tüm bağlantı kulağı kırılma analizlerinde ve çatlak ilerleme simülasyonunda yük, pim deliğine düzgün yayılı basınç olarak uygulanmıştır. Çatlağın bölüntü detayı ve bağlantı kulağı yük altındayken deforme olmuş hali Şekil 3.1.53'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1.53. Pim deliği kenarındaki köşe çatlağının bölüntü detayının yakından görünüşü (solda), geometri çekme yükü altında iken çatlağın deforme olmuş hali ve çatlak ucu boyunca gerilme dağılımı (sağda)

3.1.6.2 FCPAS ile Bağlantı Kulağının Kırılma Analizleri

Bağlantı kulağının malzeme özellikleri, malzeme sabitleri, geometrik ölçüleri, yük bilgileri ve başlangıç çatlak uzunlukları aşağıda verilmektedir, Boljanovic ve Maksimovic (2013):

Malzeme: 7075 T7351 Alüminyum alaşımı

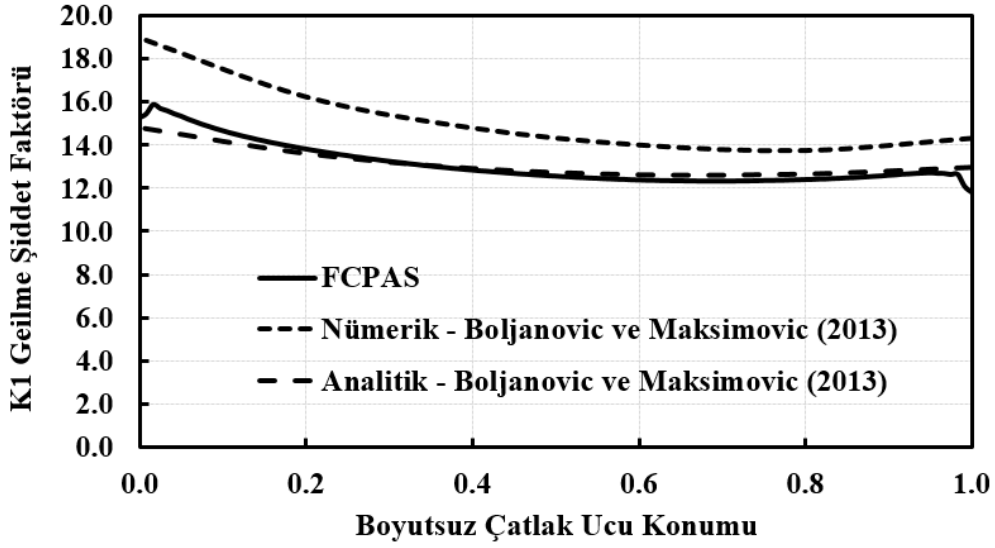
W (bağlantı kulağı genişliği) =83.3 mm

D (pim delik çapı) =40 mm

T (bağlantı kulağı kalınlığı) =15 mm

S_{maks} (yüklemeden uzak kesitteki maks gerilme= far field stress) = 51 MPa

$a_0 = b_0$ (çatlak ölçüleri) = 3.4 mm (eliptik köşe çatlağı)



Şekil 3.1.54. a=b=3.4 mm ölçülerindeki köşe çatlakı için FCPAS analiz sonuçlarının referans çalışmadaki sonlu elemanlar analizi ve analitik sonuçlarla karşılaştırması

Şekil 3.1.54'te, köşe çatlakı için FCPAS çözümünden elde edilen KI GŞF değerleri referans çalışmadan alınan sonlu elemanlar ve analitik sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, sonuçlar oldukça yakındır.

3.1.6.3 Bağlantı Kulağının Çatlak İlerleme Simülasyonu

FCPAS ile çatlak ilerleme simülasyonu yapılan bağlantı kulağının ölçüleri, malzeme özellikleri, sabitleri ve yükleme bilgileri aşağıda verilmiştir, Boljanovic ve Maksimovic (2013):

Malzeme: 7075 T651 Alüminyum alaşımı

$C_a=C_b$ (malzeme sabiti) = $4.68E-10$ (ΔK 'nın birimi $MPa\sqrt{m}$, da/dN 'in birimi $m/\text{çevrimdir}$)

m (malzeme sabiti) = 3 (aşağıdaki formülasyondan [Boljanovic ve Maksimovic (2013)] bulundu)

$$\frac{da}{dN} = C_A K_{I_{maxA}}^2 \Delta K_{IA}$$

$$\frac{db}{dN} = C_B K_{I_{maxB}}^2 \Delta K_{IB}$$

(3.1.1)

R (yükleme oranı) = 0.1 (sabit genlikte aksenal yükleme)

S_{maks} (yükten uzak kesitteki maks gerilme) = 41.38 MPa

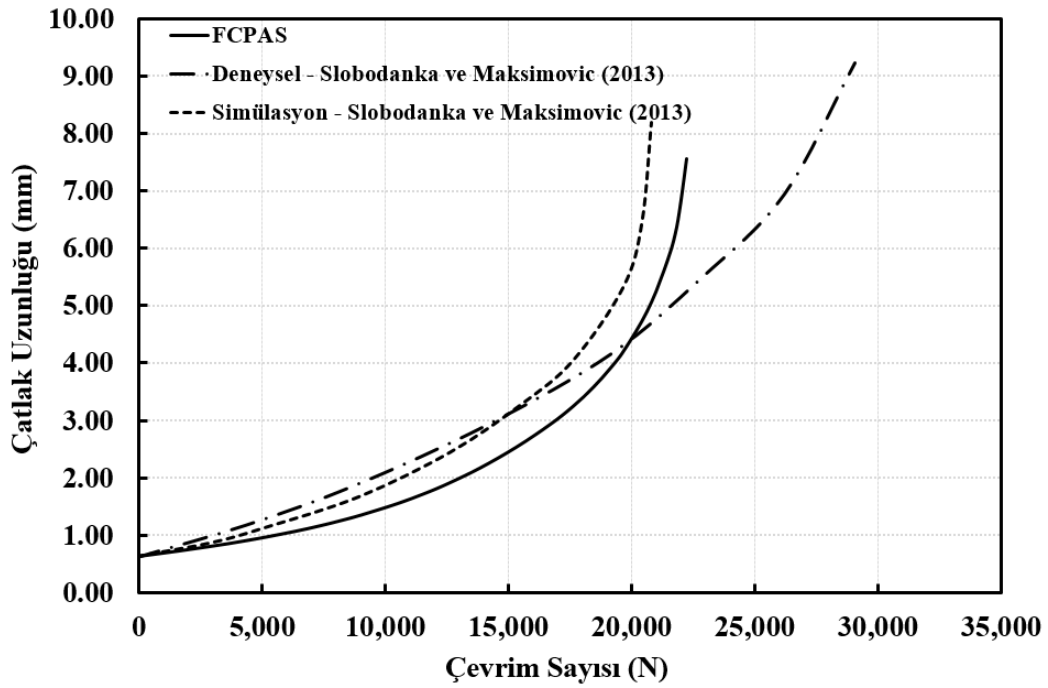
W (bağlantı kulağı genişliği) = 57.15 mm

D (pim delik çapı) =38.1 mm

t (bağlantı kulağı kalınlığı) =12.7 mm

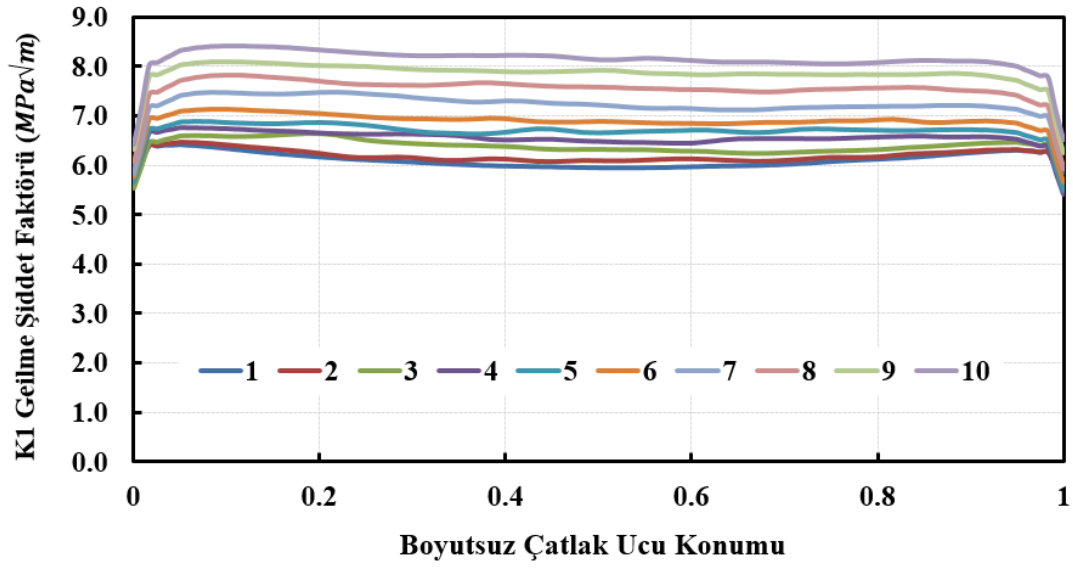
$a_0=b_0$ (başlangıç çatlak uzunlukları) =0.635 mm

Çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde ömür grafiği Şekil 3.1.55'te verilmiştir.

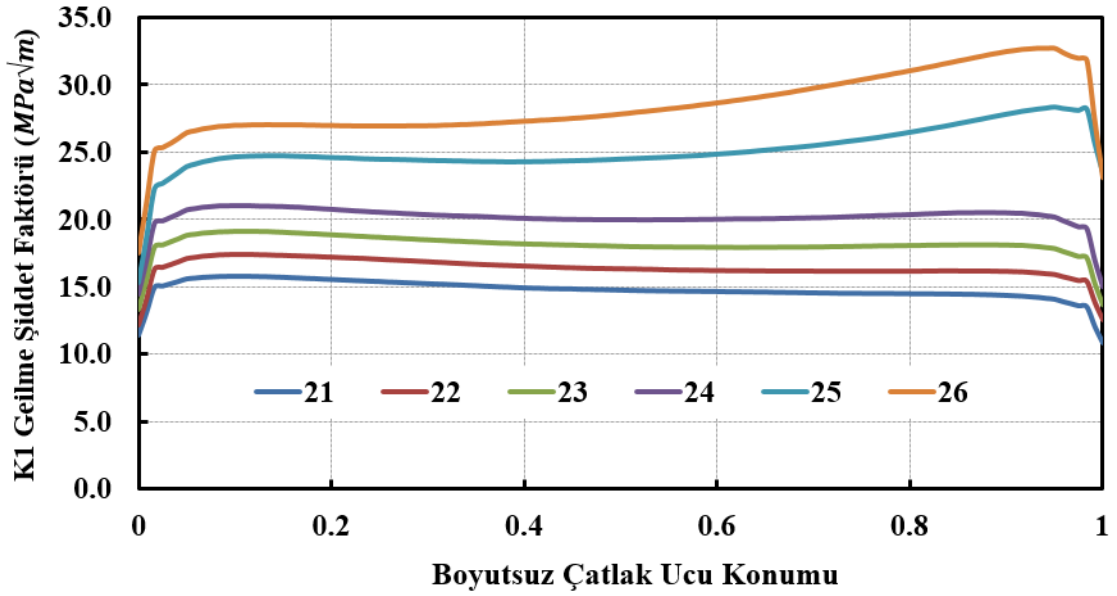


Şekil 3.1.55. FCPAS ömür tahmini sonuçlarının Boljanovic ve Maksimovic (2013)'in sonuçları ile karşılaştırılması (FCPAS analizinden yüzey tarafındaki düğüm noktaları için elde edilen GŞF değerleri kullanılarak hesaplanmıştır)

İlk 10 ve son 6 çatlak adımı için FCPAS ile elde edilen GŞF (KI) değerleri Şekil 3.1.56 ve 3.1.57'de verilmiştir.



Şekil 3.1.56. Bağlantı kulağı için 1-10 adımlarındaki KI GŞF değerleri



Şekil 3.1.57. Bağlantı kulağı için 21-26 adımlarındaki KI GŞF değerleri

Küçük boyutlardaki çatlaklarda delik yüzeyindeki gerilme yığılmasından dolayı GŞF değerleri üst yüzeye göre daha yüksek çıkmıştır. Ancak kopmaya doğru üst yüzeyde daha yüksek GŞF değerleri elde edilmiştir. Başlangıçta birbirine yakın olan GŞF değerleri, çatlak ölçüleri büyüdükçe birbirinden daha uzakta çıkmaktadır. Bunun sebebi ise, çatlak büyüdükçe çatlak ilerleme hızının artmasıdır. Çünkü çatlak ilerledikçe geometri kesiti azalmakta ve daha yüksek gerilmeler meydana gelmektedir. Bu durum GŞF'lerin daha hızlı yükselmesine ve dolayısıyla da çatlak ilerleme hızının artmasına sebep olmaktadır. GŞF grafiklerinden de

görülebileceği gibi, 7075 T6 Alüminyum alaşımı için kırılma tokluğu olan $K_{Ic} = 29 \text{ MPa}\sqrt{m}$ değerine ulaşıncaya kırılmanın gerçekleştiği tahmin edilmektedir.

Literatürdeki çalışmada yük, pim deliğine pim yüklemesi olarak değişken bir formda uygulanmıştır. FCPAS analizlerinde ise yük, pim deliğine düzgün yayılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu da GŞF değerlerinde bir miktar düşmeye sebep olmuştur ve ömür grafiğinde FCPAS çevrim sayısının bir miktar yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Makaledeki gibi yükleme ile FCPAS analizi yapıldığında alınan GŞF değerlerinin biraz yükseleceği ve çevrim sayısı değerinin düşme göstereceği tahmin edilmektedir.

3.1.6.4 Köşe Çatlağı İçin Çatlak Profili Değerlendirmesi

Bağlantı kulağı, aşağıda verilen geometri, malzeme özellikleri ve yük bilgilerine göre modellenmiştir ve köşe çatlağı ilerleme simülasyonu yapılmıştır, Boljanovic ve Maksimovic (2013):

Malzeme: 7075 T6 Alüminyum alaşımı

W (yükleme kulağı genişliği) = 60 mm

t (yükleme kulağı kalınlığı) = 9.6 mm

$a_0 = b_0$ (çatlak başlangıç ölçüleri) = 0.25 mm

$C_a = C_b$ (malzeme sabitleri) = 4.68E-10

m (malzeme sabiti) = 3 (aşağıdaki formülasyondan [Boljanovic ve Maksimovic (2013)] bulundu)

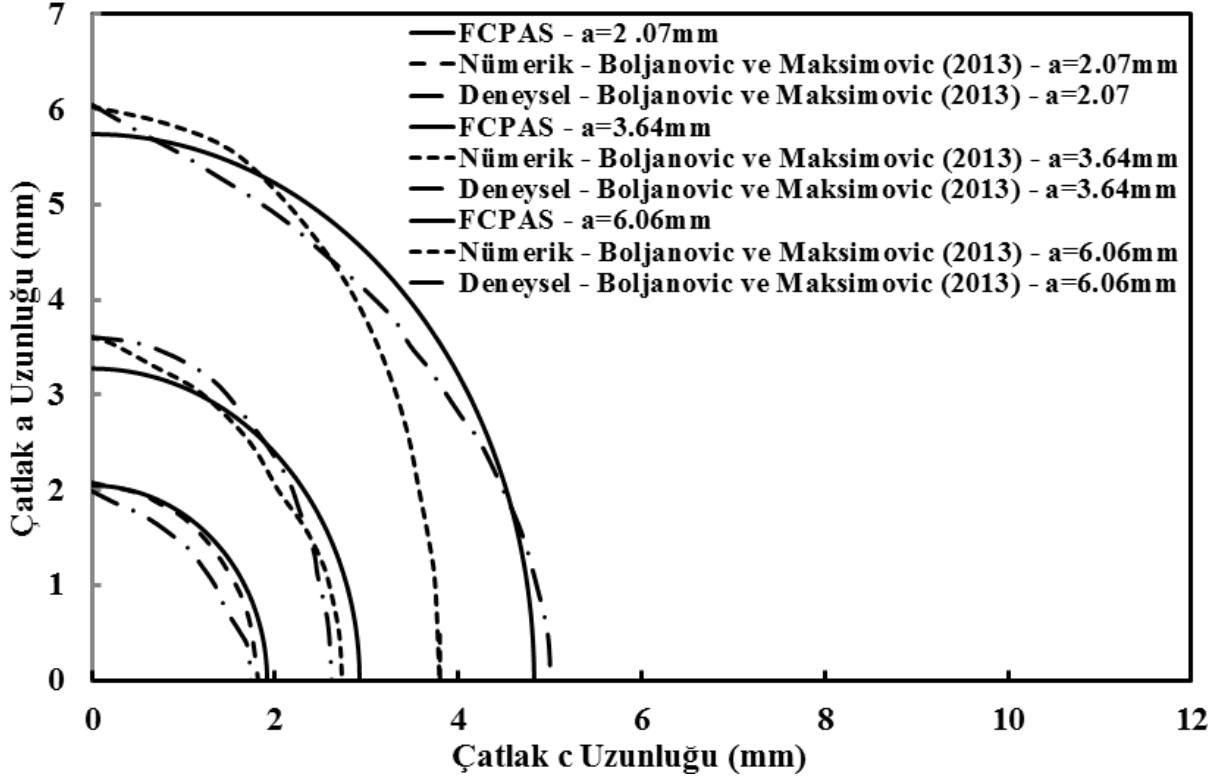
$$\frac{da}{dN} = C_A K_{I_{maxA}}^2 \Delta K_{IA}$$

$$\frac{db}{dN} = C_B K_{I_{maxB}}^2 \Delta K_{IB}$$

(3.1.2)

$S_{maks} = 120 \text{ MPa}$, $S_{min} = 40 \text{ MPa}$

FCPAS çatlak ilerleme simülasyonundan elde edilen sonuçlar literatür çalışmasından alınan verilerle karşılaştırılmıştır ve Şekil 3.1.58'de gösterilmiştir.



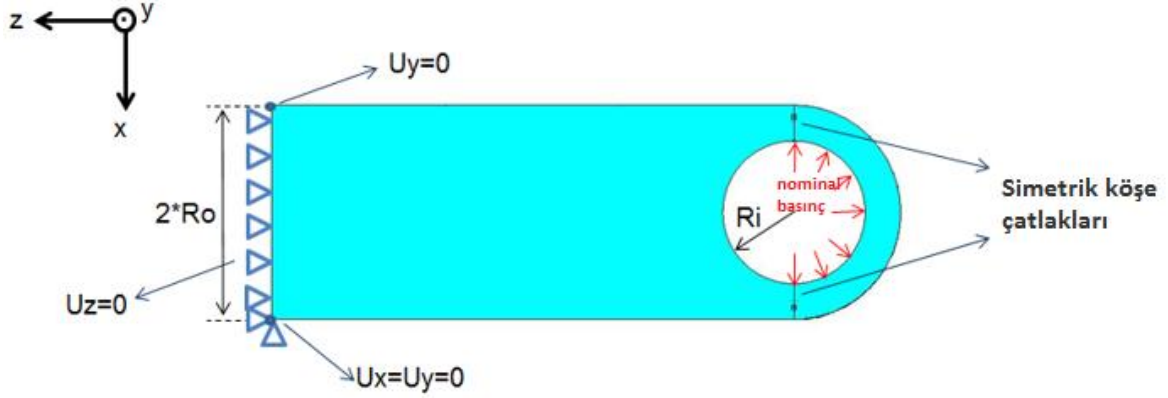
Şekil 3.1.58. FCPAS ile köşe çatlakları ilerleme simülasyonundan elde edilen bazı çatlak profillerinin literatür sonuçları ile karşılaştırılması

Yukarıdaki ömür tahmini ve çatlak profilleri incelendiğinde, FCPAS analiz sonuçlarının literatürdeki sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmektedir.

3.1.7 Bağlantı Kulağı (Attachment Lug) Çoklu Çatlak Kırılma Analizi

Rigby ve Aliabadi (1997)'nin makalesinden faydalanılarak iki çatlak barındıran bağlantı kulağı (attachment lug) için farklı R_o/R_i (pim deliği tarafında dış yarıçap/iç yarıçap oranı) oranlarında kırılma analizleri yapılmış ve elde edilen gerilme şiddet faktörleri 1 ve 2 çatlak analiz sonuçları olarak birbirleriyle ve literatür verisi ile karşılaştırılmıştır.

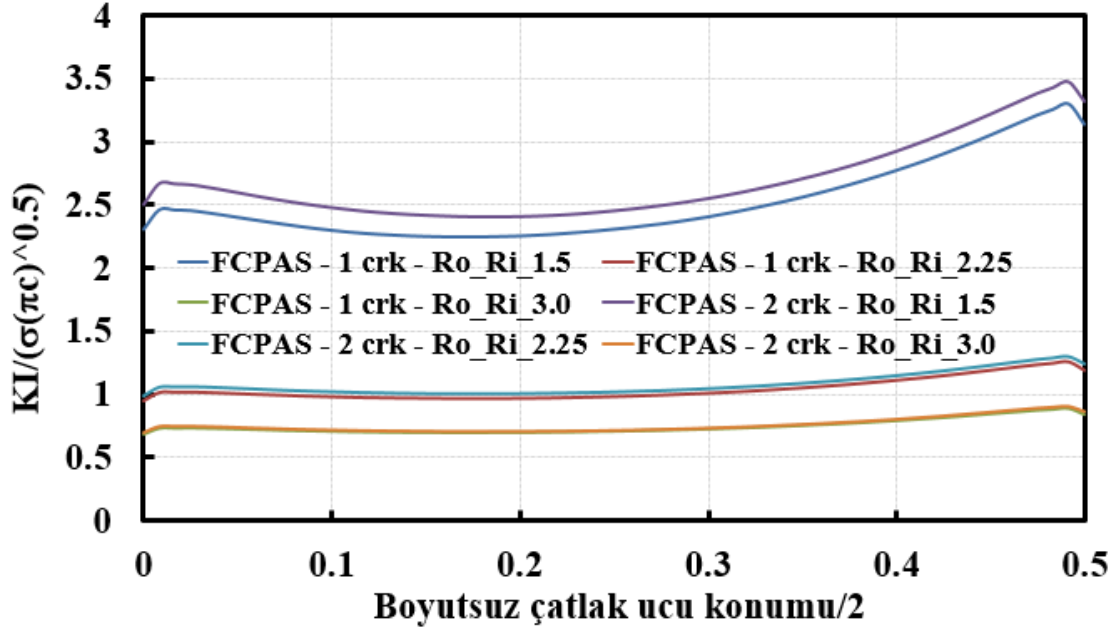
Bağlantı kulağı için boyut adlandırmaları, yükleme durumu ve sınır şartları Şekil 3.1.59'da gösterilmiştir.



Şekil 3.1.59. Bağlantı kulağı için boyut adları, yükleme durumu ve sınır şartları

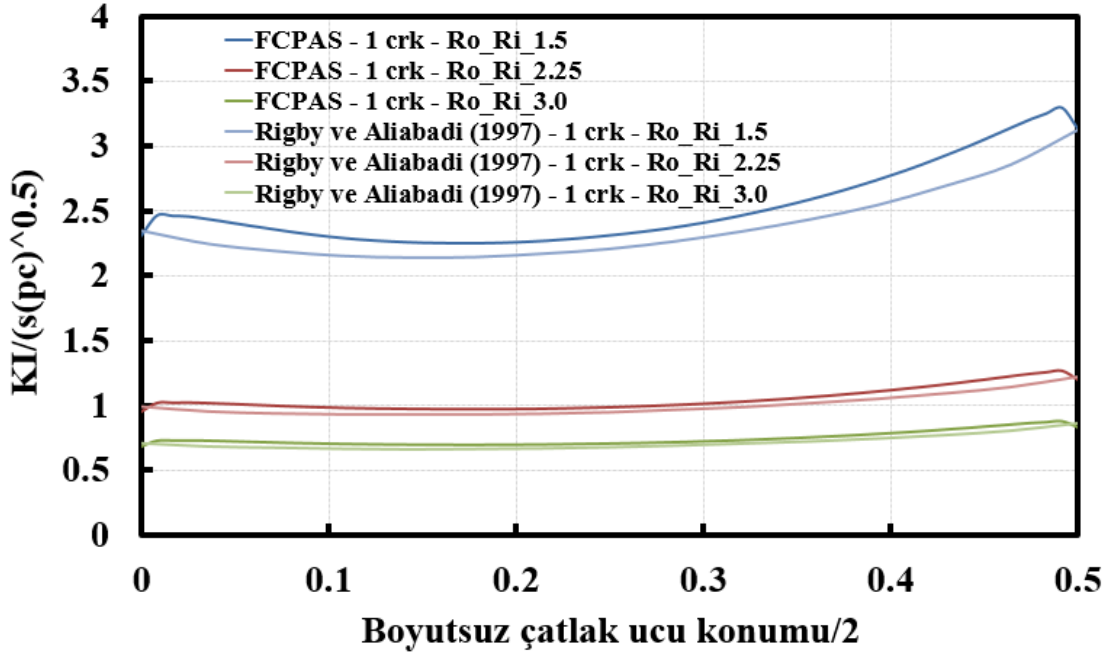
Delik iç yüzeyine, geometride çekme yükü oluşturacak şekilde 1 MPa düzgün yayılı yük uygulanmıştır. Pim deliğinin 2 tarafında veya tek tarafında çatlak(lar) bulunma durumu için farklı R_o/R_i yarıçap oranları için kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çatlaklar a ve c uzunlukları eşit olacak şekilde köşe çatlakları olup, tüm durumlarda çatlak uzunlukları aynıdır. $R_o/R_i = 1.5, 2.25$ ve 3.0 , $a/c = 1$, $a/B = 0.5$, $R_i/B = 1.5$ 'tir, Rigby ve Aliabadi (1997). Verilen boyutsuz oranlara göre geometri boyutlarını elde etmek için $a=c = 10$ mm, $B = 20$ mm alınmıştır ve diğer ölçüler verilen oranlardan çıkarılmıştır. $E = 73.1$ GPa ve $\nu = 0.33$ olarak kullanılmıştır, ASM Aerospace Specification Metals Inc. (2014).

FCPAS ile yapılan tek ve iki çatlaklı durumlar için farklı pim deliği dış ve iç yarıçapları oranlarında elde edilen gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.1.60'ta verilmiştir. Görüldüğü gibi, R_o/R_i oranı azaldıkça yani pim deliği kenarındaki et kalınlığı azaldıkça gerilme şiddet faktörleri arasındaki fark tek ve iki çatlaklı geometriler için artmaktadır. Bunun sebebi, çift çatlaktan kaynaklanan kesit düşme etkisinin numune kesiti azaldıkça daha da belirgin hale gelmesidir.



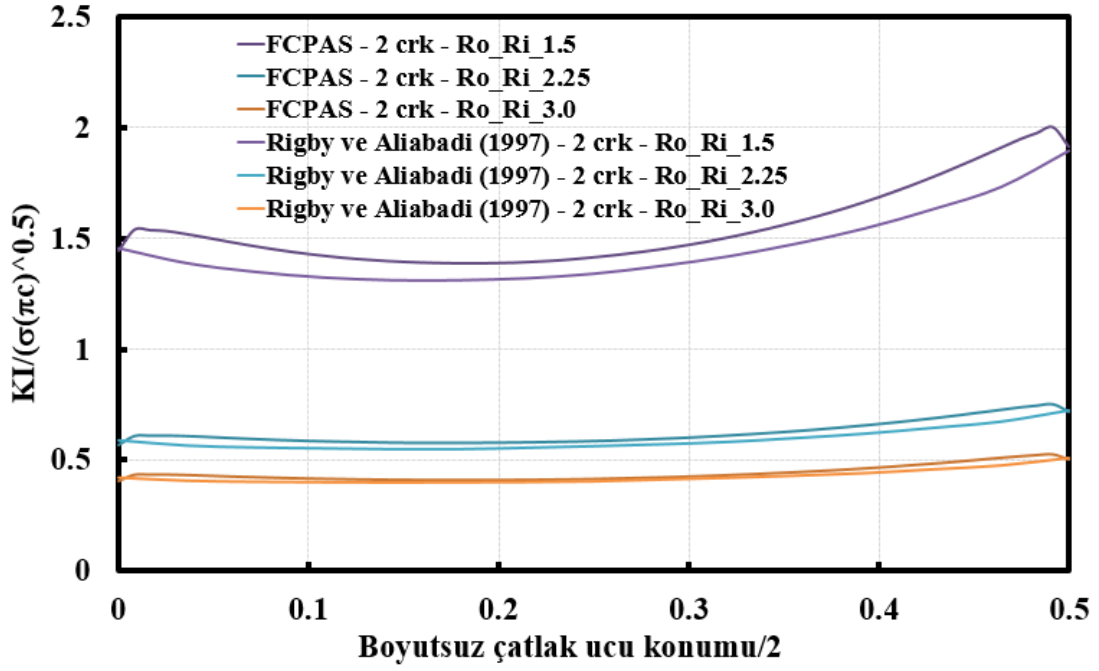
Şekil 3.1.60. Bağlantı kulağı için tek ve iki çatlaklı durumlar için gerilme şiddet faktörleri

Tek çatlaklı durumlar için referans çalışmadaki nümerik sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.1.61’de verilmiştir.



Şekil 3.1.61. Tek çatlaklı durumlar için gerilme şiddet faktörleri

İki çatlaklı durumlar için referans çalışmadaki nümerik sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.1.62’de verilmiş ve ilgili referans sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

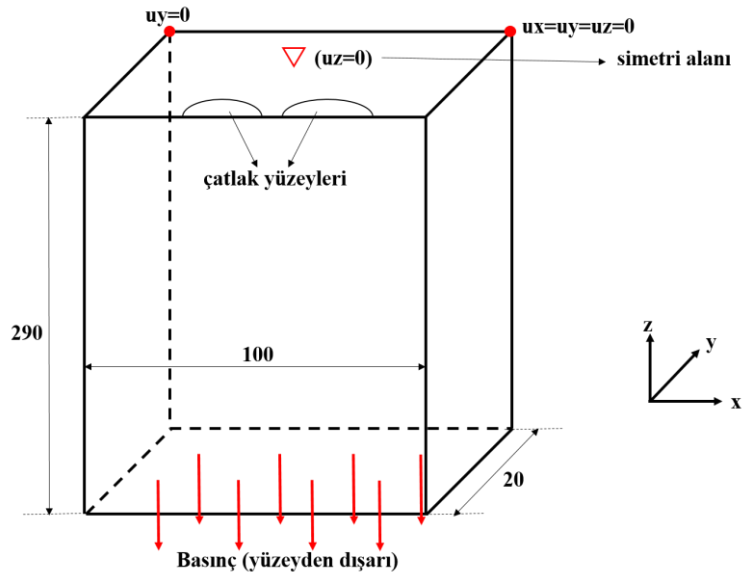


Şekil 3.1.62. Çift çatlaklı durumlar için gerilme şiddet faktörleri

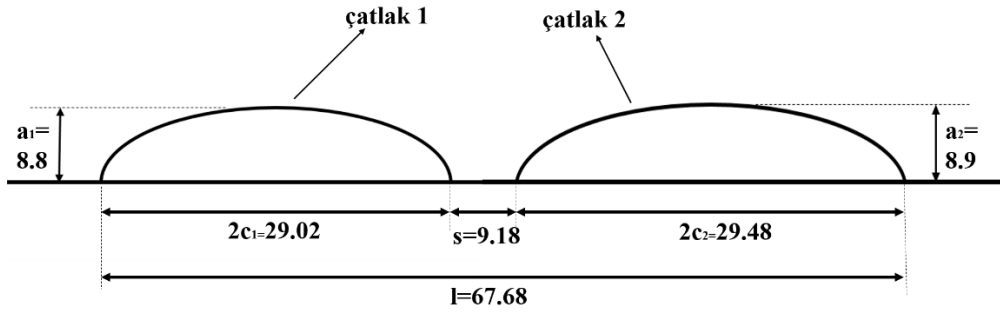
Şekil 3.1.61 ve 3.1.62'den de görüldüğü gibi, gerilme şiddet faktörleri, numune kesiti azaldıkça artış göstermektedir ve FCPAS ile hesaplanan gerilme şiddet faktörü değerleri literatürdeki çalışmadan alınan nümerik sonuçlara oldukça yakındır.

3.1.8 Bir Plakada İlerleyerek Birleşen Çoğul Çatlakların Analizi

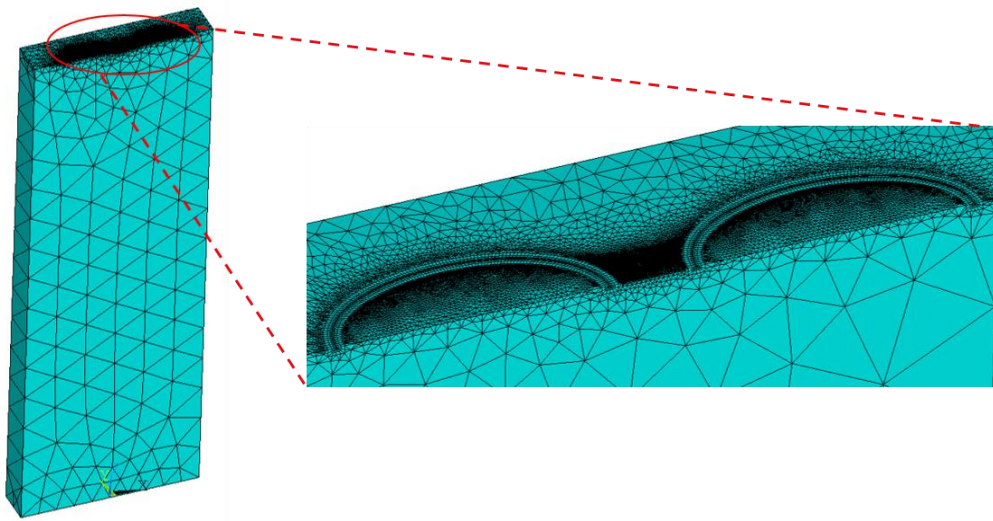
Leek ve Howard (1996), yaptıkları bir çalışmada deneysel ve analitik olarak birbirinden farklı uzunluklarda iki adet yüzey çatlaklarının bir plakada çevrimsel yük altında ilerlemesi, birleşmesi ve daha sonra tek bir çatlak olarak ilerlemeye devam etmesi durumunu incelenmişlerdir. Aynı veriler kullanılarak FCPAS ile çatlak ilerleme analizi yapılmış ve sonuçlar literatürdekilerle karşılaştırılmıştır. Analizi yapılan geometrinin çatlak detayı ve ölçüleri ve başlangıç çatlak uzunlukları Şekil 3.1.63 ve Şekil 3.1.64'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1.63. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılan plakanın ölçüleri (mm), yük ve sınır şartları

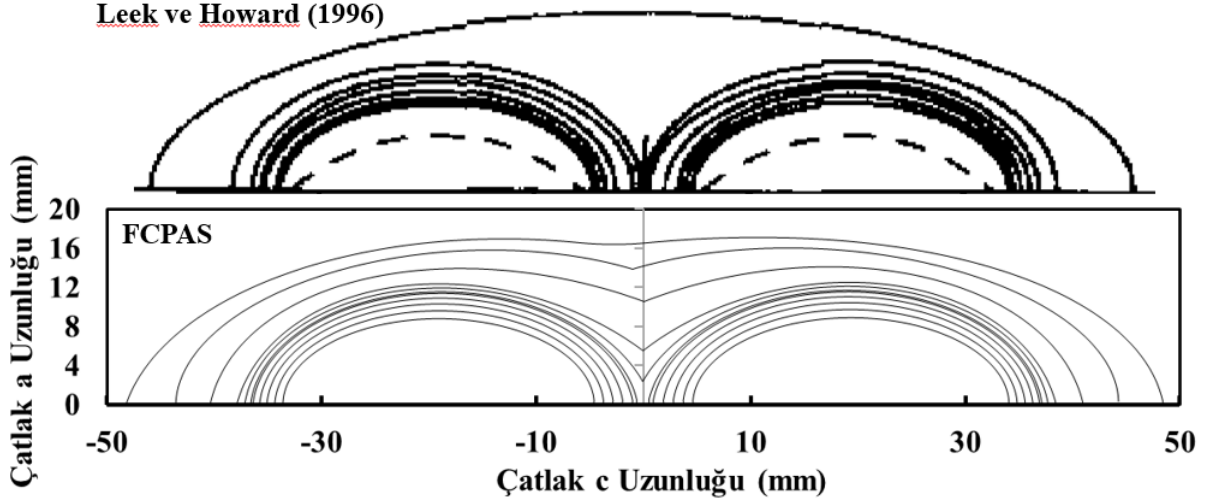


Şekil 3.1.64. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılan plakanın başlangıç çatlak ölçüleri (mm)



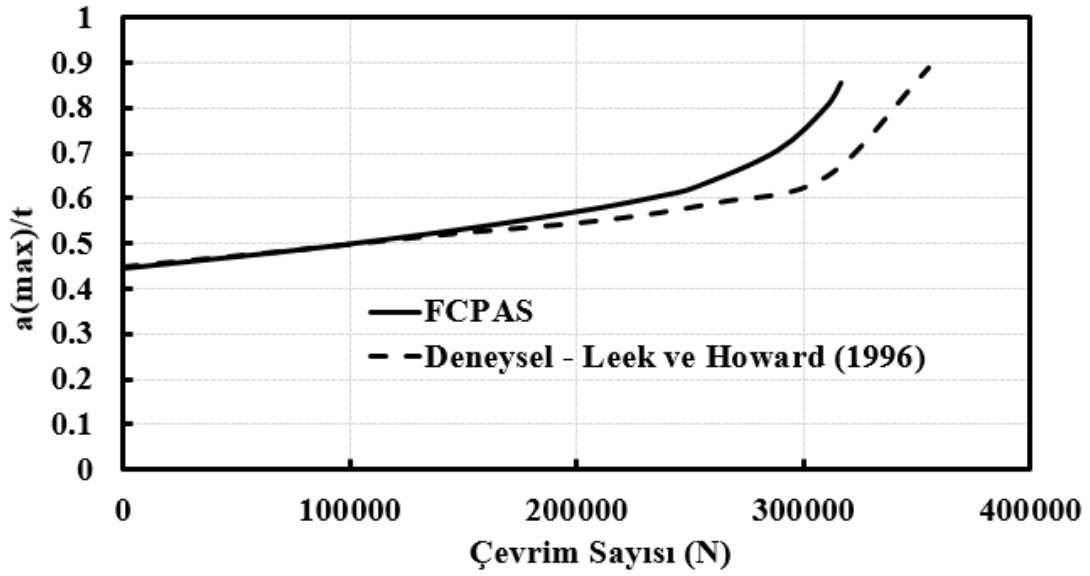
Şekil 3.1.65. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılan plakanın sonlu elemanlar modeli

Şekil 3.1.65'te görüldüğü üzere, sonlu elemanlar modeli verilen plaka simetriden dolayı $\frac{1}{2}$ olarak modellenmiştir ve alt yüzeyine 100 MPa yüzeyden dışarı basınç uygulanmıştır (yük çevrimi oranı $R=0.2$ 'dir). Malzeme sabitleri $C= 3.318E-12$ (ΔK 'nın birimi $MPa\sqrt{m}$ ve da/dN 'in birimi ise $m/\text{çevrimdir}$) ve $n=3.056$ 'dır.



Şekil 3.1.66. FCPAS analizi ile tahmin edilen çatlak ilerleme profillerinin literatür test sonuçları ile karşılaştırması

Çatlak ilerleme analizi sonucu elde edilen profillerin literatürdeki verilerle karşılaştırması Şekil 3.1.66'da verilmiştir. Kesikli çizgilerle gösterilen profiller literatürdeki deneysel çalışmada başlangıç çatlakını oluşturmak için numunede oluşturulan kesiklerdir ve bu kesikler ile çevrimsel yük altında başlangıç çatlakı oluşturulmuştur. FCPAS ve literatürdeki deneysel çalışmanın başlangıç çatlakları eşit uzunluktadır. Oldukça benzer şekilde ilerleyen çatlaklar birbirlerine temas etmekte ve birleşmektedirler. Çatlaklar birleşip tek çatlak halinde ilerleyip bir süre sonra plakanın kopmasına sebep olmaktadır. FCPAS ve literatürdeki deneysel çalışmanın son çatlak profilleri benzerdir.



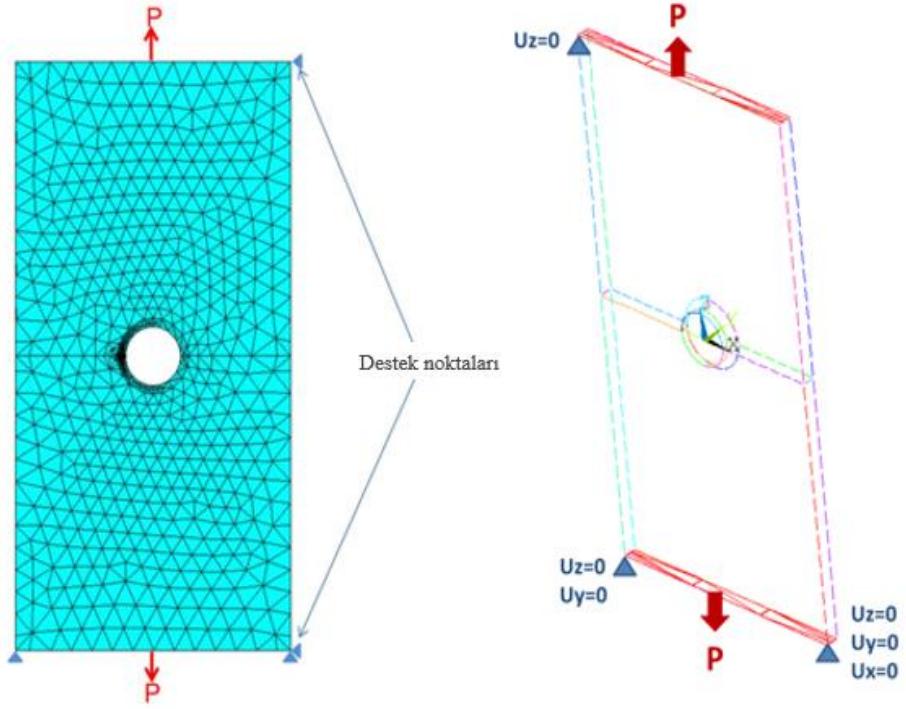
Şekil 3.1.67. “Maksimum çatlak derinliğinin plaka kalınlığına oranı”na karşılık çevrim sayısı açısından FCPAS analiz sonuçları ile literatür deneysel çalışmasının karşılaştırılması

Şekil 3.1.67’de verilen ömür tahmini karşılaştırmalarına göre FCPAS analizi ile literatürdeki çalışmanın test sonuçlarının oldukça yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

3.1.9 Havşalı Delikli Plakada Çatlak İlerleme Analizi

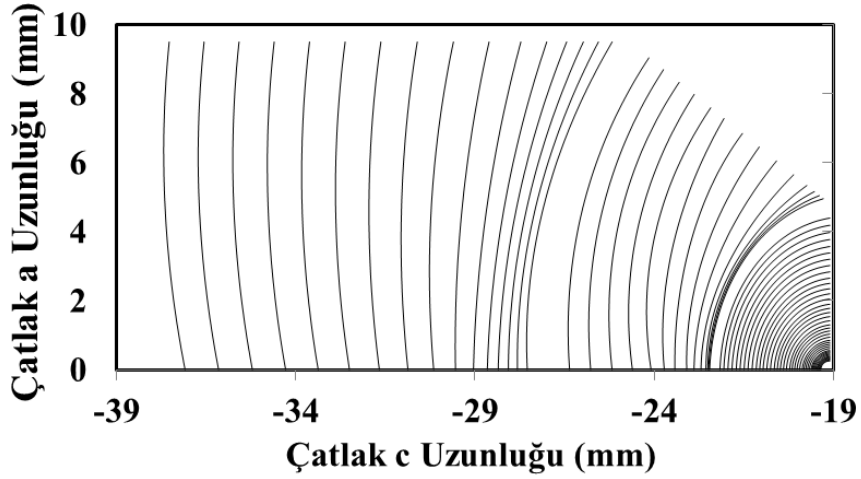
Park vd. (2006) çalışmalarında, Polimetilmetakrilat (PMMA) malzemesinden havşalı delikli plakada yorulmalı çatlak ilerleme testleri yapmışlardır ve sonucunda plakanın havşalı deliğinin farklı yerlerinden çatlak başlangıçları olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmada elde ettikleri çatlak ilerleme verileri ile ömür hesaplamaları da yapmışlardır.

Bu çalışma kapsamında, havşalı delikli plaka geometrisi için literatürdeki çalışmadan elde edilen bilgiler kullanılarak çatlak ilerleme analizi yapılmıştır. Havşalı delikli plaka için sınır şartları ve yükleme koşulları Şekil 3.1.68’de gösterilmiştir. Paris-Erdoğan kuralı malzeme sabitleri $C= 2.74606E-6$ (ΔK 'nın birimi $MPa\sqrt{m}$, da/dN 'in birimi $m/\text{çevrimdir}$) ve $m=6.1577$, başlangıç çatlak yarıçapı 0.28 mm ve yük değeri ise 5.2 MPa’dır.

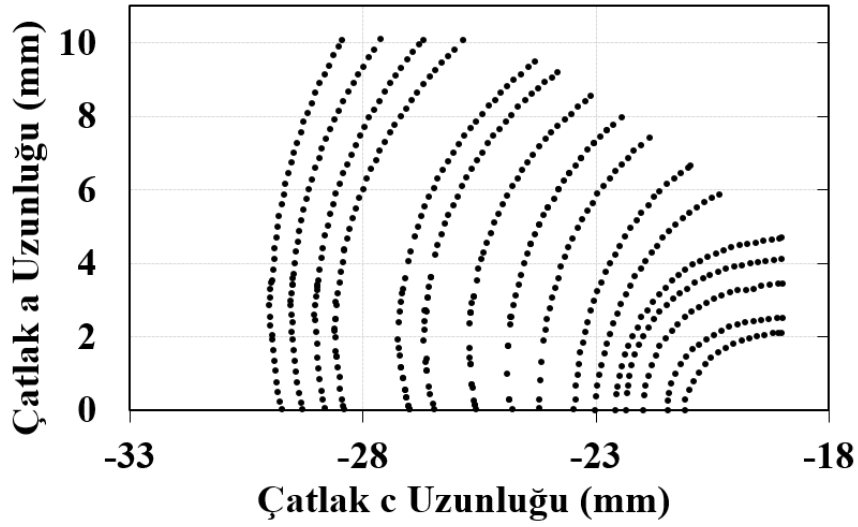


Şekil 3.1.68. Çatlak ilerleme analizi yapılan modelin sonlu elemanlar modeli (solda), yükleme koşulu ve sınır şartları (sağda)

Analiz sonucunda elde edilen çatlak ilerleme profilleri Şekil 3.1.69'da, literatür çalışmasındaki çatlak ilerleme profilleri ise Şekil 3.1.70'de verilmiştir.

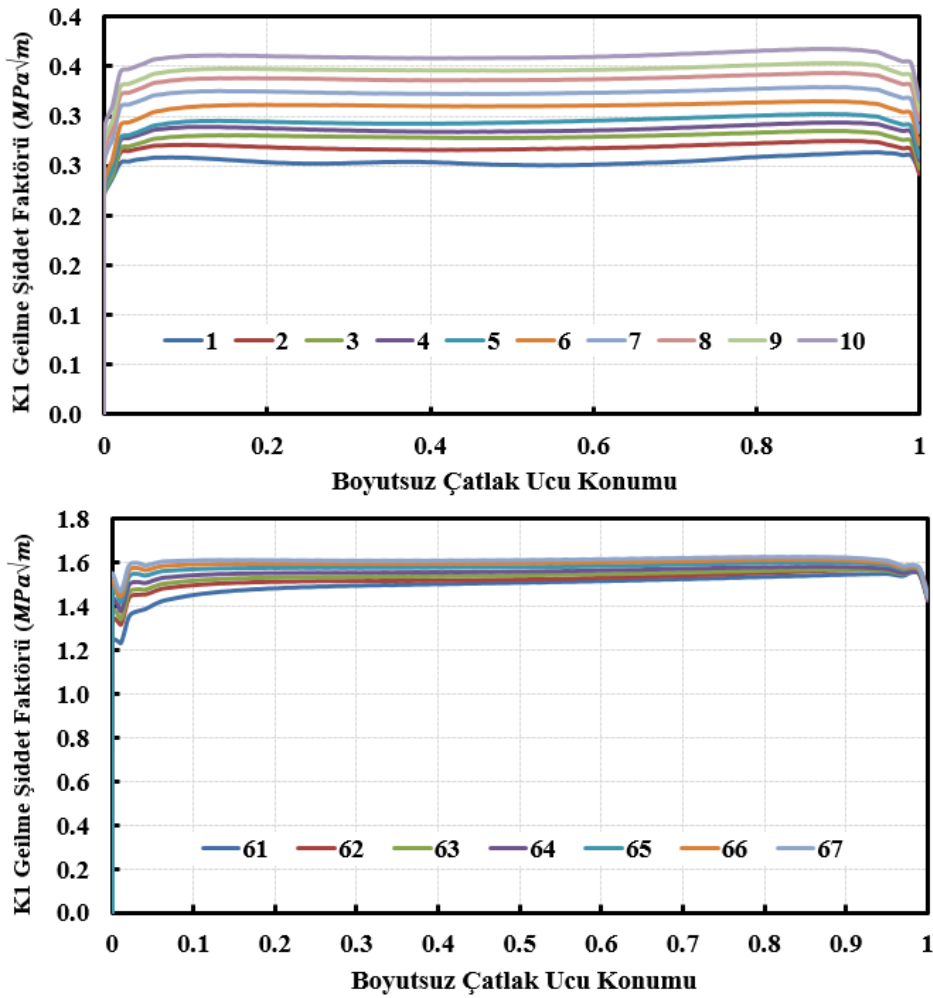


Şekil 3.1.69. FCPAS ile elde edilen çatlak ilerleme profilleri



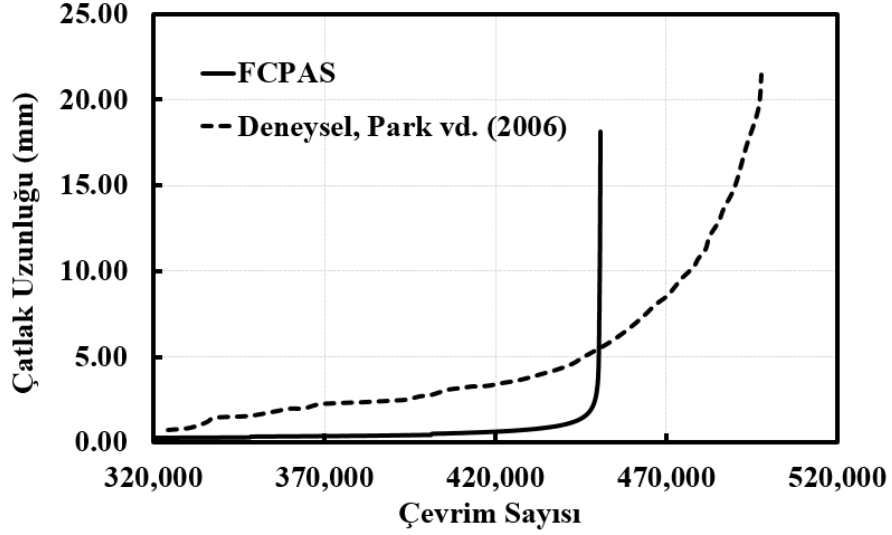
Şekil 3.1.70. Referans çalışmada elde edilen çatlak ilerleme profilleri, Park vd. (2006)

FCPAS analizlerinden elde edilen GŞF değerleri arasından, 1-10 çatlak adımı ve 61-70 çatlak adımı dağılımları, Şekil 3.1.71'de verilmiştir.



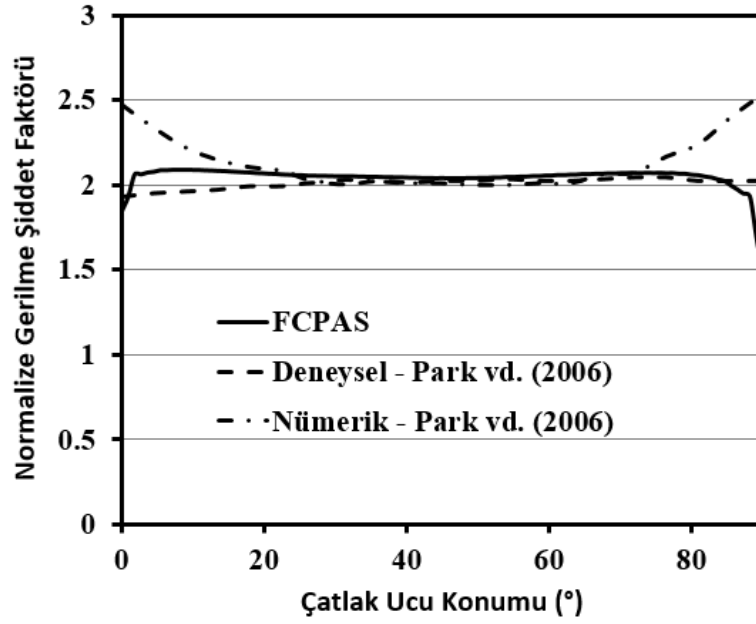
Şekil 3.1.71. FCPAS ile elde edilen 1-10 (üstte) ve 61-70 (altta) çatlak adımları için GŞF değerleri

FCPAS ile elde edilen ömür grafiğinin literatürdeki çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırması Şekil 3.1.72'de verilmiştir.



Şekil 3.1.72. Havşalı delikli plaka için çatlak uzunluğu - çevrim sayısı grafiği karşılaştırması

Şekil 3.1.72'de görüldüğü gibi çatlak ilerlemesinin çevrim sayısına oranlarında farklılık görülmektedir. FCPAS analizleri sonucu elde edilen çevrim sayısı ise 450000, literatür çalışmasındaki çevrim sayısı ise 486000'dür. Nihai çevrim sayılarının, kabul edilebilir ölçüde birbirine yakındır. Sonuçların GŞF açısından doğrulanması için FCPAS ve literatür çalışmasındaki $a=7.62$ mm uzunluğundaki çatlakların GŞF değerlerinin normalize edilmiş değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 3.1.73).



Şekil 3.1.73. Normalize edilmiş Gerilme Şiddet Faktörü (GŞF) karşılaştırması

Şekilden görüldüğü üzere, FCPAS sonucu ve literatür çalışmasındaki GŞF değerleri birbirlerine oldukça yakındır.

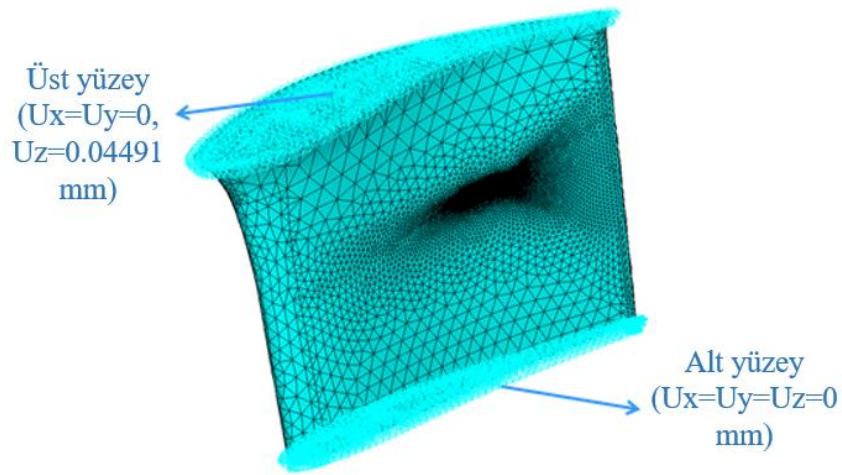
3.1.10 Sabit Türbin Kanatçığında Çatlak İlerlemesi

FCPAS'in tanıtımı ve kurumlarla yapılabilecek çalışmalarını değerlendirmek amacı ile yapılan kurum ziyaretlerinden biri de TUSAŞ-TEI ziyaretidir. Bu ziyaret kapsamında yapılan toplantıda bir sabit türbin kanatçığı modelinin yorulmalı çatlak ilerleme analizlerinin yapılması kararlaştırılmıştır. Uygulama amaçlı olarak bir adet tahliye/soğutma deliği içeren basitleştirilmiş bir model iletilmiş olup kurum prosedürleri gereği gerçek malzeme özellikleri verilmemiş ve literatürden bulunabilecek özelliklerin kullanılması istenilmiştir. Yapılan analizler ile, TUSAŞ-TEI'den sağlanan veriler kullanılarak yapılmış oldukları test koşulları simüle edilmeye çalışılmıştır. Test esnasında kanatçığa önce bası gerilmesi uygulanmış ve tahliye kanallarında kalıcı gerilmeler oluşturulmuş ve devamında yorulmalı çatlak ilerleme testleri yapılmıştır.

ANSYS ortamında hem yük kontrollü hem de deplasman kontrollü kalıcı gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda kalıcı gerilme bölgesinin ihmal edilecek kadar küçük bir bölge olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizlerde en yüksek gerilmelerin tahliye kanalında

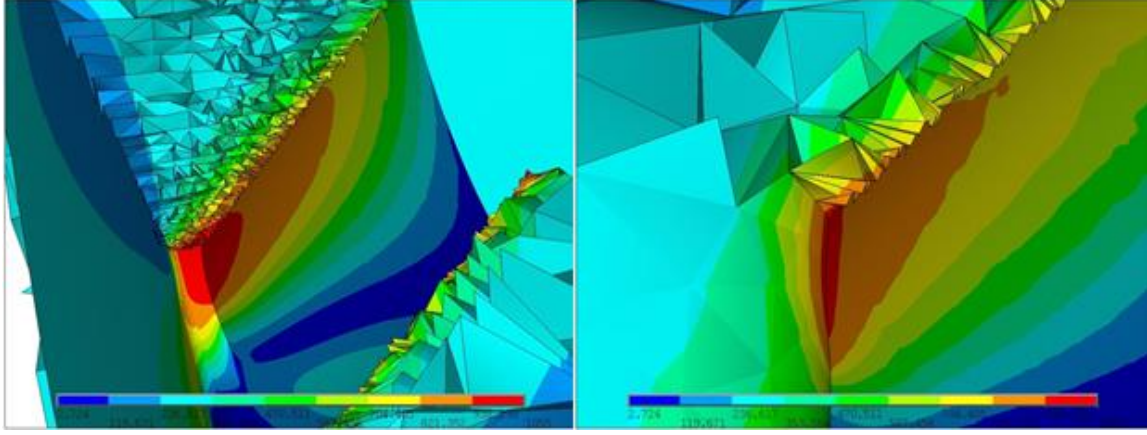
olduğu gözlemlenmiş ve bu sayede çatlak oluşumunun tahliye kanallarında gerçekleşeceği sonucu ortaya konulmuştur.

Kanatçık modelinde öngörülen başlangıç çatlağı tahliye kanalının iç taraftaki köşesinde olup, yarıçapı 0.15 mm'dir. Kanatçığın malzemesi TiAl 6-4'tür ve Paris-Erdoğan kuralı malzeme sabitleri $C=3.18 \times 10^{-11}$ ve $m=3.11$ olarak literatürden elde edilmiştir, Carpinteri ve Paggi (2007). Kırılma tokluğu $75 \text{ MPa}\sqrt{m}$, Elastiklik modülü 113800 MPa , $\nu=0.342$ ve basma yükü altındaki akma değeri ise 970 MPa olarak kullanılmıştır, ASM Aerospace Specification Metals Inc (2014).

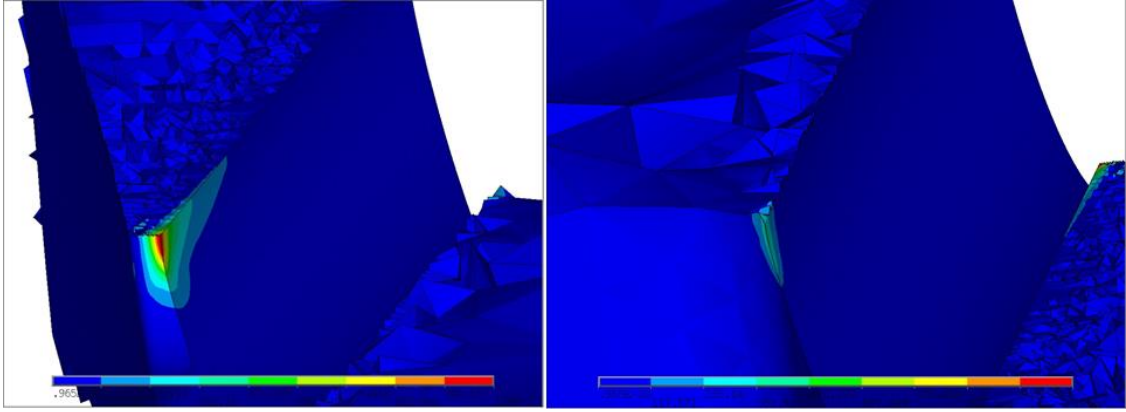


Şekil 3.1.74. Kanatçık modelinin yorulma test sınır şartları

Yapılan testlerde, yorulma testlerinden (Şekil 3.1.74) önce, kalıcı gerilme oluşturabilmek için yine iki farklı yük durumu kullanılmıştır. İlk durumda kanatçık modeline üst yüzeyinden bası yükü oluşturacak şekilde 0.10137mm deplasman, ikincisinde ise 110.6 kN büyüklüğünde basma yönünde kuvvet uygulanmıştır. ANSYS ortamında yapılan kalıcı gerilme analizlerinde de test ortamı şartları uygulanarak, basma yüklü oluşturacak şekilde 0.10137 mm deplasman uygulanmıştır. Sınır şartı kaldırıldığında tahliye kanalının hem iç hem de dış köşesinde kalıcı gerilmeler oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.1.75'te yükleme anında delik kesitinde oluşan gerilme dağılımı, Şekil 3.1.76'da ise yük kaldırıldığında kesitte kalan gerilme dağılımı gösterilmiştir.



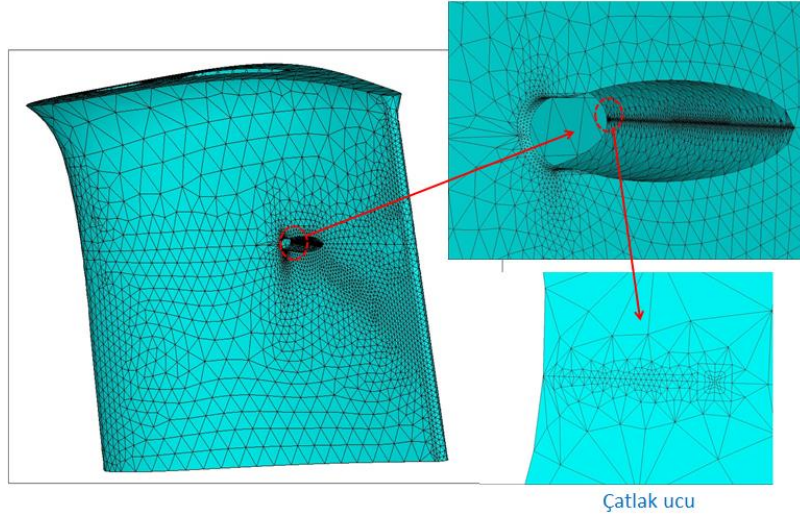
Şekil 3.1.75. Yükleme anında oluşan gerilme dağılımı; tahliye kanalının dış yüzeydeki köşesinin kesit görüntüsü (solda), tahliye kanalının iç yüzeydeki kesit görüntüsü (sağda)



Şekil 3.1.76. Yük kaldırıldıktan sonra kalıcı gerilme dağılımı, tahliye kanalının dış yüzeydeki köşesinin kesit görüntüsü (solda), tahliye kanalının iç yüzeydeki kesit görüntüsü (sağda)

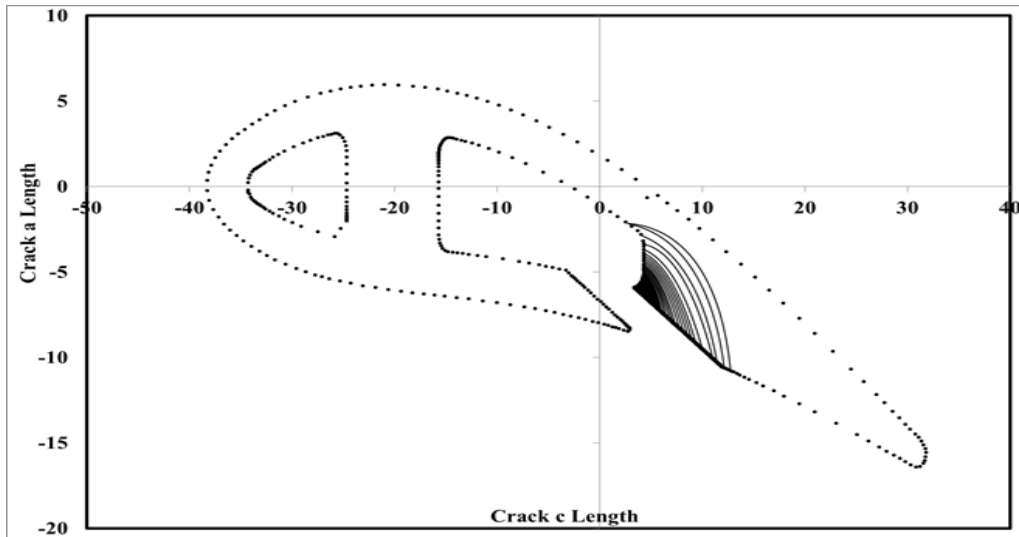
Kalıcı gerilmenin olduğu bölge oldukça küçük olduğundan dolayı çatlak ilerleme simülasyonlarına etkisi az ve sadece başlangıçta olacağından dolayı, çatlak ilerleme analizlerine kalıcı gerilmeler dâhil edilmemiştir.

Çatlaklı kanatçık modeli için sonlu elemanlar modeli görünüşü Şekil 3.1.77’de verilmiştir.

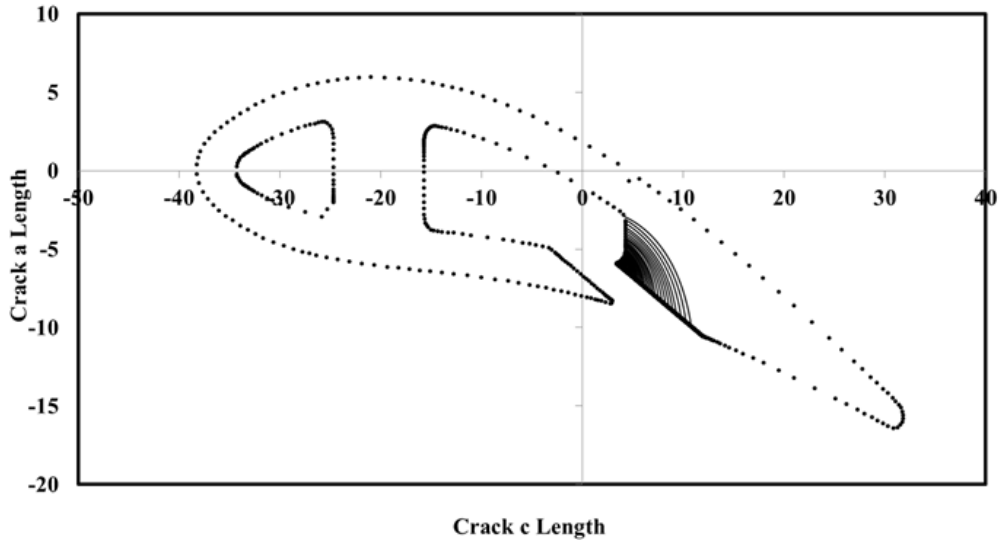


Şekil 3.1.77. Çatlak içeren kanatçık modelinin bölüntüsü

Kanatçık modelinin çatlak ilerleme simülasyonları iki farklı sınır şartı ve yük durumu için yapılmıştır. İlk durumda, deplasman kontrollü olarak; 0.04491 mm (çeki) ile 0 mm arasında olacak şekilde sınır şartı uygulanmıştır (Şekil 3.1.74). İkinci durumda ise yük kontrollü olarak 49.0 kN (çeki kuvveti) ile 0 kN arasında yük uygulanmıştır. Deplasman kontrollü analizler sonucunda elde edilen çatlak ilerleme profilleri Şekil 3.1.78'de, yük kontrollü analizler sonucunda elde edilen çatlak ilerleme profilleri ise Şekil 3.1.79'da gösterilmiştir.

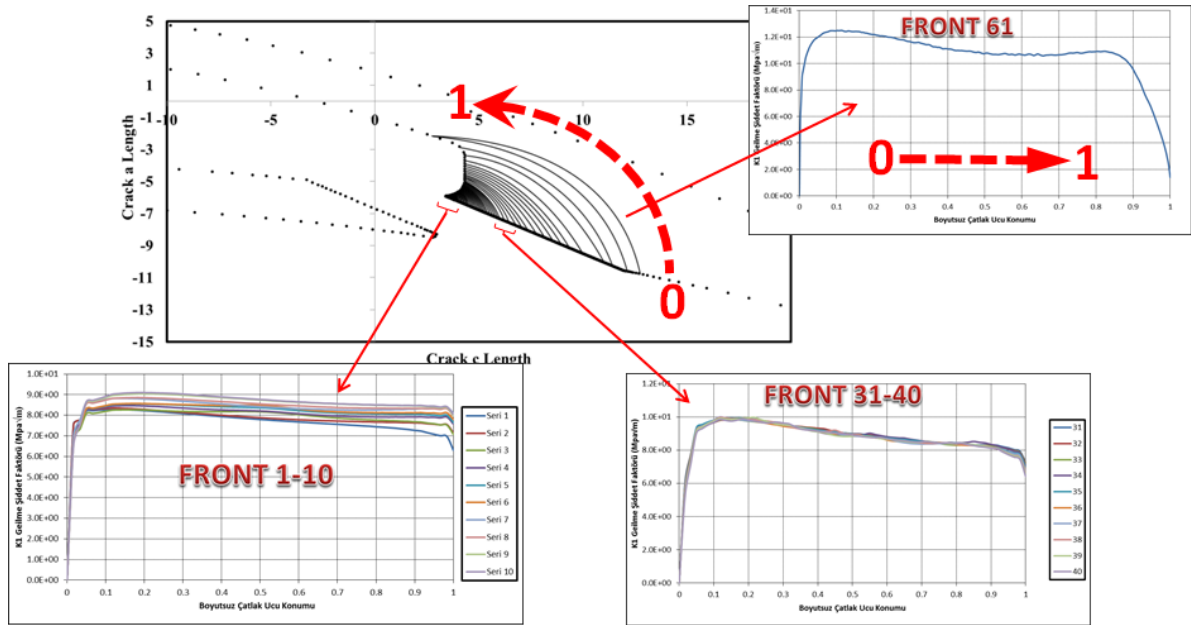


Şekil 3.1.78. Deplasman kontrollü model için çatlak ilerleme profilleri

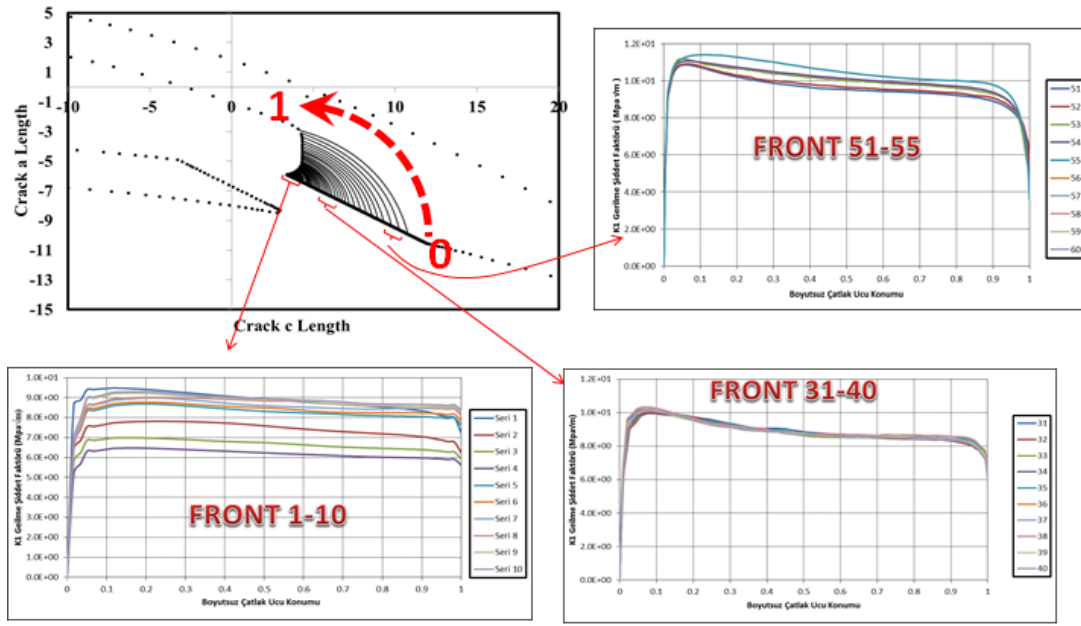


Şekil 3.1.79. Yük kontrollü model için çatlak ilerleme profilleri

Deplasman kontrollü analizler sonucunda elde edilen KI gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.1.80'de, yük kontrollü analizler sonucu elde edilen gerilme şiddet faktörleri ise Şekil 3.1.81'de verilmiştir.



Şekil 3.1.80. Deplasman kontrollü model için çatlak ucu boyunca KI GŞF dağılımları



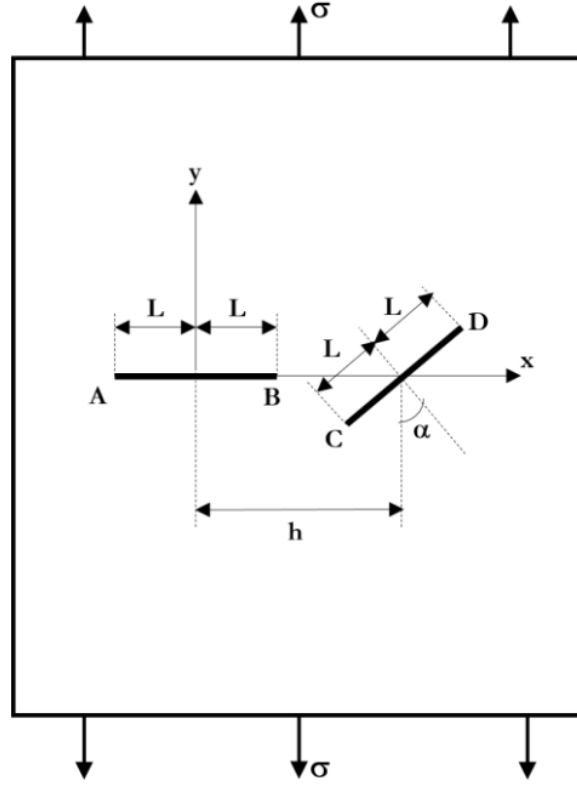
Şekil 3.1.81. Yük kontrollü model için çatlak ucu boyunca KI GŞF dağılımları

Yapılan analizler sonucunda çatlak profilleri ve KI GŞF değerleri elde edilmiştir. Hem yük kontrollü hem de deplasman kontrollü analizler sonucunda KI GŞF değerlerinin kanatçığin ön yüzeyinde (tahliye kanalı çıkış noktası) daha yüksek olduğu ve bu nedenle de çatlak ilerlemesinin daha hızlı gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Bu analizlerde gerçek malzeme özellikleri kullanılmamıştır (malzeme özelliklerinin tamamı literatürden alınmıştır). Ancak, gerçek ve nispeten karmaşık geometrinin kullanıldığı bu uygulama ile, Havacılık ve Uzay alanında oldukça önemli olan türbin parçalarının analizinin FCPAS kullanılarak yapılabildiği gösterilmiştir.

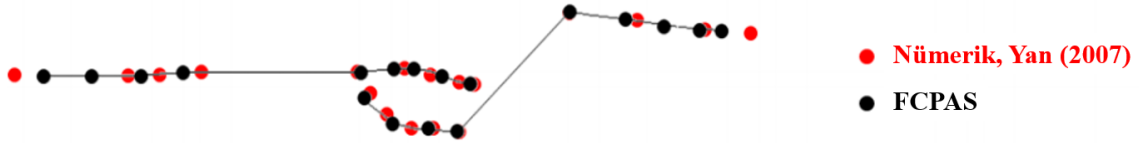
3.1.11 İki Çatlaklı Plakada Düzlemsel Olmayan Çatlak İlerleme Analizi

Yan (2007) tarafından nümerik olarak analizi yapılan düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesi çalışmasındaki bilgiler kullanılarak aynı model için FCPAS ile çatlak ilerleme analizi yapılmıştır. Şekil 3.1.82'de görünüşü verilen 2 boyutlu modelde, biri yatay düzleme paralel, diğeri ise 45°'lik açı yapan iki adet çatlak bulunmaktadır.



Şekil 3.1.82. Düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesi yapılan modelin genel görünüşü

$L=4$ mm, $\alpha=45^\circ$, $h=8$ mm'dir ve plaka sınırlarının çatlaklara etkisini ihmal edebilmek için plaka yüksekliği ve genişliği 160 mm, kalınlığı ise 5 mm olarak alınmıştır. 150.42 MPa çeki yükü ile yükleme yapılan plaka için yükleme oranı 0.048'dir. Paris-Erdoğan kuralı malzeme sabitleri $C=1.039E-10$ ve $n=2.7438$ 'dir. Elastiklik modülü ve poisson oranı sırası ile 70000 MPa ve 0.321 olarak kullanılmıştır. FCPAS ile yapılan analiz sonucunda elde edilen çatlak profili ile Yan (2007)'in çalışmasındaki çatlak profillerinin karşılaştırılması Şekil 3.1.83'te verilmiştir.

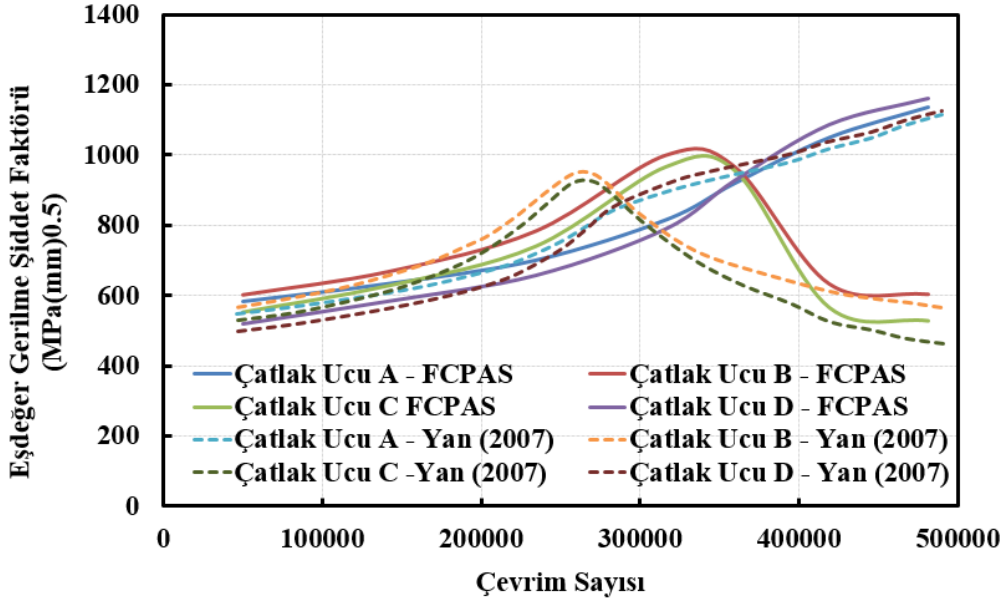


Şekil 3.1.83. FCPAS ile literatürdeki çalışmanın çatlak ilerleme profillerinin karşılaştırılması

Yüklemenin tek ekseninde çeki olarak yapılmasına rağmen birbiri arasında dikey ekseninde mesafe bulunan çatlaklardan dolayı kayma gerilmeleri ve bunun neticesinde de KII gerilme şiddet faktörleri oluşmuştur. Bu nedenle çatlaklar buldukları düzlemden yön değiştirerek ilerlemişlerdir. Çatlakların birbirlerine yakın olan uçlarında bu etki görülebilmektedir. En sağdaki çatlak ucundaki KII gerilme şiddet faktörlerinin sıfıra çok yakın olmasından dolayı

çatlak, yüklem eksenine dik hale gelmeye başlamıştır. Eşdeğer GŞF değerleri referans çalışmadan alınan aşağıdaki formülasyona göre hesaplanmış olup, karşılaştırması Şekil 3.1.84'de verilmiştir.

$$\Delta K_e = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} [\Delta K_I (1 + \cos \theta_0) - 3 \Delta K_{II} \sin \theta_0]$$

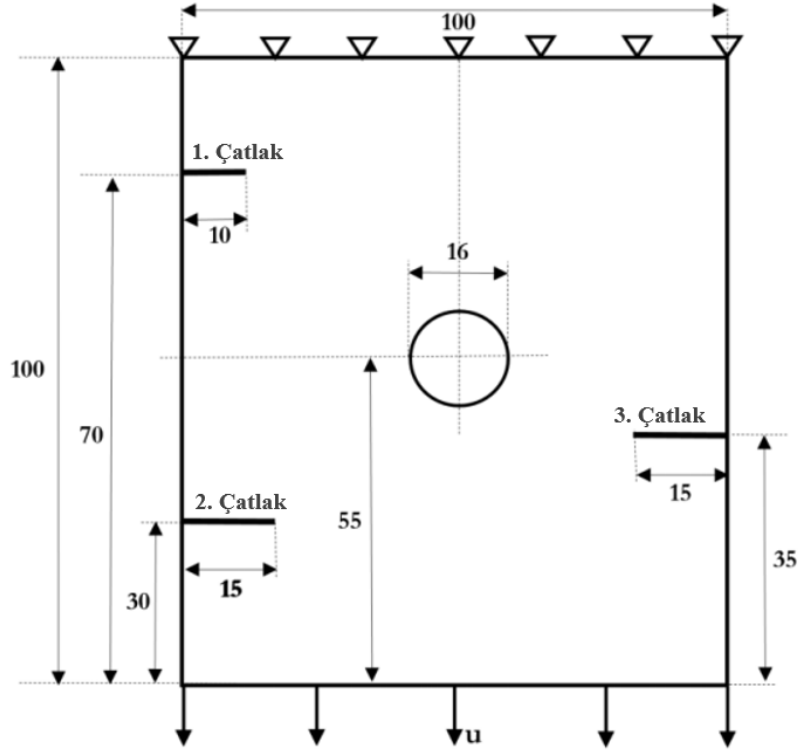


Şekil 3.1.84. FCPAS ile elde edilen eşdeğer GŞF değerlerinin karşılaştırılması

Çatlak profilleri ve GŞF değerlerine bakıldığında FCPAS sonuçlarının literatürdeki çalışmadan elde edilenlere oldukça benzer olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

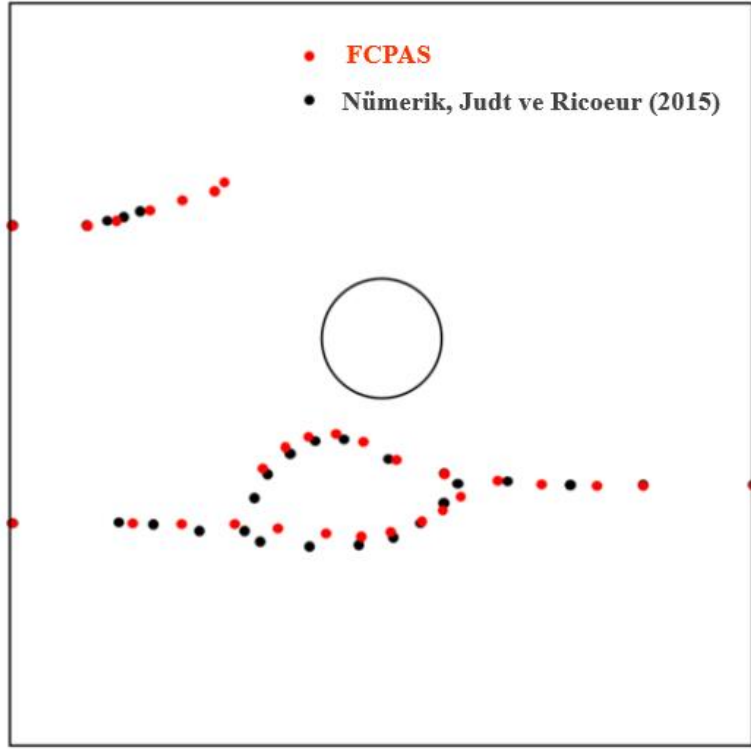
3.1.12 Üç Kenar Çatlağı İçeren Delikli Plakada Düzlemsel Olmayan Çatlak İlerlemesi

Judt ve Ricoeur (2015) tarafından yapılan çalışmada delikli bir plakada üç çatlağın düzlemsel olmayan ilerlemesi analiz edilmiştir. Bu çalışmadaki veriler kullanılarak FCPAS ile çatlak ilerleme analizi yapılmıştır. Şekil 3.1.85'te geometrisi, yüklem durumu ve sınır şartları gösterilmiştir.



Şekil 3.1.85. 3 çatlaklı plakanın geometrisi, yükleme durumu ve sınır şartları (uzunluklar mm birimindedir)

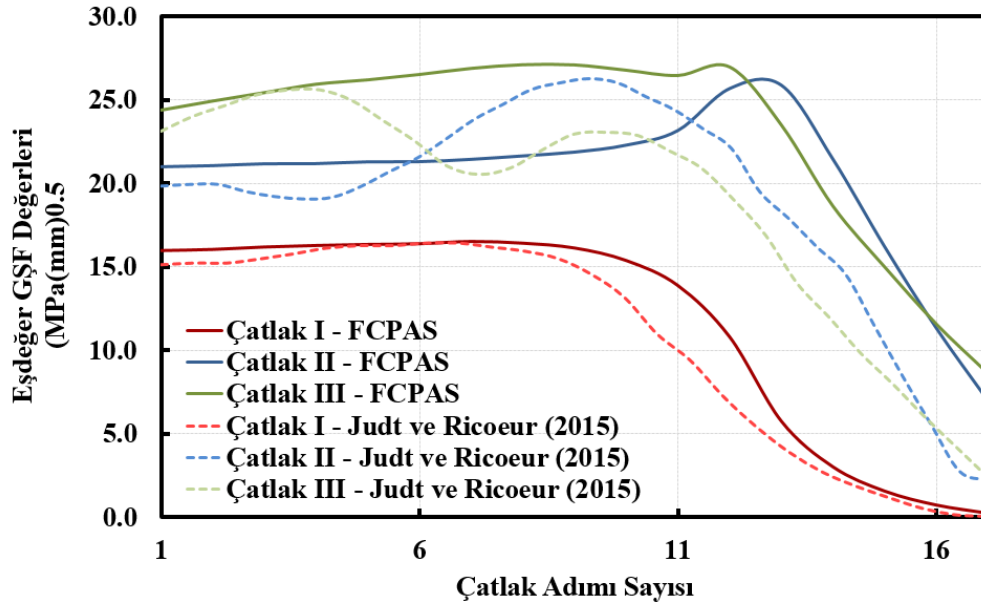
0.005 mm deplasman ile çeki yüklemesi oluşturacak şekilde yüklemesi yapılan plakanın malzemesi Al-7075'tir ve elastisite modülü ile poisson oranı sırasıyla 72000 MPa ve 0.33'tür. Malzeme n sabiti 1.34 ve kırılma tokluğu $23.9 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 'dir. 2 boyutlu plakanın FCPAS analizlerinde düzlem gerilme (plane stress) durumunu simüle edebilmek için kalınlığı diğer ölçülerine göre çok küçük olacak şekilde 3 mm olarak alınmıştır. FCPAS ile elde edilen çatlak profilleri ile Judt ve Ricoeur (2015)'un çalışmasındaki profiller Şekil 3.1.86'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.1.86. FCPAS ile literatürdeki çalışmanın çatlak ilerleme profillerinin karşılaştırması

Çatlakların yatay mesafede birbirlerinden uzaklıkları ve deliğin bulunması kayma gerilmelerine ve KII GŞF değerlerinin oluşmasına sebep olmuştur. Bunun sonucunda çatlaklar düzlemsel olmayan bir şekilde ilerlemişlerdir. Eşdeğer GŞF değerleri, referans çalışmadan alınan aşağıdaki formüle göre hesaplanmış olup, ilgili karşılaştırma Şekil 3.1.87'de verilmiştir.

$$K_e = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 4(\alpha_1 K_{II})^2}$$



Şekil 3.1.87. FCPAS ile literatürdeki çalışmanın eşdeğer GŞF değerlerinin karşılaştırması

FCPAS analizi, literatürdeki çalışmadan çok daha az (17 adet) çatlak adımı ile yapılmıştır ve çatlak profilleri ile GŞF değerleri literatür çalışması ile oldukça yakınlık içerisinde.

3.1.13 Küresel Kaplarda Eğik Çatlakların Üç Boyutlu Analizi

İmalat yöntemleri ve malzeme kusurları dolayısıyla küresel kaplarda da çatlak oluşumu gözlemlenebilir. Yapılan literatür çalışması sonucunda basınçlı küresel kaplarda olması muhtemel çatlak tipleri ve çatlak ucunda oluşan gerilme şiddet faktörüne etki eden, kap ve çatlak geometrileri ile ilgili parametreler belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda küresel yapının iç ve dış çap oranı, çatlak derinliği/et kalınlığı oranı, çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı, çatlak yatay eksen ile yaptığı ve çatlak iç ya da dış yüzeyde olması gibi parametrelerin değişimlerinin GŞF'ne etkisi incelenmiştir.

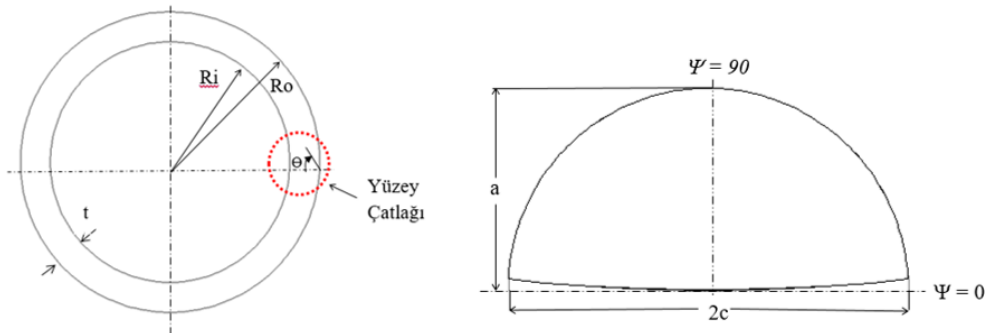
Küresel kap için dış çap/iç çap oranları 1.10, 1.25, 1.50, 2.0; çatlak için çatlak derinliği/et kalınlığı oranları 0.25, 0.50, 0.75 ve çatlak ucu profili olan elipsin çaplarının oranları (a/c) 0.25, 0.50 ve 1.50 olarak seçilmiştir. Bu değerler, Tablo 3.1.2'de verilmiştir. Çatlak yatay eksenle arasındaki açının sıfır durumunda kayma ve yırtılma modlarında GŞF değerleri sıfır olmaktadır. Diğer bir ifade ile çatlak yatay eksen üzerinde ise iç basınçlı küresel kap için problem mod-I kırılma problemi haline dönüşmektedir. Ancak çatlak açısı değeri sıfırdan farklı olursa mod-II ve mod-III gerilmeleri de ortaya çıkmaktadır. Bu doğrultuda karışık modlu

çatlak analizleri için çatlağın yatay eksenle yaptığı açılar 0, 15, 30, 45, 60 ve 75 derece olarak belirlenmiştir.

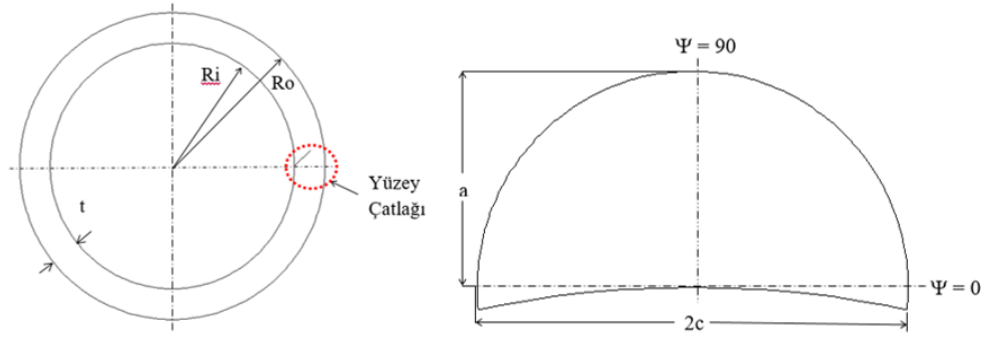
Tablo.3.1.2. Çatlak parametrelerinin değerleri (dış çap 10 mm sabit)

Ro/Ri	1.1	1.25	1.5	2
t	0.9091	2	3.3333	5
a/t=0.25				
a	0.2272	0.5	0.8333	1.25
c (a/c=0.25)	0.9091	2	3.3333	5
c (a/c=0.50)	0.4545	1	1.6667	2.5
c (a/c=1.00)	0.2272	0.5	0.8333	1.25
c (a/c=1.50)	0.1514	0.3333	0.5555	0.8333
a/t=0.50				
a	0.4545	1	1.6667	2.5
c (a/c=0.25)	1.8182	4	6.6667	10
c (a/c=0.50)	0.9091	2	3.3333	5
c (a/c=1.00)	0.4545	1	1.6667	2.5
c (a/c=1.50)	0.303	0.6667	1.111	1.6667
a/t=0.25				
a	0.6818	1.5	2.5	3.75
c (a/c=0.25)	2.7273	6	10	15
c (a/c=0.50)	1.3636	3	5	7.5
c (a/c=1.00)	0.6818	1.5	2.5	3.75
c (a/c=1.50)	0.4545	1	1.6667	2.5

Analizlerde basınçlı küresel kabın iç basıncı, analiz amacıyla, 1 MPa olarak alınmıştır. Basınçlı küresel kaplarda iç veya dış yüzeyde çatlak olması durumları için çatlak ve küresel kap geometrileri Şekil 3.1.88 ve Şekil 3.1.89'da verilmiştir.



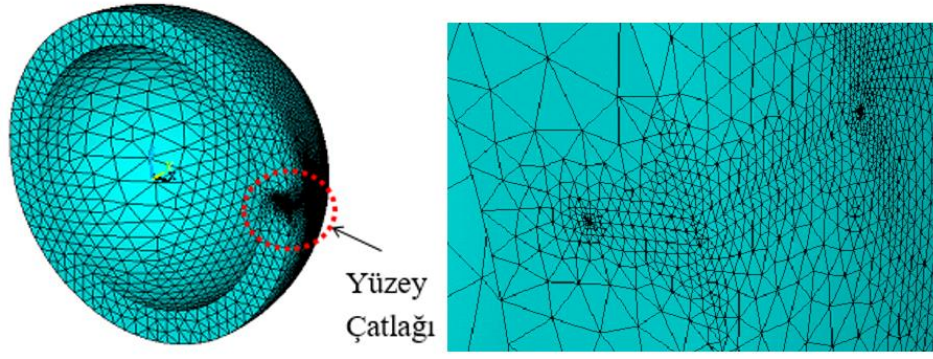
Şekil 3.1.88. Basınçlı küresel kaplarda dış yüzeyde çatlak bulunması durumu için model kesiti (solda) ve çatlak geometrisi(sağda)



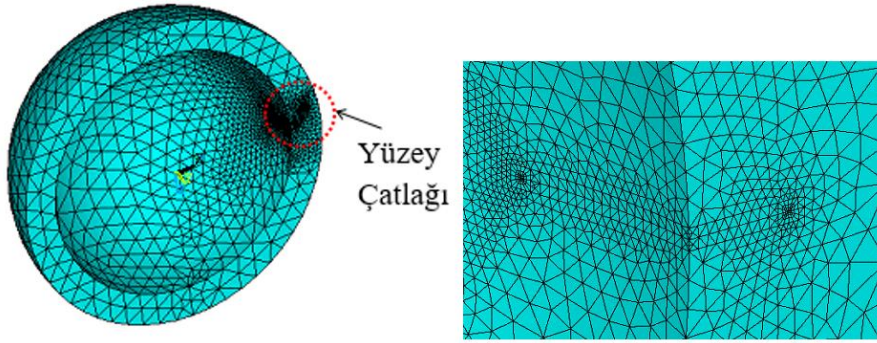
Şekil 3.1.89. Basıncılı küresel kaplarda iç yüzeyde çatlak bulunması durumu için model kesiti (solda) ve çatlak geometrisi(sağda)

Çatlağın düz bir levha üzerinde oluşması durumunda, Ψ açısı 180 derecedir. Ancak küresel geometrideki kaplarda Şekil 3.1.88 ve Şekil 3.1.89'da görüldüğü gibi çatlağın dış yüzeyde oluşması durumunda Ψ açısı 180 dereceden düşük, iç yüzeyde olması durumunda ise Ψ açısı 180 dereceden yüksek olacaktır. Dış yüzeyde çatlak olması durumu için çatlak uzunluğu arttıkça Ψ azalmakta ve iç yüzeyde olması durumunda ise çatlak uzunluğu arttığında Ψ açısı artmaktadır. Çatlağın yatay eksenle yaptığı açının artması durumunda dış yüzey için Ψ açısı azalmakta, iç yüzey için ise artmaktadır. Tez çalışması kapsamında, yaklaşık olarak 600 adet sonlu elemanlar modeli oluşturularak tüm modeller için çatlak ucunda GŞF değerleri hesaplanmış olmakla beraber, bu raporda, yapılan çalışmalardan dış yüzeyde çatlak olması durumu için farklı çatlak eğim açılarında gerilme şiddet faktörleri çözümleri verilmiştir..

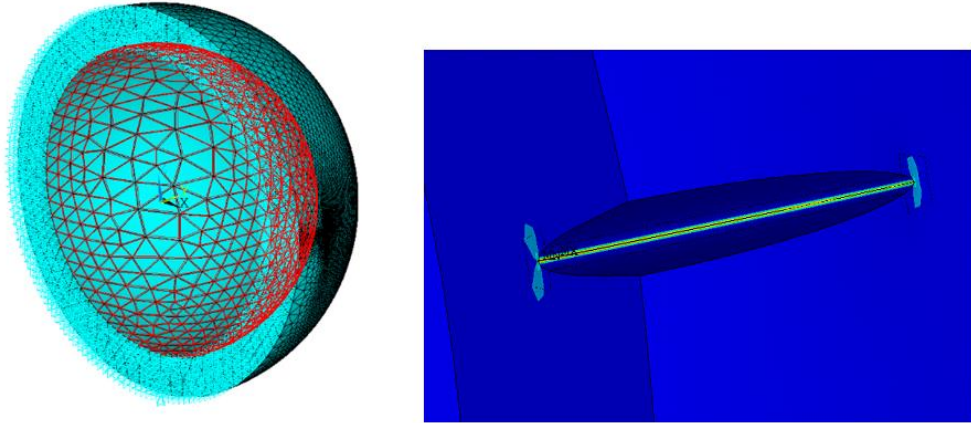
Basıncılı küresel kaptaki iç veya dış yüzeyde çatlak olması durumu ile ilgili Tablo 3.1.2'de gösterilen parametreler için oluşturulan sonlu elemanlar modelleri ANSYS kullanılarak hazırlanmıştır. Bu modellerden dış yüzeyde çatlak bulunması durumuna ait bir sonlu elemanlar modeli ve bölüntü görüntüsü Şekil 3.1.90'da, iç yüzeyde çatlak bulunması durumuna ait bir sonlu elemanlar modeli ve bölüntü görüntüsü ise Şekil 3.1.91'de verilmiştir. Modeller için çatlak ucundaki tüm GŞF değerleri FCPAS yardımı ile hesaplanmıştır. Dış yüzeyde çatlak olması durumu için sonlu elemanlar modeli, sınır şartları ve çatlağın yük altında davranışı Şekil 3.1.92'de verilmiştir.



Şekil 3.1.90. Basıncılı küresel kaptaki dış yüzeyde çatlak olması durumu için sonlu elemanlar modeli ve çatlak bölgesinin yakından görünümü



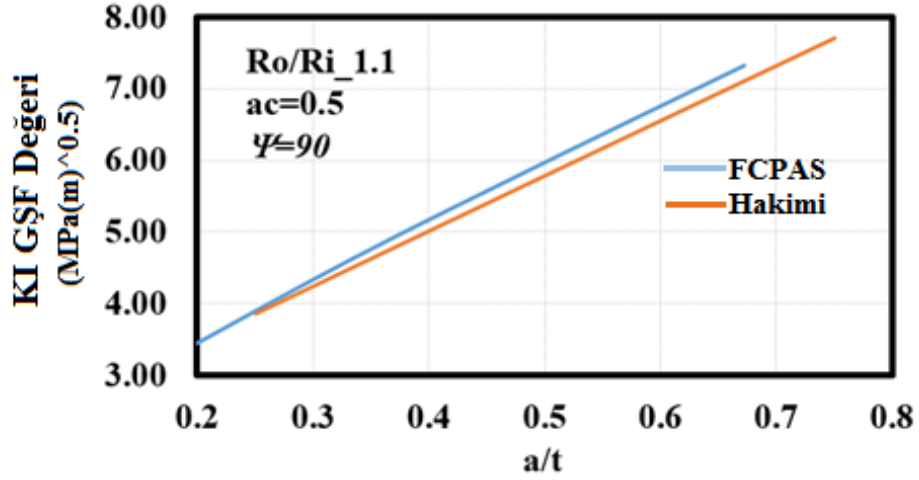
Şekil 3.1.91. Basıncılı küresel kaptaki iç yüzeyde çatlak olması durumu için sonlu elemanlar modeli ve çatlak bölgesinin yakından görünümü



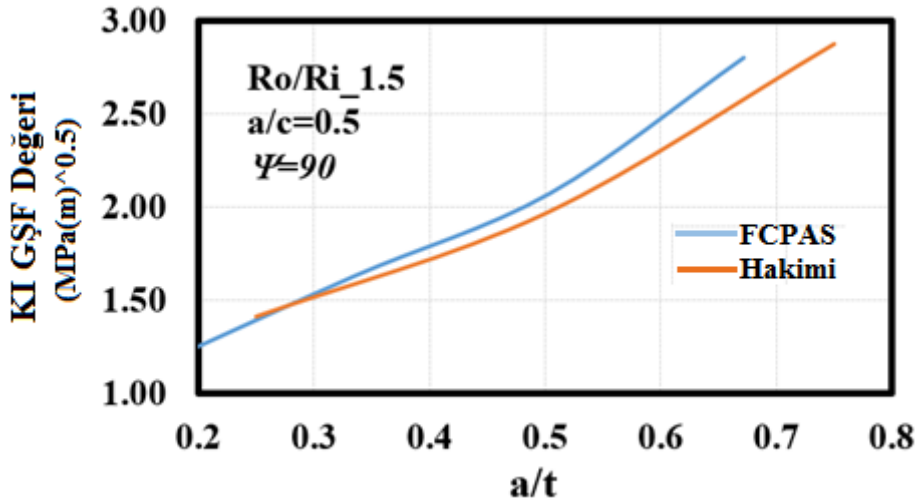
Şekil 3.1.92. Basıncılı küresel kaptaki dış yüzeyde çatlak olması durumu için sonlu elemanlar modeli, sınır şartları ve çatlakın yük altında deformasyonu

Elde edilen bu değerlerden bazıları Hakimi vd. (2008) elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. İç yüzeyde çatlakla sahip basınçlı küresel kaptaki $R_o/R_i=1.1$ için Hakimi'nin GŞF değerleri ve FCPAS ile elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.1.93'te, $R_o/R_i=1.5$ için ise

Şekil 3.1.94'te gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere, FRAC3D çözümü, Hakimi vd'nin çözümü ile uyum içerisinde.



Şekil 3.1.93. Basıncılı küresel kaptaki iç yüzeyde çatlak olması durumu, $R_o/R_i = 1.1$



Şekil 3.1.94. Basıncılı küresel kaptaki iç yüzeyde çatlak olması durumu, $R_o/R_i = 1.5$

FCPAS kullanılarak karışık modda GŞF değerleri hesaplandıktan sonra, Newman ve Raju'nun (1986) çalışmasında olduğu gibi, K_0 değeri ile normalize edilmiştir. K_0 , normalizasyon için kullanılan bir değerdir ve formülasyonunda bulunan $\sigma_{\theta\theta}$ ortalama çevresel gerilmedir. Q ise eliptik çatlak için şekil faktörüdür. K_0 , $\sigma_{\theta\theta}$ ve Q formülasyonları Denklem 3.1.3-3.1.6'da verilmiştir.

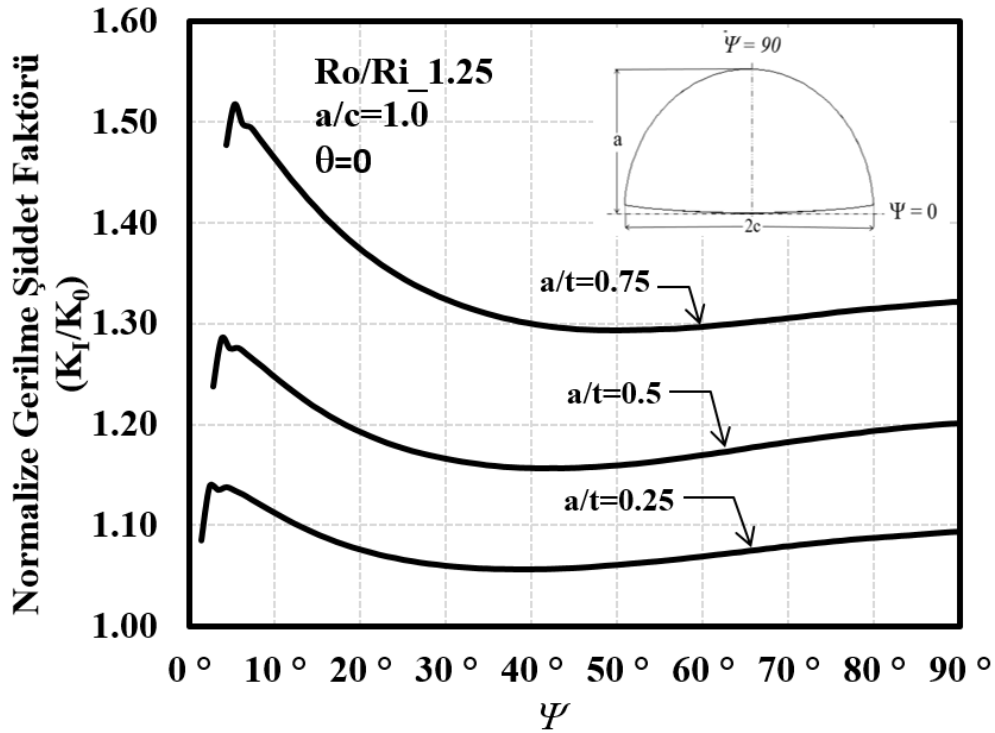
$$K_0 = \sigma_{\theta\theta} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (3.1.3)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = p \frac{R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (3.1.4)$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}; \quad \frac{a}{c} > 1 \quad (3.1.5)$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.65}; \quad \frac{a}{c} < 1 \quad (3.1.6)$$

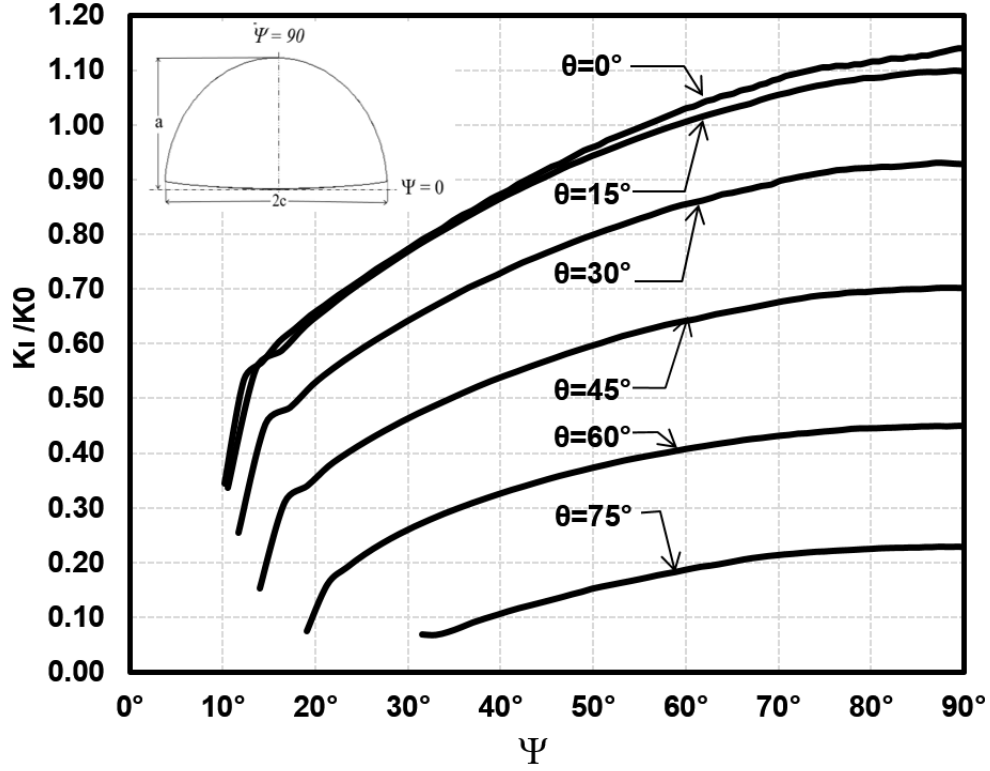
Çatlak derinliği/et kalınlığı (a/t) ifadesinde, t sabit tutularak bu oran 0.25 den 0.75'e kadar değiştirilmiştir. Bu değişim çatlak derinliğinin arttırmakta ve bu da mod-I gerilme şiddet faktörünün de artmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.1.95'te çatlak derinliği ve çatlak uzunluğu değerlerinin eşit olduğu ($a/c=1$) durum için a/t oranının değişiminin gerilme şiddet faktörüne etkisi görülmektedir.



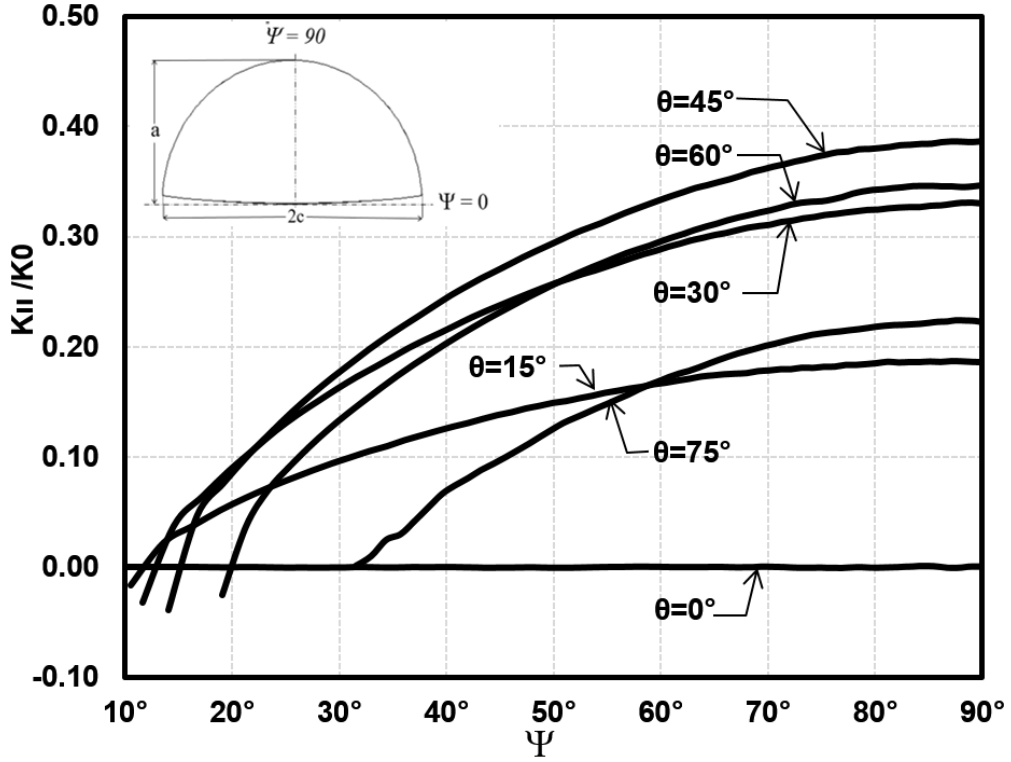
Şekil 3.1.95. Dış yüzeyde çatlak olduğu durumda $R_o/R_i=1.25$, $a/c=1.0$ ve $\theta=0^\circ$ için a/t oranı değişiminin normalize edilmiş gerilme şiddet faktörüne etkisi

Çatlağın yatay eksenle yaptığı açının 0 derece olması mod-I durumudur ve çatlak sadece açılma modunda yüklenir. 0 dereceden farklı olması durumunda ise karışık modlu durumu olacaktır ve açılma modu (mod-I), kayma modu (mod-II) ve yırtılma modu (mod-III) gerilme şiddet faktörleri oluşacaktır. Şekil 3.1.96-3.1.98'de, $R_o/R_i=1.1$, $a/t=0.25$, $a/c=0.25$ durumu için farklı çatlak eğilm açılarında, çatlak ucu boyunca mod-I, II ve III gerilme şiddet faktörleri

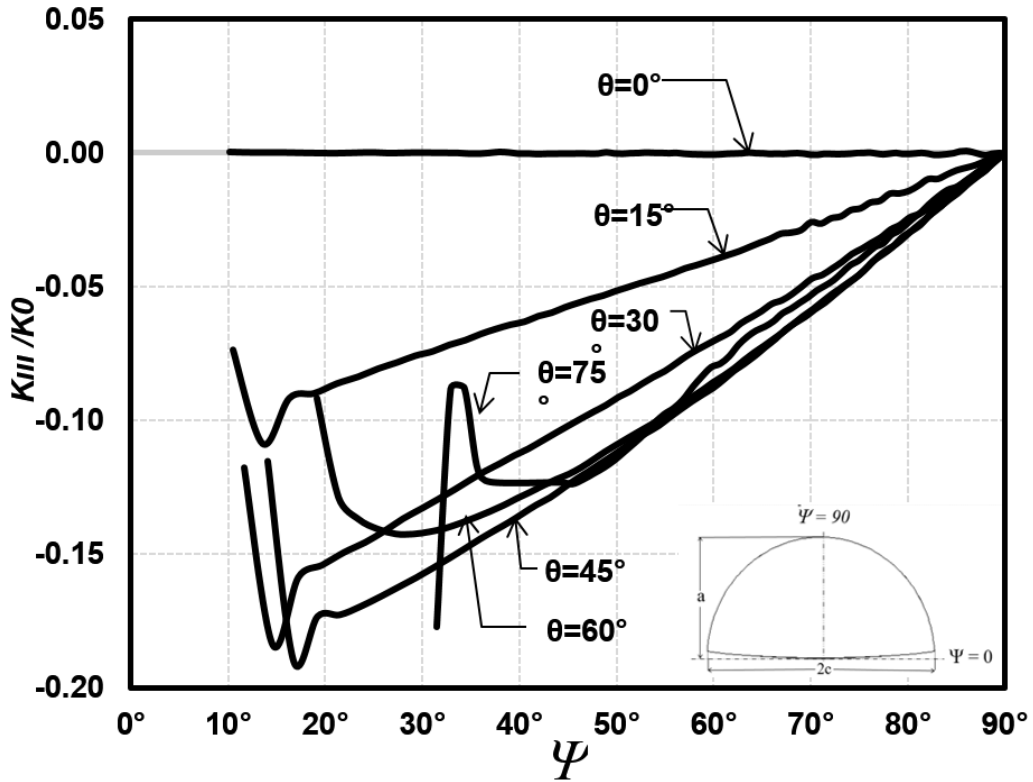
dağılımları verilmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere, çatlak eğim açısı arttıkça mod-I gerilme şiddet faktörü azalmakta, mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörleri ise 45o çatlak eğim açısına kadar artmakta, daha fazla eğim açıları için azalmaktadır. Bu durum, maksimum kayma gerilmesinin 45o açılı düzlemlerde olması olgusu ile tutarlı bir durumdur. Bu çalışma ile, eğik yüzeylere sahip küresel kaplarda bulunan düz ve karışık mod gerilmeye maruz eğimli çatlakların kırılma analizlerinin yapılabildiği ispat edilmiştir.



Şekil 3.1.96. Normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörleri - dış yüzey çatlaklı, $R_o/R_i=1.1$, $a/t=0.25$, $a/c=0.25$.



Şekil 3.1.97. Normalize edilmiş mod-II gerilme şiddet faktörleri - dış yüzey çatlaklı, $R_o/R_i=1.1$, $a/t=0.25$, $a/c=0.25$.



Şekil.3.1.98. Normalize edilmiş mod-III gerilme şiddet faktörleri - dış yüzey çatlaklı, $R_o/R_i=1.1$, $a/t=0.25$, $a/c=0.25$.

3.1 Bölümünde verilen çalışmalar, lisansüstü tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmiştir (Dündar, 2015; Derya, 2016; Kurt, 2016).

3.2 Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Deney Kabiliyeti Geliştirilmesi

Proje önerisinde de belirtildiği gibi bu iş paketinin amacı, genel üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin doğru bir şekilde modellenenebilmesi 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-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.

3.2.1 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.

Proje kapsamında planlanan ve sonrasında gerçekleştirilen tüm testlerin özeti Tablo 3.2.1'de verilmiştir.

Tablo 3.2.1. Proje 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		Al 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
		Al 7075	TS	25	3	4	7
Mod I/II		Al 7075	LT	10	15	17	32
		Al 7075	TS	10	14	15	29
		Al 7075	LT		15	8	23
Mod I/III	CTT / CTST	Al 7075	LT	12.5	10	10	20
				25	10	6	16
Mod II/III		Al 7075	LT	12.5	6	3	9
				25	5	3	8
Mod I/II/III		Al 7075	LT	25	18	21	39
GERÇEKLEŞTİRİLEN TOPLAM TEST SAYISI							201

Yukarıdaki testlerde, malzemenin üretiminden kaynaklı olan değişkenlikler dolayısıyla 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 30mm, 70mm ve 90mm 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. 30mm, 70mm ve 90mm kalınlıktaki malzemeler için elde edilen içerik test sonuçları Şekil 3.2.1, 3.2.2 ve 3.2.3'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			580577	1/2	
1198100	Line No. 6.1	ALC214090 Line NO.6			Cert Creation Date	01-MAY-14	Cert Print Date	
Quantity Shipped		Date Shipped		Item Description				
Inspection Category		Item No.		BARE, 7075-T651, ROLLED PLATE BARE				
MILL CERTS		A221049132R04		HTGE STANDARD BY-LAT TOLS, KITTS_GREEN				
Delivery Number		Customer Account Number		SAWED, MILL FINISH, NONE				
5179727		102878		30.0 MMT TK [+1.200-1.200] 1.1811 INH TK				
Customer Part No				1520.0 MMT WD [+7.000-0] 59.8425 INH WD				
				3020.0 MMT LN [+9.000-0] 118.898 INH LN				
				B 11 23 V5				
				MAX GROSS WEIGHT 1000.0 KGM 2205.0 LB				
				---SPEC 1: ANSI H35.2(M) TOL (GE);2009				
				SPEC 2: ASTM B209M 7075 T651:10				
Header Note:								
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 - BSD) and ISO 14001:2004 (EMS70033 - BSD). 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 acknowledgement for product liability statement								
Legal Statement				Signed for and on behalf of Alcoa Manufacturing (GB) Limited trading as Alcoa Europe Flat Rolled Products:				
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 met 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				
Inspection Stamp								
Quantities per Lot / Packages								
Package Number	Lot/Slab	Mult Number	Number Of Plates	Weight in KGM				
				Gross	Net			
B55473036	1439701/8F3381B	--	1	437	397			
TOTAL	for Packages	--	1	437	397			
Composition Results								
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

Certified Inspection Report						Cert Number	Page		
Sales Order Number			Customer P/O			580577	2/2		
1198100	Line No. 6.1	ALC214090 Line NO.6			Cert Creation Date	01-MAY-14	Cert Print Date		
Composition Results									
Cast Number	Others Total PCT								
8F3381B	0.00								
Stretching - Test Results									
Test Type				Stretch %					
UOM				PCT					
Temper				Min				Max	
Lot				2.2				2.2	
T651				1439701					
Tensile Properties Test									
Test Results									
Test Type				UTS	Elongation %	0.2% Proof Stress			
UOM				MPA	PCT	MPA			
Temper				Results	Results	Results			
Lot				598.6	12.4*	525.8			
T651				1439701					
Test Dir. Pos'n				Gauge Length					
T651LT.A.C.3W				5					
Cert Notes									
ALUMINIUM ALLOY PLATE									
Package Number : HTGE									
* Fracture outside centre half of gauge length.									
Material : ASTM B209M 7075 T651, Revision 10									
Inspection : ANSI H35.2(M) TOL (GE), Revision 2009									
Heat Treatment : AMS 2772, Revisio									
n.F. Heat Treatment of Aluminium Alloy Raw Materials									
Test Method : ASTM B 557, Revision 10, Standard Test Methods of Tension Testing W									
rought and Cast Aluminium and Magnesium Alloy Products									
SER.LOT NUMBER, 184141066F - ORACLE LOT NUMBER 1439701									

Şekil 3.2.1. 30x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri.

INSPECTION CERTIFICATE													
Contact/Order: ALE 214004										Date: 30.01.2014			
Material : ALUMINIUM PLATES													
Alloy : EN-AW-7075													
Dimensions : 70096390 70 x 1520 x 3020 Temper: T651													
According to : EN 485-515-573													
MECHANICAL PROPERTIES													
Specified			Rm		Rp0.2		Elongation%		Hardness		Lot/Batch		
			Mpa		Mpa		50 mm		HB				
			min	max	min	max	min	max	min	max			
			495		420		4		147				
Measured			Rm		Rp0.2		Elongation%		Hardness				
			542		476		10		155				
CHEMICAL COMPOSITION [%]													
Batch	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al	
S23111230	0,18	0,29	1,42	0,068	2,45	0,19	0,007	5,68	0,046	0,011	0,017	REST	
												REST	
			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 3.2.2. 70x1520x3020 mm boyutlarındaki plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri.

Produkt / product				Bedingungen / terms							
Form / form: Plate, stretched				Technische Lieferbedingungen / techn. spec.:							
Werkstoff / material: EN AW 7075				EN 485-2 : 2008							
Zustand / temper: T651				EN 485-3 : 2003							
Dim. / dim.: [mm]: 90,00x1520,0x3020,0				EN 573-3 : 2003							
				Sondervorschrift / special terms:							
AB-Pos. ord.-item.	BNr/Los/Teilno. Lot/No./Part	Guss Nr. cast no.	Werkstoff material	Kollo packno.	Gewicht netto weight net	Sök. pcs.					
05	14242/0100	010058150/3	EN AW 7075	6724920007	1179 kg	1					
05	14242/0100	010058150/3	EN AW 7075	6724920008	1180 kg	1					
Chemische Zusammensetzung [%] Gewichtsanteile / Chemical composition [%] weight proportion (OES)											
Guss Nr. / cast no.	material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+Zn	Others
010058150/3	EN AW 7075										
	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	0,18	5,7	0,05	0,08	0,03
		Others Total									
	spec. min.	-									
	spec. max.	0,15									
	actual	0,04									
Zugprüfung LT / tensile test LT											
BNr/Los Lot/No.	Zustand temper	Richtung direction	Tests	Rm [MPa]	Rp0.2 [MPa]	A5 [%]					
				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 3.2.3. 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 3.2.4 ve 3.2.5' te verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde alaşım miktarlarının St-1045 çeliğinin özelliklerine daha yakın olduğu görülmüştür.

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 gözlemlenmiş 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 3.2.6) Bursa Teknik Üniversitesinde bulunan 200 kN kapasiteli çekme cihazında çekme testi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tablo halinde Tablo 3.2.2 'de verilmiştir.



Şekil 3.2.6. Çekme testi sonrası alüminyum ve çelik malzemelerinin görünüşü.

Tablo 3.2.2. 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 3.2.3 'te verilmiştir.

Tablo 3.2.3. Çelik numunelere uygulanan sertlik testi sonucu elde edilen sertlik değerleri.

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

3.2.2 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. 1. dönem proje ara raporunun (113M407; Dönem-1) 2b.1 no.lu bölümünde hazırlanan bu kontrol listeleri detaylı bir şekilde verilmiştir.

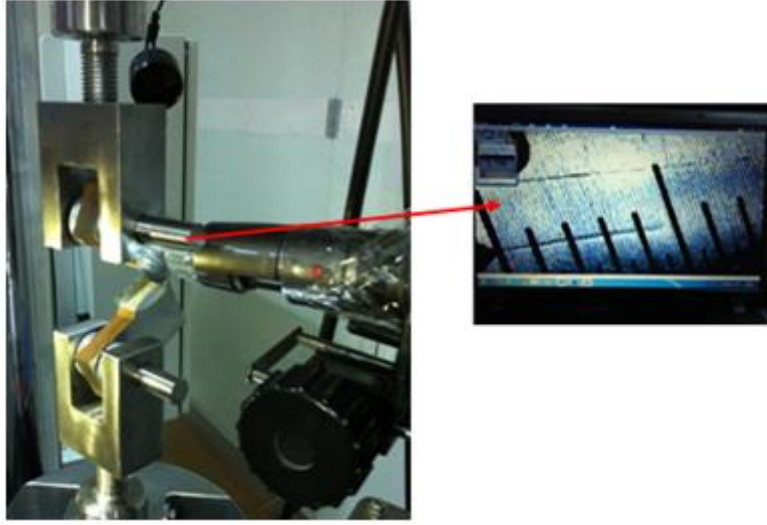
3.2.2.1 Mod-I Kırılma Tokluğu Testleri

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 ($B \geq 2.5 \cdot (K_{IC}/\sigma_Y)^2$) 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 deneylerimiz için bu cihazda oluşturulmuştur. İmal edilen yorulma cihazı Şekil 3.2.7 'de gösterilmektedir.



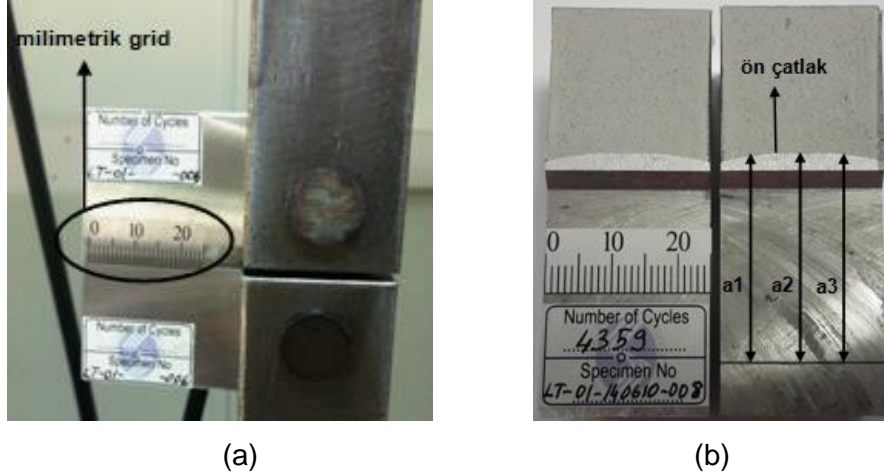
Şekil 3.2.7. Yorulma ön çatlaklarının oluşturulması için imal edilen yorulma cihazı.

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 çatlakın ilerlemesi hassas bir şekilde izlenmektedir (Şekil 3.2.8). Her bir yüklemedeki çevrim sayısının tespit edilmesi için cihaza bir sayaç entegre edilmiştir. Çatlak istenen boyuta ulaştığı zaman cihaz durdurularak kaç çevrim sonrasında çatlakın bu boyuta ulaştığı belirlenerek ön çatlak oluşturma işlemi tamamlanmaktadır.



Şekil 3.2.8. Test esnasında ön çatlak oluşumunu görüntülemek için kullanılan yüksek çözünürlüklü kamera

Şekil 3.2.9-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 3.2.9-b). Etiketle numune ön çatlağının kaç çevrimde oluşturulduğu ve numunenin numarası yer almaktadır.



Şekil 3.2.9. (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 çatlağın 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 değerin 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 Laboratuvarında bulunan Zwick marka 50 kN kapasiteli çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2.10). 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 3.2.9-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 yer alan denklemde gösterilen formülasyon (ASTM E399-12; 2013) kullanılarak numunelerin kırılma tokluğu hesaplanmaktadır.



Şekil 3.2.10. Zwick marka 50 kN kapasiteli çekme cihazı.

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{BB_N} \sqrt{W}} \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0.866 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (3.2.1)$$

3.2.2.2 Alüminyum Numunelerin Mod-I Kırılma Tokluğu Test Sonuçları

Alüminyum numunelerin kırılma tokluğu ölçümü için 5 adet numune seçilerek Bölüm 2b.2 'de bahsedildiği şekilde kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.11'de test edilen numunelerin kırıldıktan sonraki genel perspektif ve üst görünüşleri verilmiştir.



Şekil 3.2.11. Kırılma tokluğu testi sonucunda Alüminyum malzemelerin perspektif görünüşü.

Kırılma tokluğu test sonuçları Tablo 3.2.4'te verilmiştir. 5 adet numune için gerçekleştirilen kırılma tokluğu testi sonucu kırılma tokluğu değeri ortalama $29.11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olarak hesaplanmıştır. Literatür verileri ile mukayese edildiğinde test sonuçlarının tutarlı olduğu görülmektedir.

Tablo 3.2.4. Al 7075 T-651 malzemesinin kırılma tokluğu ölçümü test sonuçları ve minimum kalınlık hesabı.

KIRILMA TOKLUĞU ÖLÇÜMÜ TEST SONUÇLARI ve MİNİMUM KALINLIK HESABI									
Numune No	Malzeme	Hadde Yönü	W (mm)	t (mm)	P ^Q (kN)	a _{avg} (mm)	Minimum kalınlık (mm)	K ^Q (Mpa m ^{1/2})	K _{IC} (Mpa m ^{1/2})
LT-01-140603-01	AL 7075	LT	50	25	15.20	26.83	≥ 6.53	29.14	*28-31
LT-01-140603-08	AL 7075	LT	50	25	15.36	25.51	≥ 5.78	27.40	

LT-01-140610-03	AL 7075	LT	50	25	15.28	26.26	≥ 6.29	28.59	**28.6
LT-01-140611-04	AL 7075	LT	50	25	15.65	26.43	≥ 6.75	29.62	
LT-01-140611-06	AL 7075	LT	50	25	17.00	25.75	≥ 7.29	30.79	
ORTALAMA								29.11	

* Hertzberg, R. W. 1996. "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc,

**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 standardına uygun olduğu görülmektedir.

3.2.2.3 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 3.2.12 'de test sonrasında kırılan çelik numunelerin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 3.2.12. 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 3.2.5 'te verilmiştir.

Tablo 3.2.5. Çelik malzemelerinin kırılma tokluğu ölçümü test sonuçları ve minimum kalınlık hesabı.

KIRILMA TOKLUĞU ÖLÇÜMÜ TEST SONUÇLARI ve MİNİMUM KALINLIK HESABI									
Numune No	Malzeme	σ_y (Mpa)	W (mm)	t (mm)	P ^Q (kN)	a _{avg} (mm)	K ^Q (Mpa m ^{1/2})	Minimum kalınlık (mm)	ORTALAMA K _{IC} (Mpa m ^{1/2})
TRY-01-150814-004	St 1040 /BASE)	430	50	12.5	26.25	25.02	90.81	≥ 111.50	84.14
TRY-01-150814-06	St 1040 /BASE)	430	50	12.6	22.80	25.42	80.13	≥ 86.81	
TRY-01-150814-07	St 1040 /BASE)	430	50	12.8	23.89	25.22	81.48	≥ 89.77	
TRY-01-150814-01	St 1040 /HT(QT))	742	50	12.5	35.85	25.23	125.64	≥ 71.68	130.68
TRY-01-150814-03	St 1040 /HT(QT))	742	50	12.5	39.00	25.06	134.88	≥ 82.60	
TRY-01-150814-02	St 1040 /HT(QT))	742	50	12.5	38.57	24.42	128.33	≥ 74.78	
TRY-01-150814-08	St 1040 /HT(QT))	742	50	12.4	35.79	25.53	128.84	≥ 75.37	
TRY-01-220814-03	St 1040 /NAQT	742	50	12.6	36.85	25.02	126.50	≥ 72.66	115.97
TRY-01-220814-02	St 1040 /NAQT	742	50	12.5	35.47	24.81	121.12	≥ 66.61	
TRY-01-220814-01	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.

3.2.2.4 Mod-I Çatlak İlerleme Testleri ve Sonuçları

Mod-I çatlak ilerleme testleri, Sakarya Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarına alınması planlanan yorulma cihazının alımı projenin 1.yılı içerisinde yapılması gereken testlere henüz yetişemediği için, 1. yıl içerisinde yapılması gereken testlerimizin büyük bir çoğunluğu Bursa Teknik Üniversitesi'nde (BTÜ) Schimadzu 100 kN kapasiteli eksenel yorulma cihazında (Şekil 3.2.13) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2.13. Schimadzu 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.

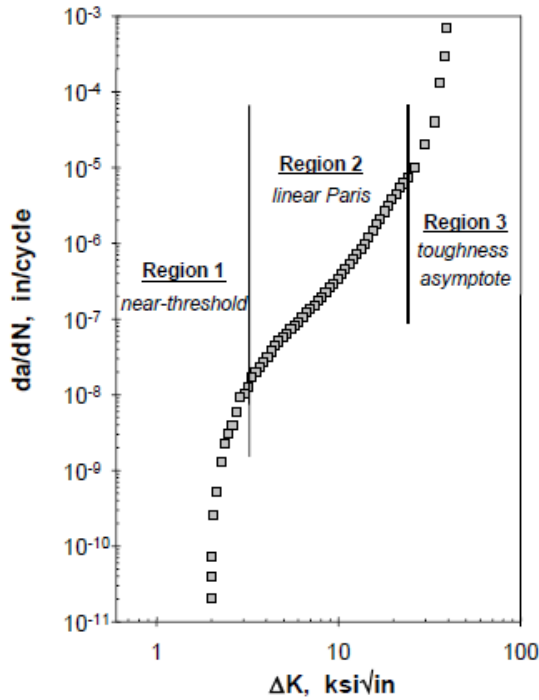
Ön çatlak uzunluğu standartta yer alan;

ön çatlak uzunluğu $\geq 0.1 \cdot B$ (B:kalınlık)

şartına göre 2.5 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca ön çatlak oluşumu için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı, yine standartta yer alan;

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

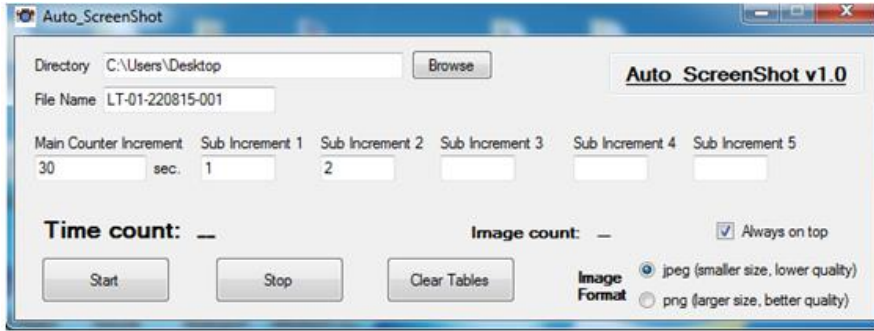
şartına göre belirlenmiştir. Testlerde kullanılan Al 7075 no.lu alüminyum malzeme literatürde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Burada amaçlanan bilinen bir malzeme için da/dN grafiği elde etmek değildir. Mod-I çatlak ilerleme testlerinin gerçekleştirilmesindeki amaç, karışık modlu yüklemeler 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 3.2.14 '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 3.2.14. Çatlak ilerleme davranışının üç bölgesini gösteren temsili yorulmalı çatlak ilerleme ömür grafiği.

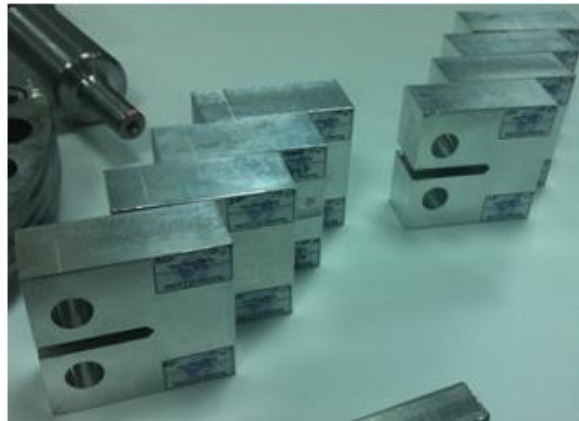
Literatürde yer alan yorulmalı çatlak ilerleme ömür grafikleri incelendiğinde Al 7075 T-651 malzemesi için 2. lineer bölgeyi temsil eden ΔK aralığının 10-20 MPa \sqrt{m} arasında olduğu görülmektedir. Bu yüzden yukarıdaki formülasyonda belirtilen " $(K_{max})_{başlangıç\ testi}$ " değerini 10 MPa \sqrt{m} 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 proje 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 3.2.15 'te, yazılımın ara yüzü gösterilmektedir.



Şekil 3.2.15. Otomatikleştirilmiş ekran görüntü alma program ara yüzü

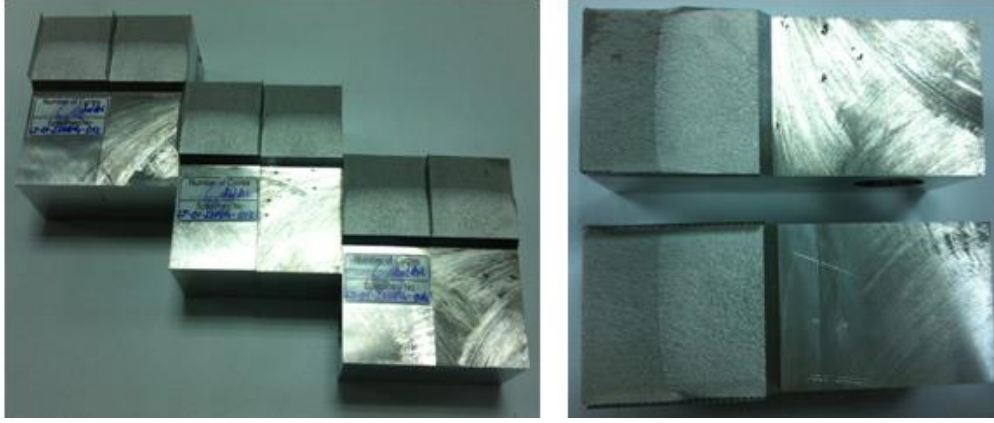
Şekil 3.2.16 'da mod-I çatlak ilerleme testi için hazırlanan numunelerin perspektif görünüşü verilmektedir. 4 adet Al 7075 T-651 alüminyum alaşımlı numune mod-I çatlak ilerleme testine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.2.16. Mod-I çatlak ilerleme testi için hazırlanan numunelerin perspektif görünümü.

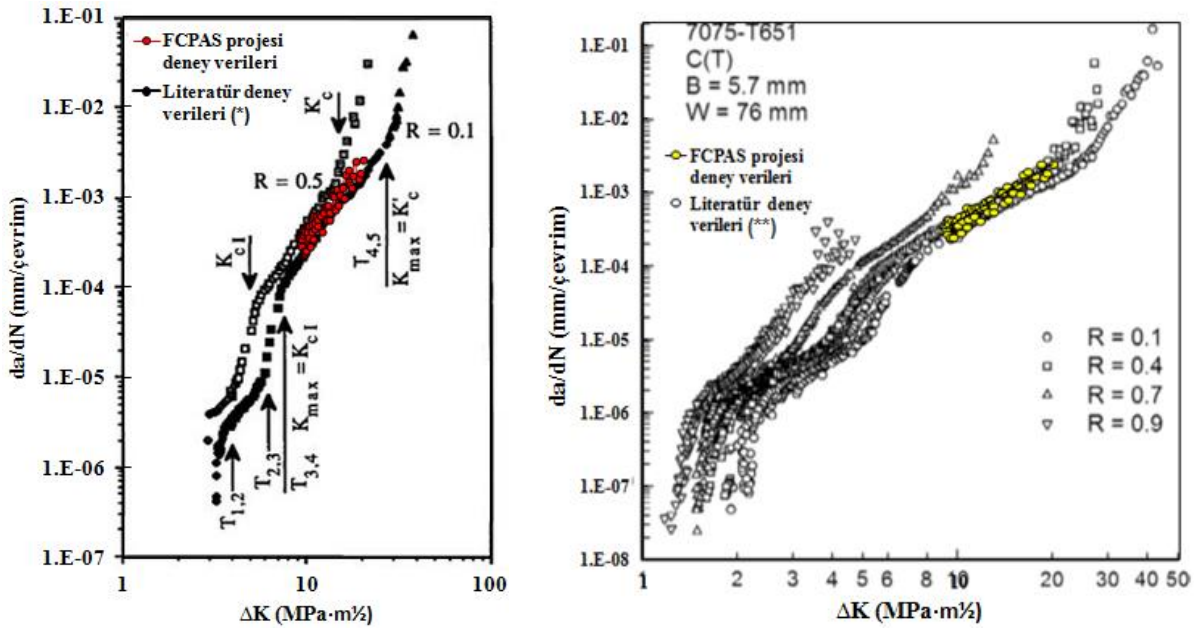
Test başlangıcında, çevrim yükü, numune geometrik bilgileri, R (Kmin/Kmax) oranı gibi değerler ve test sırasında alınan çatlak uzunluğu ve çevrim sayısı ölçümleri standartta yer

alan empirik formüller kullanılarak da/dN ve ΔK değerleri hesaplanmaktadır. Mod-I çatlak ilerleme testi sonrasında numunelerin kırık yüzeylerinin görünüşleri Şekil 3.2.17 'de verilmiştir.



Şekil 3.2.17. Mod-I çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numunelerin yüzey görünüşleri.

Gerçekleştirilen 4 adet mod-I çatlak ilerleme testleri sonrasında, sonuçları literatür verileri ile karşılaştırmak için deneylerden elde edilen da/dN - ΔK grafiği ile literatürden alınan grafikler üst üste çakıştırılarak Şekil 3.2.18 'de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi literatür verilerine oldukça yakın değerler projemizdeki deneylerden elde edilmiş olup veriler istenen aralıktadır.



Şekil 3.2.18. Deneyler sonucu elde edilen da/dN - ΔK grafiğinin literatür verileri ile karşılaştırılması.

*Reuter, W. G., Underwood J. H., Newman J. C. 1995. "Fracture Mechanics", West Conshohocken : ASTM, 26- 662.

** 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.

R (Kmin/Kmax) oranı 0.1 alınarak gerçekleştirilen mod-I çatlak ilerleme testlerinin sonrasında, yorulma çatlak ilerleme denklemlerinden biri olan Paris- Erdoğan denklemi (3.2.2) kullanılarak "C" ve "n" malzeme sabitleri elde edilmiş ve literatürde yer alan çalışmalardan elde edilen "C" ve "n" malzeme sabitleri ile birlikte tablo halinde verilmiştir (Tablo 3.2.6). Literatürdeki bazı çalışmalarda "C" ve "n" malzeme sabitlerinin hangi R oranı kullanılarak elde edildiği belirtilmediği için bu kısımlar boş bırakılmıştır.

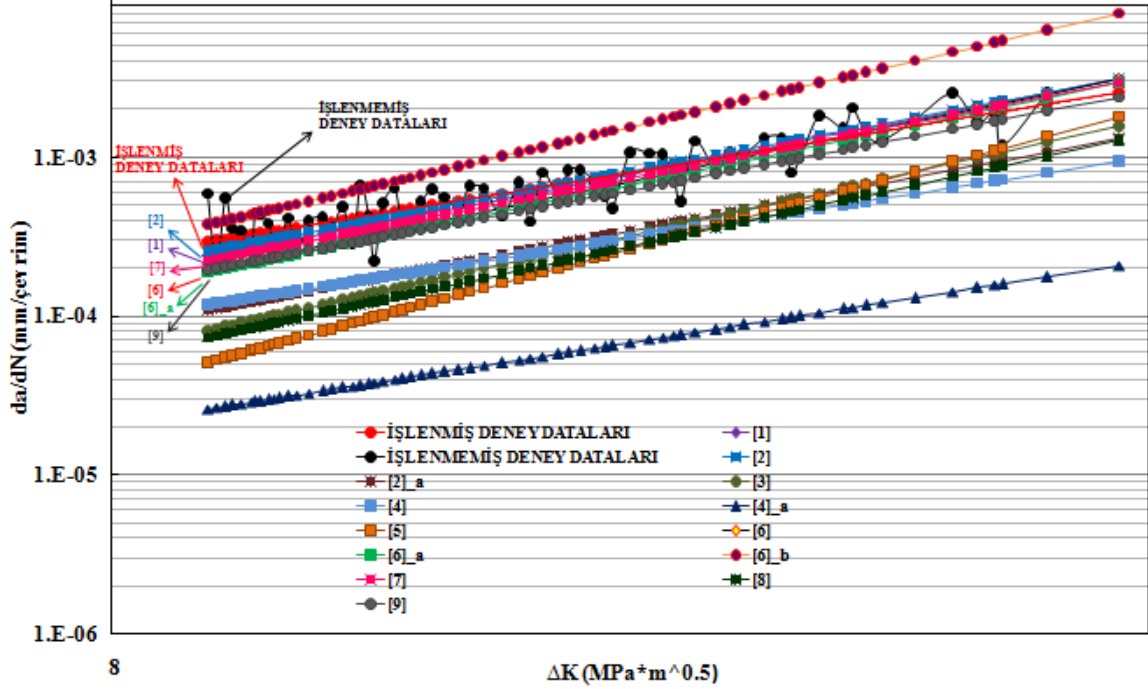
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (3.2.2)$$

Tablo 3.2.6. Mod-I çatlak ilerleme testlerinden ve literatürden elde edilen "C" ve "n" malzeme sabitleri.

KAYNAK	Malzeme	R oranı	C (mm/(cycle*(Mpa√m)^n)	n
İşlenmiş Deney Verileri	Al-7075-T651	0.1	1.4619100E-06	2.4392
[1]	Al-7075-T651	0.1	4.5064635E-07	2.8850
[2]	Al-7075-T651	-	5.8524040E-07	2.8000
[2]_a	Al-7075-T651	-	2.5381940E-07	2.7910
[3]	Al-7075-T651	-	6.0000000E-08	3.3200
[4]	Al-7075-T6	0	7.2965000E-07	2.3398
[4]_a	Al-7075-T6	-1	1.6170000E-07	2.3398
[5]	Al-7075-T6	-	8.6000000E-09	4.0000
[6]	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]	Al-7075-T6	-	4.0823000E-07	2.9024
[8]	Al-7075-T6	-	6.8500000E-08	3.2100
[9]	Al-7075-T6	-	4.2780000E-07	2.8160

Tablo 3.2.6 incelendiğinde deneyler sonrası elde edilen "C" değerinin diğerlerine oranla daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Ancak denklem 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 $da/dN-\Delta K$ değişim grafiği elde edilmiş ve Şekil 3.2.19 '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 (Denklem 1) ΔK

empirik formülü kullanılarak elde edilmiştir. "İşlenmiş deney dataları" isimli eğri ile diğer referans eğrileri ise Tablo 3.2.6 'da yer alan "C" ve "n" değerleri kullanılarak çizdirilmiştir.



Şekil 3.2.19. Farklı "C" ve "n" değerleri için çizdirilen da/dN - ΔK grafiklerinin karşılaştırılması.

Yukarıda da bahsedildiği gibi literatürden alınan malzeme sabitlerinin bir kısmının hangi R oranına ait olduğu belirtilmediği için Şekil 3.2.19 'da yer alan eğrilerin bir kısmı farklılık göstermektedir. Ancak deney datalarını, Tablo 3.2.6 '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.

3.2.3 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 3.2.6 no.lu bölümde 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 vd. 2004) iki boyutlu karışık mod kriterleri karşılaştırıldığında,

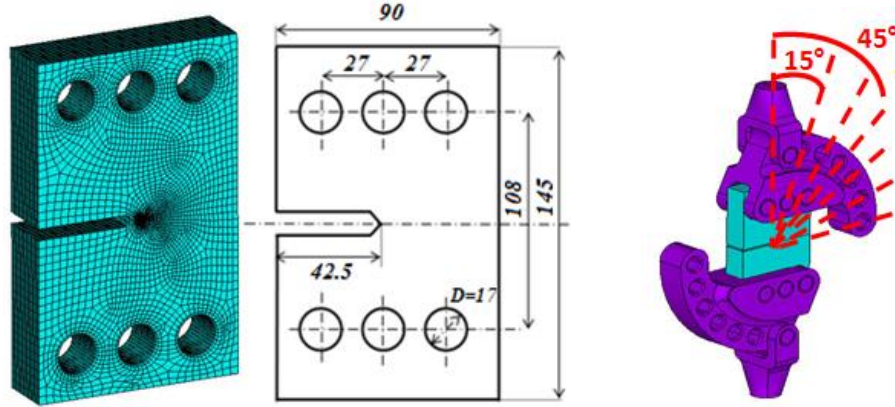
iki boyutlu kriterler arasından Erdoğan ve Sih kriteri (1963) ve Richard kriteri (1985; 1987) çatlak ilerleme profilini tanımlayan en uygun kriterler olarak belirtilmiştir.

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 vd. 1998; Wang vd. 1999; Richard ve Sander 2003; 2011; Buchholz vd. 2004; Sander ve Richard 2003; 2005; 2006; Richard vd. 2005; 2008; 2013; 2014; Schöllmann vd. 2003; Fulland vd. 2008; Steigemann vd. 2010; Leuders vd. 2013). Gerçekleştirdiği çalışmaların birçoğunda compact tension shear (CTS) numunesi kullanarak farklı açılarda yükleme yapmış ve elde ettiği sonuçlara göre iki ve üç boyutlu kriterler geliştirmiştir. Zhao ve Guo (2012) da 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 KII/KI 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 proje önerisinde yer almamasına rağmen proje ekibi tarafından geliştirilen, 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 SIF değerlerini elde etmeyi amaçlayan, şeklinden dolayı bu ismi alan T-numunesidir.

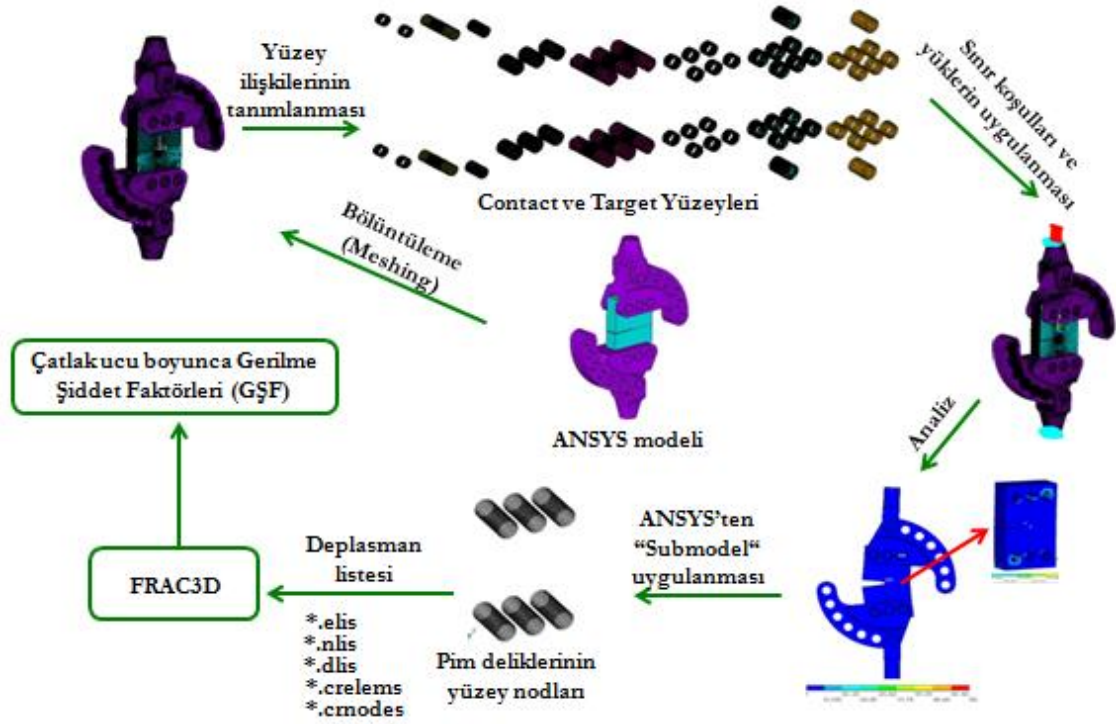
3.2.3.1 Mod-I/II CTS (Richard) Numunesi Tasarım ve Kırılma Analizleri

Richard ve ekibinin karışık modlu çatlak ilerlemesiyle ilgili yapmış olduğu çalışmalar (Sander ve Richard 2005; 2006) referans alınarak Şekil 3.2.20-a 'da ölçüleri verilen karışık modlu yüklemelerde kullanılan compact tension shear (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 3.2.20-b).



Şekil 3.2.20. Karışık modlu yüklemeler için modellenen (a) CTS numunesi ve (b) test konfigürasyonu.

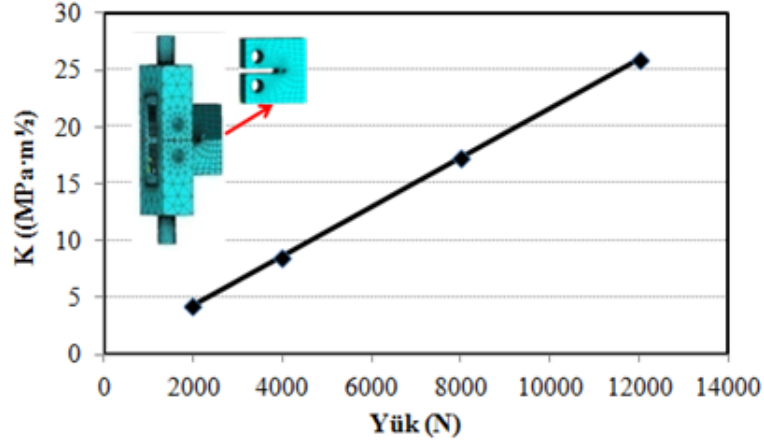
Deneyel çalışmalar gerçekleştirilmeden önce ANSYS (2009) sonlu elemanlar programı kullanılarak değişik açılardaki ($\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ-90^\circ$) yükleme durumları için gerilme analizleri yapılmıştır. Deneyi birebir simüle etmek için analizler tutucu ile pimler 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) çözümü FRAC3D kullanılarak çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerleri hesaplanarak, bu değerlerin kırılma tokluğu (K_{IC}) değerine ulaşması için gereken yükler ve bu yüklerde tutucu, pim ve numune 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 gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 3.2.21 'de prosedürün özeti görsel olarak verilmiştir.



Şekil 3.2.21. ANSYS ve FCPAS programında gerçekleştirilen CTS numunesi analizlerinin proses şeması.

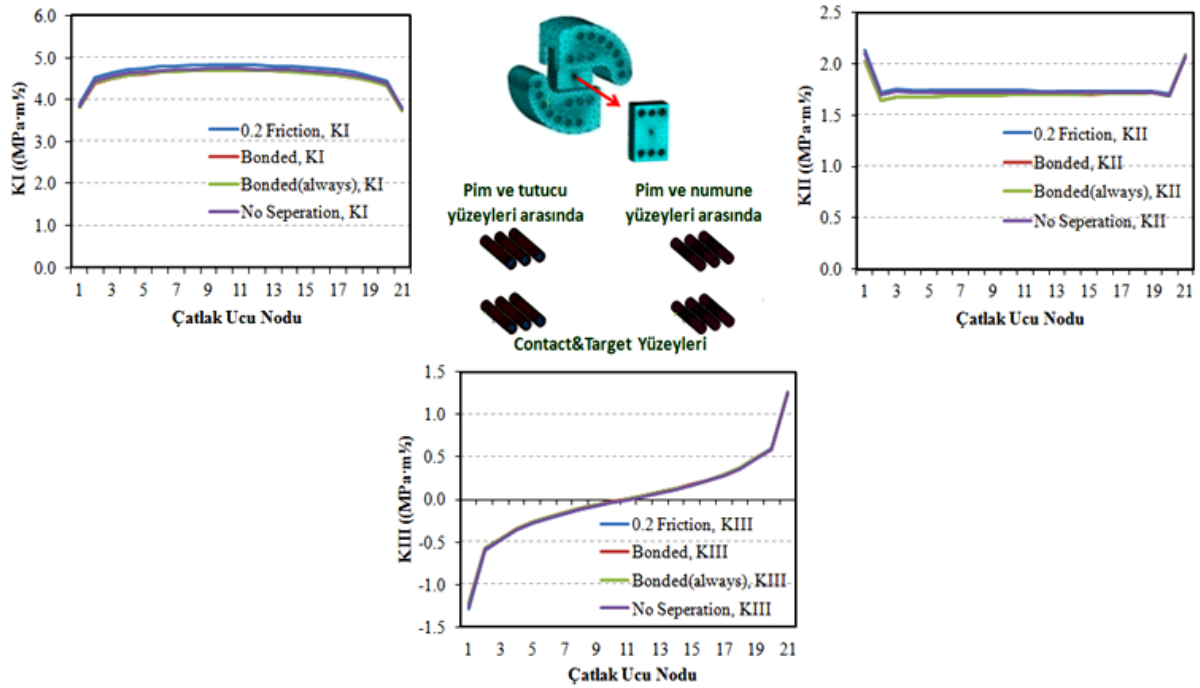
Yukarıda proses şeması verilen CTS numunesi için kırılma analizleri gerçekleştirilmeden önce sonlu elemanlar programında temas yüzeyleri için tanımlanan temas (contact) tipinin, yük ve sınır koşullarının analizler sonrasında elde edilen GŞF değerleri üzerine etkisini belirlemek için bazı hassasiyet analizleri 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 compact tension (CT) numunesine farklı yükler uygulanarak (2, 4, 8, 12 kN) kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Yüke bağlı olarak GŞF değişim grafiği Şekil 3.2.22 'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yükün artışıyla GŞF değerlerinin de lineer olarak arttığı gözlenmektedir.



Şekil 3.2.22. Lineer yük artışına bağlı olarak GŞF değerlerinin lineer değişimi.

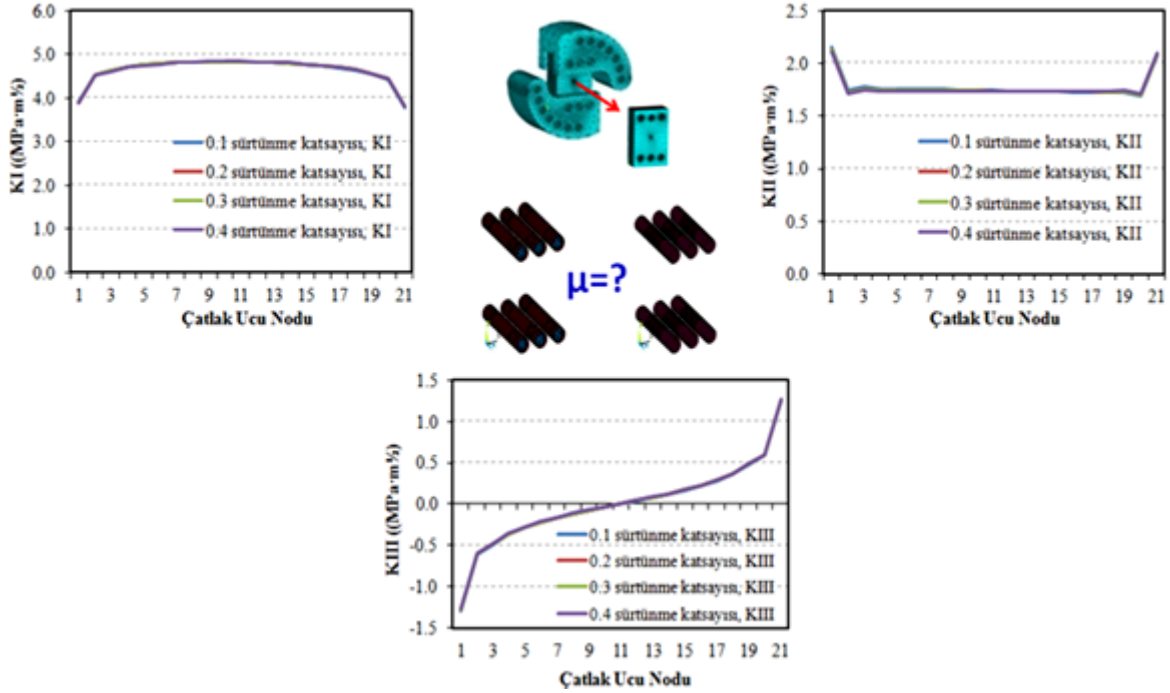
ANSYS 'te yüzeyler arasında temas ilişkisi tanımlanarak gerçekleştirilen analizlerde, temas yüzeyleri arasında tanımlanan temas tipinin GŞF (KI, KII, KIII) değerleri üzerine etkisi ayrı bir çalışma olarak incelenmiş olup sonuçlar Şekil 3.2.23 'te verilmiştir. Farklı temas tipleri (standart, bonded, bonded (always) ve no seperation) tanımlanarak yapılan analizlerde, contact tipinin hesaplanan GŞF değerleri üzerinde pek etkisinin olmadığı görülmüştür.



Şekil 3.2.23. 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

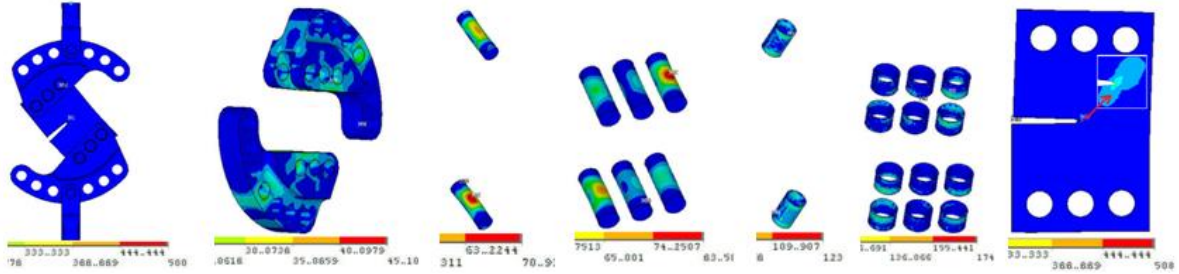
katsayı değerleri (0.1, 0.2, 0.3, 0.4) için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.2.24 'te verilmiştir. Temas tipinde olduğu gibi sürtünme katsayısının da GŞF değerleri üzerinde önemli ölçüde bir etkisinin olmadığı görülmüştür.



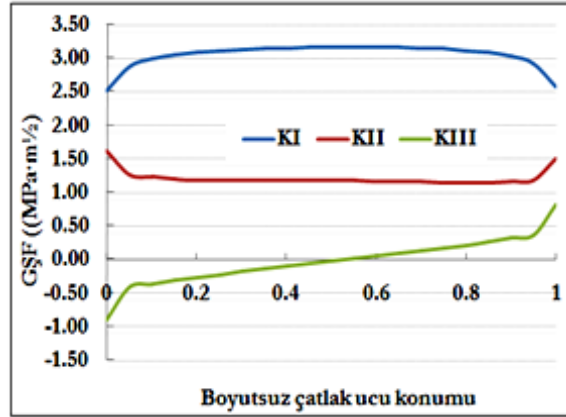
Şekil 3.2.24. Sürtünme katsayısının çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri üzerine etkisi.

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 3.2.20 'de boyutları ve tasarımı verilen numune ve tutucu kullanılarak ve numune kalınlığı 25 mm alınarak gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin tamamı 1. dönem proje ara raporunun (113M407; Dönem-1) 2c.2 no.lu bölümünde detaylı olarak verilmiştir. Şekil 3.2.25 'te $\theta=45^{\circ}$

yüklemeye açısı için gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası aparatlarda oluşan gerilmeler verilmiştir. Şekil 3.2.26 'da ise bu yüklemeye durumu için gerçekleştirilen kırılma analizi sonrası FRAC3D yardımıyla çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerlerinin dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.2.25. $\theta=45^\circ$, 10 kN yüklemeye durumunda burç, pim, tutucular ve numunede oluşan gerilmelerin dağılımı.

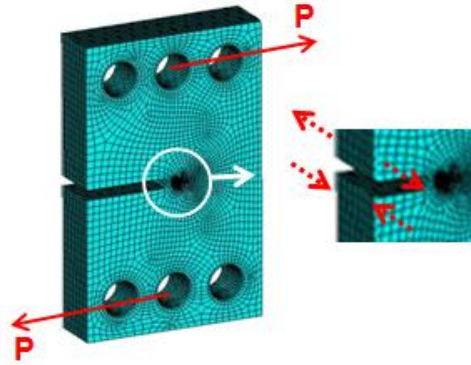


Şekil 3.2.26. $\theta=45^\circ$, 10 kN yüklemeye durumunda çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri.

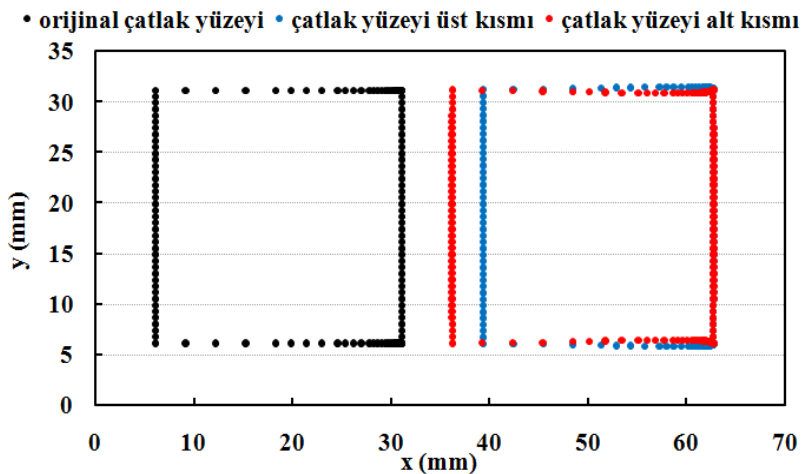
Şekil 3.2.26 'da görüldüğü gibi yüklemeye durumu mod-I/II olmasına rağmen kırılma analizi sonucunda çatlak ucu boyunca KIII değeri de elde edilmiştir. KIII GŞF değerinin oluşma sebebinin şu şekilde olduğu düşünülmektedir. 90° 'lik yüklemeye durumu (mod-II yüklemeye) ele alındığında, numune üzerinde çatlak yüzeyinin üst kısmı yüklemeye etkisiyle basma yüküne, çatlak yüzeyinin altında kalan kısım ise ters açıda yüklemeye dolayısıyla çekme yüküne maruz kalmaktadır. Poisson oranını 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 KIII etkisinin oluştuğu gözlemlenmektedir. Grafiklerde KIII SIF değerinin negatiften pozitif doğru yönelmesinin sebebi, yukarıda bahsedilen basma ve çekme yüklerinin etkisiyle çatlak ucunun yarısında pozitif KIII modu oluşurken diğer yarısında negatif KIII modu oluşmasından

kaynaklanmaktadır ve çatlak ucu orta noktasında bu yüzden KIII sıfır değerini almaktadır. Buchholz ve ekibi de (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.

KIII SIF etkisini görselleştirmek için ANSYS 'te $\theta=90^\circ$ 'lik yükleme durumu için (Şekil 3.2.27) yapılan analiz sonrası çatlak yüzeylerini oluşturan sınır düğüm noktalarındaki deplasmanlar belli bir katsayı oranında artırılarak, sınır düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler grafiksel olarak gösterilmiştir (Şekil 3.2.28). KIII etkisinin CTS analizlerinde kullanılan tutucu, pim veya temas yüzeylerine tanımlanan yüzey ilişkisinden kaynaklanabileceği ihtimalini ortadan kaldırmak için, Şekil 3.2.27 'de görüldüğü gibi numunede yer alan orta deliklere zıt yönlü kuvvetler uygulayarak analiz gerçekleştirilmiştir. Mod-II etkisinin baskın olduğu karışık mod-I/II problemlerinde önemli ölçüde KIII gerilme şiddet faktörü de elde edilmektedir.

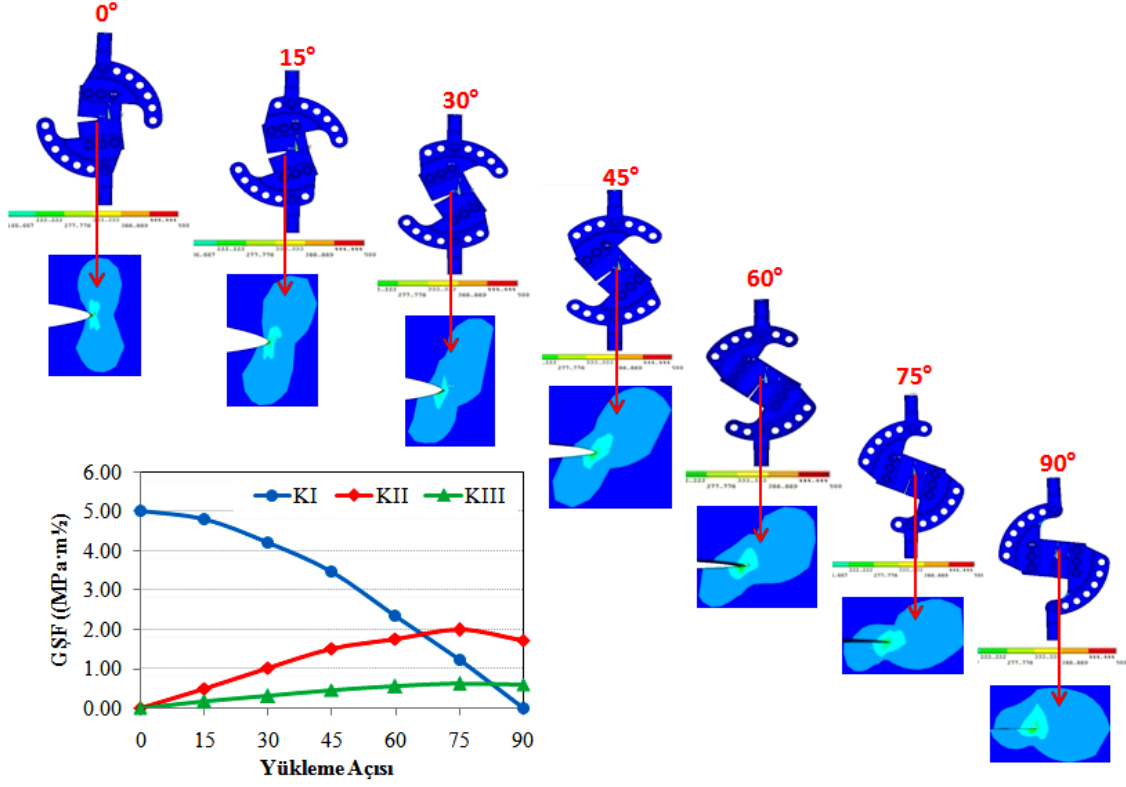


Şekil 3.2.27. $\theta=90^\circ$ 'lik yükleme durumunu temsil etmek için numuneye uygulanan yüklerin gösterimi.



Şekil 3.2.28. $\theta=90^\circ$ 'lik yükleme durumunda KIII etkisinin görsel olarak gösterilmesi – yükleme öncesi ve sonrası çatlak yüzeylerinin üst görünüşü.

Şekil 3.2.29 '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 3.2.29. Farklı yüklem açıları için gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizleri sonrasında çatlak ucunda oluşan gerilme ve GŞF dağılımları.

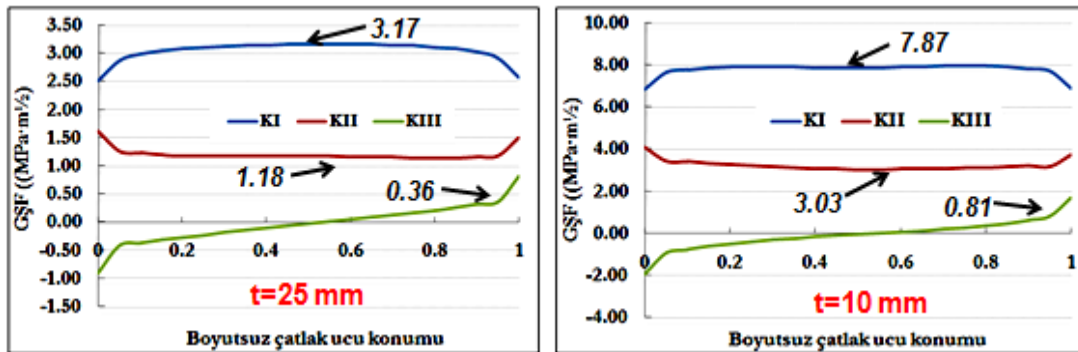
Yapılan gerilme analizleri ve sonrasında çatlak ucu boyunca hesaplanan KI ve KII GŞF değerleri sonrasında, Richard ve ekibinin geliştirmiş olduğu (Richard 1985; 1987) ve aşağıda formülü verilen denklem ile her bir açılı yüklem durumu için eşdeğer gerilme şiddet faktörü değeri hesaplanarak Tablo 3.2.7 'de verilmiştir.

$$K_V = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 5,366 \cdot K_{II}^2} = K_{IC} \quad (3.2.3)$$

Tablo 3.2.7. $\theta = 0^\circ - 15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ - 90^\circ$ açılarda gerçekleştirilen analizlerin sonuçları.

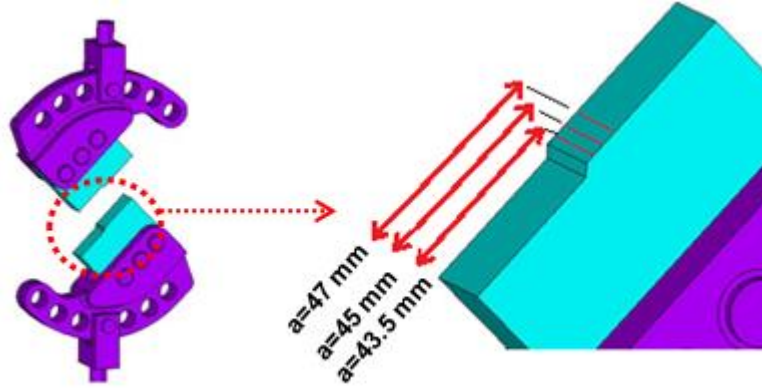
P=10 kN, $K_{Ic}=29 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (7075T6 Al), $\nu=0.33$, $t=25\text{mm}$														
($^\circ$)	(MPa $\sqrt{\text{m}}$)					(N)	TUTUCU		ÜST ve ALT PİM		ARA PİMLER		NUMUNE	
	K_I	K_2	K_2/K_I	K_V	p^{crit}		σ_{eqv}^{max}	$\sigma_{eqv}^{max} \cdot (K_{Ic}/K_V)$	σ_{eqv}^{max}	$\sigma_{eqv}^{max} \cdot (K_{Ic}/K_V)$	σ_{eqv}^{max}	$\sigma_{eqv}^{max} \cdot (K_{Ic}/K_V)$	σ_{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	∞	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 mm olacak şekilde CTS numuneleri üretilmiştir. Simülasyonlar 25mm kalınlıktaki CTS numuneleri için gerçekleştirildiği için, herhangi bir açı değerinde o numuneyi kırmak için gerekli olan kritik yük değerinin $2/5$ 'i alınarak 10mm kalınlık için gerekli olan yük hesaplanmaktadır. Şekil 3.2.30'da $t=25$ ve 10mm 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 3.2.30. $\theta=45^\circ$ yükleme durumunda $t=25$ ve 10mm 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 ± 1 mm fark oluşabildiği için, tüm yükleme açılarında 45mm ön çatlak uzunluğu için gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizleri 43.5mm ve 47mm ön çatlak uzunlukları için de (Şekil 3.2.31) gerçekleştirilmiş ve elde edilen GŞF değerleri Tablo 3.2.8 'de verilmiştir.



Şekil 3.2.31. Farklı ön çatlak uzunluklarının analiz modelinde gösterimi.

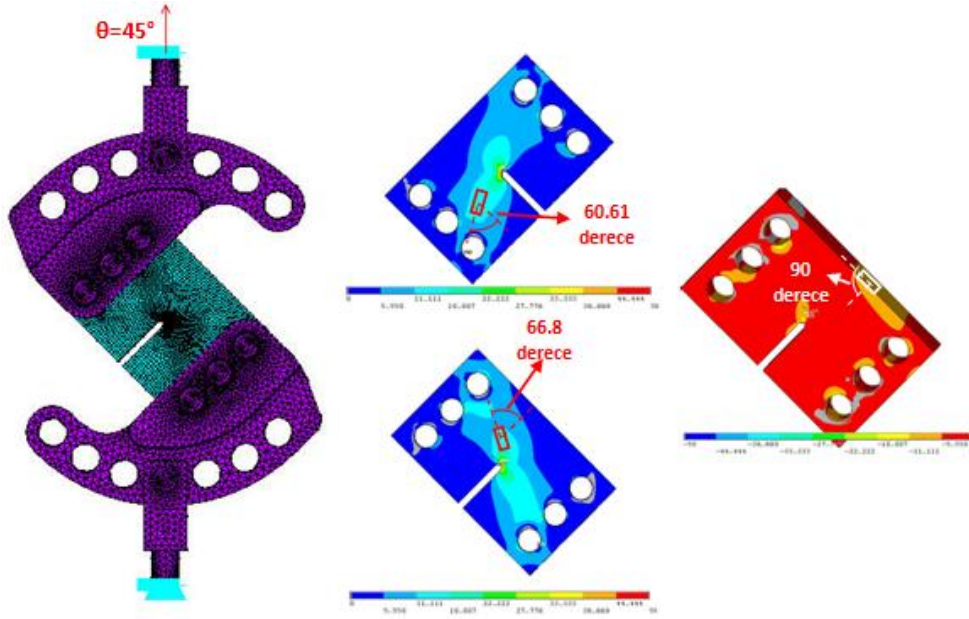
Böylece, kırılan numunenin yüzeyinden okunan ön çatlak uzunluk değerine karşılık gelen GŞF değeri interpolasyon yöntemiyle hesaplanmaktadır. Tabloda verilen KI ve KII değerleri çatlak ucu merkezi için, KIII değeri ise çatlak ucu kenarı için elde edilen değerlerdir. Çatlak ucu merkezinde tüm yükleme açılarında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

Tablo 3.2.8. $\theta=0, 15, 30, 45, 60, 75$ ve 90° yükleme açılarında 43.5, 45 ve 47 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucunda elde edilen KI, KII ve KIII değerleri (Demir vd. 2016).

Yükleme açısı ($^\circ$)	43.5 mm çatlak uzunluğu			45 mm çatlak uzunluğu			47 mm çatlak uzunluğu		
	Çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri, ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)								
	KI	KII	KIII (Kenar Değer)	KI	KII	KIII (Kenar Değer)	KI	KII	KIII (Kenar Değer)
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	-	-	-

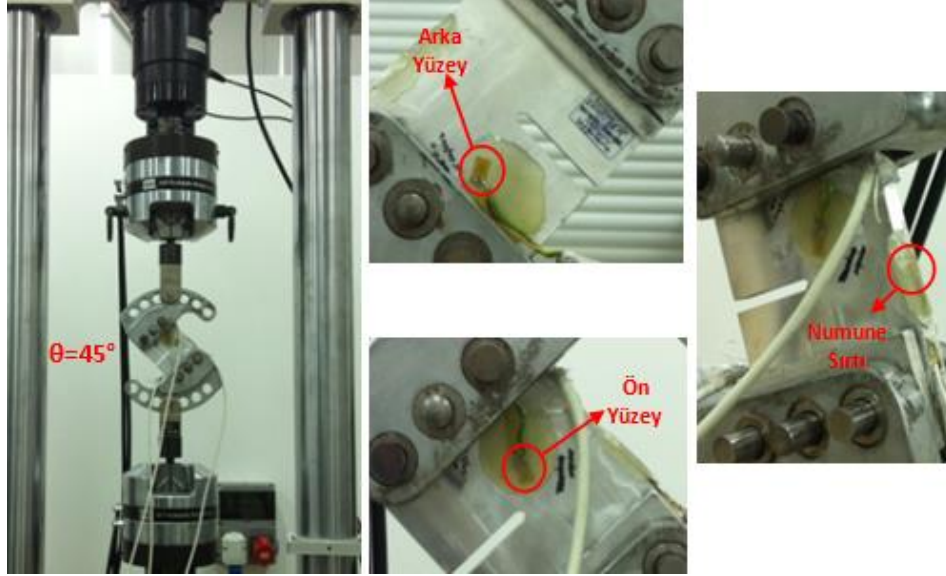
3.2.3.2 Mod-I/II CTS (Richard) Numunesi Strain-Gage Doğrulama Çalışması

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 önce bir 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° yükleme açısında 10 kN yüklemde gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrası numunede oluşan asal gerilmeler ve yönleri belirlenerek strain-gagelerin yerleştirileceği yer ve açılar belirlenmiştir (Şekil 3.2.32). Daha sonra bu noktadaki düğüm noktalarının belirlenen açıdaki birim şekil değiştirme miktarları deney verileri ile kıyaslanmıştır. Numunenin ön yüzeyine, arka yüzeyine ve sırtına olmak üzere numuneye 3 adet strain-gage yerleştirilmesi uygun görülmüştür.



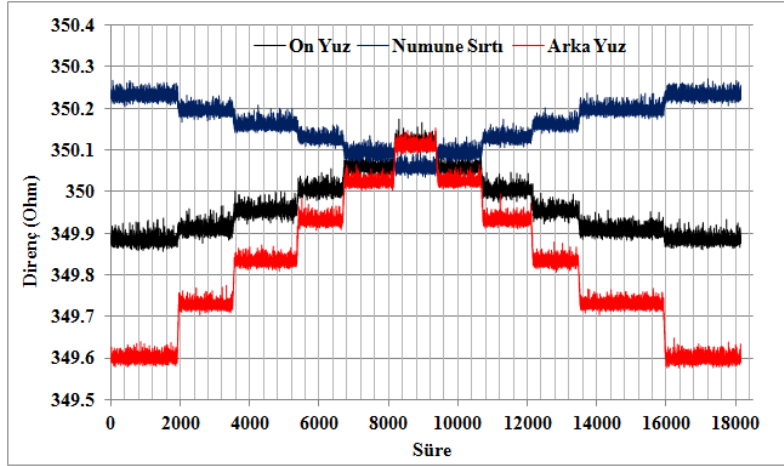
Şekil 3.2.32. $\theta=45^\circ$ yükleme açısı ve 10 kN yüklem durumu için strain-gagelerin yerleştirileceği bölgeler.

Şekil 3.2.33'te gösterildiği gibi, gerilme analizi sonucu yerleri ve yerleştirileceği açıları belirlenen strain-gageler numuneye yapıştırılarak 45° açıda mod-I/II yüklemesi yapılmıştır. Deney esnasında yükleme 0' dan başlayarak her ikişer kN artırımlarda belirli bir süre tutularak 10 kN yüke çıkarılmış, daha sonra ikişer kN azaltılarak yüksüz konuma getirilmiştir.



Şekil 3.2.33. $\theta=45^\circ$ 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 3.2.34'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 3.2.34. Richard numunesi için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği.

Tablo 3.2.9'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 yapılan karşılaştırma son satırda yer alan % farkı temsil etmektedir.

Tablo 3.2.9. 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 yüklemde ϵ	0.00016476	-69.7466413	-0.000227767	-14.22015621	0.000815373	61.96508808
0-4 kN yüklemde ϵ	0.000223909	-58.88561165	-0.000223958	-15.65483368	0.000743969	47.78157208
0-6kN yüklemde ϵ	0.00025741	-52.73406876	-0.00021835	-17.76669912	0.000703944	39.83090663
0-8kN yüklemde ϵ	0.000277412	-49.06129049	-0.000219178	-17.45494744	0.000677498	34.57774098
0-10kN yüklemde ϵ	0.000298676	-45.15689888	-0.000220451	-16.9753241	0.000654285	29.96675258
	Ön Yüz	% Fark	Numune Sırtı	% Fark	Arka Yüz	% Fark
10 kN yüklemde ϵ (ANSYS Çözümü)	0.000544600	-45.15689888	-0.000265525	-16.9753241	0.000503425	29.966752580

Numune ön yüzüne yerleştirilen strain-gage çentik ucuna yakın bir konumda olması ve bu bölgede nispeten daha yüksek gerilme gradyanları olduğundan dolayı numune ön yüzeyi için güvenilir dotalar 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.

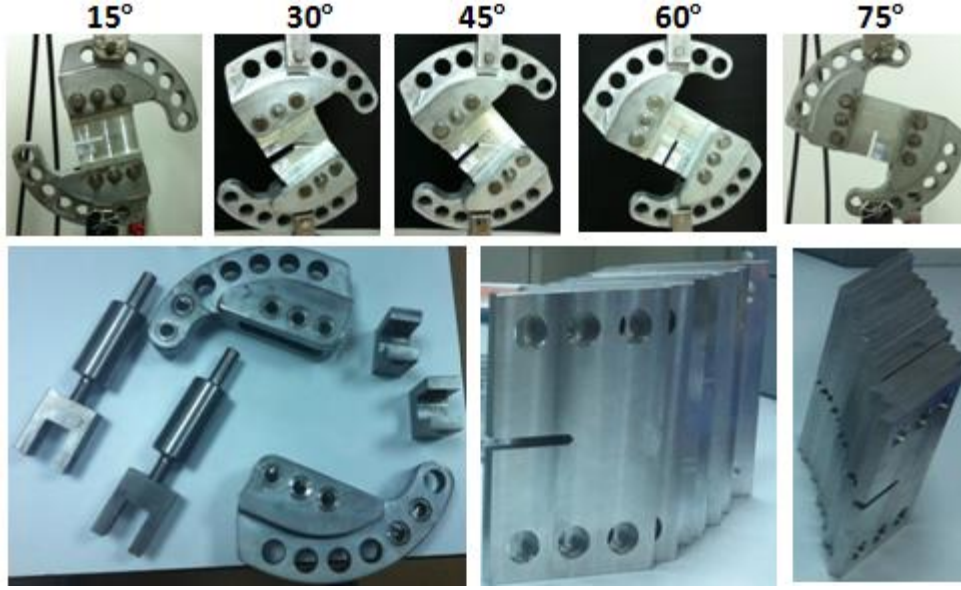
3.2.3.3 Mod-I/II CTS (Richard) Numunesi Kırılma Tokluğu Testleri

Mod-I/II CTS kırılma tokluğu testleri, Bursa Teknik Üniversitesi'nde (BTÜ) Schimadzu 200 kN kapasiteli eksenel çekme cihazında (Şekil 3.2.35) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2.35. Schimadzu 200 kN kapasiteli eksenel çekme cihazı.

Mod-I/II kırılma tokluğu testlerinden önce her bir numuneye 2.5 mm ön çatlak eksenel yorulma cihazı kullanılarak oluşturulmuştur. Ön çatlak oluşumu için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı mod-I kırılma tokluğu testlerinde (Bölüm 3.2.2.1) 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 3.2.36 'da kırılma testleri için kullanılan aparat ve numuneler ile farklı açılardaki yükleme durumlarında gerçekleştirilen deneylerden kesit görüntüleri verilmiştir.



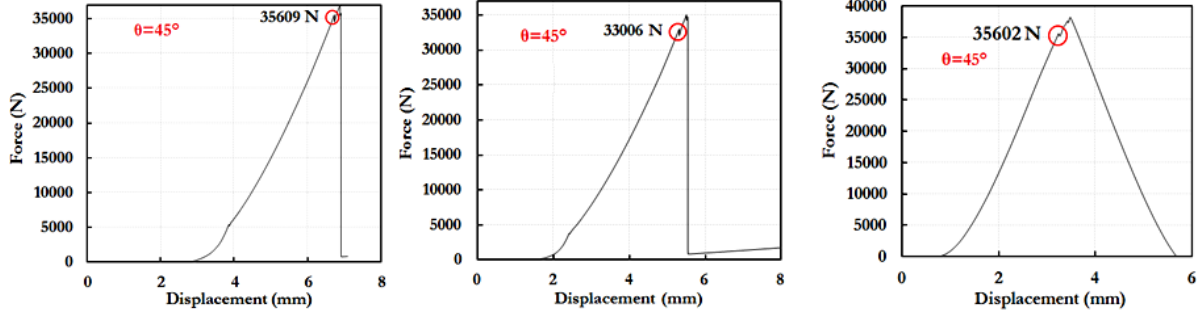
Şekil 3.2.36. CTS mod-I/II kırılma tokluğu testleri için kullanılan ekipmanların ve gerçekleştirilen deneylerin genel görünümü.

Şekil 3.2.37 'de ise deney sonrası kırılan numunelerin perspektif görünümleri verilmiştir. Aynı yükleme açılarında tutulan numunelerde çatlakların ilerleme açısı incelendiğinde birbirini tekrar eden yüzeylerin oluştuğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.2.37. 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 3.2.38 '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 3.2.10 'da verilmiştir.



Şekil 3.2.38. Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrasında $\theta=45^\circ$ yükleme açısı için elde edilen kuvvet-uzama eğrileri.

Tablo 3.2.10. 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

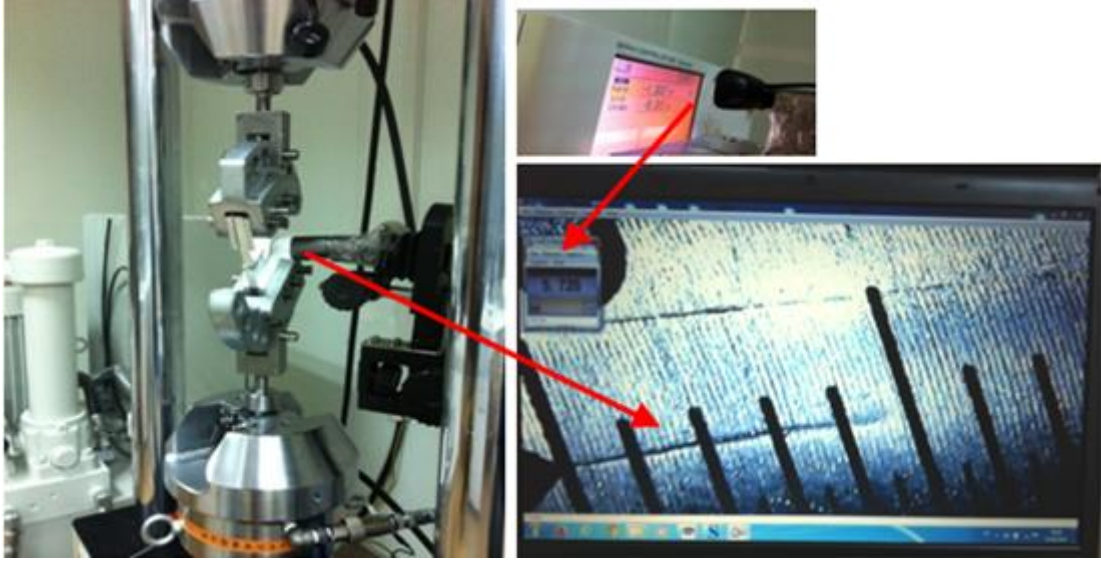
3.2.3.4 Mod-I/II CTS (Richard) Numunesi Çatlak İlerleme Testleri

Mod-I/II CTS 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 aksenal torsiyonel yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. $\theta=30^\circ$, 45° , 60° ve 75° 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 $\geq 0.1 \cdot B$ (B:kalınlık) şartına göre 2.5 mm olarak belirlenmiştir.

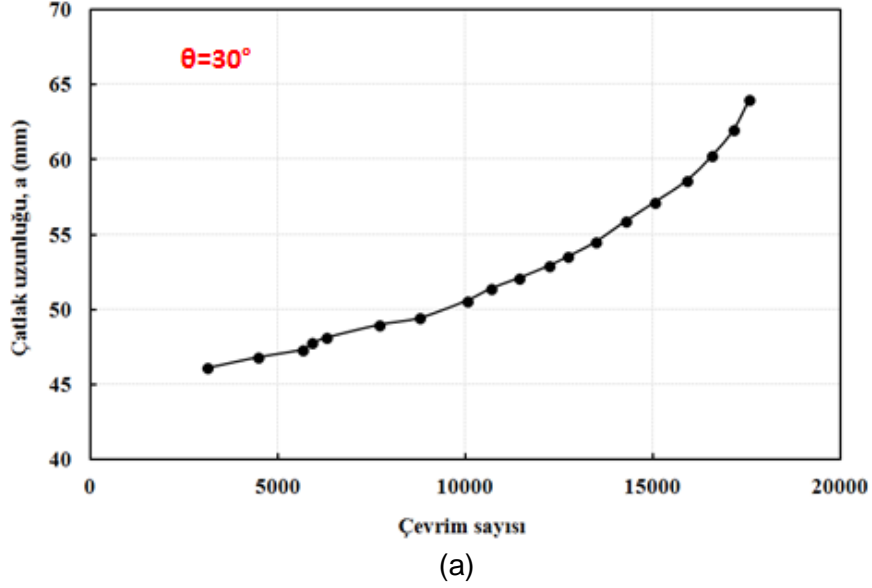
Ön çatlak oluşumu için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı mod-I çatlak ilerleme testlerinde (Bölüm 3.2.2.1) ön çatlak oluşumu için izlenen yöntemle göre ASTM standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Mod-I/II çatlak ilerleme testi için yorulma ön çatlağı mod-I açılma modunda CTS numunesinin 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 aç 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.

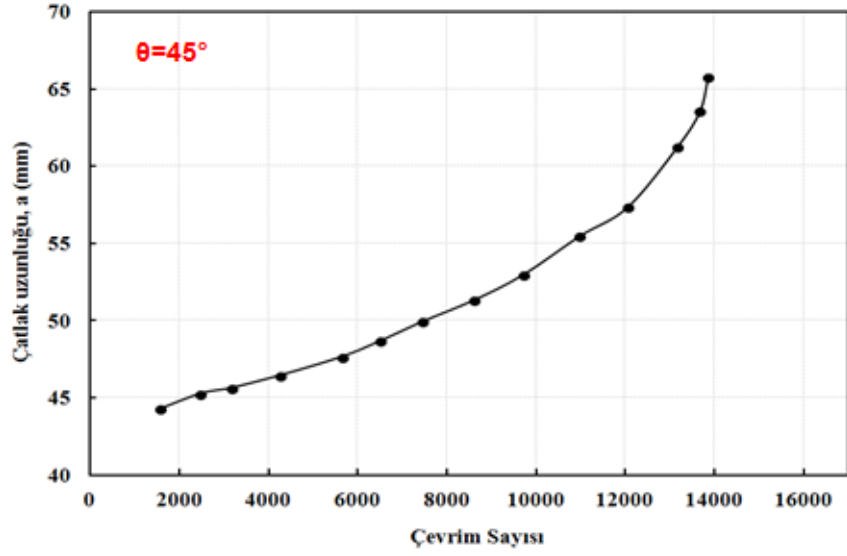
Numune kalınlığının 25 mm olduğu durum için 10 kN yüklemeye gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen KI ve KII değerlerinden Richard kriterine göre eş değeri gerilme şiddet faktörü Kv değeri hesaplanmıştır. Çatlak ilerleme testlerinde lineer Paris-Erdoğan bölgesinde veriler elde etmek için başlangıç Kv değeri belirlenerek simülasyon sonuçlarından elde edilen Kv değerinin başlangıç Kv değerine ulaşması için ne kadar yükün gerekli olduğu tespit edilmiştir. Mod-I/II çatlak ilerleme deneyleri için başlangıç Kv değeri 12 olarak belirlenmiştir. 10 mm kalınlık için istenen Kv değeri 12 ise bu değeri 25 mm için $12/2.5=4.8$ olmaktadır. Hangi açıda test gerçekleştirilecek ise o aç için 25 mm kalınlıkta analizi yapılan modelden elde edilen Kv 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 3.2.39).



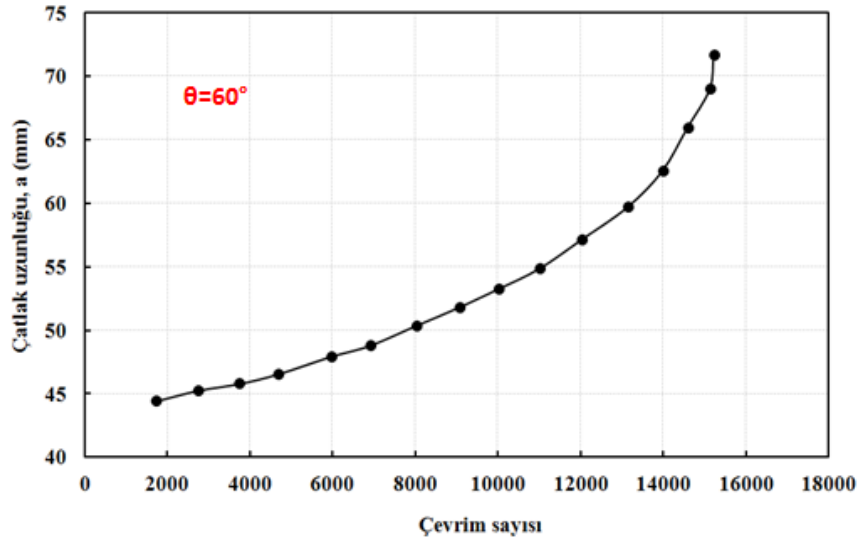
Şekil 3.2.39. Çatlak ilerleme testinden bir görünüm.

Mod-I/II çatlak ilerleme testlerinin ardından bilgisayara kaydedilen görüntülere göre çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunlukları tespit edilmiş ve $\theta=30^\circ$, 45° ve 60° yükleme açıları için elde edilen grafikler Şekil 3.2.40 'da verilmiştir.





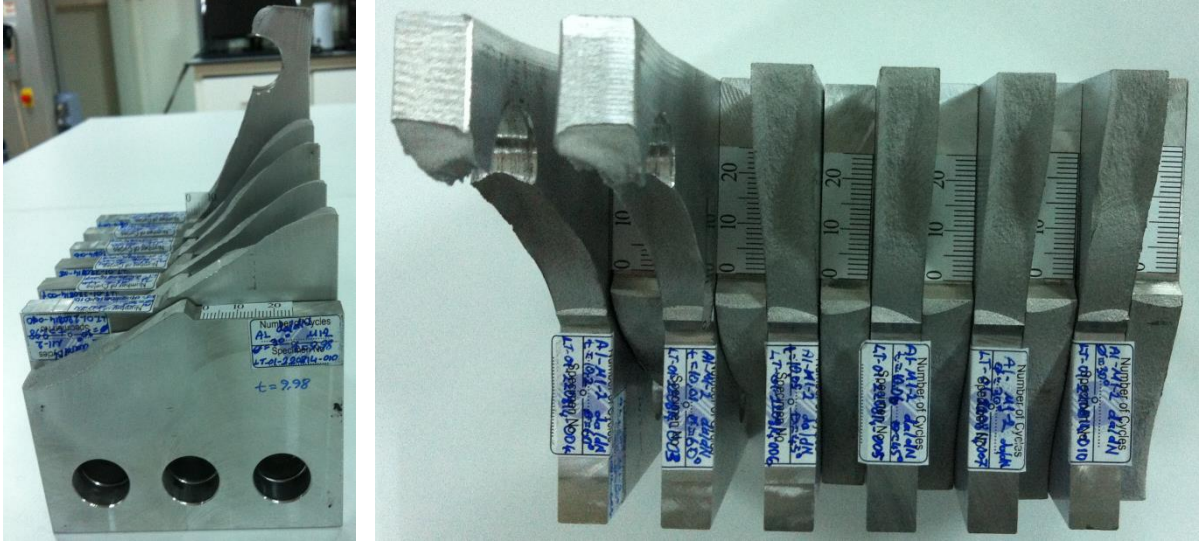
(b)



(c)

Şekil 3.2.40. Çevrim sayısına göre çatlak uzunluk değerlerinin değişimi, (a) $\theta = 30^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$ ve (c) $\theta = 60^\circ$.

Şekil 3.2.41'de deney sonucu numunelerin kırılan yüzeylerinin perspektif ve üst görünüşleri verilmiştir. Kırılan yüzeyler incelendiğinde, kırılma tokluğu testinde elde edilen yüzeyler gibi birbirini tekrar eden tutarlı ve beklenen çatak yüzey eğilimlerinin olduğu görülmektedir.



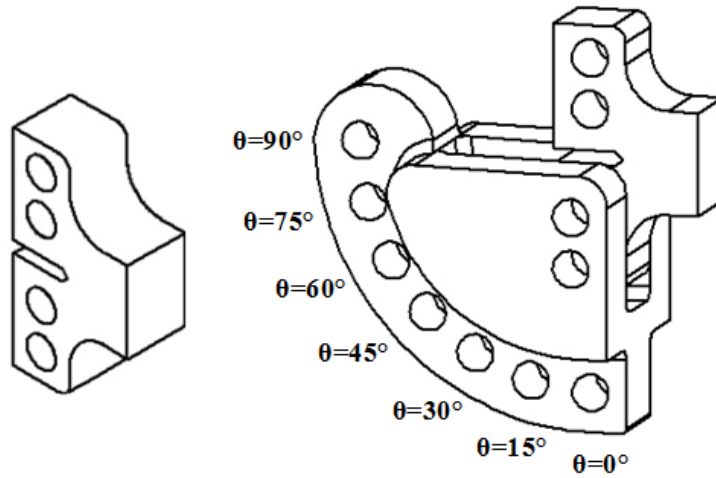
(a)

(b)

Şekil 3.2.41. Deney sonucu numunelerin kırılan yüzeylerinin perspektif ve üst görünüşleri sırasıyla verilmiştir.

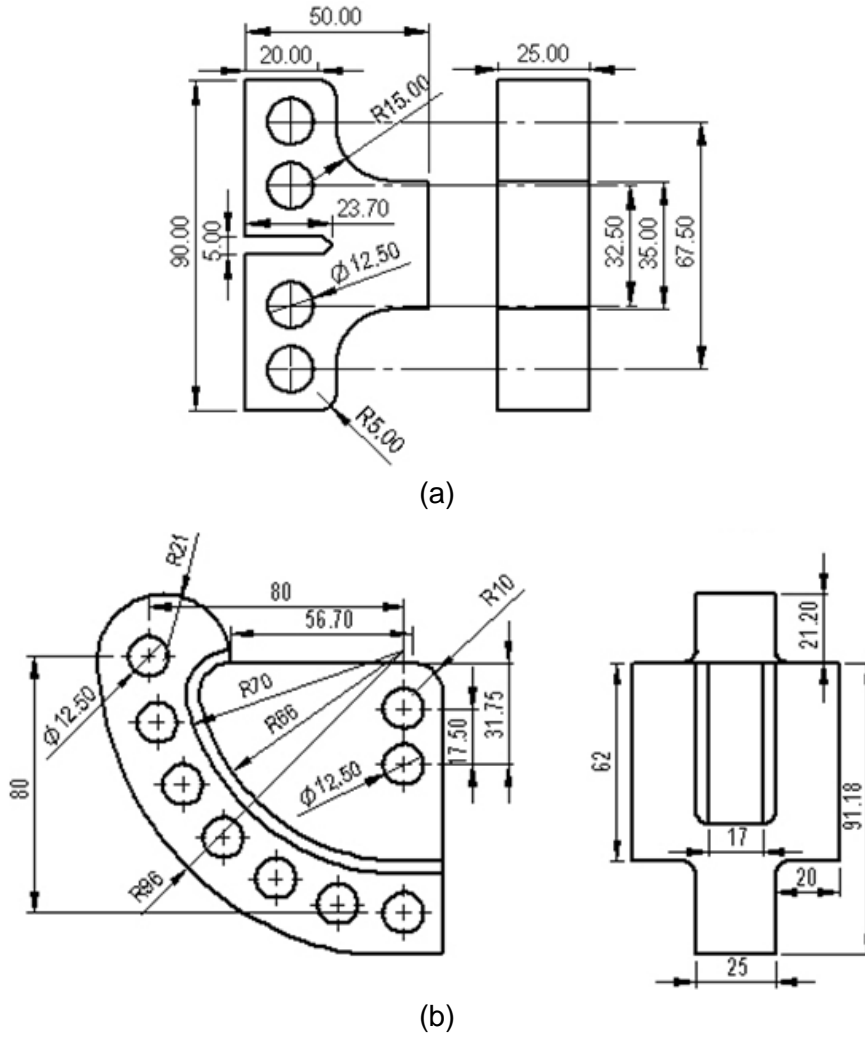
3.2.3.5 Mod-I/II T Numunesi (Yeni Numune)Tasarım ve Kırılma Analizleri

Proje önerisinde yer almamasına rağmen, yukarıda açıklanan ve 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 3.2.42). Burada amaçlanan, deneylerde kullanılan numune boyutlarını küçültürken malzemeden tasarruf sağlamak ve daha küçük numune boyutlarında daha yüksek GŞF değerleri elde etmektir.



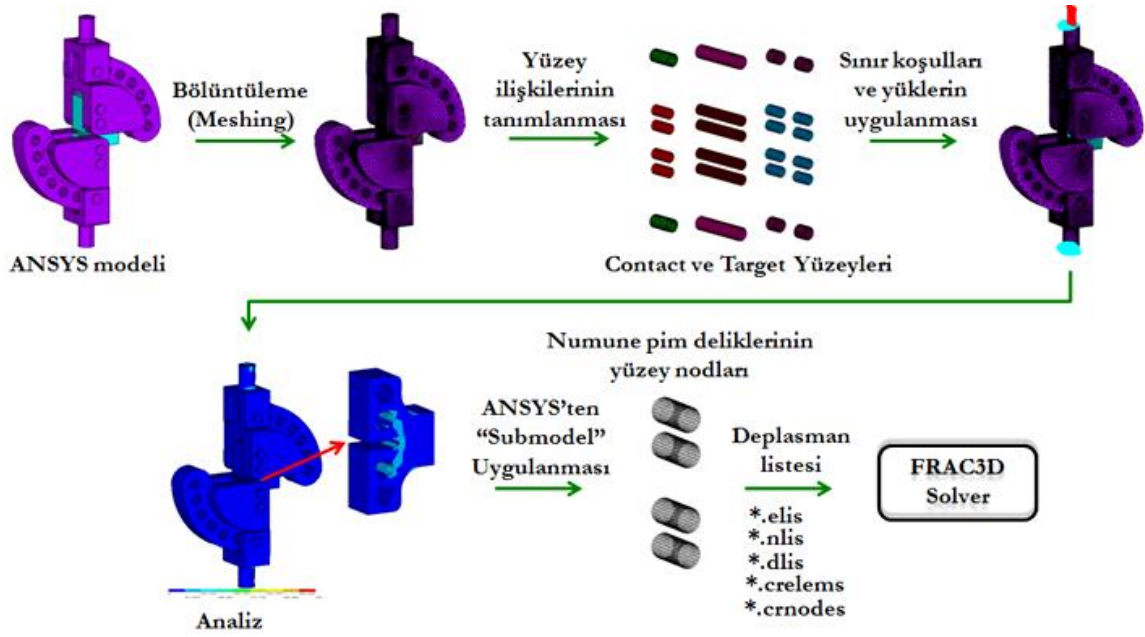
Şekil 3.2.42. Tasarlanan yeni numune ve uygun tutucu modeli.

Numune ile ilgili ön tasarım, gerilme ve kırılma analiz çalışmaları 2. dönem proje ara raporunun (113M407; Dönem-2) 2c.1 no.lu bölümünde detaylı olarak verilmiştir. Ön tasarım çalışmaları sonrasında numune ve tutucunun nihai boyutlarına karar verilmiş ve Şekil 3.2.43'te numune ve tutucunun belirlenen ölçüleri verilmiştir.



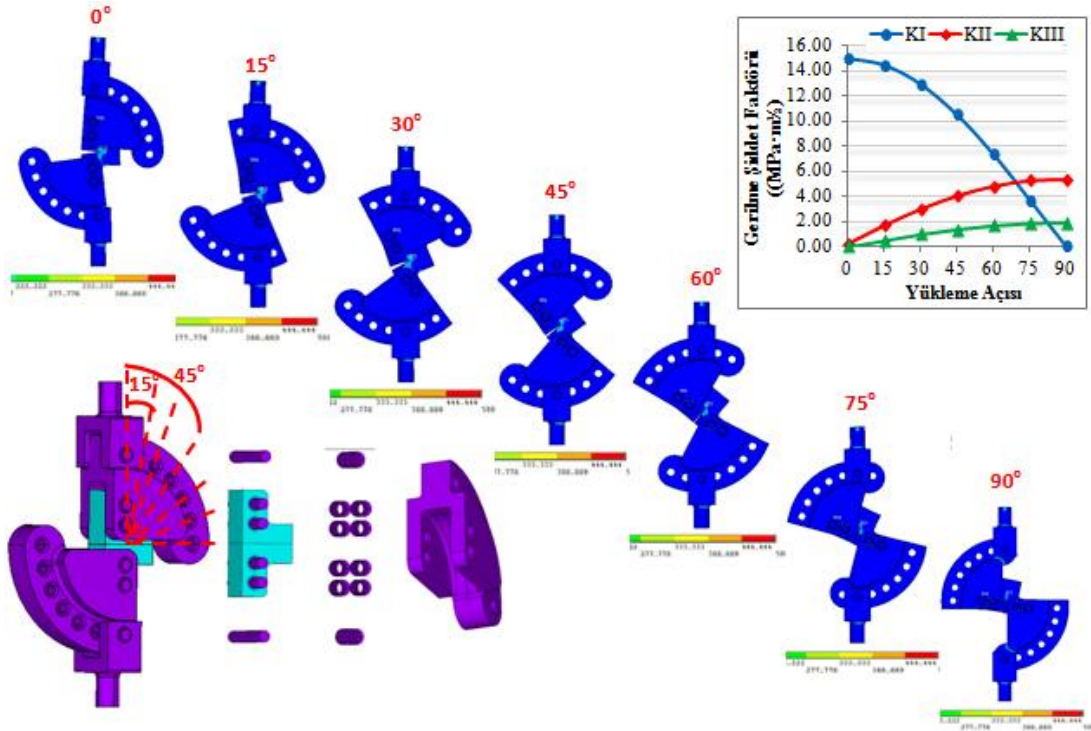
Şekil 3.2.43. Detaylı ölçüleri verilen (a) numune ve (b) tutucu modeli.

CTS numunesinde olduğu gibi T-numunesi için de farklı yükleme açılarında gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneyi birebir simüle etmek için analizler, tutucu ile pimler 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 3.2.3.1 'de analiz işlem adımları detaylı bir şekilde bahsedilmiş ve Şekil 3.2.44'te analiz adımları özet olarak verilmiştir.



Şekil 3.2.44. ANSYS ve FRAC3D programında gerçekleştirilen T-numune analizlerinin proses şeması.

CTS numunesinde olduğu gibi, T-numunesi için de farklı yükleme açılarında gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.45 '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 3.2.45. T-numune için gerçekleştirilen kırılma analizlerinden elde edilen çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörlerinin dağılımları.

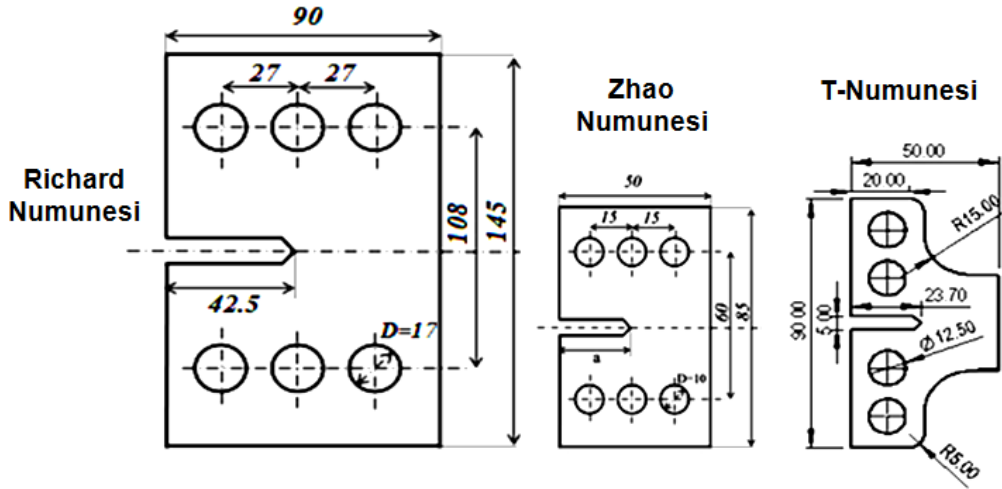
Çatlak derinlik yönünde daha hızlı ilerlediği için ve çatlağın sadece yüzeyden ilerlemesi kamera yardımıyla takip edilebildiği için, mod-I/II kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme deneylerinden önce oluşturulan ön çatlak uzunluğu her numunede aynı olmayıp az da olsa farklılıklar olmaktadır. Bu durum gerilme 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° yükleme açılarında 26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için de gerçekleştirilerek çatlak ucu merkezi için elde edilen KI, KII ve çatlak ucu kenarı için elde edilen KIII değerleri Tablo 3.2.11' de verilmiştir.

Tablo 3.2.11. $\theta=0, 15, 30, 45, 60, 75$ ve 90° yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizlerinden elde edilen KI, KII ve KIII değerleri.

	Çatlak Uzunluğu								
	25 mm			26 mm			27 mm		
	Gerilme Şiddet Faktörü ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)								
Yükleme Açısı (°)	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	-	-	-	-	-	-

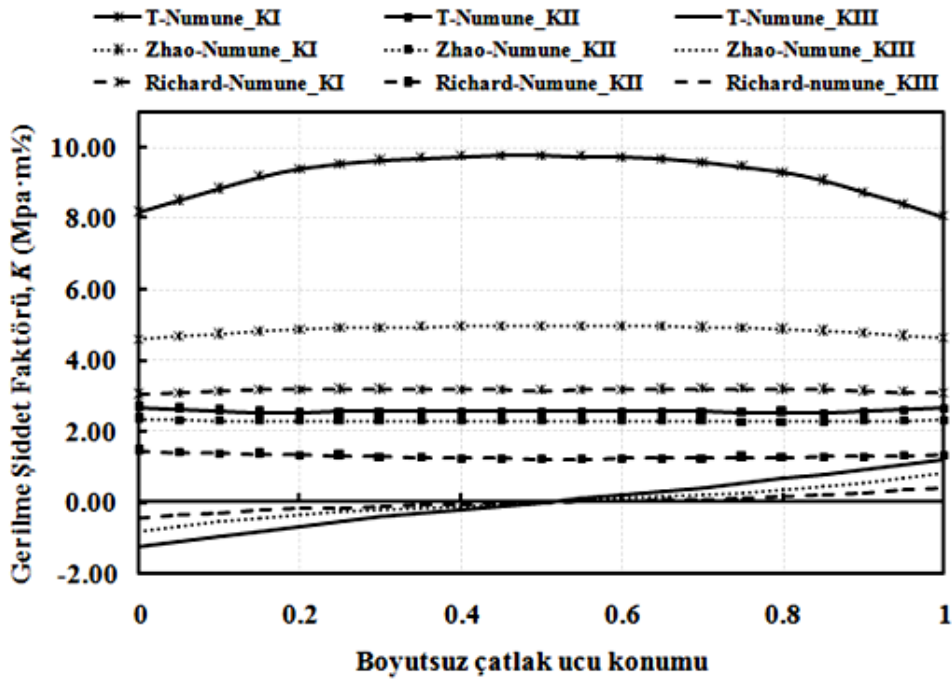
*K_{III} değerleri, çatlak ucu kenarı için elde edilmiştir.

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 (2012) 'nun geliştirmiş olduğu daha düşük boyutlara sahip CTS numunesi karşılaştırma analizlerinde kullanılmıştır. Şekil 3.2.46'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.



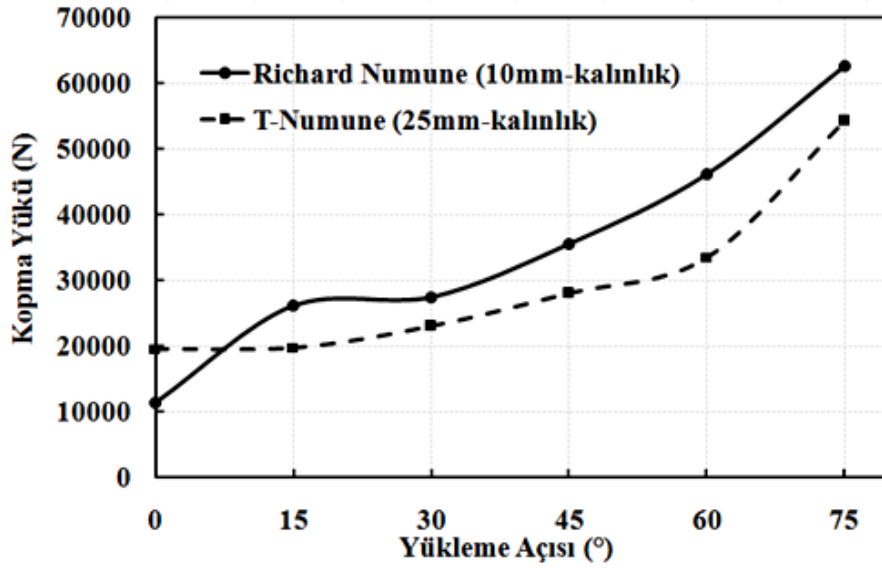
Şekil 3.2.46. Karşılaştırma analizlerinde kullanılan numunelerin detaylı ölçüleri.

Üç numune de 25mm kalınlıkta modellenerek ve buna uygun tutucular tasarlanarak her üç numuneye de $\theta=45^\circ$ yükleme açısında 10kN yük uygulanarak gerilme ve kırılma analizi gerçekleştirilmiştir. Kırılma analizi sonrasında elde edilen KI, KII ve KIII GŞF değerleri Şekil 3.2.47 'de verilmiştir.



Şekil 3.2.47. Kırılma analizlerinden 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-numunesi (25mm) 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 3.2.48 'de verilmiştir.



Şekil 3.2.48. CTS-10mm (Richard) ve T-25mm kalınlık ve farklı yükleme açıları için gerçekleştirilen kırılma deneylerinden elde edilen kopma yükü değerleri.

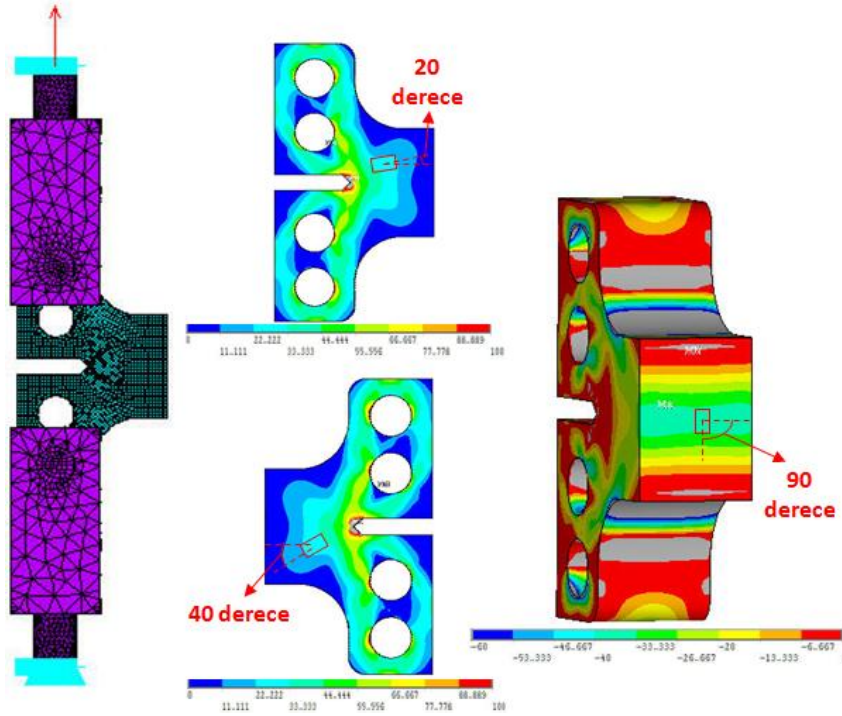
2.5 kat daha yüksek kalınlığa sahip olmasına rağmen $\theta=0^\circ$ hariç tüm yükleme açılarında T-numunesi için daha düşük kopma yükleri elde edilmiştir. Karşılaştırma aynı kalınlık durumu ele alınarak yapıldığında, CTS numunesi için elde edilen kopma yükleri 2.5 kat artacağı için T-numunesinin kopma yükleri açısından yüksek avantaj sağladığı görülmektedir.

3.2.3.6 Mod-I/II T-Numunesi Strain-Gage Doğrulama Çalışması

Sonuçları bir sonraki bölümde verilen T numunesine, öncelikle mod-I yüklemede 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 plane strain durumunun sağlandığı görülmüştür.

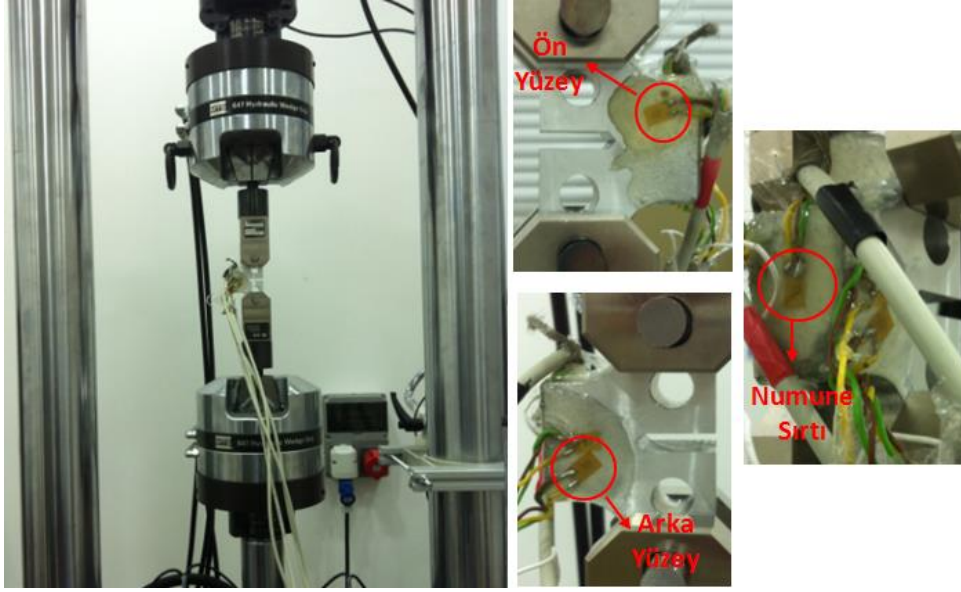
Simülasyon sonuçlarının deney sonuçlarını karşılayıp karşılamadığını tespit etmek amacıyla, ön çatlaksız T numunesi ile strain-gage uygulaması gerçekleştirilerek, T numunesi ile ilgili ikinci bir doğrulama çalışması yapılmıştır.

Şekil 3.2.49 '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 3.2.49'da verilmiştir.



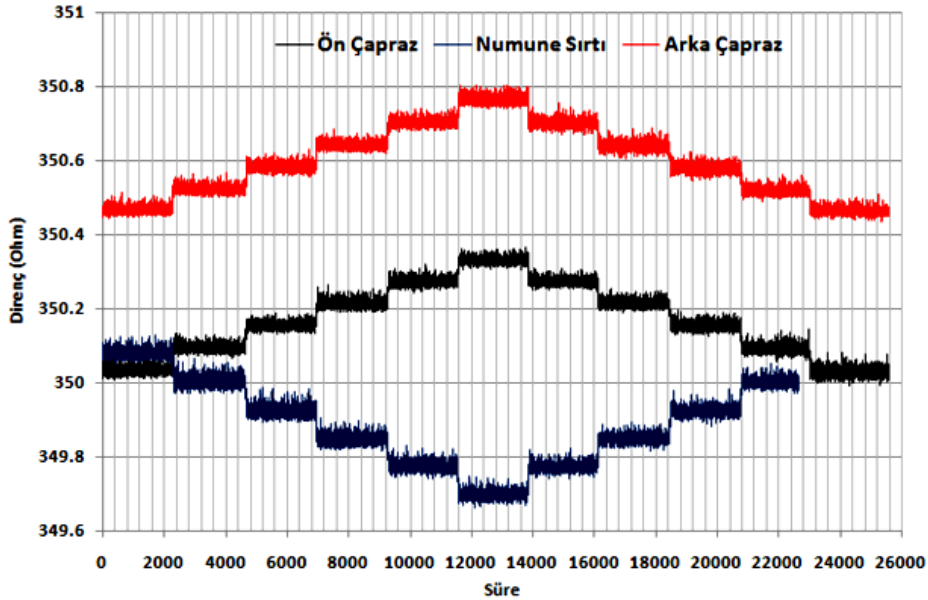
Şekil 3.2.49. Mod-I yüklemeye 10 kN yüklemeye gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numunedeki gerilmeler ve strain-gage yerleşim yerleri.

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 3.2.50' de deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gage'lerin 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 3.2.50. Mod-I yüklemesi altında 10 kN' ye 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 3.2.51 'de verilmiştir. Direnç değerlerinin değişiminin lineer bir şekilde değişim gösterdiği şekilden görülmektedir.



Şekil 3.2.51 T-numune için gerçekleştirilen deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği.

Tablo 3.2.12 'de T numunesi için her bir yük farkına karşılık gelen birim şekil değiştirme değerleri ölçülerek simülasyondan elde edilen strain değerleri ile karşılaştırılması verilmiştir.

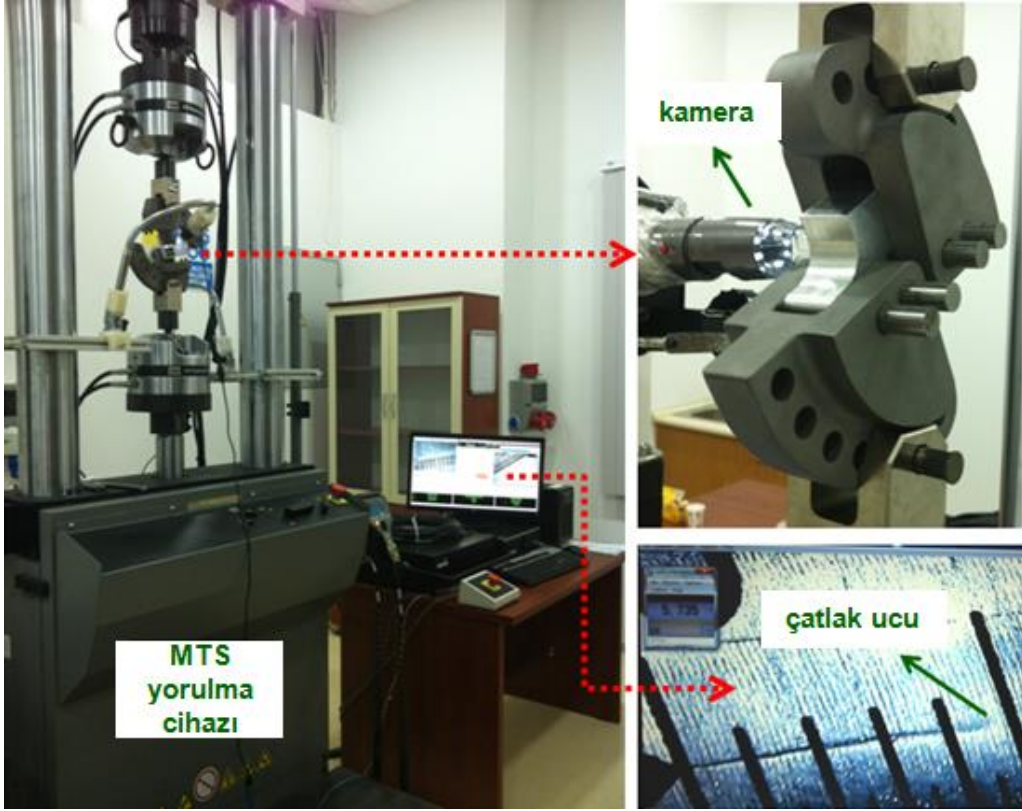
Tabloda son satırda yer alan 0-10 kN arası birim şekil değiştirme değeri referans alınarak numune ön yüzeyi için yapılan karşılaştırma değerlendirildiğinde yaklaşık %1 hata oranı ile simülasyon ve deney sonuçlarının birebir örtüştüğü görülmektedir. Numune sırtı ve ön yüzey için de genel eğilimin %3 ila %5 mertebelerinde olduğu görülerek gerçekleştirilen simülasyonlar her üç strain-gage ile doğrulanmıştır.

Tablo 3.2.12. 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 ϵ	0.000386	0.84	-0.000487	2.72	0.000351	-9.77
0-4 kN yüklemde ϵ	0.000384	0.34	-0.000499	5.10	0.000369	-5.39
0-6kN yüklemde ϵ	0.000386	0.86	-0.000494	4.21	0.000368	-5.43
0-8kN yüklemde ϵ	0.000382	-0.12	-0.000489	3.00	0.000375	-3.79
0-10kN yüklemde ϵ	0.000379	-0.91	-0.000487	2.54	0.000380	-2.54
	Ön Çapraz	% Fark	Numune Sırtı	% Fark	Arka Çapraz	% Fark
10 kN yüklemde ϵ (ANSYS Çözümü)	0.000383	-0.91	-0.000474	2.54	0.000390	-2.54

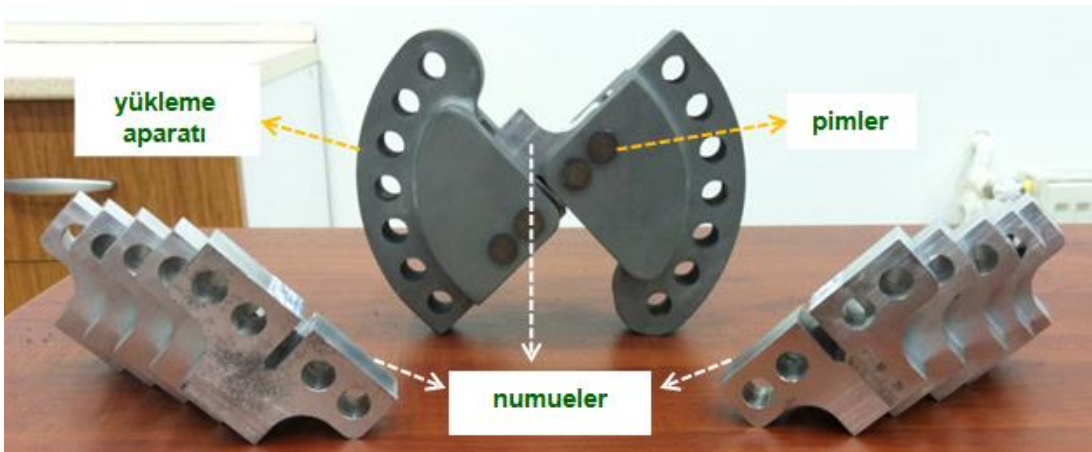
3.2.3.7 Mod-I/II T-Numunesi Kırılma Tokluğu Testleri

T-numune Mod-I/II kırılma tokluğu deneyleri, Sakarya Üniversitesi'nde bulunan MTS aksenal-torsiyonel yorulma cihazında (Şekil 3.2.52) gerçekleştirilmiştir.



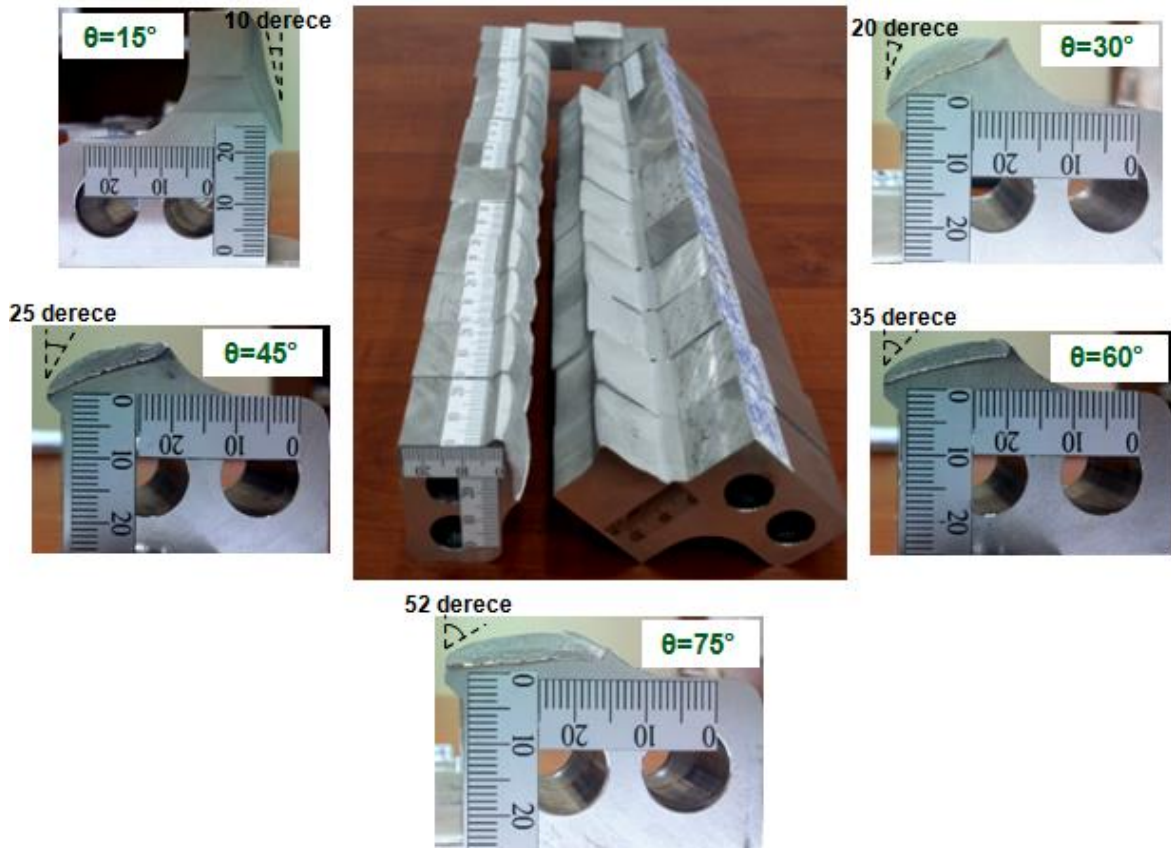
Şekil 3.2.52. T-numune kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kullanılan cihaz ve test sisteminin genel görünümü.

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 3.2.53 'te verilmiştir.



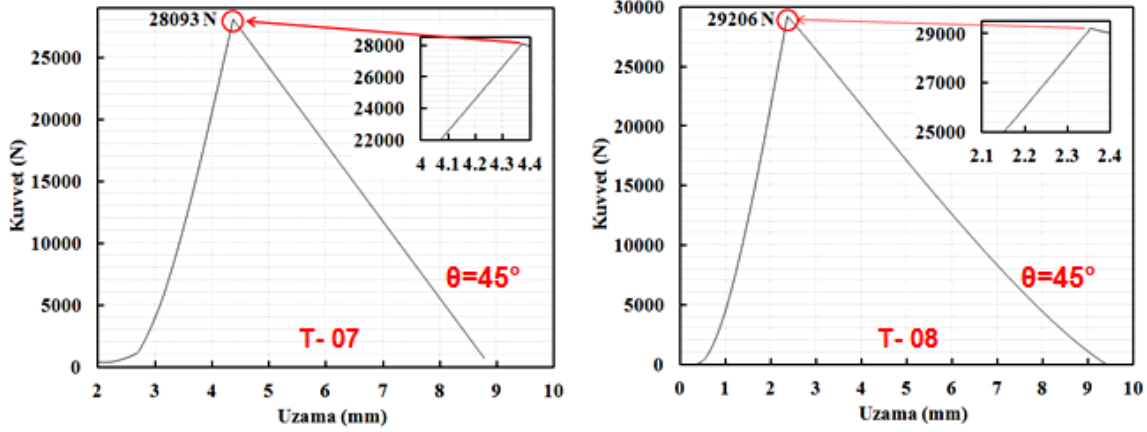
Şekil 3.2.53. T-numune kırılma ve çatlak ilerleme testlerinde kullanılan numune ve tutucuların genel görünümü.

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 2. dönem proje ara raporunun (113M407; Dönem-2) 2c.4 no.lu bölümünde 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 3.2.6 'da detaylı olarak verilmiştir. Kırılma tokluğu deneylerinde, $\theta=0^\circ$, 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° yükleme açılarında ikişer adet olmak üzere toplam 12 adet numune kullanılarak mod-I/II kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.54'te kırılma tokluğu testleri sonrası kırılan numunelerin yüzey görünüşleri farklı açılar için verilmiştir.



Şekil 3.2.54. 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 3.2.55'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 3.2.10 'da verilmiştir.



Şekil 3.2.55. Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrasında $\theta=45^\circ$ yükleme açısı için elde edilen kuvvet-uzama eğrileri.

Tablo 3.2.13. 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 3.2.6 'da detaylı bir şekilde verilmiştir.

3.2.3.8 Mod-I/II T-Numunesi Çatlak İlerleme Testleri

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

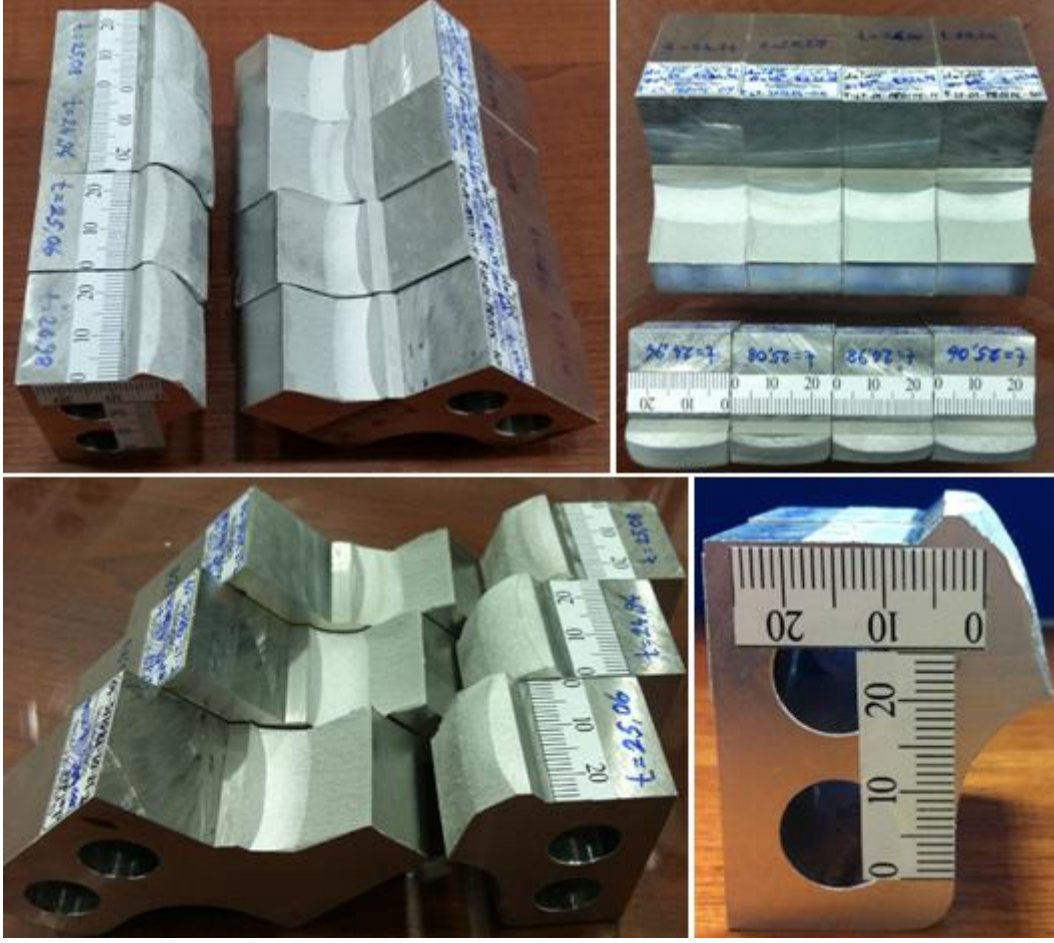
Mod-I/II çatlak ilerleme testlerinden önce her bir numuneye 1.3 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Ön çatlak oluşumu için uygulanması gereken yük miktarı ve aralığı, standartta yer alan;

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

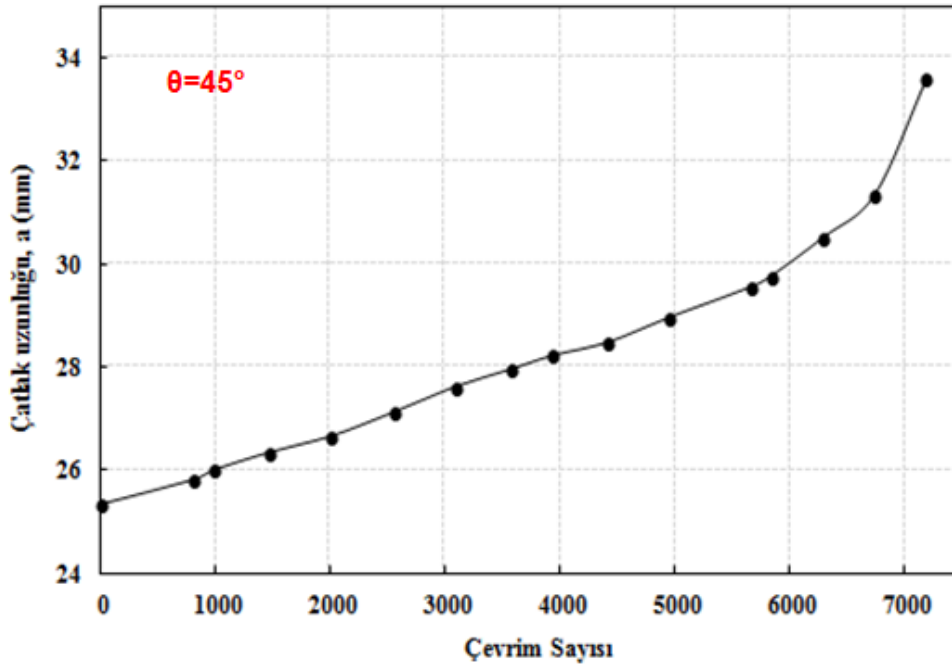
limitine göre belirlenmiştir. Yorulma ön çatlağı ve mod-I/II çatlak ilerleme testleri için gerekli yük aralıkları, CTS mod-I/II çatlak ilerleme testlerinde bahsedilen yöntemle göre belirlenerek gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.2.56'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 3.2.57'de $\theta=45^\circ$ yükleme açısı için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi için çevrim boyunca çatlak uzunluğunun değişimi verilmiştir.



Şekil 3.2.56. T-numune çatlak ilerleme deneyleri sonrasında numunelerin kırılan yüzeylerinin genel görünüşleri.

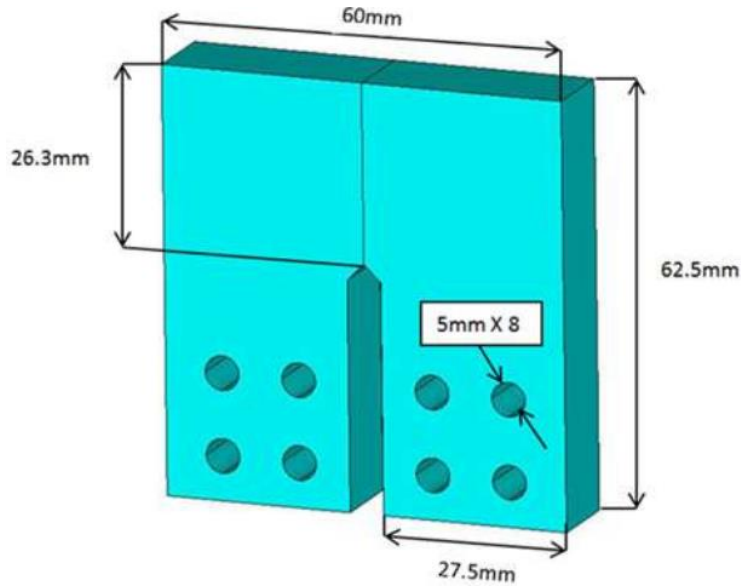


Şekil 3.2.57. $\theta=45^\circ$ yükleme açısında çevrim sayısına göre çatlak uzunluk değerlerinin değişimi.

3.2.4 Mod-I/III Kırılma ve Çatlak İlerleme Testleri

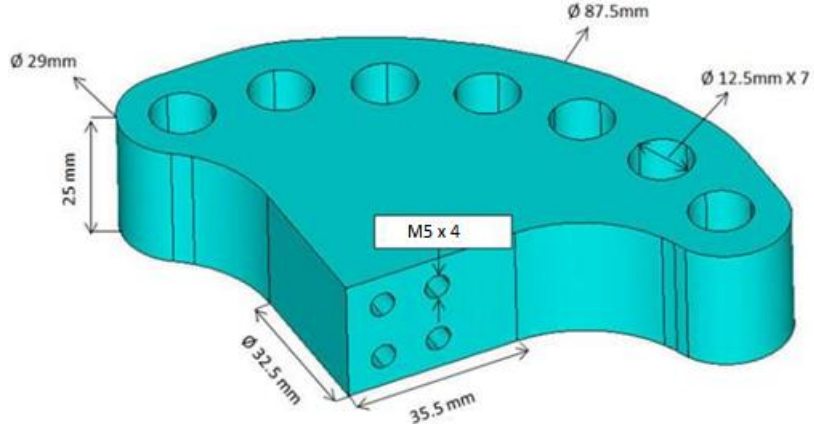
3.2.4.1 Mod-I/III Kırılma Analizleri

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 (yırılma) yüklemesi sağlanmıştır. Üzerinde civata deliği bulunan bu numune Compact Tension Tear (CTT) numunesi olarak adlandırılmıştır. Şekil 3.2.58'de numunenin detaylı görünüşü verilmiştir. Analizler 12.5mm, 20mm ve 25mm et kalınlığındaki CTT numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla Şekil 3.2.58'de et kalınlığı belirtilmemiştir.



Şekil 3.2.58. Mod-I/III numunesi.

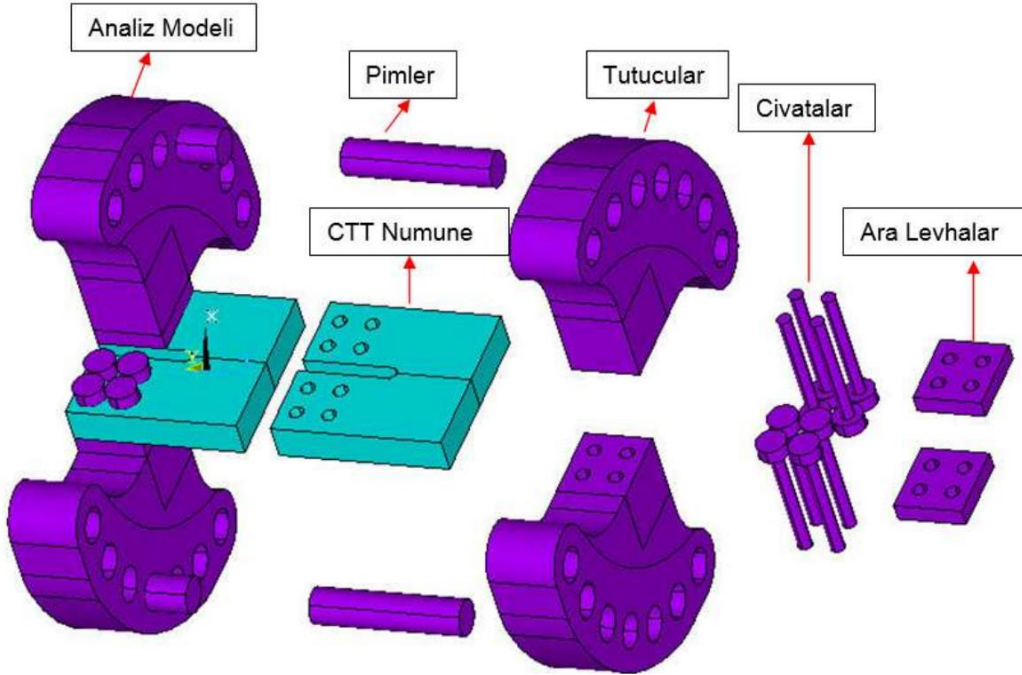
CTT deney numune tutucusu 25mm et kalınlığına sahip numuneler için tasarlanmıştır. Daha düşük et kalınlığına sahip numuneler için ise ara plakalar kullanılarak aynı tutucu ile deneyler yapılabilmektedir. Bu sayede tek bir tutucu ile farklı kalınlıktaki numuneler test edilebilmektedir. CTT numune tutucusu 7 farklı açıda ($\theta = 0^\circ - 15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ - 90^\circ$) yükleme yapabilmek için tasarlanmıştır. Bu tutucunun 0° pim deliğinden yüklenmesi sadece Mod-I, 90° pim deliğinden yüklemesi ise numune üzerine sadece Mod-III yüklemesi sağlamaktadır. Ara açılarda ise Mod-I ve Mod-III yüklemeleri aynı anda farklı oranlarda uygulanmaktadır. Şekil 3.2.59'da CTT numune tutucusunun detaylı ölçüleri ve resmi verilmiştir.



3.2.59. Mod-I/III numune tutucusu.

3.2.4.2 Mod-I/III Kırılma Analizleri

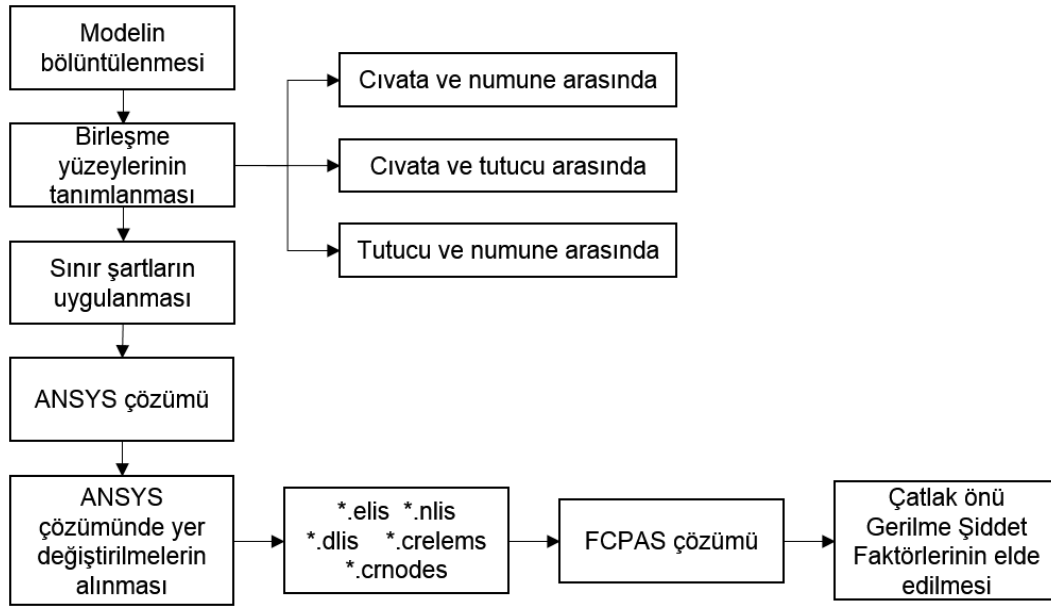
Şekil 3.2.60'da analiz modelinin tüm öğelerinin bulunduğu bir detay resim verilmiştir. Bu detay resim 12.5mm et kalınlığına sahip CTT deney numunesinin 45 derece açıyla yüklemeye maruz kaldığı analizden alınmış bir şablondur.



3.2.60. 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 (12.5mm ve 20mm 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 (Fracture and Crack Propagation Analysis System) çözücüsü FRAC3D kullanılarak çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerleri hesaplanmıştır. GŞF'nin eşdeğer gerilme şiddet faktörü (K_{es}) değerine ulaşması için gereken yükler ve bu yüklerde tutucu, pim, civata, ara levha ve numunede oluşması beklenen gerilmeler belirlenmiştir. ANSYS'te gerçekleştirilen analiz sonrasında numune deliklerinin yüzeyleri ile numune ön ve arka yüzelerindeki 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 gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerleri bu şekilde hesaplanmaktadır. Şekil 3.2.61'de, yukarıda tarif edilen analiz prosedürü akış şeması şeklinde verilmektedir.



Şekil 3.2.61. Mod-I/III analiz prosedürü.

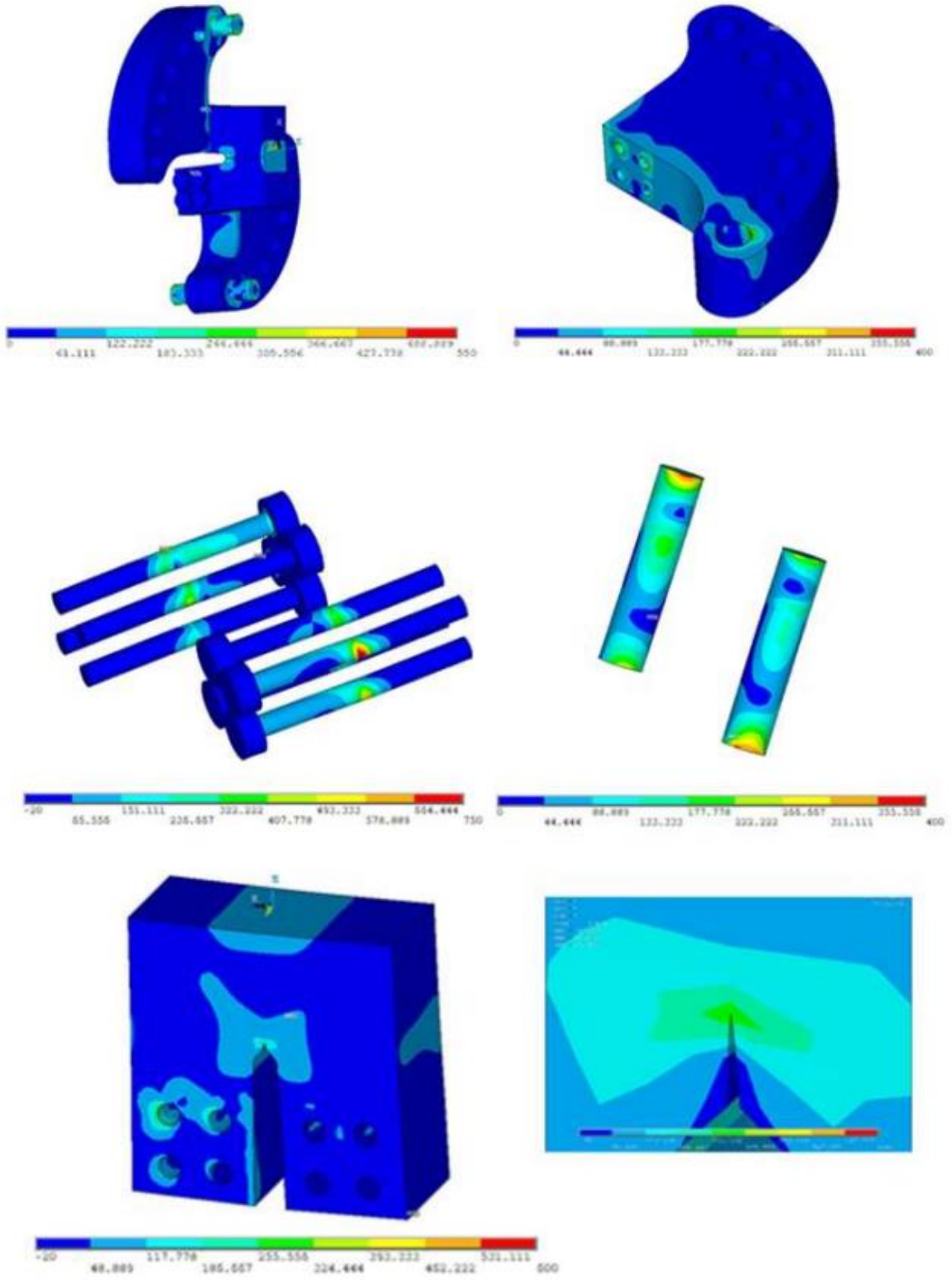
Şekil 3.2.61'de tanımlanan analizler, kontak tipinin, civata ve pimlerin varlığının yapılan analizlerde gerilme şiddet faktörlerine etkisini incelemek amacıyla farklı durumlarda tekrarlanmış ve birbirleriyle mukayese edilmiştir. Analiz edilen durumlar Tablo 3.2.14'te verilmiştir. Tablodaki her bir madde ayrıntılı olarak alt başlıklar halinde incelenmiştir.

Tablo 3.2.14. Farklı kontak tipleri için yapılan analizler

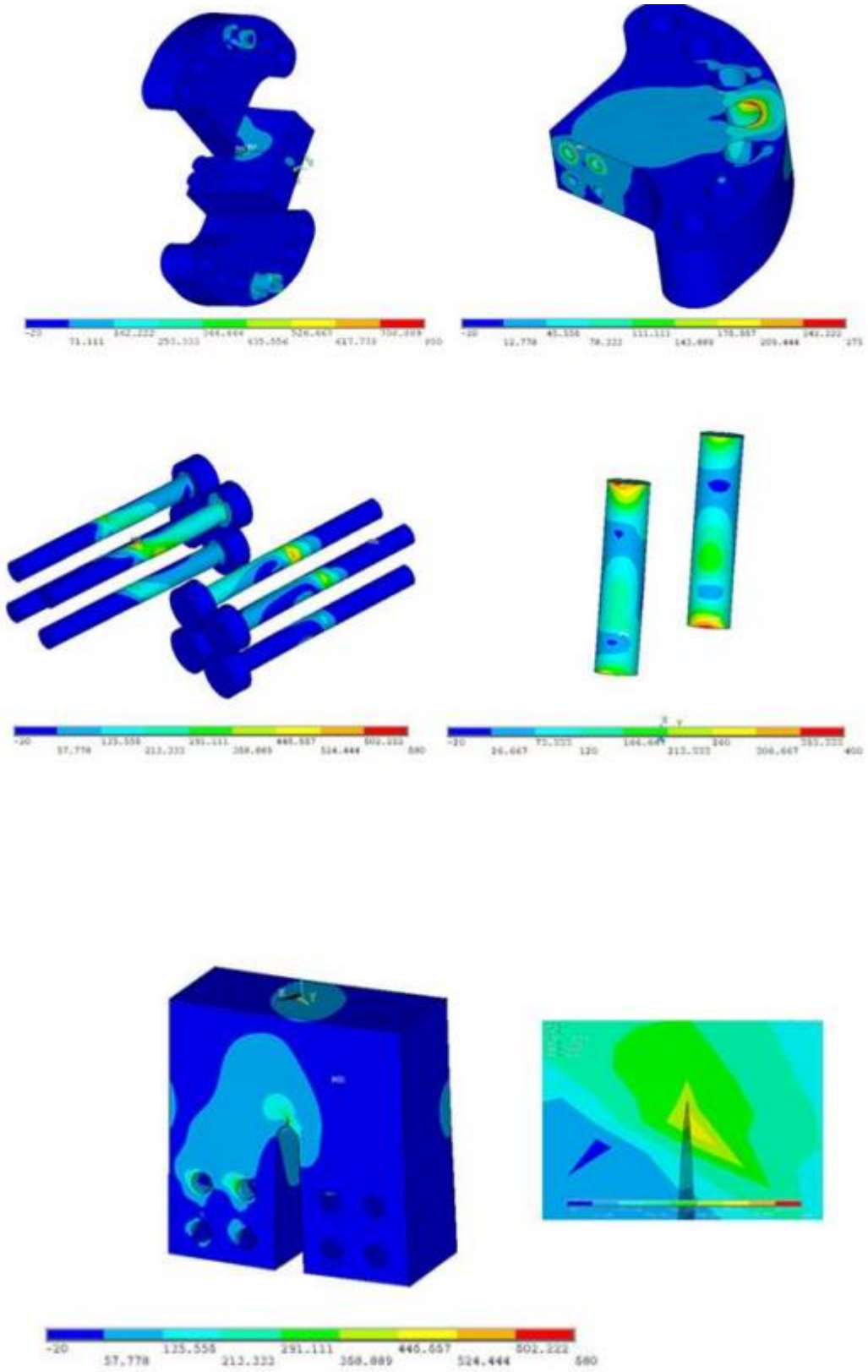
	Tekrar Edilen Analizler
1	Standart – bonded always kontak tipi kullanılarak yapılan analizler
2	Sadece bonded always kontakt tipi kullanılarak yapılan analizler
3	Sadece pimlere standart kontakt tipi kullanılarak yapılan analizler
4	Kontakt kullanmadan yapılan analizler
5	Strain gage ölçümleri için yapılan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

3.2.4.3 Gerilme Analizi Sonuçları

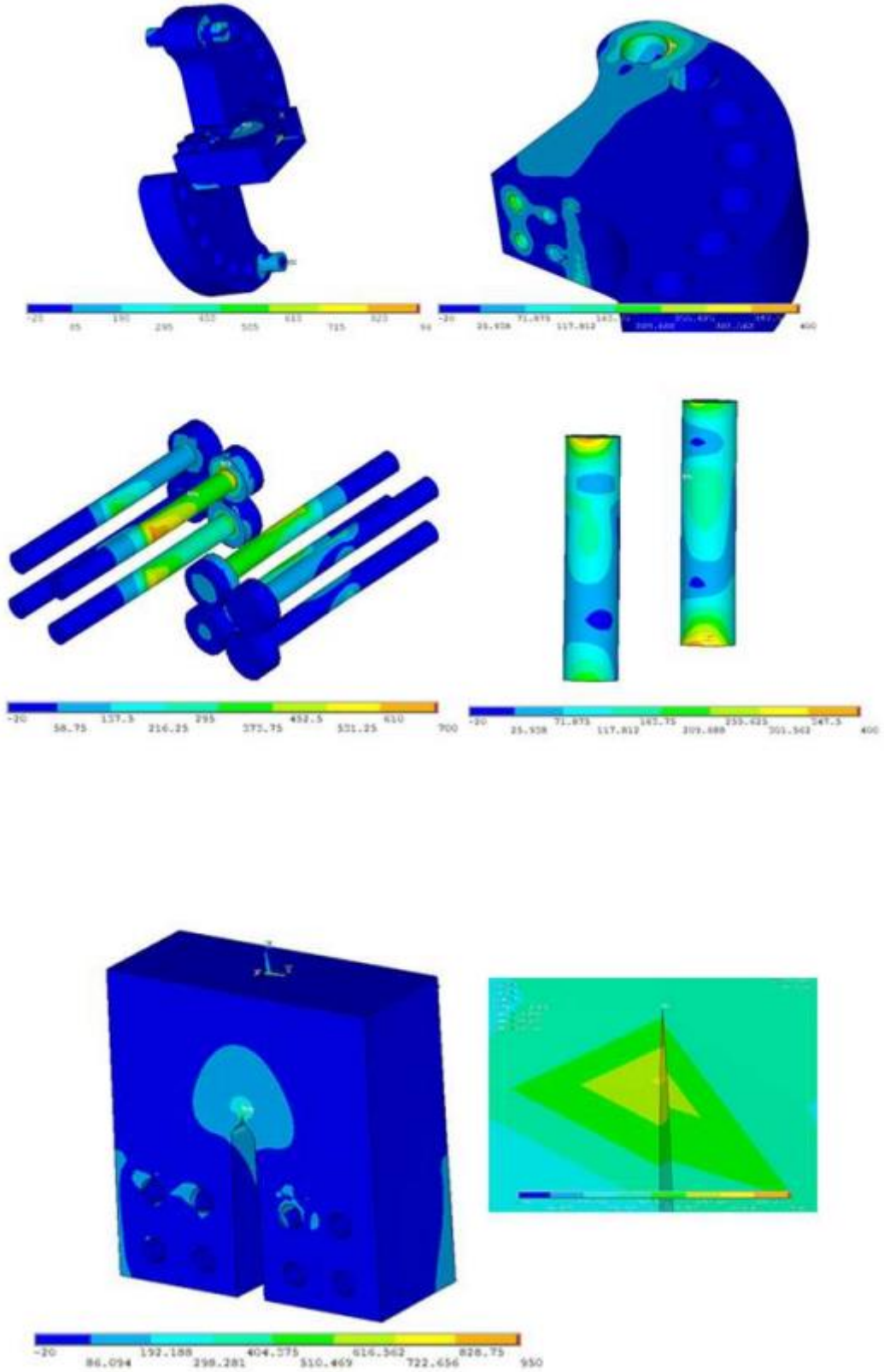
25 mm et kalınlığına sahip CTT numunesinin 10 kN yükleme altında 7 farklı açı için (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) analizleri yapılan modeldeki tüm parçaların (CTT numune, CTT numune tutucusu, civatalar ve pimler) Von Misses Gerilme Analizi sonuçları Şekil 3.2.62 - Şekil 3.2.64'te verilmiştir. Gerilme analizlerinden de görüldüğü gibi yükleme açısı 0° den 90°'ye değıştikçe CTT Numunesi ve civatalarda gerilme artışı gözlenmektedir. Pimlerde ve CTT numune tutucularında ise bu gerilme değışimi oldukça küçüktür. Bu gerilme değeri göz önüne alındığında CTT numunesi için Al 7075-T651, tutucular için 4140 Çeliği ve pimler için de HSS Çeliği kullanılması uygun görülmüştür. CTT numunesinin 25mm, 20mm ve 12.5mm et kalınlığına sahip tüm analizleri için gerilme dağılımlarındaki değışim birbirine çok yakın değeri izlediği için sadece 25mm et kalınlığına sahip CTT numunesinin bulunduğu modeldeki tüm parçaların bazı yükleme açıları için Von Misses gerilmeleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.2.62. 25 mm et kalınlığı ve 0 derece yükleme durumu için gerilme analizi sonuçları



Şekil 3.2.63. 25 mm et kalınlığı ve 45 derece yükleme durumu için gerilme analizi sonuçları

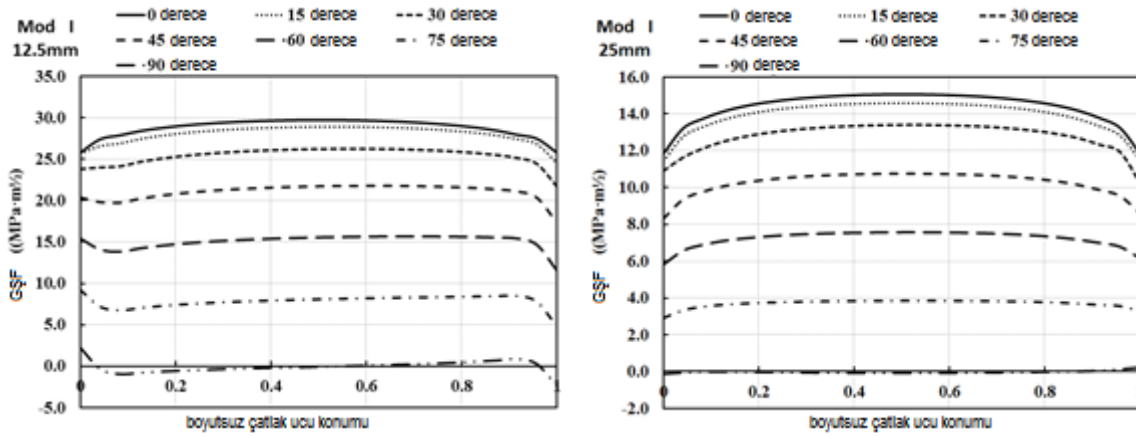


Şekil 3.2.64. 25 mm et kalınlığı ve 90 derece yükleme durumu için gerilme analizi sonuçları

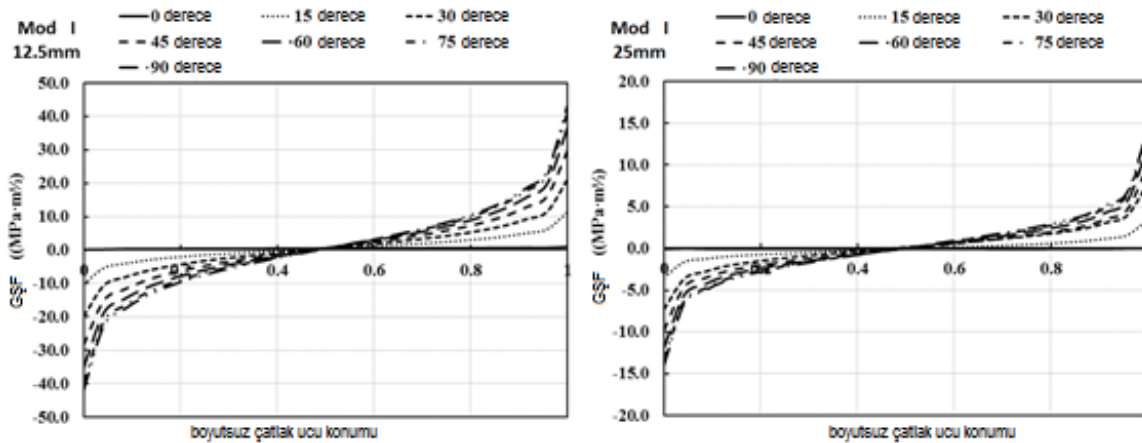
3.2.4.4 Gerilme Şiddet Faktörü Değerleri

FCPAS ile kırılma analizi yapılan CTT numunesinin 7 farklı açı ve $t=25\text{mm}$, $t=20\text{mm}$ ve $t=12.5\text{mm}$ et kalınlıkları için elde edilen gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.2.65 – Şekil 3.2.67’de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere yükleme açısı arttıkça, verilen bir çatlak uzunluğu için mod-I gerilme şiddet faktörü azalmakta, mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörleri ise artmaktadır.

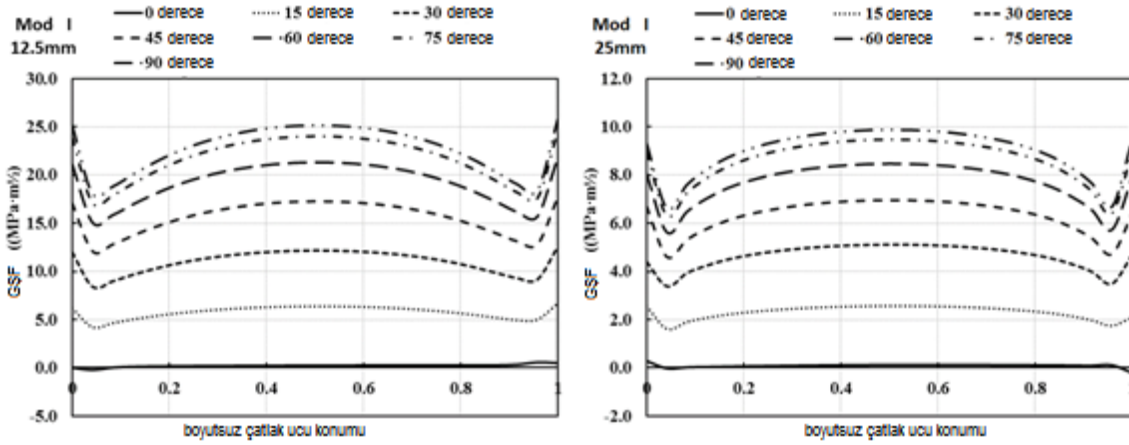
0, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 derecede uygulanan 10 kN’luk çekme kuvvetleri için, 12.5mm et kalınlığından 25mm et kalınlığına çıktığında ise KI gerilme şiddet faktörlerinde yaklaşık 2 kat, KII gerilme şiddet faktörlerinde yaklaşık 2.9 kat, KIII gerilme şiddet faktörlerinde yaklaşık 2.5 kat azalma gözlenmiştir. Özellikle 12.5mm ve 25mm et kalınlıklarındaki KI gerilme şiddet faktörleri kıyaslandığında et kalınlığındaki 2 kat artışın lineer olarak KI gerilme şiddet faktörlerinde %1 gibi kabul edilebilir bir farkla 2 kat azalmaya sebep oluşu yapılan analizlerin doğruluğunu desteklemektedir.



Şekil 3.2.65 . Farklı yüklemeye açılarındaki KI gerilme şiddet faktörü değerleri



Şekil 3.2.66 . Farklı yüklemeye açılarındaki KII gerilme şiddet faktörü değerleri.



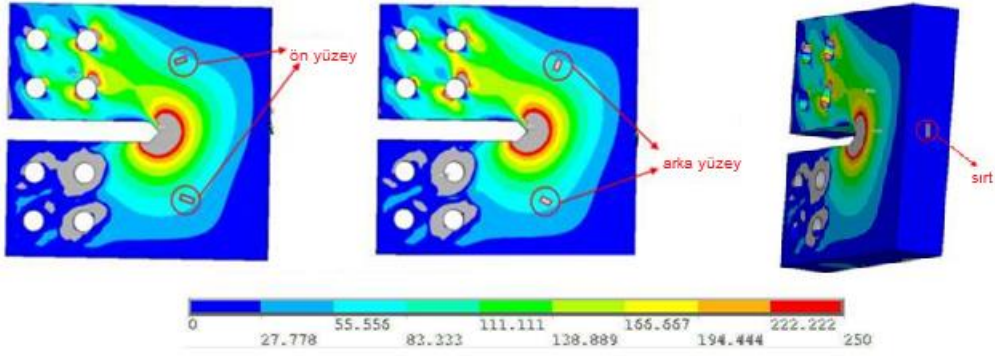
Şekil 3.2.67 . Farklı yükleme açılarında KIII gerilme şiddet faktörü değerleri.

Bu gerilme şiddet faktörlerine bakılarak Mod-III yükleme açısı arttıkça KIII gerilme şiddet faktörü değeri artmakta ve KI gerilme şiddet faktörü değeri azalmakta ve KII gerilme şiddet faktörü değeri çatlak ucu boyunca sabit kalmaktadır. Tam Mod-III yükleme durumunda ise KI gerilme şiddet faktörü yaklaşık olarak 0 değerine ulaşmaktadır.

Mod-III yükleme açısı arttıkça, Mod-II gerilme şiddet faktörü 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 gerilme şiddet faktörü artmakta ve çatlak ucu boyunca yaklaşık sabit kalmaktadır.

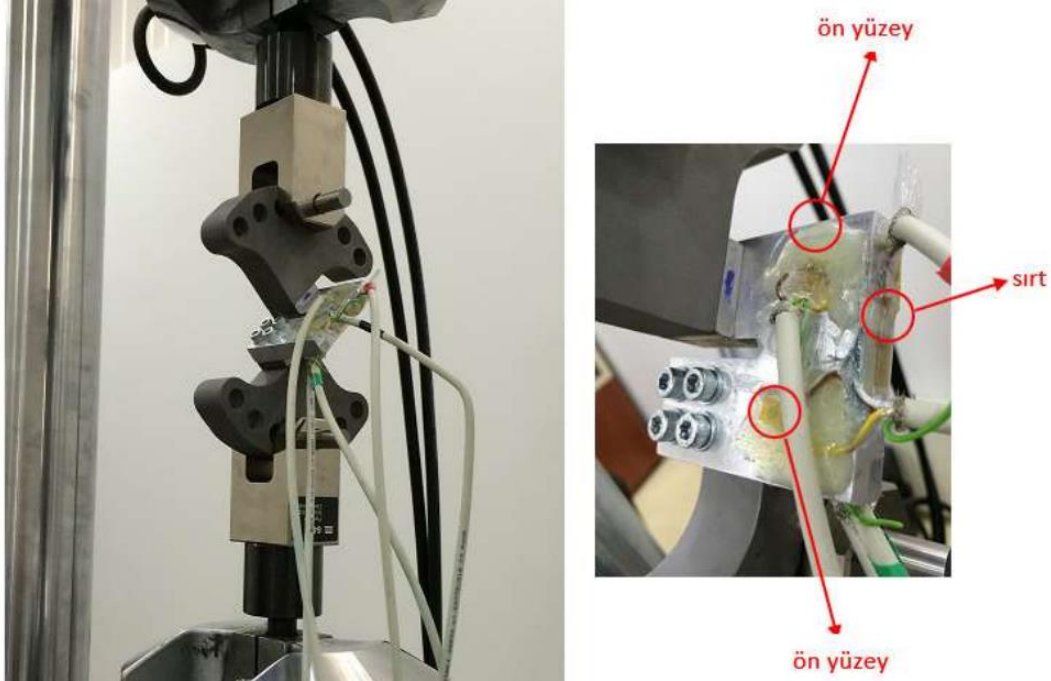
3.2.4.5 Mod-I/III Numunesi için Strain-Gage Doğrulama Çalışmaları

Analiz sonuçları ile deney sonuçlarını karşılaştırmak için ön çatlaksız Mod-I/III CTT numunesi ile strain-gage uygulaması gerçekleştirilerek bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.68'de görünen strain-gage'lerin yerleşim konumları, 45°'lik Mod-I/III yükleme durumunda elde edilen asal gerilmeler yönlerine göre belirlenmiş ve numune üzerine yapıştırılmıştır. Numunenin 5 noktasına strain-gage yerleştirilmiştir. Şekil 3.2.69'da deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü verilmiştir. Deney numunesinde 0' dan başlayarak 1'er kN artırılarak 6 kN yüke çıkılmış, daha sonra 1'er kN azaltılarak yüksüz konuma getirilmiştir.

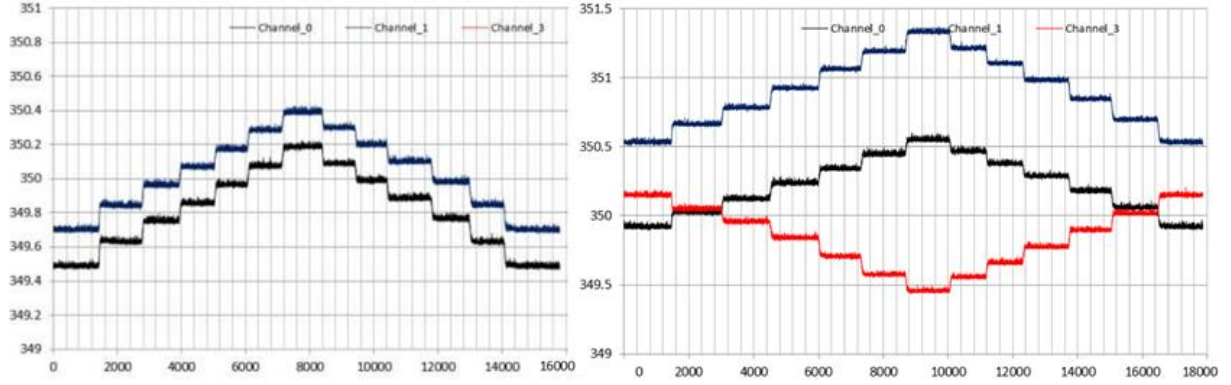


Şekil 3.2.68. 6 kN Mod-I/III (45°) yüklemde gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numunede oluşan 1. asal gerilmeler ve strain-gagelerin yerleştirildiği yerler.

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 3.2.70'de verilmiştir. İkinci aşamada numune ön yüzeyi ve sırtındaki birim şekil değişimi değerleri alınmıştır. Şekil 3.2.71'den direnç değerlerinin lineer bir şekilde değişim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.2.69. 45° mod-I/III yüklemesi altında 6 kN'a kadar değişen yüklerde gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü



Şekil 3.2.70. Mod-I/III CTT numune için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana (yüke) bağlı değişim grafiği

Tablo 3.2.15. 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 %
Strain for 0-1 kN	0.001865876	77.39834964	0.00186851	38.2339858
Strain for 0-2 kN	0.001728691	64.35550062	0.00172484	27.60533285
Strain for 0-3kN	0.00160815	52.89507957	0.00161658	19.59572606
Strain for 0-4kN	0.001563359	48.63652417	0.00155077	14.72737985
Strain for 0-5kN	0.001539689	46.3861362	0.00153594	13.63054055
Strain for 0-6kN	0.001532517	45.70424312	0.00151398	12.00570955
	Arka yüz 1	Fark %	Arka yüz 2	Fark %
Strain of Ansys Solution for 10 kN	1.0518E-03	45.70	1.3517E-03	12.01

	Ön yüz 1	Fark %	Ön yüz 2	Fark %	Sırt	Fark %
Strain for 0-1 kN	0.00138274	30.74323868	0.00170724	30.52280581	-0.001317728	-7.638039957
Strain for 0-2 kN	0.001324245	25.21226909	0.00163541	25.03106811	-0.001262057	-11.54014901
Strain for 0-3kN	0.001382237	30.69565835	0.00170794	30.57663076	-0.001361174	-4.592871474
Strain for 0-4kN	0.001378794	30.37006464	0.00173684	32.786154	-0.001460275	2.353353318
Strain for 0-5kN	0.001383208	30.78746733	0.00172576	31.93901791	-0.001516174	6.271404284
Strain for 0-6kN	0.001380165	30.49969918	0.00174953	33.75605971	-0.001523119	6.758191376
	Ön yüz 1	Fark %	Ön yüz 2	Fark %	Sırt	Fark %
Strain of Ansys Solution for 10 kN	1.0576E-03	30.50	1.3080E-03	33.76	-1.4267E-03	6.758191376

Tablo 3.2.15'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 görülerek gerçekleştirilen simülasyonlar her üç strain-gage ile de doğrulanmıştır.

3.2.4.6 Mod-I/III Kırılma Testleri

Mod-I/III testlerinde kullanılmak üzere Compact Tension Tearing numunesi hazırlanmıştır. Şekil 3.2.71'de CTT numunesine ait bir görüntü verilmiştir. Numunenin tasarımında literatürde bulunan standart Compact Tension (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 yırtma yükünü kaydırmaksızın numuneye uygulamaktadır. Şekilde görülen dört cıvata deliğinin merkezi ile çentik ucu arasındaki mesafe 23.7 mm olarak ayarlanmıştır. Bu mesafe, standart CT (compact tension) numunesinde de aynıdır.



Şekil 3.2.71. 12.5 mm kalınlıktaki mod-I/III CTT numunesi.

Mod-I/III CTT deney numunesi için değişik açılarda ($\theta = 0^\circ - 15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ - 90^\circ$) yükleme yapabilen tutucu üzerinde değişiklik yapılmaksızın mod-II/III (90° yükleme) 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 3.2.72'de verilmiştir.



Şekil 3.2.72. Mod I-III CTT numune tutucusu. Wei vd. (2011), Deng X vd. (2014)

3.2.4.7 Deneysel Yöntem

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.

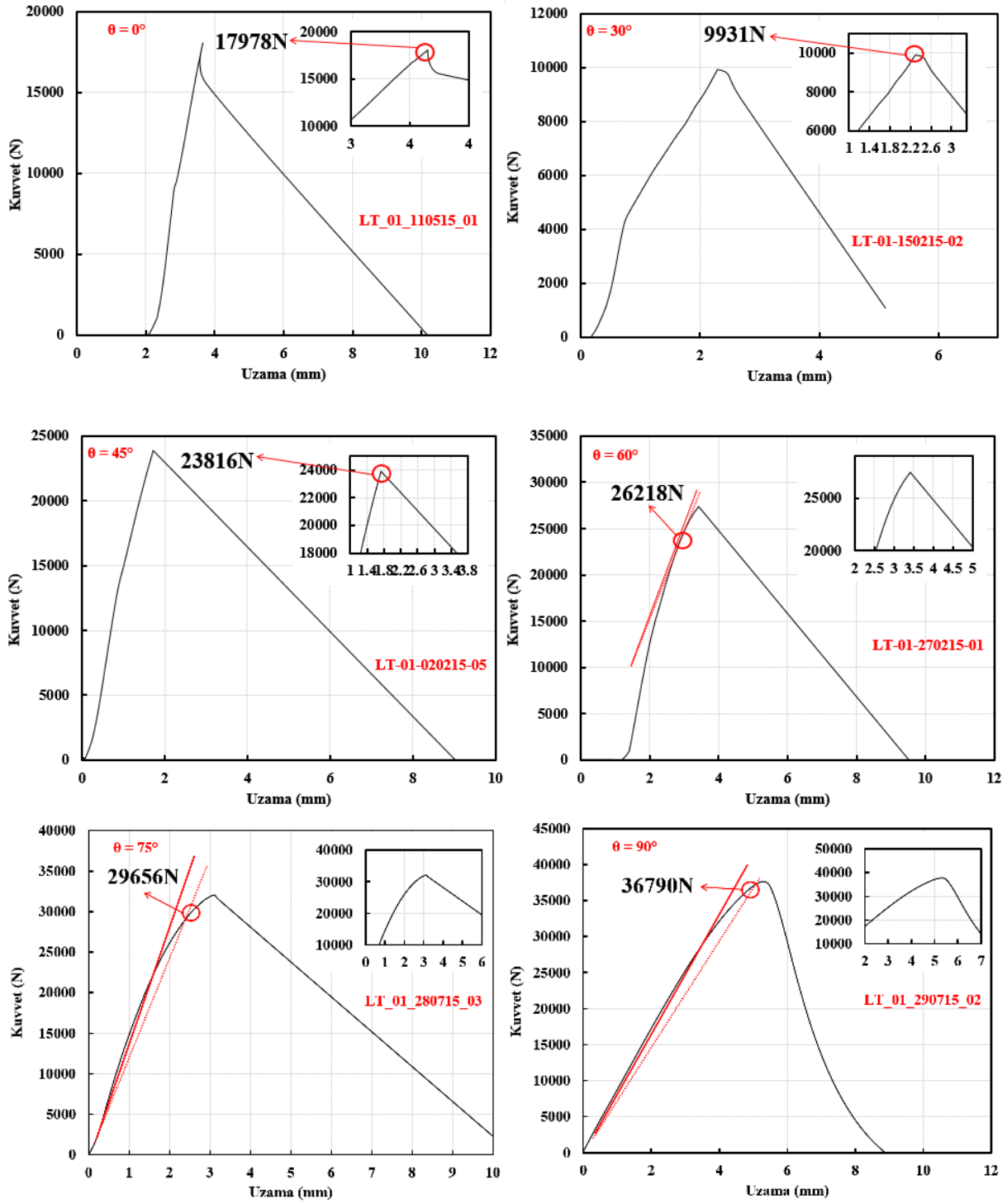
Testlerin tüm aşamaları ASTM E399-12 standardına uygun bir şekilde yapılmıştır. Buna göre yorulma ön çatlağı oluşturulurken istenen limitler arasında kalabilmek için, maksimum K değeri kırılma tokluğu "Kıc" değerinin yarısını geçmeyecek şekilde yük aralığı belirlenmiştir. R-oranı (K_{min}/K_{max}) 0.1 alınmıştır. Prosedürler projemizde yapılan diğer deneylerle benzerlik göstermektedir. İlgili detaylar Bölüm 3.2.2 ve 3.2.3'te verilmiştir.

Tablo 3.2.16'da, yapılan geçerli kırılma tokluğu testlerinin detayları verilmiştir. Şekil 3.2.73 ve 3.2.74'te ise, 25 mm ve 12.5 mm kalınlıklarındaki numuneler üzerinde yapılan Mod-I/III

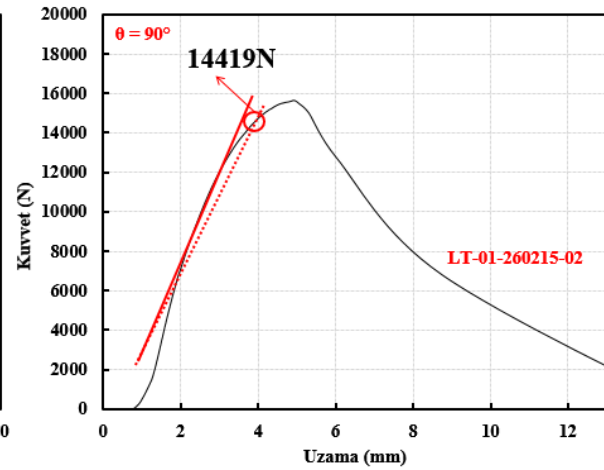
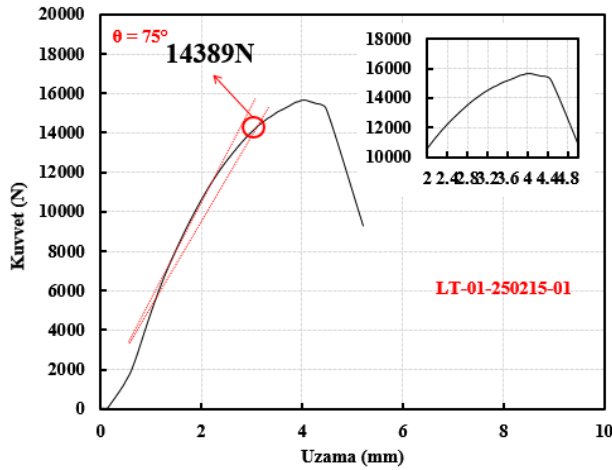
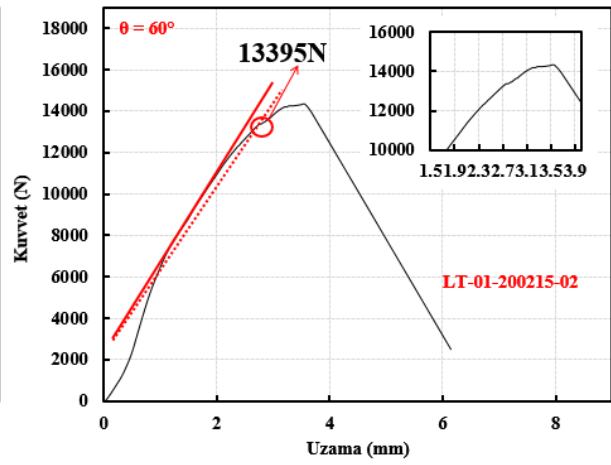
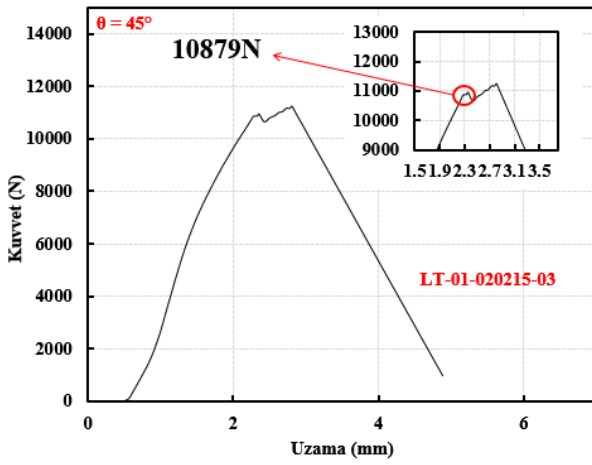
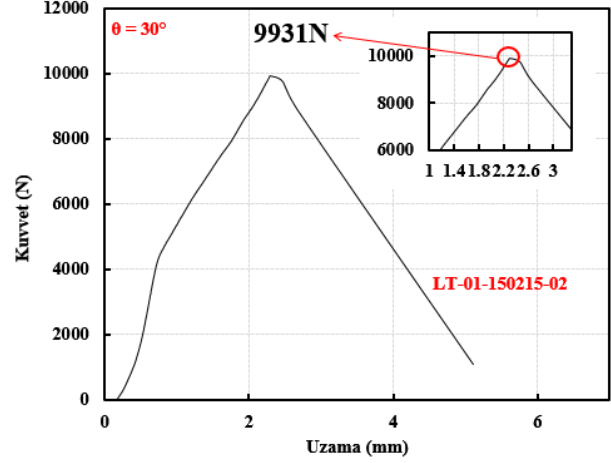
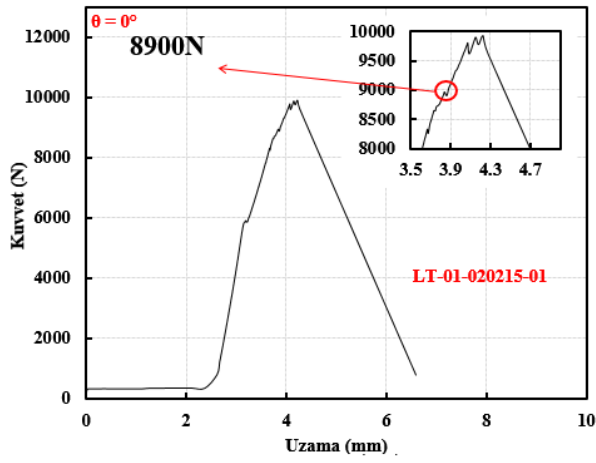
kırılma tokluğu testleri için kuvvet-yer değiştirme grafikleri ve okunan kopma yükleri gösterilmektedir.

şekil 3.2.16. Kırılma tokluğu test matrisi.

Numune İsmi	Kalınlık (mm)	Ykleme Açışı	n atlak Uzunluğu (mm)	Ykleme Hızı (kN/sn)	Kopma Yk (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



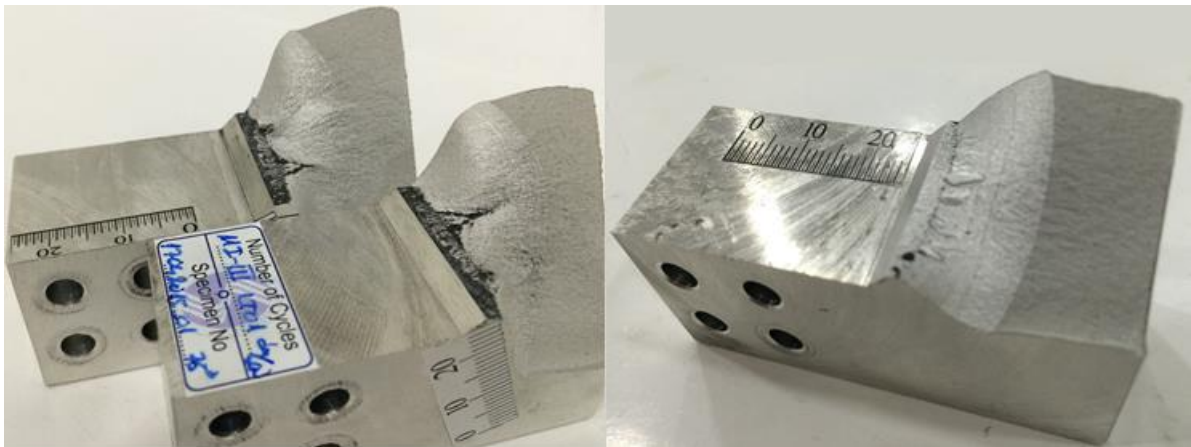
Şekil 3.2.73. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kuvvet-yer değiştirme grafikleri (t = 25mm).



Şekil 3.2.74. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kuvvet-yer değiştirme grafikleri ($t = 12.5\text{mm}$).

Tablo 3.2.17 Çatlak ilerleme test matrisi.

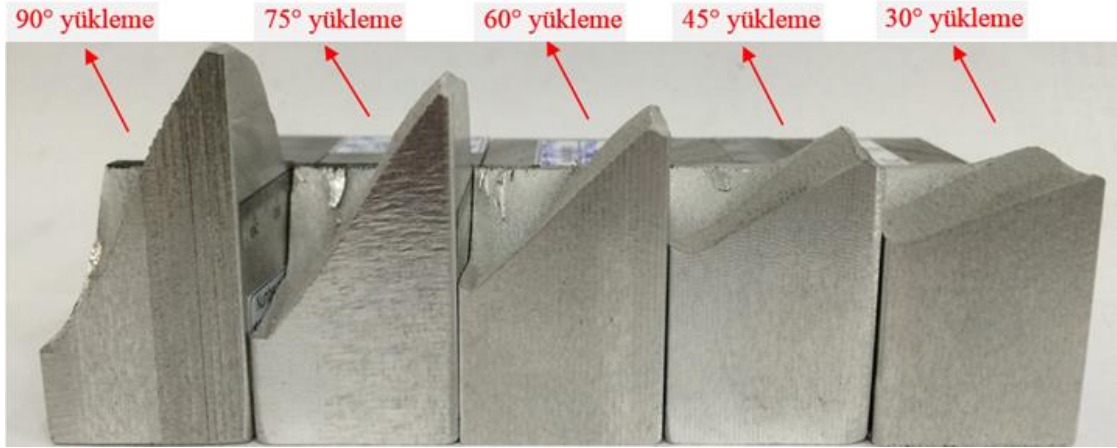
Numune İsmi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	Yükleme Miktarı (kN)	Çevrim Sayısı
M_I-III_LT_01_23.02.15_02	12.5	30	4	54501
M_I-III_LT_01_24.02.15_02	12.5	30	4	16226
M_I-III_LT_01_16.02.15_01	12.5	30	5	8140
M_I-III_LT_01_16.02.15_03	12.5	30	5	11099
M_I-III_LT_01_04.02.15_01	12.5	45	4	21870
M_I-III_LT_01_05.02.15_02	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



Şekil 3.2.75. Farklı açılarda yapılan da/dN testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri

Tablo 3.2.17’de, değişik mod-I/III yüklemeye açıları ile yapılan yorulma testlerine ait yük ve çevrim sayısı bilgileri verilmektedir. Testler sonrasında kırılma yüzeylerinin fotoğrafları

alınmıştır. Şekil 3.2.75'te, farklı yüklem açıları ile yapılan yorulma testleri sonrasında elde edilen kırılma yüzeylerinin perspektif görünüşleri, Şekil 3.2.76'da ise deneyi yapılan tüm yüklem açıları için da/dN testleri sonucunda elde edilen kopma yüzeylerinin sırt görüntüsü verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yüklem 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 olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2.76. Farklı açılarda yapılan da/dN testleri kırılma yüzeyleri (sırt görünüşü).

Proje kapsamında mod-I/III durumu için gerçekleştirilen kırılma ve da/dN testlerinde kullanılan numunelerin toplu görüntüsü Şekil 3.2.77'de verilmiştir. Yüklem açısının değişimi ile kırılma yüzeyleri arasındaki ilişki bu şekilde de açıkça görülmektedir.



Şekil 3.2.77. Mod-I/III ve Mod-II/III testlerinde kullanılan tüm numuneler – üst görünüş.

3.2.5 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 karişik 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.

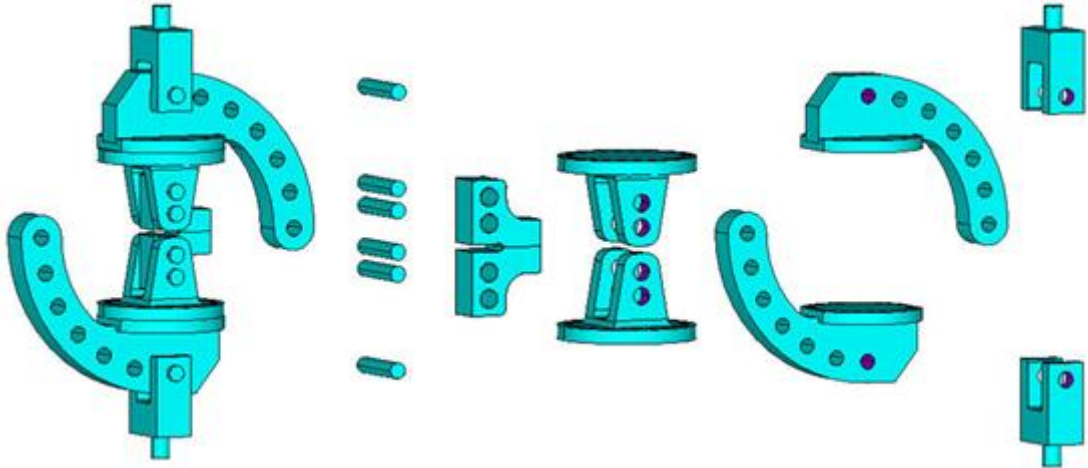
Karışık mod-I/II kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinde, yükleme durumu mod-I/II olmasına rağmen kırılma analiz sonuçlarında çatlak ucu boyunca KIII GŞF değerleri de elde edilmiş ve bunun Poisson oranının etkisinden kaynaklandığı ve bu nedenle çatlak ucu boyunca yükleme tipine bağlı olarak negatiften pozitive veya pozitiften negatife doğru lineer olarak değişen, orta noktada sıfır değerini alan simetrik bir KIII eğiliminin oluştuğu belirtilmişti. Yani çatlak ucu kenarlarında aynı fakat merkezde KIII sıfır değerini almaktadır. Literatürde karışık mod-I/II problemleri ile ilgili çok sayıda çalışma yer almasına rağmen Buchholz vd. (2001; 2004) yaptığı çalışma dışında KIII 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 KIII GŞF değerleri hem de karışık mod-I/II/III yüklemesinden gelen mod-III nedeniyle oluşan KIII GŞF değerleri olacağı için çatlak ucunun iki kenarı ve merkezi olmak üzere her üç noktada elde edilen KIII GŞF değerleri farklı olmakta ve çatlak ucu merkezine göre simetrik olmayan bir KIII GŞF dağılımı elde edilmektedir. Bu yüzden karışık mod-I/II/III yükleme durumunda hesaplanan KI, KII ve KIII 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.

3.2.5.1 Farklı Mod-I/II/III Numune Tutucusu Tasarım ve Analizleri

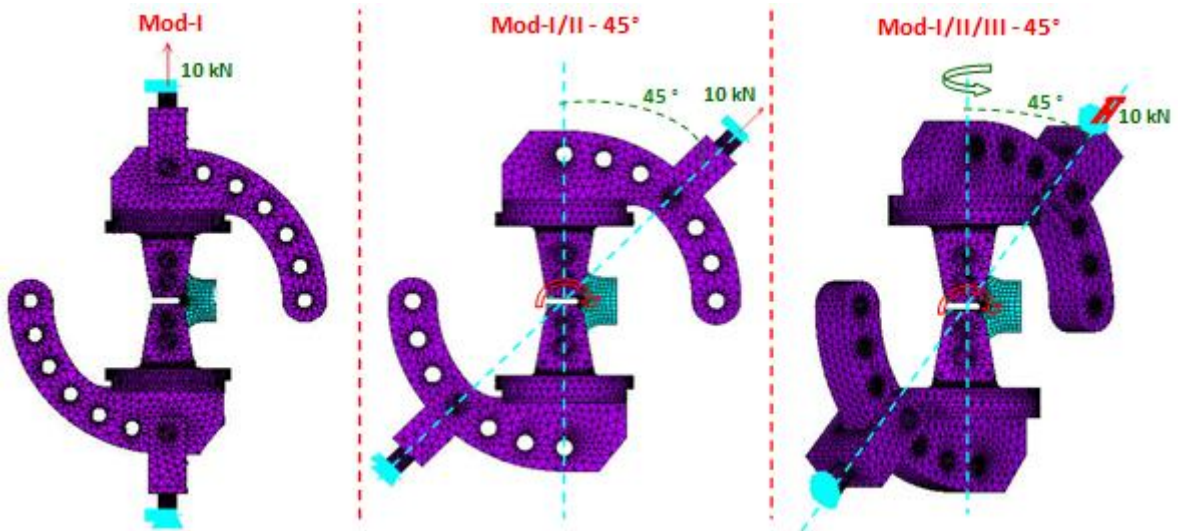
T-Numunesi İçin Geliştirilen Tutucu Tasarım ve Analizleri:

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 3.2.78) 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.

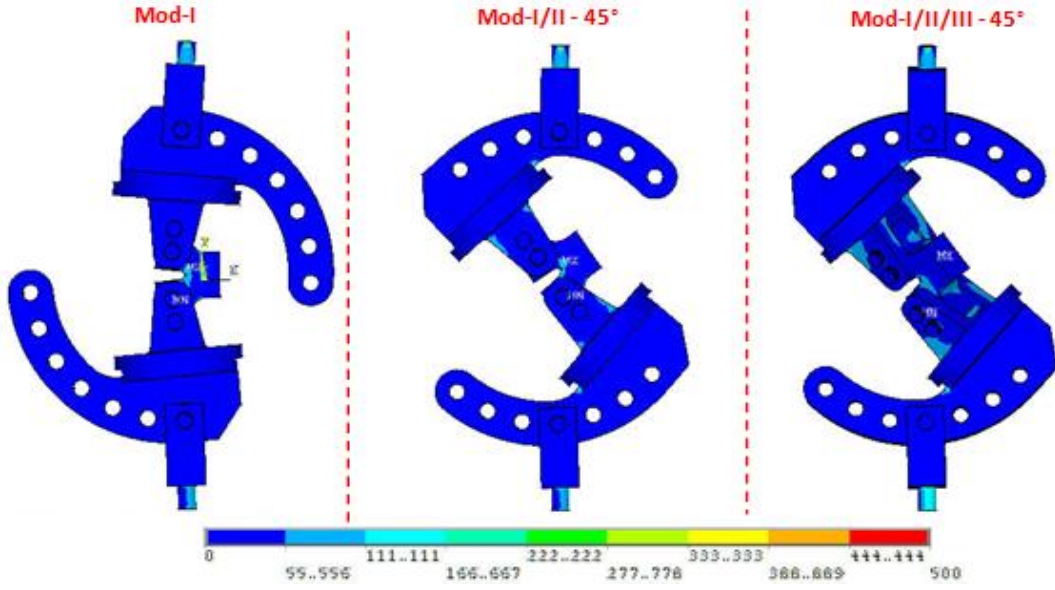


Şekil 3.2.78. Mod-I/II/III yüklemesi için tasarlanan T-numune tutucusu ve aparatları.

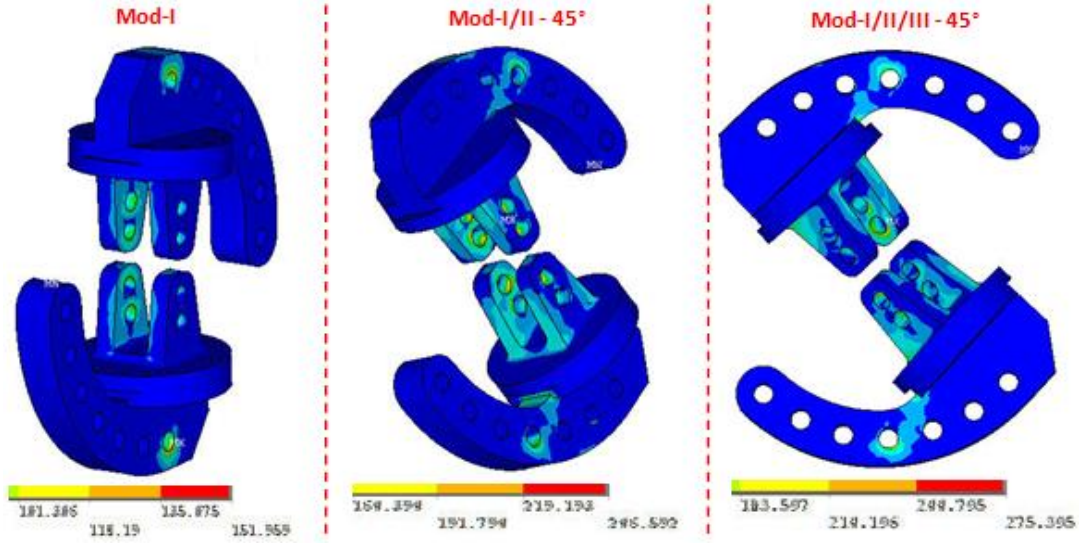
Tasarlanan yeni mod-I/II/III tutucusuna mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° yükleme açılarında ön gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz detayları ve sonuçları sırasıyla Şekil 3.2.79, 3.2.80, 3.2.81, 3.2.82, 3.2.83 ve 3.2.84 'te verilmiştir.



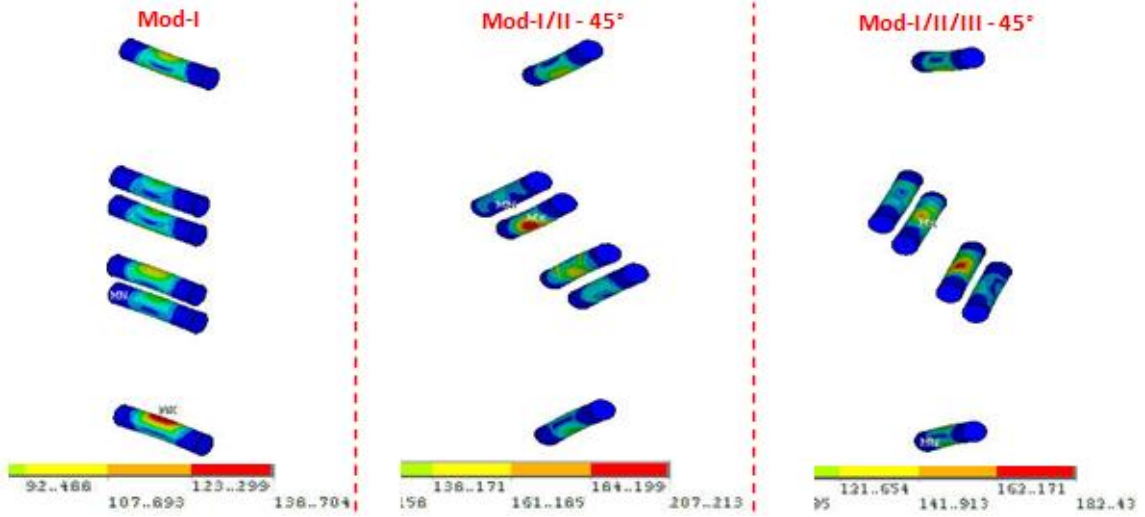
Şekil 3.2.79. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarının kırılma analizleri için hazırlanan sonlu eleman modelleri.



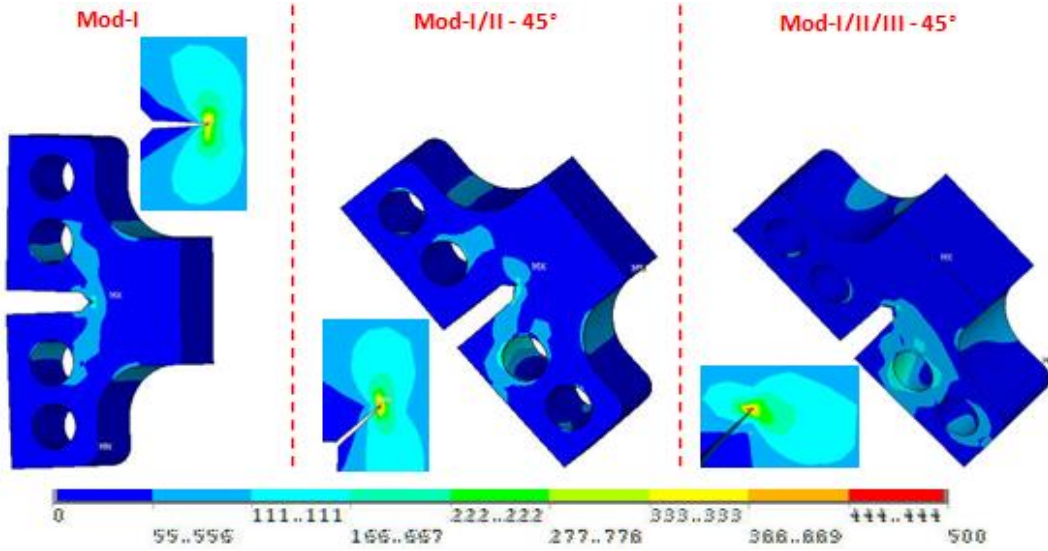
Şekil 3.2.80. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında tutucu, numune ve pimde oluşan gerilme dağılımının genel görünümü.



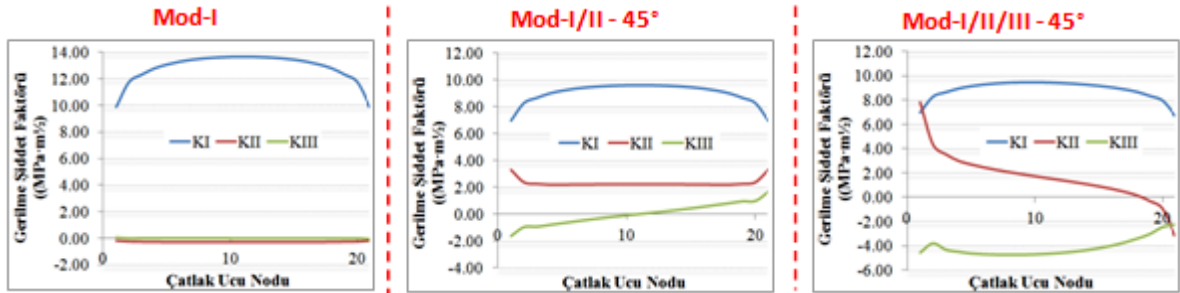
Şekil 3.2.81. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında tutucularda oluşan gerilme dağılımları.



Şekil 3.2.82. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında pimlerde oluşan gerilme dağılımları.



Şekil 3.2.83. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme durumlarında numunelerde oluşan gerilme dağılımları.



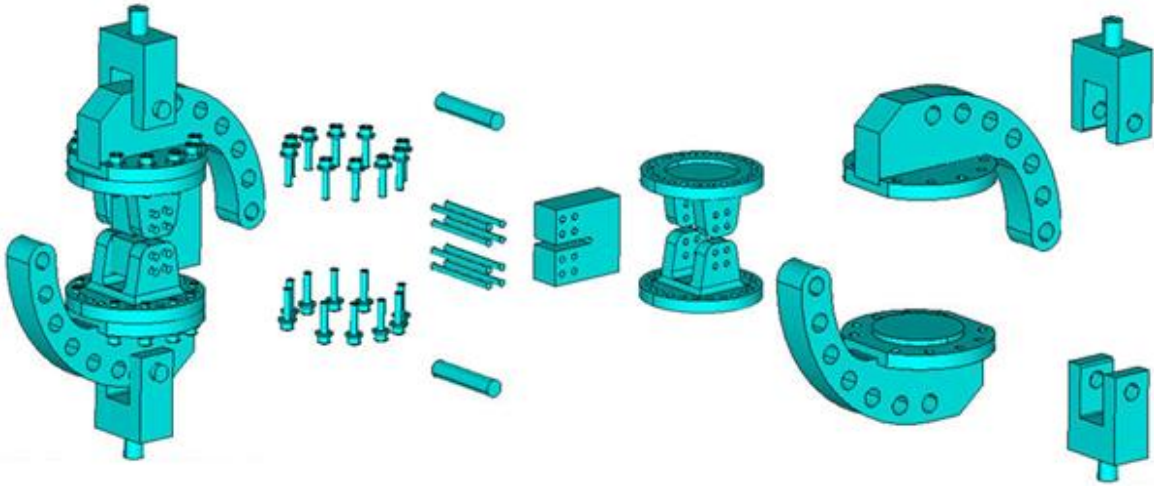
Şekil 3.2.84. Mod-I, mod-I/II 45° ve mod-I/II/III 45° açılı yükleme çatlak ucunda elde edilen gerilme şiddet faktörlerinin dağılımı.

Tutucu, pim ve numunelerde oluşan gerilmeler incelendiğinde bazı bölgelerde belirgin gerilme yığılmalarının olduğu gözlenmiştir. Özellikle yüksek mod-II ve mod-III kırılma modlarının oluşacağı yüklem 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 (compact tension) numunesine yakın boyutlara sahip olan CTT (compact tension and tear) 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 özellikte tasarlanacağı için bu deneylerde kullanılacak olan numunelere CTST (compact tension shearing and tearing) numunesi adı verilmiştir.

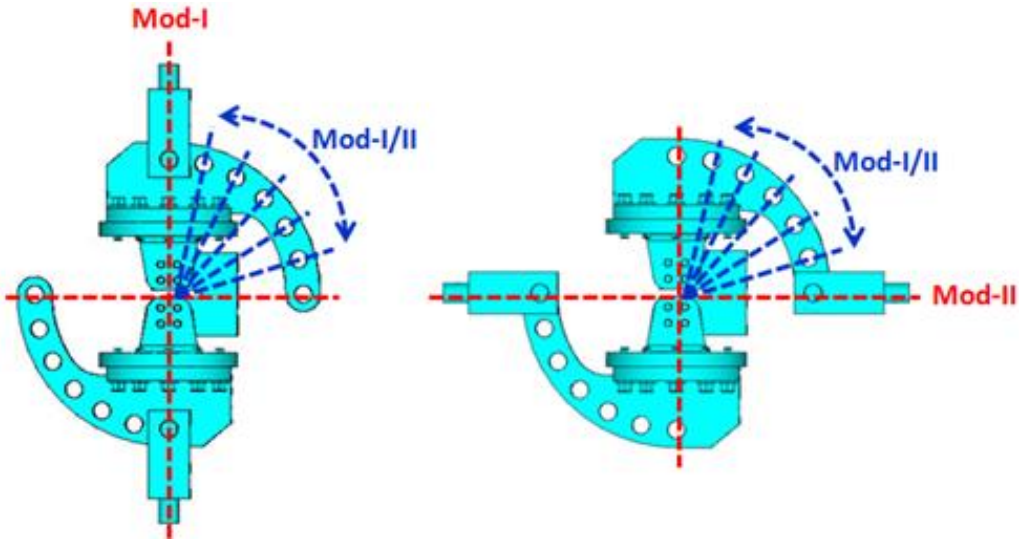
CTST (Compact Tension Shearing&Tearing)-Numunesi İçin Geliştirilen Tutucu Ön Tasarım ve Analizleri:

Karışık mod-I/II/III yüklem durumu 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 (compact tension tearing) numunesine uygun olarak farklı CTST tutucu konfigürasyonları tasarlanmış ve farklı yüklem açıları için önce gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilerek optimum tutucu tasarımı hedeflenmiştir.

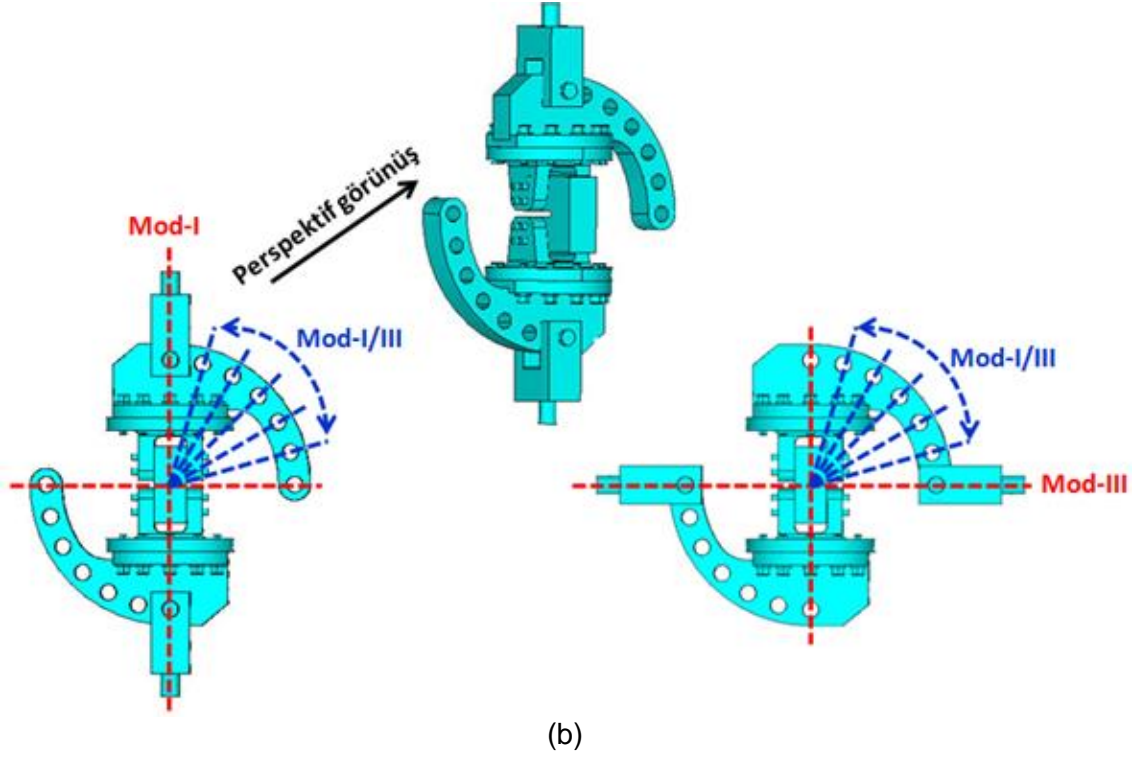
Tasarım çalışmalarında ilk olarak T-numunesi için tasarlanan mod-I/II/III tutucusuna benzer şekilde CTST numunesine uygun bir mod-I/II/III tutucusu tasarlanmıştır (Şekil 3.2.85). Tutucunun mod-I/II yüklemesi ile birlikte mod-III yüklemesi de yapabilmesi için düşey eksen etrafında açılı dönmeyi sağlayabilecek ve tutucuya civatalar ile monte edilebilecek şekilde ayrı bir aparat düşünülmüştür. Şekil 3.2.86 'da uygulanabilecek yüklem açıları görsel olarak verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi her iki eksen etrafında 15'er derecelik aralıklarla yüklem tipleri uygulanacak şekilde tutucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mod-I/II ve mod-I/III yüklem durumunun her ikisi de mod-I tutucusunun karışık mod (mixed-mode) tutucusunun yüklem deliklerine açılı olarak yüklenmesi ile oluşturulduğu için, bu yüklem durumlarının açı değerleri tüm mod-I/II/III analizlerinde birbirine eşit olmaktadır.



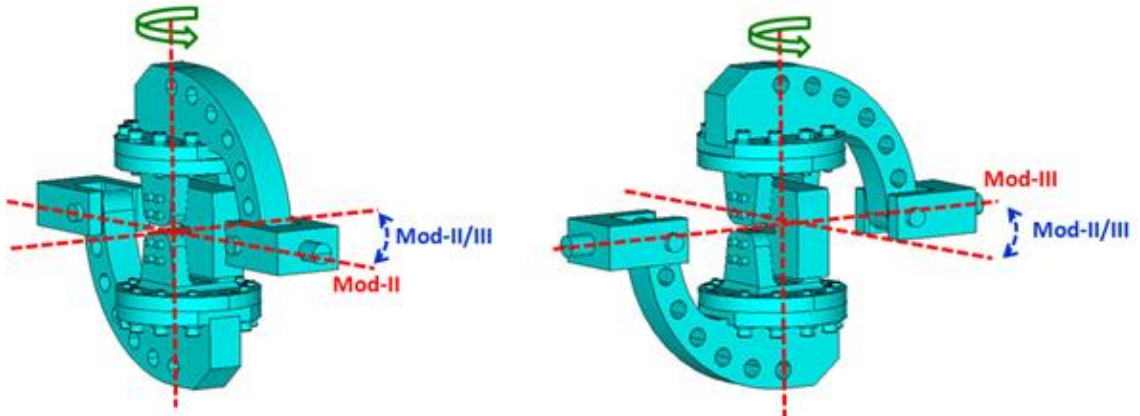
Şekil 3.2.85. Mod-I/II/III yüklemesi yapabilen CTST numune tutucusu ve aparatları.



(a)



(b)

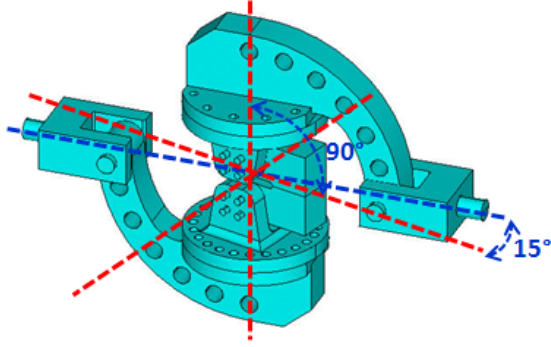


(c)

Şekil 3.2.86. 15 derecelik aralıklarla uygulanabilen yükleme tiplerinin gösterimi, (a) mod-I/II, (b) mod-I/III, (c) mod-II/III yükleme durumları.

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.

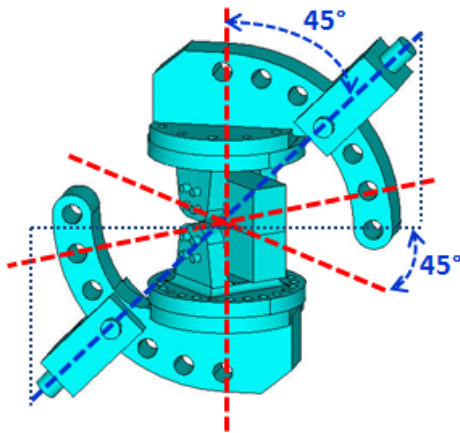
Şekil 3.2.87 'de, mod-I/II-90°, mod-I/III-90° ve mod-II/III-15° yükleme durumu verilmiştir.



Mod-I/II-90°		Mod-II/III-15°		Mod-I/III-90°	
Mod-I	Mod-II	Mod-II	Mod-III	Mod-I	Mod-III
cos90	sin90	cos15	sin15	cos90	sin90
Mod-I		Mod-II		Mod-III	
cos90 * cos90 = 0		sin90 * cos15 = 0.97		sin15 * sin90 = 0.26	

Şekil 3.2.87. 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 yüklemesinin oluşmayacağı ve mod-II yüklemesinin mod-III yüklemesine göre çok daha baskın olacağı tabloda görülmektedir. Şekil 3.2.88'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.



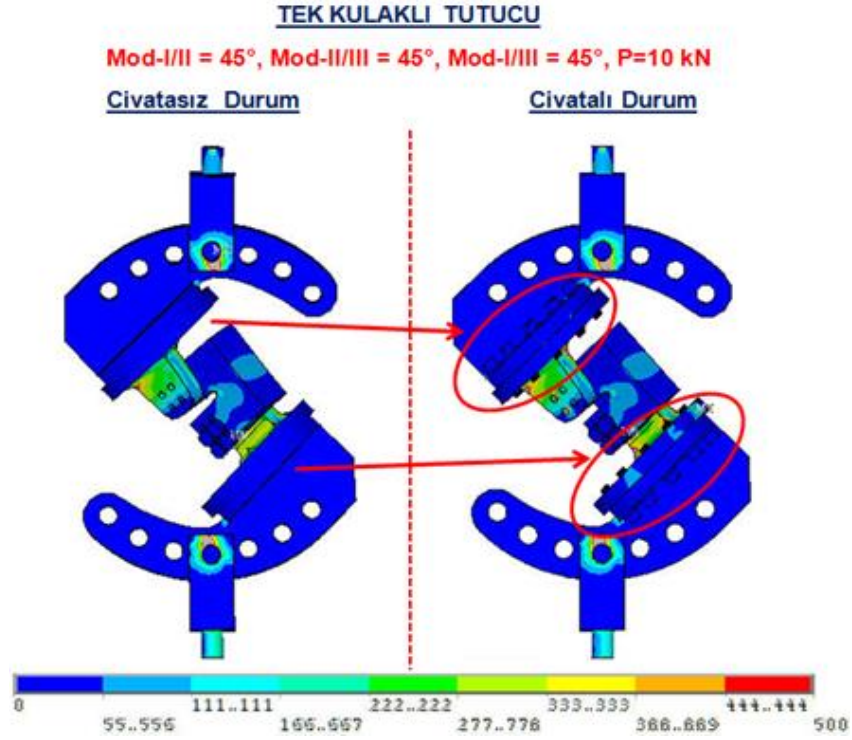
Mod-I/II-45°		Mod-II/III-45°		Mod-I/III-45°	
Mod-I	Mod-II	Mod-II	Mod-III	Mod-I	Mod-III
cos45	sin45	cos45	sin45	cos45	sin45
Mod-I		Mod-II		Mod-III	
cos45 * cos45 = 0.5		sin45 * cos45 = 0.5		sin45 * sin45 = 0.5	

Şekil 3.2.88. Mod-I/II-45°, mod-I/III-45° ve mod-II/III-45° yükleme durumu ve bunun etkisinde oluşacak kırılma modlarının birbirlerine göre etkinliği.

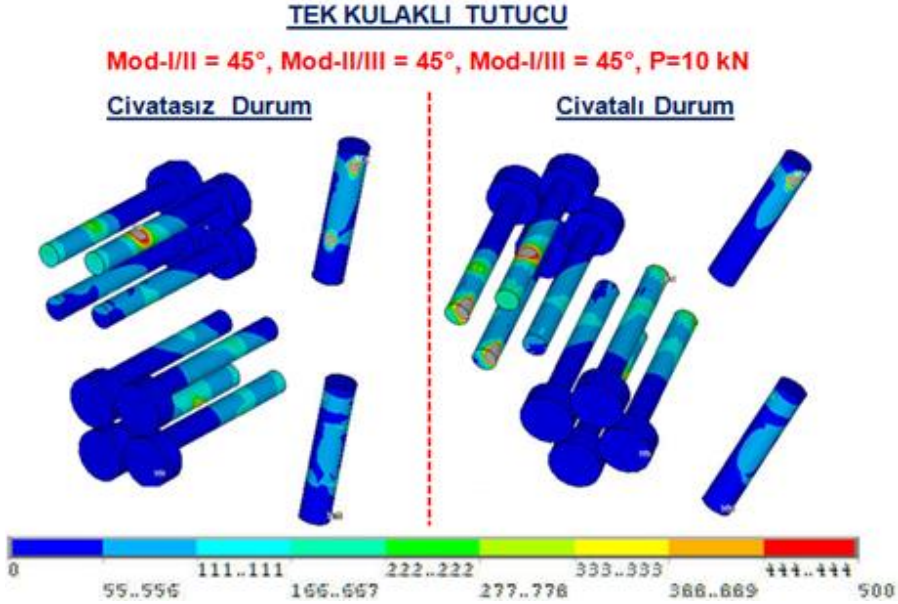
Mevcut tutucu için belirlenen kritik yükleme açılarında gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizleri sonucunda tutucu tasarımında değişiklik yapılmasına karar verilmiştir. Bölümün başında bahsedildiği gibi, karışık mod-I/II/III yüklemesinin durumunda hem Poisson oranı etkisi

nedeniyle hem de mod-III yüklemesi nedeniyle çatlak ucu boyunca her noktada farklı KIII 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 da simülasyon sonuçları ile deney sonuçları arasında tutarsızlıklara neden olacaktır.

Numunenin tutucu kulağının yüzeyine 4 adet civata ile tutturulması sağlanmış ve mod-III yükü, tutucu kulağından numuneye iletilecek şekilde tutucu tasarlanmıştır. Böylece civatalar mod-III yükünden dolayı çekme yüküne maruz kalmamakta, sadece mod-I ve mod-II yüklemesinin etkisinde kesme yüküne maruz kalmaktadır. Farklı yükleme açıları için gerçekleştirilen bir önceki gerilme analiz sonuçlarına göre mod-I/II yükleme açısının verildiği tutucunun boyutu ve kalınlığı bir miktar daha artırılmıştır. Yeniden tasarlanan tutucu için de yukarıda gösterilen yükleme açılarında gerilme ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ancak aşağıda sadece mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısının sonuçları temsili olarak verilmiştir. Ayrıca şu ana kadar sonuçları gösterilen analizlerde, analizlerin daha kısa sürmesi için tutucuda bulunan civatalar kaldırılarak (böylece toplam eleman sayısı ciddi derecede azalmaktadır) tutucu yekpare olarak modellenmiştir. Civatalı ve civatasız modellerden elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın olduğu için civatasız model tercih edilmiştir. Aşağıda mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme durumunda civatalı ve civatasız tek kulaklı model kullanılarak gerçekleştirilen gerilme ve kırılma analizlerinin sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 3.2.89 ve Şekil 3.2.90'da, civatalı ve civatasız konfigürasyonlarda ve pimlerde oluşan gerilme dağılımları sırasıyla verilmiştir. Her iki konfigürasyon için de benzer gerilme dağılımlarının olduğu gözlemlenmektedir.



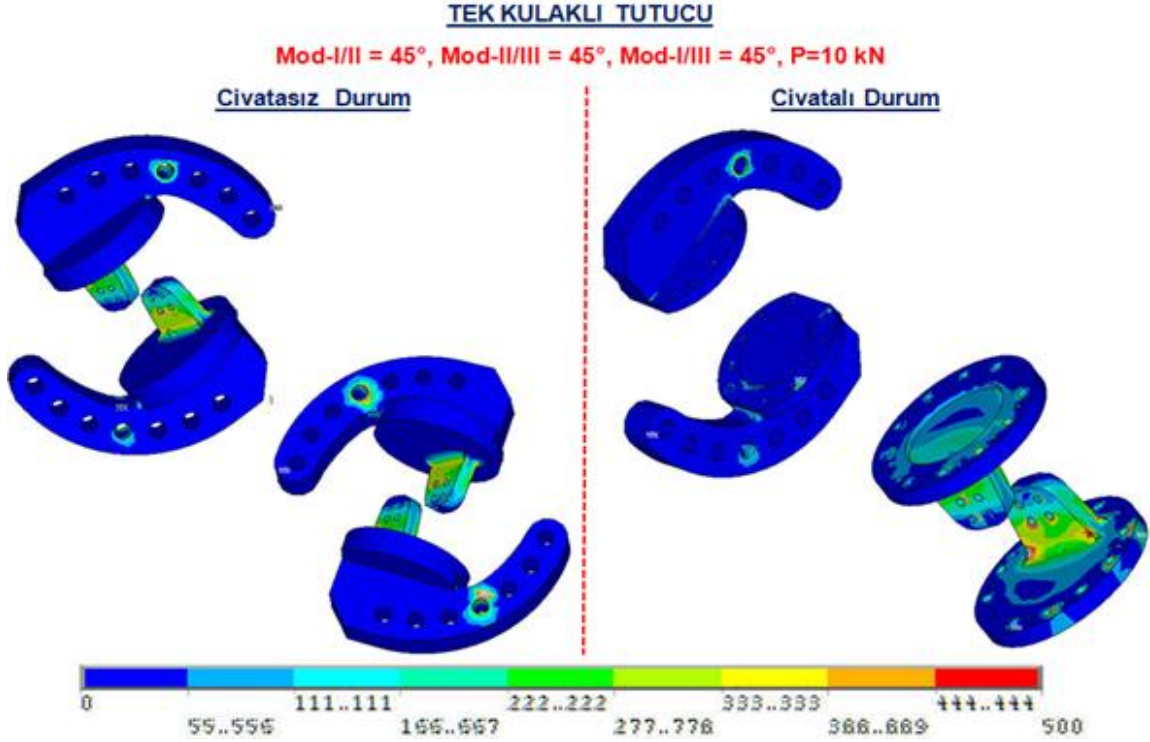
Şekil 3.2.89. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda civatalı ve civatasız konfigürasyonlarda oluşan gerilme dağılımları.



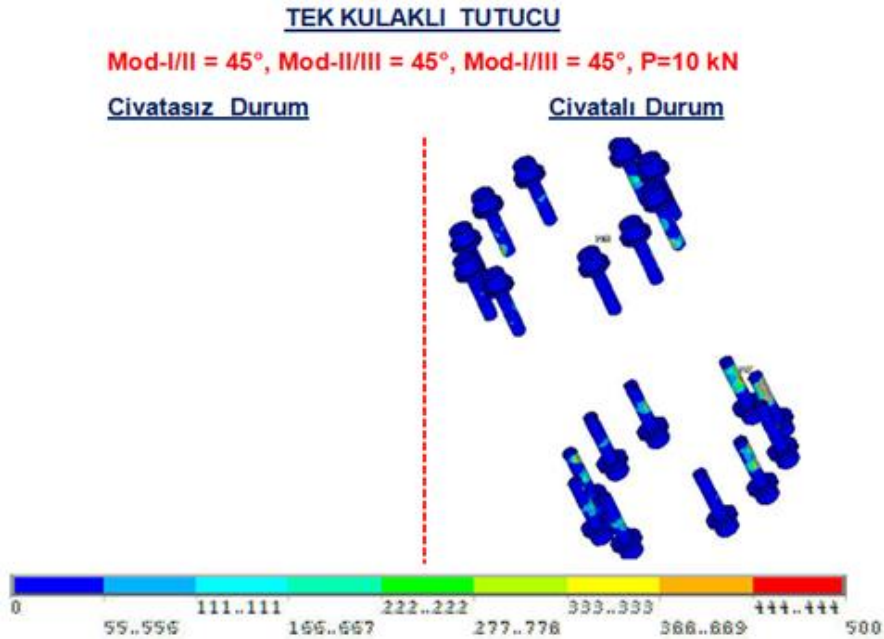
Şekil 3.2.90. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda pim ve civatalarda oluşan gerilme dağılımları.

Şekil 3.2.91'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 gereği oluşmuştur

görülmektedir. Şekil 3.2.92'de ise tutucuda kullanılan civatalarda oluşan gerilme dağılımları verilmiştir.

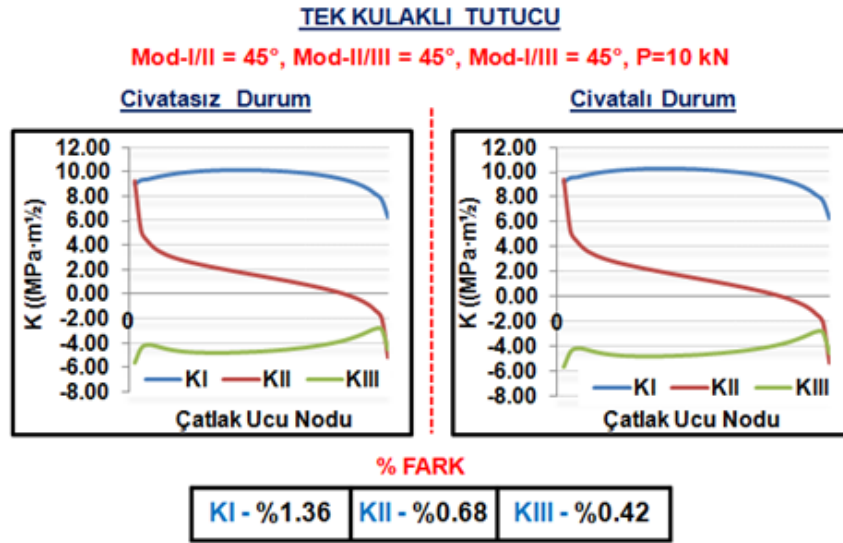


Şekil 3.2.91. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda tutucularda oluşan gerilme dağılımları.



Şekil 3.2.92. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda tutucu civatalarında oluşan gerilme dağılımları.

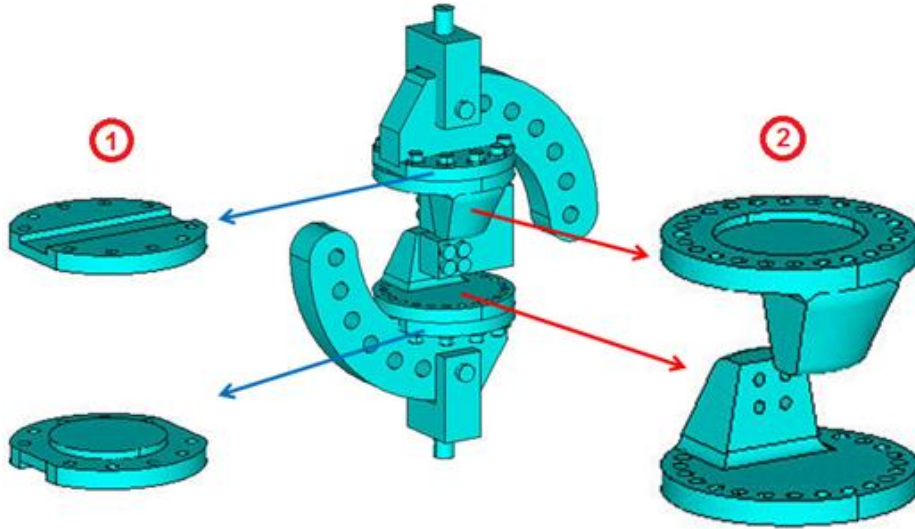
Her iki model için çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.2.93'te verilmiştir. Elde edilen KI, KII ve KIII değerleri arasındaki farkların %1 mertebelerinde olduğu görüldüğü için bundan sonra gerçekleştirilen mod-I/II/III analizlerinde, tutucular ile numune arasındaki bağlantıyı sağlayan civatalar hariç diğer civatalar kaldırılarak, tutucular yekpare olarak modellenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi KIII GŞF değeri çatlak ucu boyunca simetrik olmayan bir dağılım sergilemektedir. Ayrıca, beklendiği üzere, KII 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 KII eğilimi çatlak ucu boyunca görülmektedir. Mod-I/II/III analizlerinde ise hem mod-III yüklemesinden dolayı, hem de mod-I/II/III yüklemesinden gelen mod-II etkisinden dolayı KII 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.



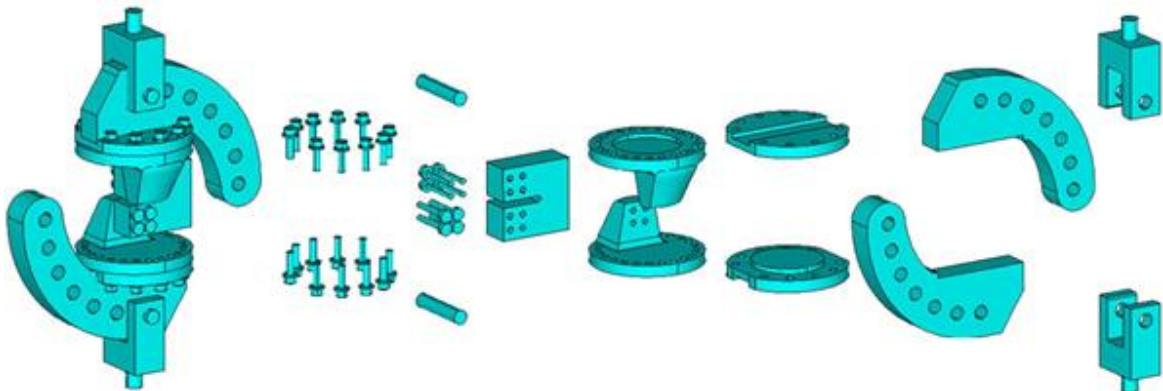
Şekil 3.2.93. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45°, mod-I/III=45°, 10 kN yükleme durumunda çatlak ucu boyunca hesaplanan GŞF değerleri.

3.2.5.2 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 3.2.94'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 civata deliği açılarak civata ile ilave bir bağlantı yapılmıştır. Tutucu kalınlığı artırılmış ve tutucunun yuvarlatma kısmı bir miktar daha genişletilerek bu bölgede de kalınlık artışının olması sağlanmıştır. Şekil 3.2.95'te, nihai konfigürasyonu oluşturan tüm parça ve modellerin perspektif görünümü verilmiştir.

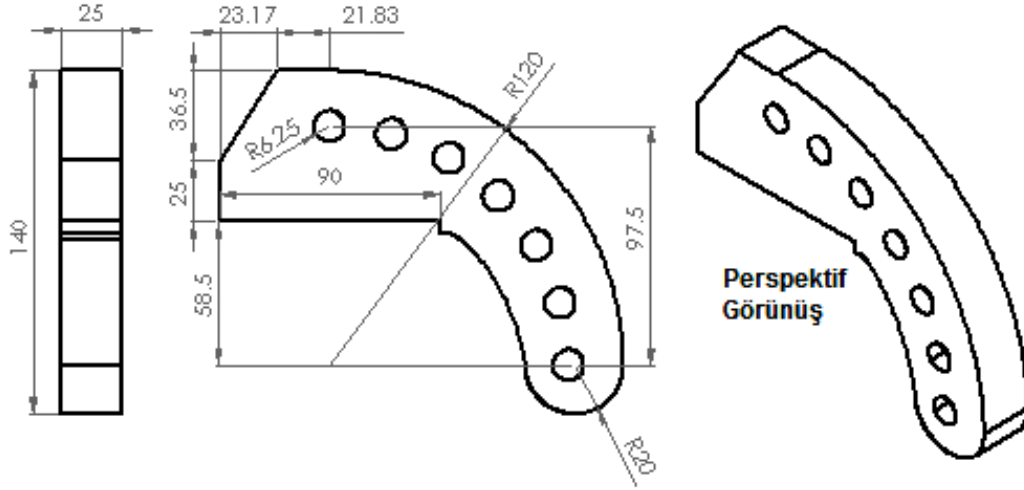


Şekil 3.2.94. Mod-I/II/III tutucusu için tasarımı tamamlanan nihai konfigürasyon.

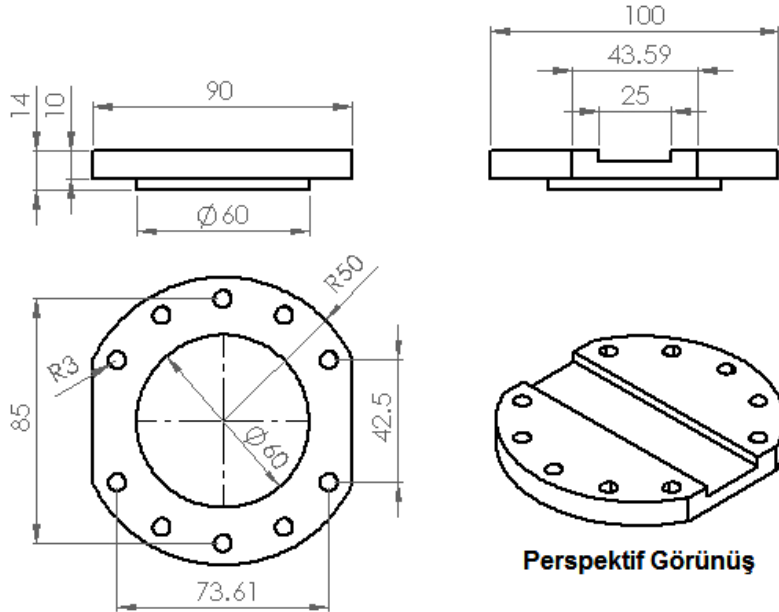


Şekil 3.2.95. Nihai mod-I/II/III konfigürasyonunu oluşturan parça ve modellerin perspektif görünümü.

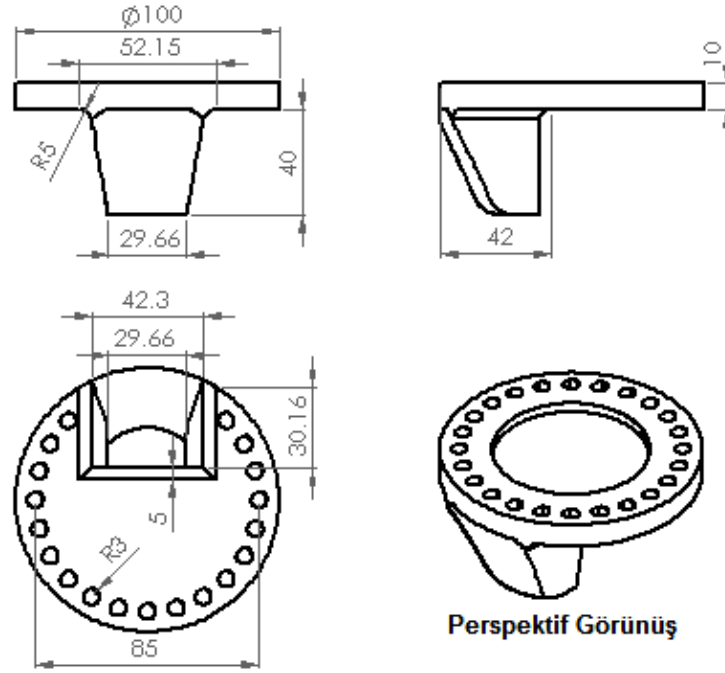
Şekil 3.2.96 'da mod-I/II açılı yüklemeyi sağlayan tutucu modelinin, Şekil 3.2.97 'de tutucu ile kulak arasındaki bağlantıyı sağlayan bağlantı elemanının, Şekil 3.2.98 'de ise kulak olarak isimlendirdiğimiz mod-II/III yüklemesinin verilmesini sağlayan modelin detaylı boyutları ve perspektif görünümü verilmiştir. Son olarak numunenin detaylı boyutları ile perspektif görünümü Şekil 3.2.99 'da verilmiştir.



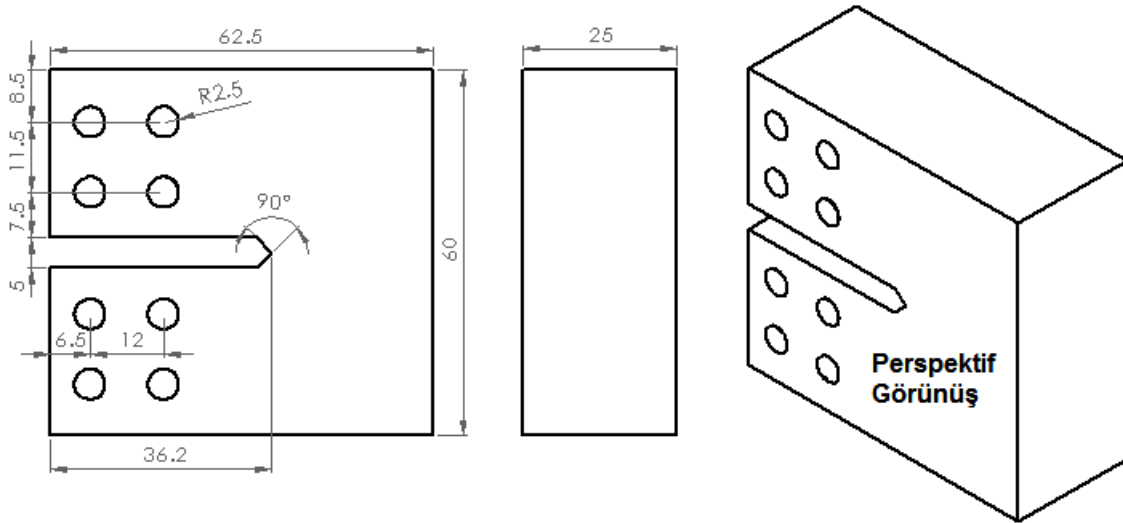
Şekil 3.2.96. Mod-I/II açılı yüklemeyi sağlayan tutucu modelinin detaylı boyutları ve perspektif görünümü.



Şekil 3.2.97. Tutucu ile kulak arasındaki bağlantıyı sağlayan bağlantı elemanının ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü.



Şekil 3.2.98. Mod-II/III yüklemesinin verilmesini sağlayan modelin ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü.



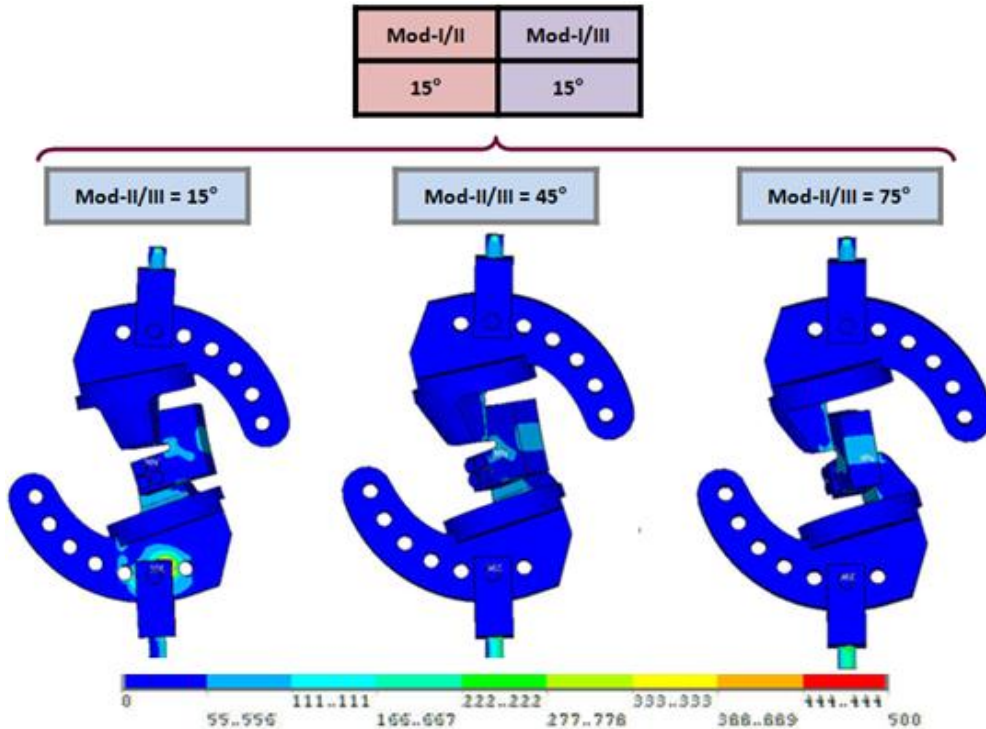
Şekil 3.2.99. Mod-I/II/III-CTST numunesinin ayrıntılı boyutları ve perspektif görünümü.

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 3.2.18'de verilmiştir. Toplam 9 adet yükleme açısı belirlenmiş ve deney öncesi her bir yükleme açısı için kırılma ve gerilme analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar aşağıda verilmiştir.

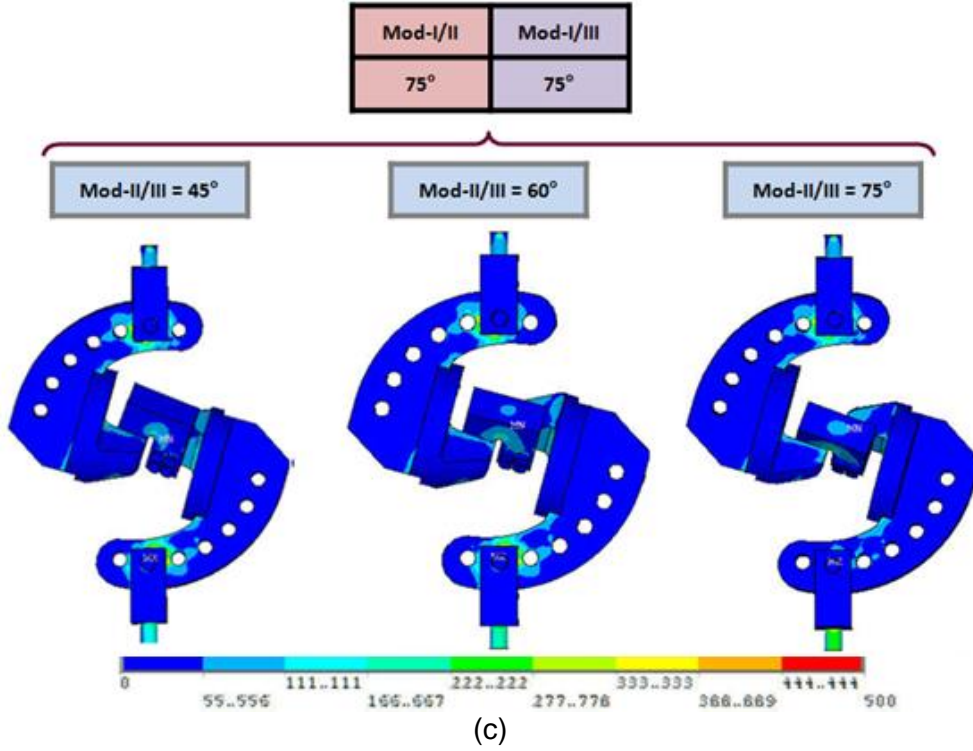
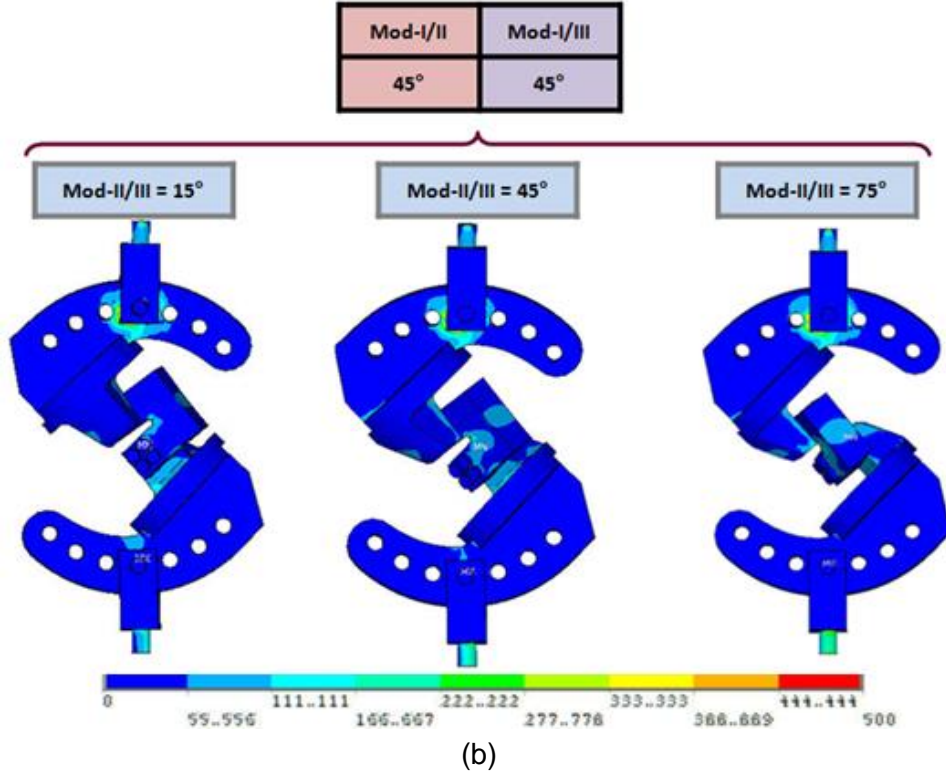
Tablo 3.2.18. Mod-I/II/III test ve analizleri için belirlenen yükleme açıları.

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 3.2.100'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.




(a)

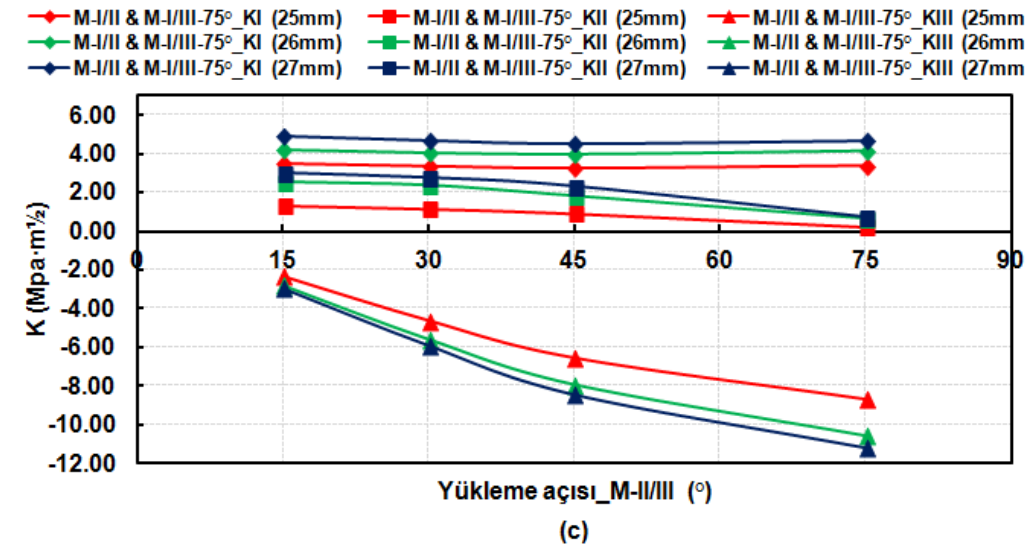
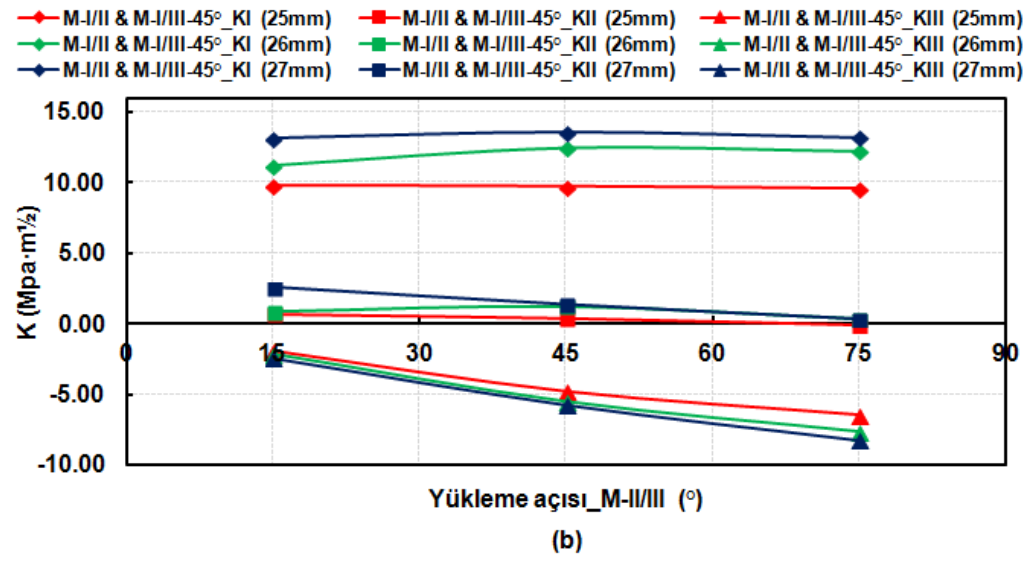
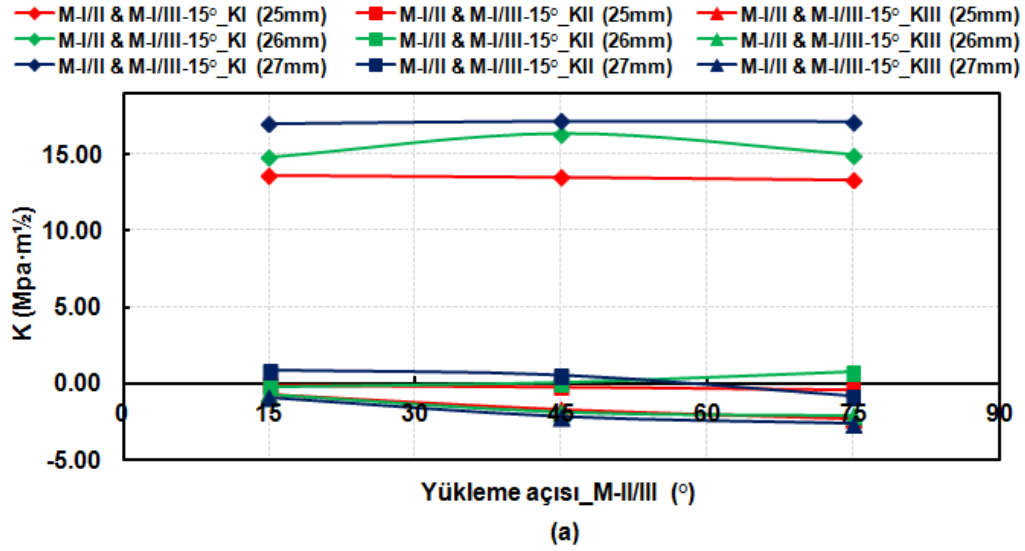


Şekil 3.2.100. CTST-numune için gerçekleştirilen gerilme analizleri sonrası test sisteminde oluşan gerilme dağılımları, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° yükleme durumu.

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 KII ve KIII 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 3.2.19'da çatlak ucu merkezi için elde edilen GŞF değerleri ve Şekil 3.2.101'de ise GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı görülmektedir.

Tablo 3.2.19. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu merkezi için elde edilen KI, KII ve KIII değerleri.

		Çatlak Uzunluğu								
		25 mm			26 mm			27 mm		
		Gerilme Şiddet Faktörü (MPa*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 3.2.101. 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°.

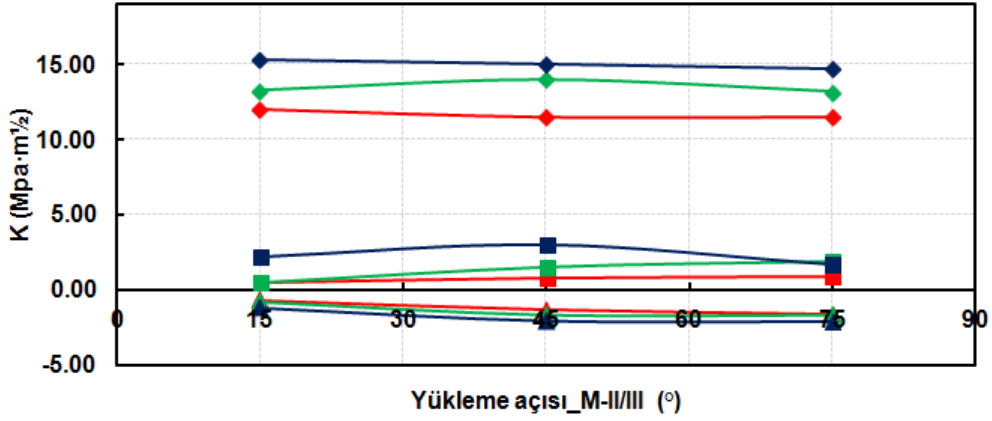
Şekilde GŞF dağılımları incelendiğinde analiz sonuçlarından beklenen eğilimlerin elde edildiği görülmektedir. Çatlak uzunluğu arttıkça beklendiği gibi KI değerinde artış gözlemlenmektedir. Mod-I/II ve mod-I/III yükleme açısı sabit tutulup mod-II/III yükleme açısı arttıkça KI sabit kalırken, KII ve KIII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

Çatlak ucu arka kenarından elde edilen GŞF değerleri ve bu değerlerin çatlak ucu boyunca dağılımı Tablo 3.2.16 ve Şekil 3.2.82 'de sırasıyla verilmiştir.

Tablo 3.2.20. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için çatlak ucu arka kenarından elde edilen KI, KII ve KIII değerleri.

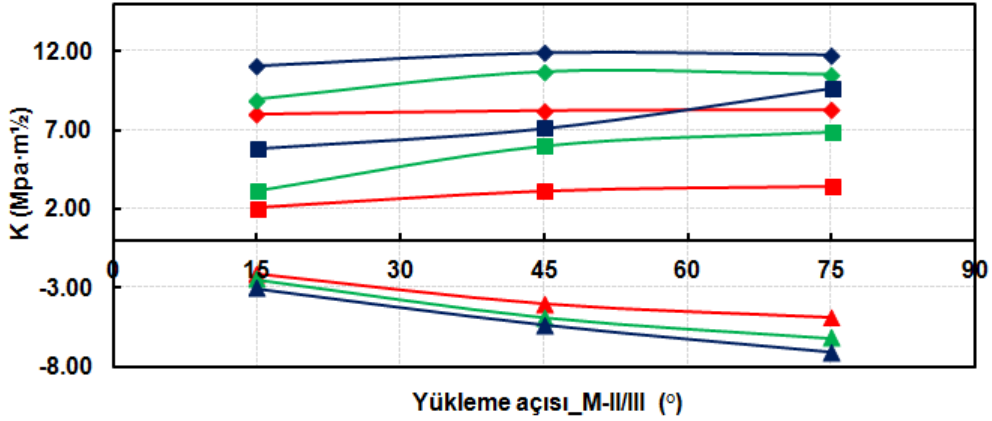
		Çatlak Uzunluğu									
		25 mm			26 mm			27 mm			
		Gerilme Şiddet Faktörü (MPa*m ^{1/2}) - (Çatlak Ucu Arka Kenarı)									
M-I/II & M-I/III	M-II/III	K _I	K _{II}	K _{III}	K _I	K _{II}	K _{III}	K _I	K _{II}	K _{III}	
15	15	15	12.00	0.47	-0.67	13.28	0.48	-0.76	15.28	2.22	-1.16
		45	11.52	0.79	-1.28	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
45	45	15	7.98	2.05	-2.11	8.95	3.15	-2.46	11.05	5.83	-3.04
		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
75	75	45	2.41	4.63	-5.57	2.82	9.24	-7.09	3.74	12.06	-7.99
		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

◆ M-I/II & M-I/III-15°_KI (25mm) ■ M-I/II & M-I/III-15°_KII (25mm) ▲ M-I/II & M-I/III-15°_KIII (25mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KI (26mm) ■ M-I/II & M-I/III-15°_KII (26mm) ▲ M-I/II & M-I/III-15°_KIII (26mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KI (27mm) ■ M-I/II & M-I/III-15°_KII (27mm) ▲ M-I/II & M-I/III-15°_KIII (27mm)



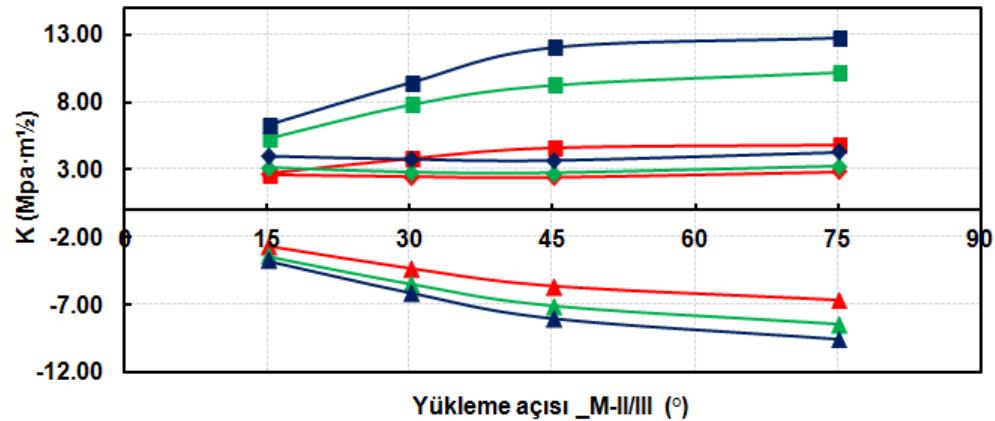
(a)

◆ M-I/II & M-I/III-45°_KI (25mm) ■ M-I/II & M-I/III-45°_KII (25mm) ▲ M-I/II & M-I/III-45°_KIII (25mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KI (26mm) ■ M-I/II & M-I/III-45°_KII (26mm) ▲ M-I/II & M-I/III-45°_KIII (26mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KI (27mm) ■ M-I/II & M-I/III-45°_KII (27mm) ▲ M-I/II & M-I/III-45°_KIII (27mm)



(b)

◆ M-I/II & M-I/III-75°_KI (25mm) ■ M-I/II & M-I/III-75°_KII (25mm) ▲ M-I/II & M-I/III-75°_KIII (25mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KI (26mm) ■ M-I/II & M-I/III-75°_KII (26mm) ▲ M-I/II & M-I/III-75°_KIII (26mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KI (27mm) ■ M-I/II & M-I/III-75°_KII (27mm) ▲ M-I/II & M-I/III-75°_KIII (27mm)



(c)

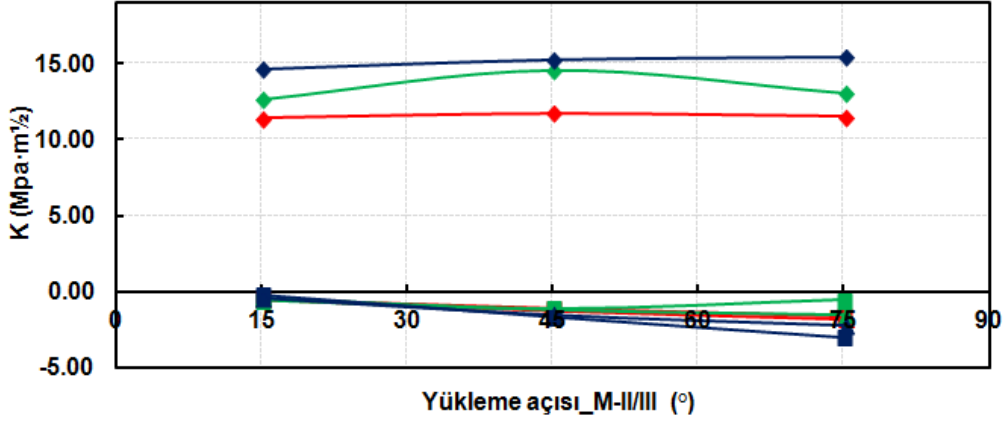
Şekil 3.2.102. Farklı yükleme açıları ve çatlak uzunlukları için çatlak ucu arka kenarından elde edilen GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi, (a) M-I/II & M-I/III=15°, (b) M-I/II & M-I/III=45°, (c) M-I/II & M-I/III=75°.

Son olarak, Tablo 3.2.21'de çatlak ucu ön kenarından elde edilen GŞF değerleri ve Şekil 3.2.102'de ise GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı verilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin sonuçları değerlendirildiğinde, tutarlı sonuçların elde edildiği ve belirlenen yükleme açıları bakımından, genel üç boyutlu yükleme 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 3.2.21. Farklı yükleme açılarında 25, 26 ve 27 mm çatlak uzunlukları için çatlak ucu ön kenarından elde edilen KI, KII ve KIII değerleri.

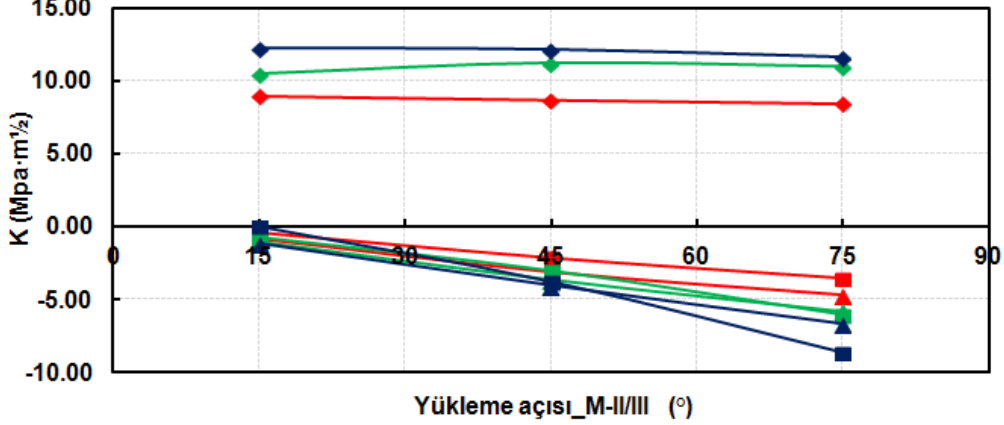
		Çatlak Uzunluğu									
		25 mm			26 mm			27 mm			
		Gerilme Şiddet Faktörü (MPa*m ^{1/2}) - (Çatlak Ucu Ön Kenarı)									
Yükleme Açısı (°)											
M-I/II & M-I/III	M-II/III	K _I	K _{II}	K _{III}	K _I	K _{II}	K _{III}	K _I	K _{II}	K _{III}	
15	15	15	11.40	-0.54	-0.49	12.66	-0.60	-0.40	14.65	-0.24	-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

◆ M-I/II & M-I/III-15°_KI (25mm) ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KII (25mm) ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KIII (25mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KI (26mm) ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KII (26mm) ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KIII (26mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KI (27mm) ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KII (27mm) ◆ M-I/II & M-I/III-15°_KIII (27mm)



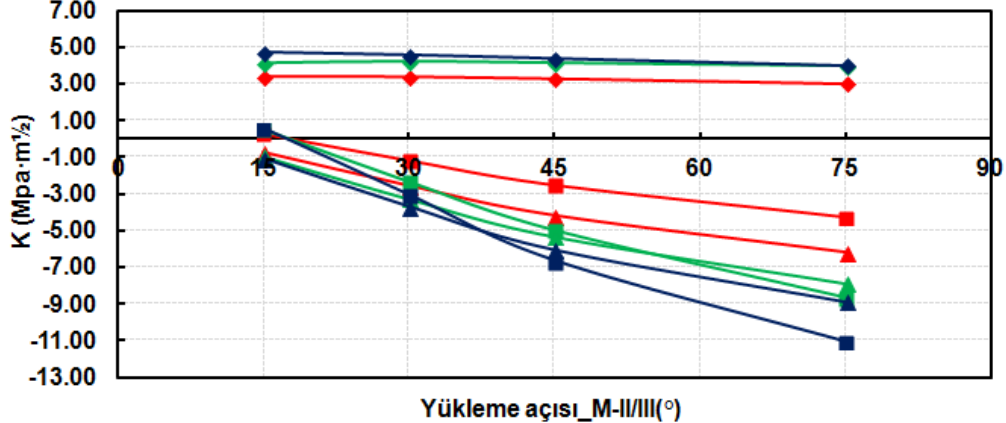
(a)

◆ M-I/II & M-I/III-45°_KI (25mm) ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KII (25mm) ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KIII (25mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KI (26mm) ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KII (26mm) ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KIII (26mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KI (27mm) ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KII (27mm) ◆ M-I/II & M-I/III-45°_KIII (27mm)



(b)

◆ M-I/II & M-I/III-75°_KI (25mm) ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KII (25mm) ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KIII (25mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KI (26mm) ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KII (26mm) ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KIII (26mm)
 ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KI (27mm) ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KII (27mm) ◆ M-I/II & M-I/III-75°_KIII (27mm)

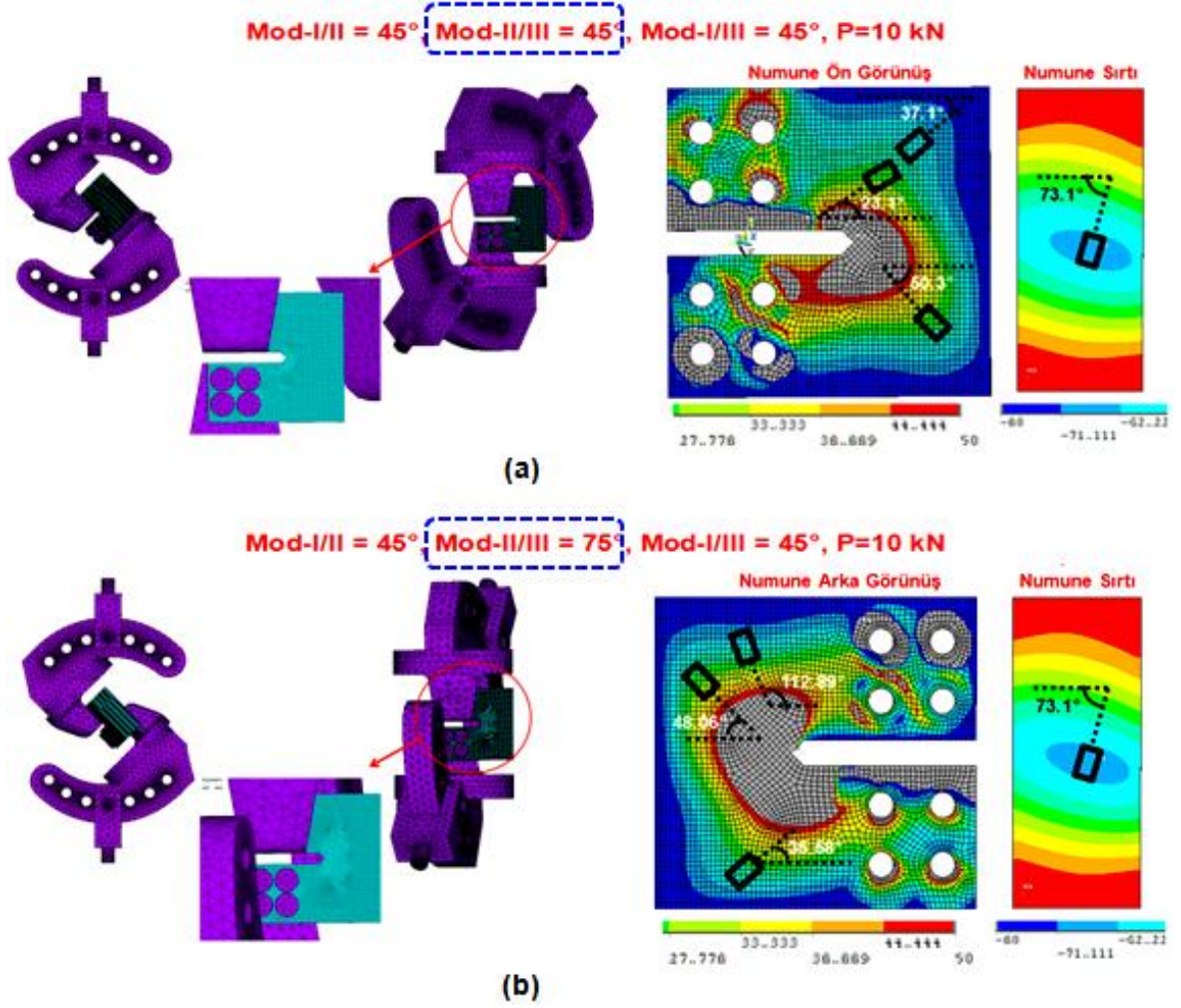


(c)

Şekil 3.2.103. 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°.

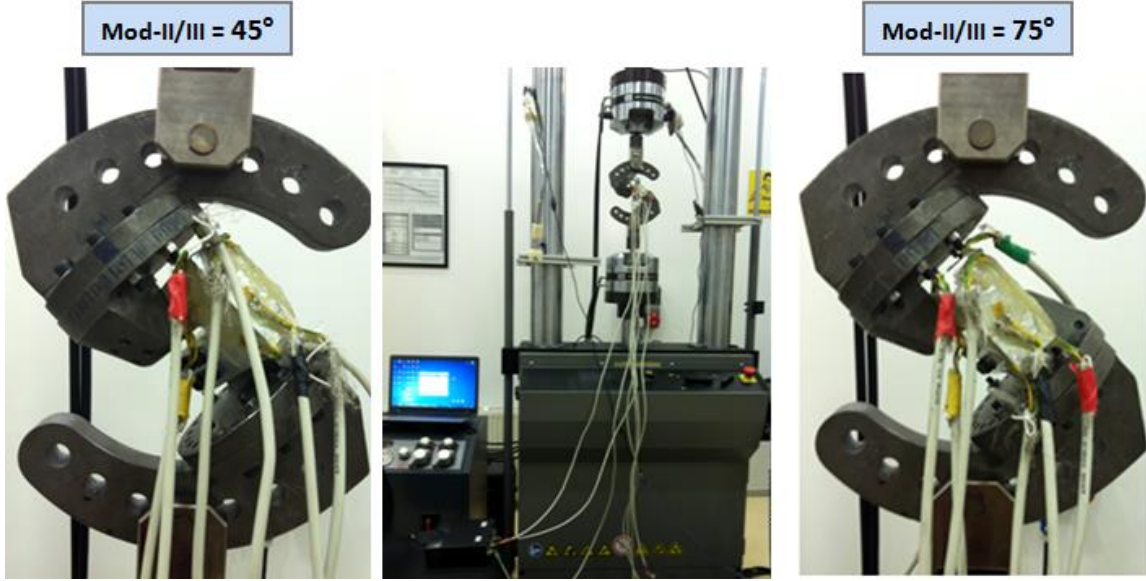
3.2.5.3 Mod-I/II/III CTST Numunesi Strain-Gage Doğrulama Çalışması

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 yükleme kombinasyonu geniş bir yelpazede olduğu için 2 adet yükleme açısı belirlenerek bu yükleme açıları için strain-gage doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yükleme 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°" yükleme 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 yükleme açılarında 10 kN yüklemeye gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrası numunede oluşan asal gerilmeler ve yönleri belirlenerek strain-gagelerin yerleştirileceği yer ve açılar belirlenmiştir. Gerilme analizi öncesinde bölüntülenmiş (meshlenmiş) konfigürasyonların farklı açılardan görünümü ve belirlenen strain-gagelerin yerleştirileceği yer ve açılar Şekil 3.2.104'te verilmiştir. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme durumu için numunenin ön yüzeyine 3, sırtına 1 adet ve mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=75° yükleme durumu için numunenin arka yüzeyine 3 adet olmak üzere numuneye toplam 7 adet strain-gage yerleştirilmiştir.



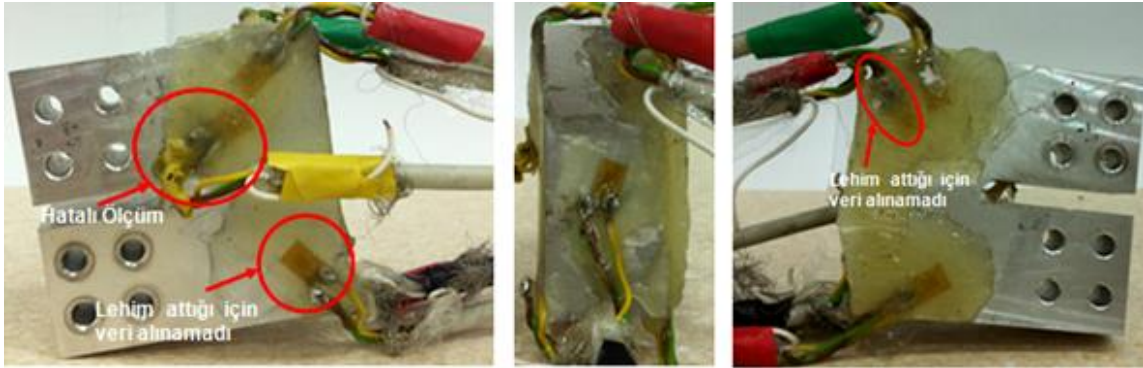
Şekil 3.2.104. Strain-gage uygulaması için oluşturulan sonlu eleman modelleri ve analiz sonrası strain-gagelerin yerleştirileceği yerlerin belirlenmesi, (a) mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45°, (b) mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yükleme durumu.

Deney esnasında yükleme sıfırdan başlayarak ikişer kN artırılarak 10 kN yüke çıkarılmış, daha sonra ikişer kN azaltılarak yüksüz konuma getirilmiştir. Şekil 3.2.105'te her iki yükleme durumu için gerçekleştirilen deneylerden bir kesit görüntüsü verilmiştir.



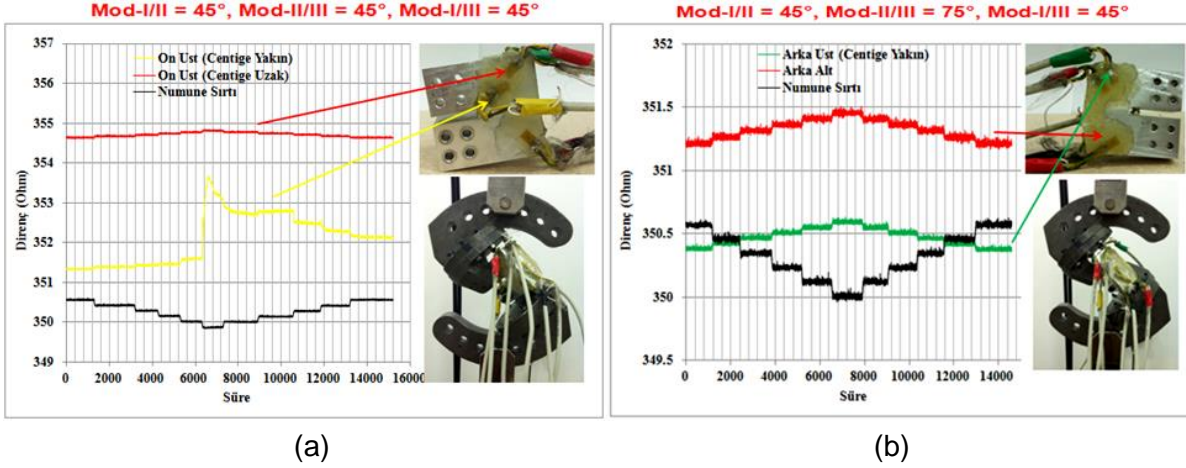
Şekil 3.2.105. Strain-gage deneyleri esnasında cihazın ve test sisteminin genel görünümü.

Şekil 3.2.106'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 lehim attığı için bu strain-gagelerden veri alınamamıştır.



Şekil 3.2.106. Her iki yükleme açısı 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 3.2.107'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 3.2.107. Deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin değişen yüklerle 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.

Simülasyonlar 10 kN yükleme 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 3.2.22'de öncelikle, yüksüz durumdan 10 kN yüke kadar artış esnasındaki her bir yük farkına karşılık gelen strain değerleri her iki yükleme durumu için ölçülerek simülasyondan elde edilen strain 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 yapılan karşılaştırma son satırda yer alan % farkı temsil etmektedir. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme durumu için (Tablo 3.2.22-a) elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, numune ön yüzünün 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 örtüştüğünü göstermektedir. Mod-I/II=45°, mod-II/III=75° ve mod-I/III=45° yükleme durumunda ise (Tablo 3.2.22-b), numune arka yüzünün alt kısmında yer alan strain-gageten alınan ölçümlerde %6.5 hata oranı ile simülasyon ve deney sonuçlarının örtüştüğü görülmektedir. Numune arka yüzünün 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 3.2.22. 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 Çentige Uzak	% Fark	Numune Sırtı	% Fark
D-2 kN yüklemeye z	0.000210	-8.95	-0.000874	-3.15
D-4 kN yüklemeye z	0.000209	-9.67	-0.000859	-4.85
D-6kN yüklemeye z	0.000206	-10.92	-0.000851	-5.70
D-8kN yüklemeye z	0.000204	-11.49	-0.000859	-4.82
D-10kN yüklemeye z	0.000212	-8.17	-0.000875	-3.02
	Ön Üst Çentige Uzak	% Fark	Numune Sırtı	% Fark
10 kN yüklemeye z (ANSYS Çözümü)	0.000231	-8.17	-0.000902	-3.02

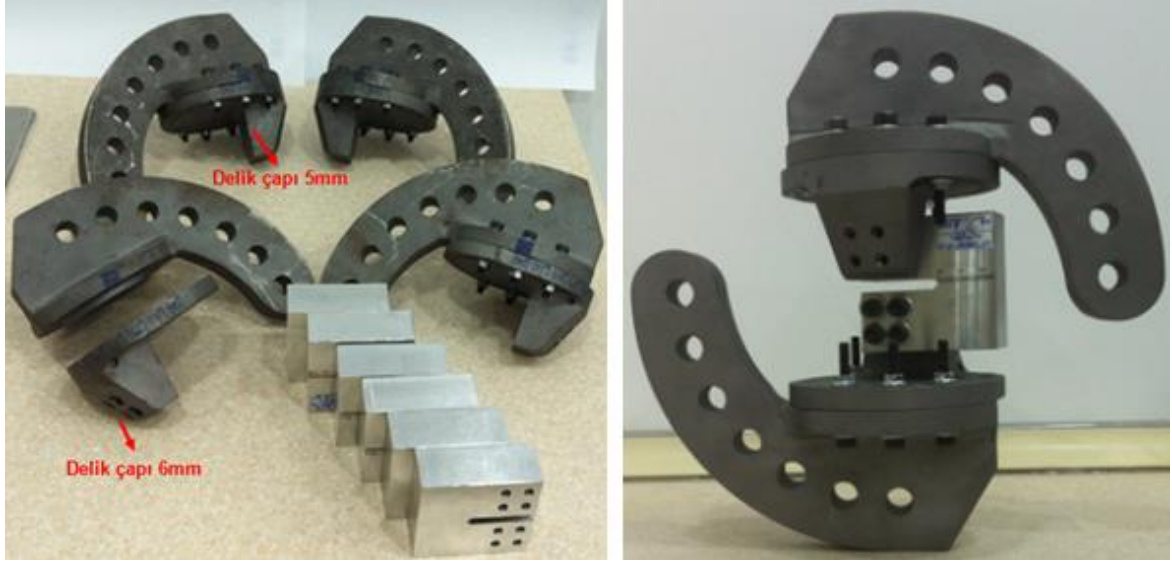
(a)

	Arka Üst Çentige Yakın	% Fark	Arka Alt	% Fark	Numune Sırtı	% Fark
D-2 kN yüklemeye z	0.000270	-22.0717585	0.000321	-3.775911	-0.000692	-27.03774254
D-4 kN yüklemeye z	0.000272	-21.4074768	0.000335	0.572970519	-0.000706	-25.48353425
D-6kN yüklemeye z	0.000266	-23.1011303	0.000322	-3.50110307	-0.000710	-23.07155517
D-8kN yüklemeye z	0.000263	-23.8558364	0.000318	-4.62153051	-0.000711	-24.95420244
D-10kN yüklemeye z	0.000268	-22.6451759	0.000312	-6.54526586	-0.000718	-24.27713622
	Arka Üst Çentige Yakın	% Fark	Arka Alt	% Fark	Numune Sırtı	% Fark
10 kN yüklemeye z (ANSYS Çözümü)	0.000346	-22.65	0.000333	-6.55	-0.000948	-24.28

(b)

3.2.5.4 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 3.2.5.2'de verilen mod-I/II/III CTST tutucusu tasarım boyutlarına uygun olarak üretilmiş ve Şekil 3.2.108'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 5mm 'den 6mm 'ye çıkarılarak ikinci bir mod-I/II/III CTST-numune tutucusu üretilmiş (Şekil 3.2.108) 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 3.2.109'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 3.2.108. CTST-numunesi ve tasarım boyutlarına uygun olarak üretilen tutucu aparatlarının genel görünümü.

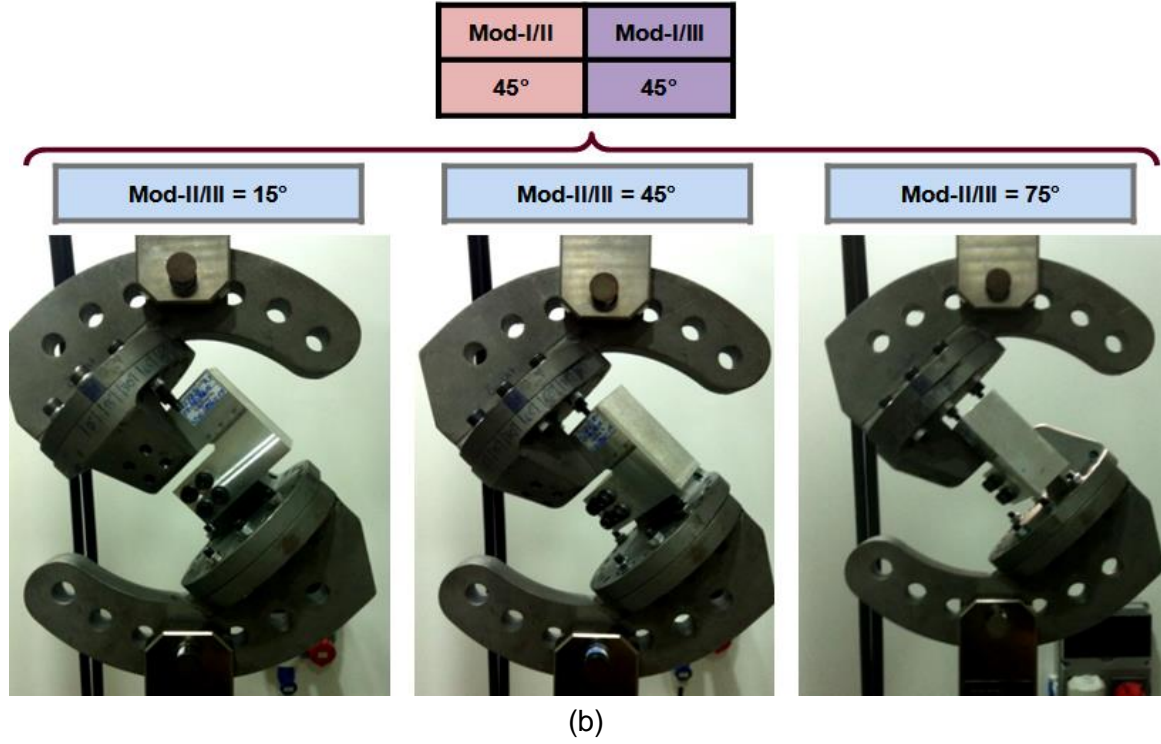
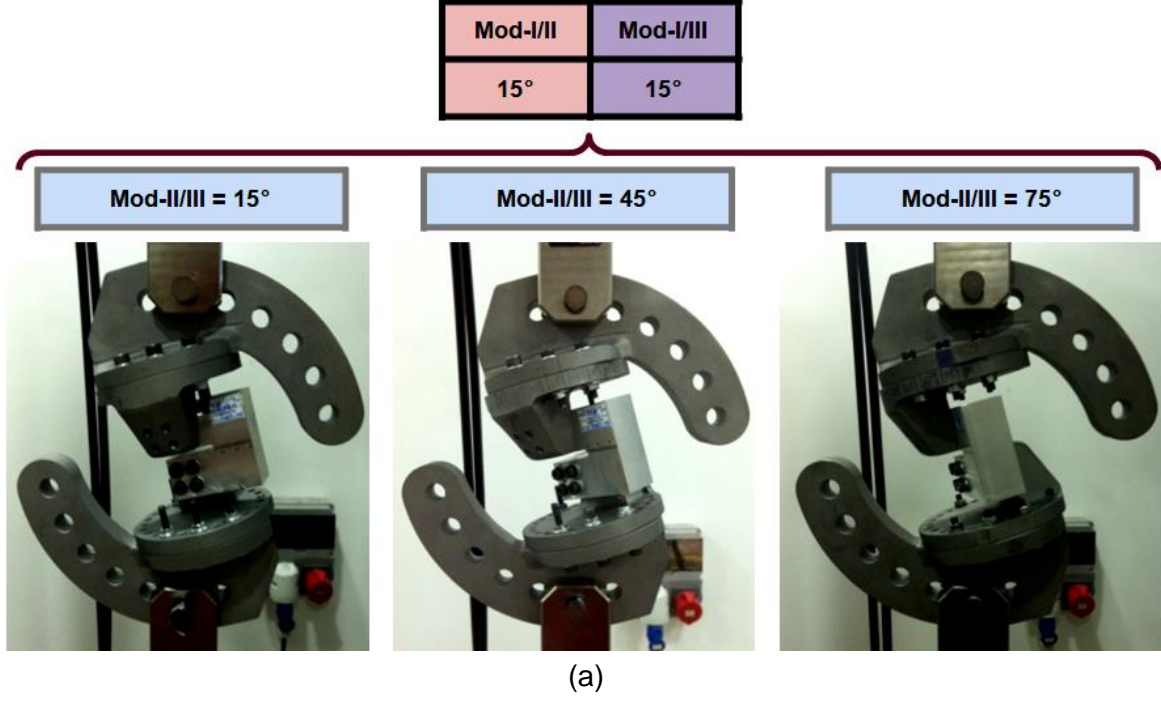


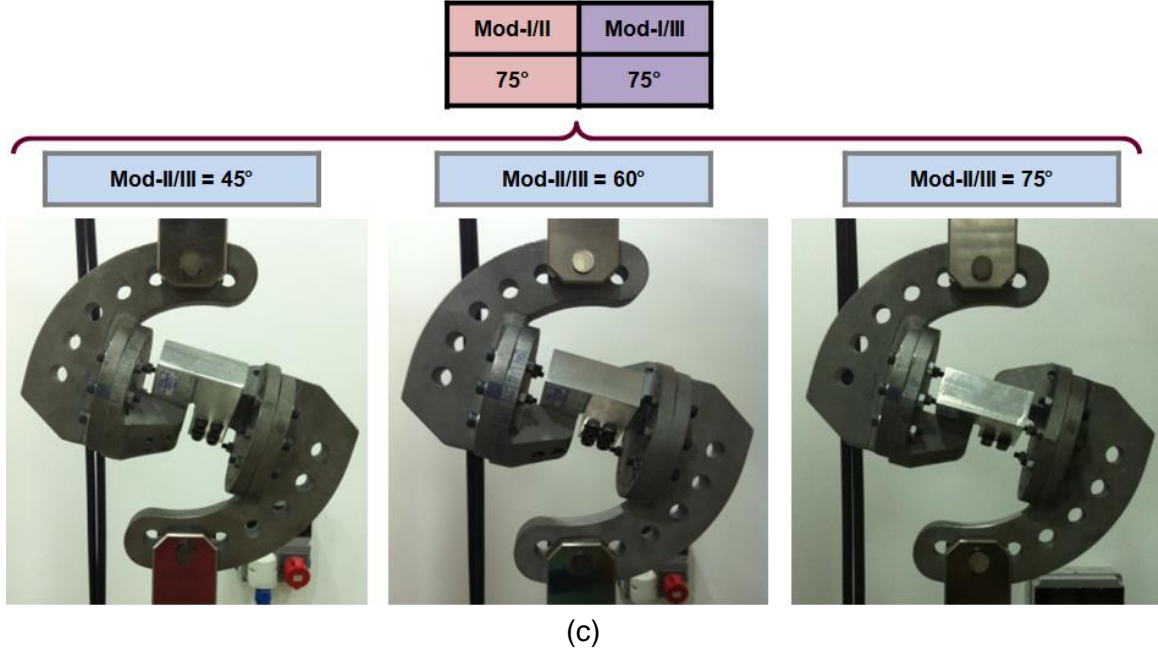
Şekil 3.2.109. Mod-II/III CTST-numune tutucusunun mod-II/III yüklemesi yapabilmesi için tasarlanan ve kaynak işlemi ile tutucuya tutturulan aparat ve tutucunun yakın görünümü.

CTST numunesi mod-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 3.2.110'da bir önceki bölümde analiz sonuçları verilen farklı yükleme açıları için gerçekleştirilmiş kırılma tokluğu testlerinden birer kesit temsili olarak verilmiştir. Her açıda

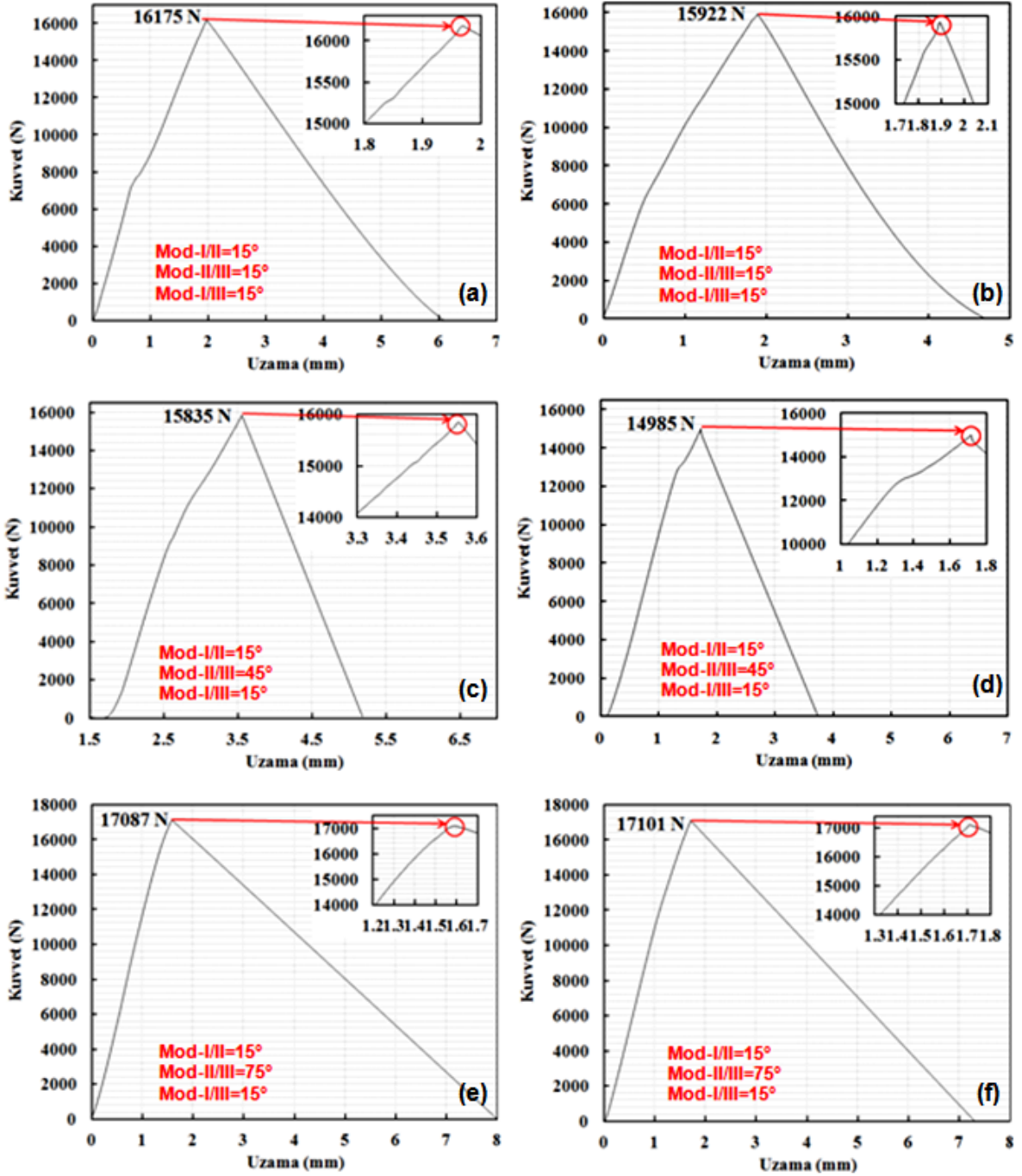
ikişer adet olmak üzere CTST-numunesi kullanılarak toplam 18 adet mod-I/II/III kırılma tokluğu deneyi gerçekleştirilmiştir.





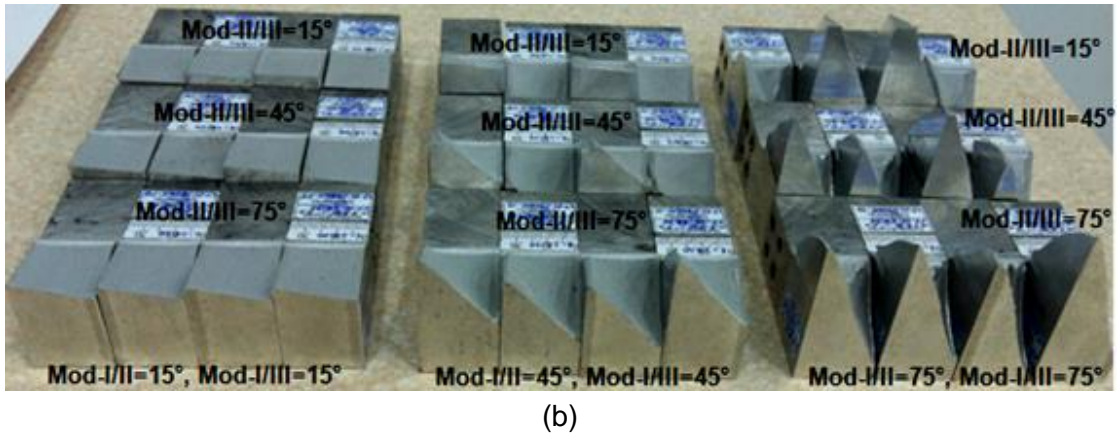
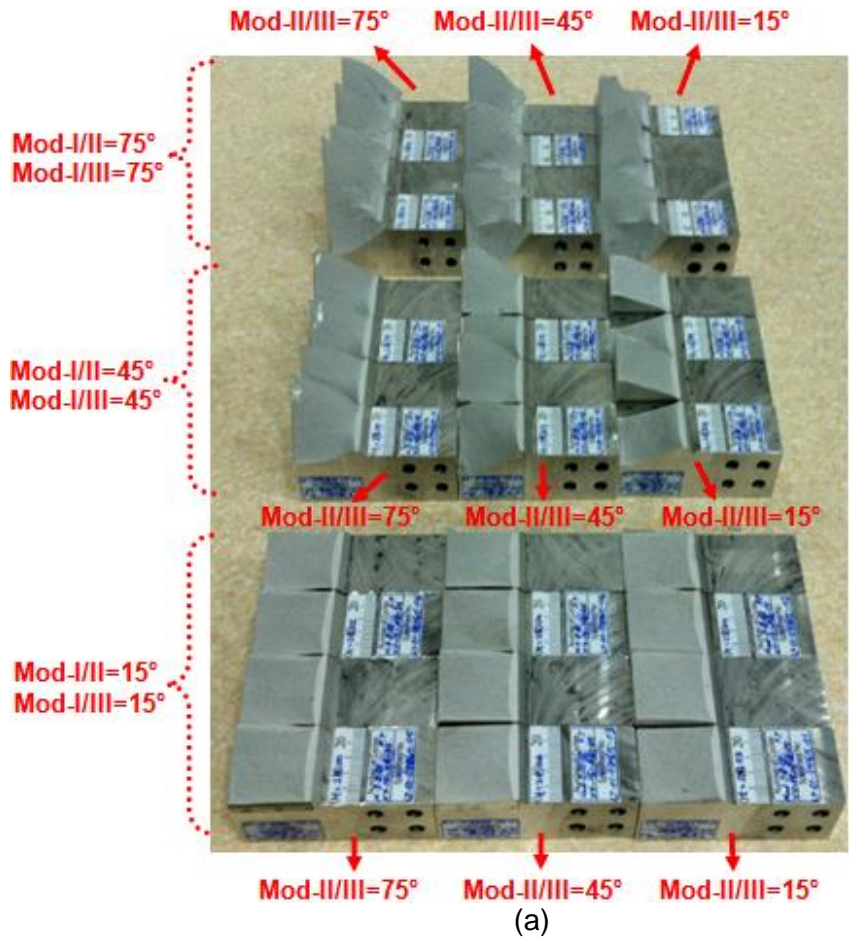
Şekil 3.2.110. Farklı yükleme açılarında gerçekleştirilen CTST- numunesi kırılma tokluğu testlerinden birer kesit, (a) mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, (b) mod-I/II=45°, mod-I/III=45°, (c) mod-I/II=75°, mod-I/III=75° yükleme durumu.

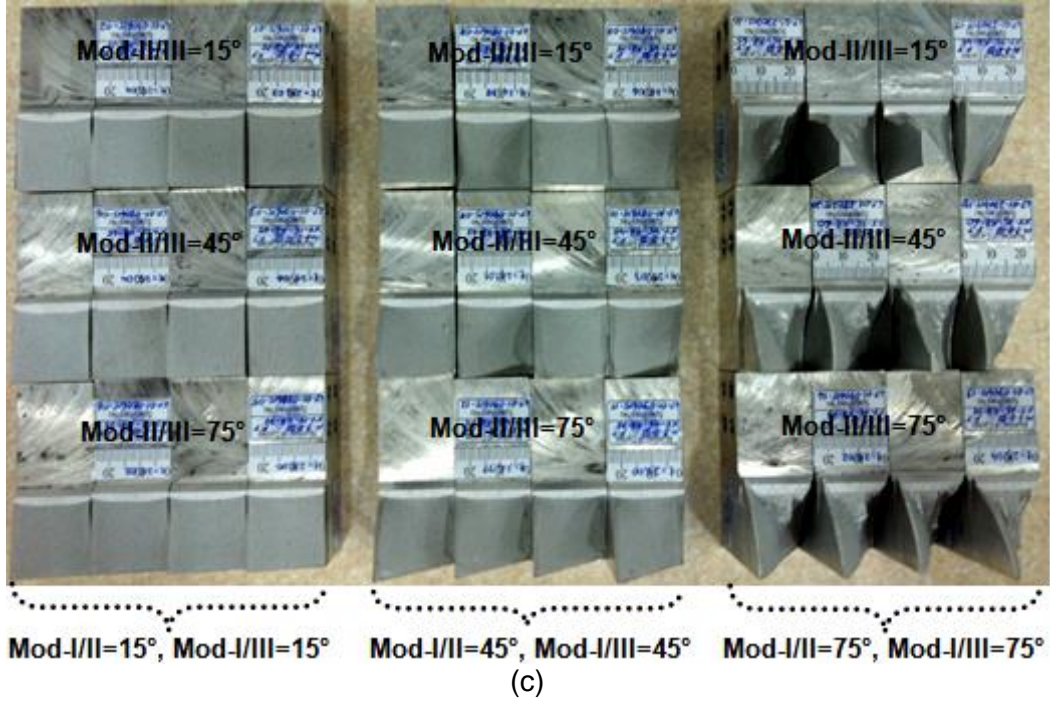
Testler sonrasında cihazdan alınan kuvvet-uzama verileri Excel programı yardımıyla çizdirilerek kopma yükleri ASTM E399-12 standardında belirtilen kriterlere uyularak belirlenmektedir. Şekil 3.2.111 'de mod-I/II=15°, mod-I/III=15°, mod-II/III=15°, 45° ve 75° yükleme açıları için oluşturulan kuvvet-uzama 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 3.2.111. 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 3.2.112'de, belirlenen açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra CTST-numunelerinin kırık yüzeylerinin ön açıdan, yan açıdan ve üstten genel görünüşleri verilmiştir.





Şekil 3.2.112. Farklı açılarda gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerinden sonra CTST-numunelerinin kırılan yüzeylerinin (a) ön açıdan, (b) yan açıdan, (c) üstten genel görünümü.

Tablo 3.2.23'te, gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçları özet olarak verilmiştir. Bölüm 3.2.6'da bu sonuçlar literatürdeki mevcut kriterler ile kıyaslanarak ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Tablo 3.2.23. 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
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

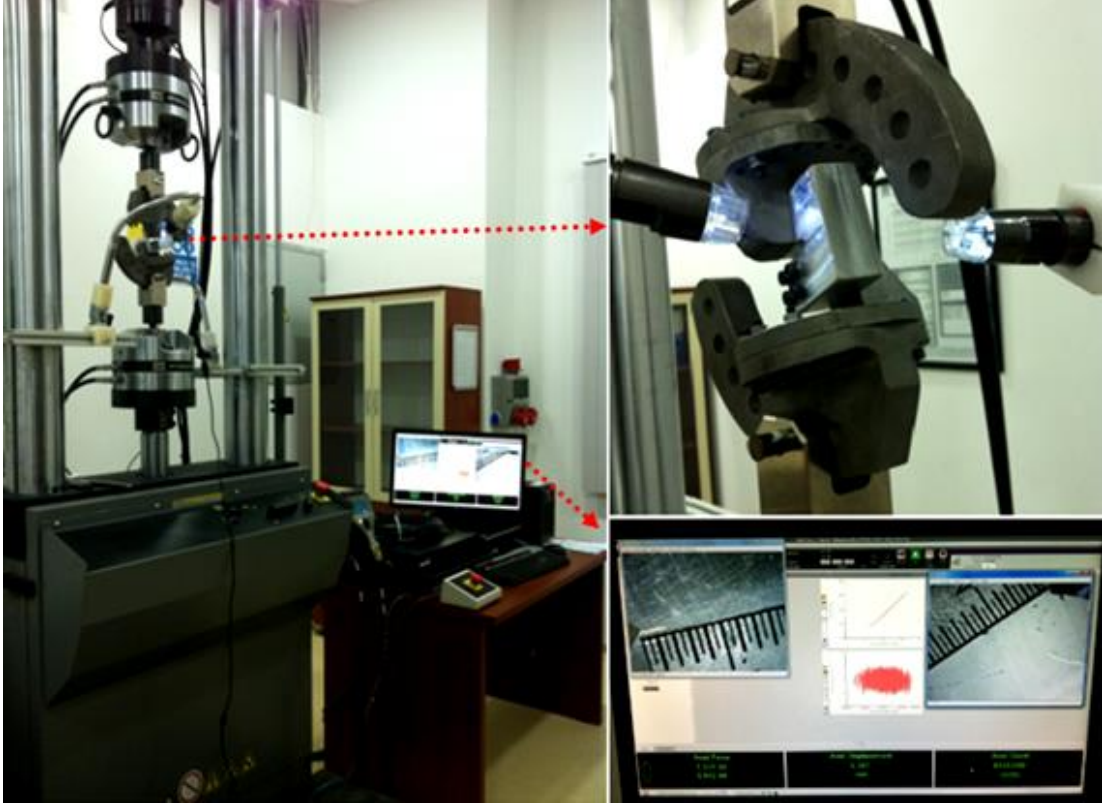
3.2.5.5 Mod-I/II/III CTST-Numunesi Çatlak İlerleme Testleri

CTST-numune mod-I/II/III çatlak ilerleme testleri de, Sakarya Üniversitesi'nde bulunan MTS marka 100 kN-1100 Nm kapasiteli eksenel-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; (Kmax)son ön çatlak \leq (Kmax) başlangıç testi limitine göre belirlenmiştir. Mod-I/II/III da/dN testi için yorulma ön çatlağı mod-I açılma modunda düzlemsel ön çatlak 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 3.2.113) her 30 saniyede bir bilgisayar üzerindeki ekran görüntüsü otomatik olarak bilgisayara kaydedilmiştir.

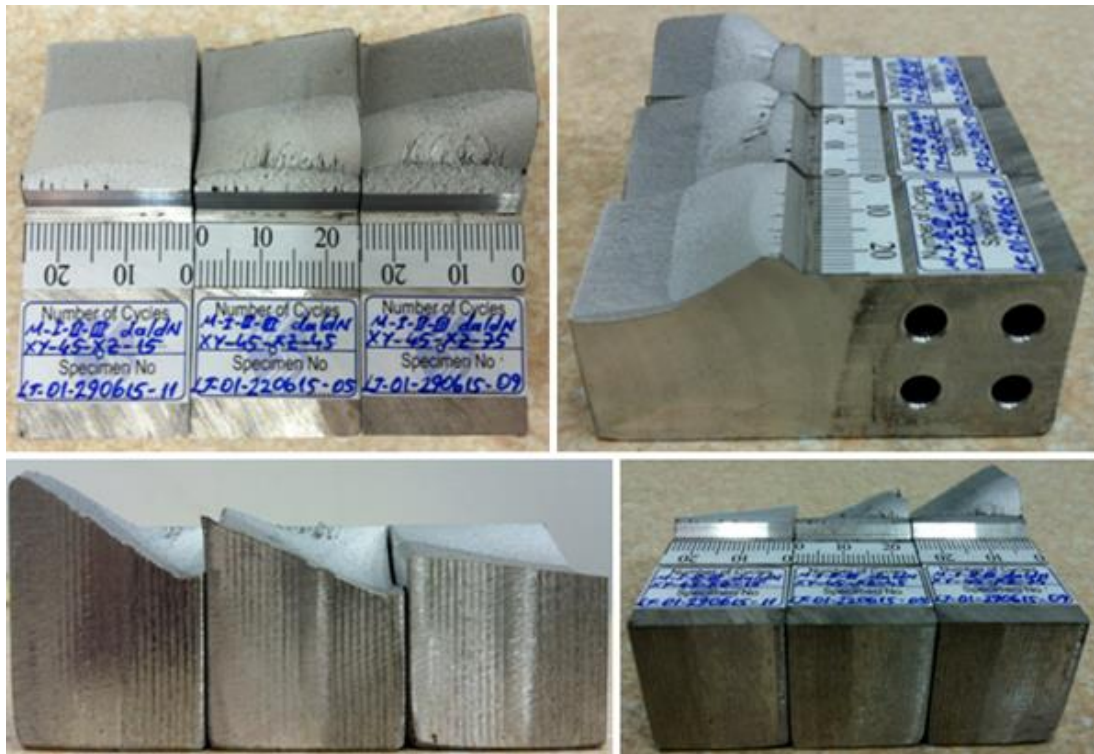


Şekil 3.2.113. Gerçekleştirilen Mod-I/II/III da/dN testlerinden bir kesit görünümü.

Şekil 3.2.114'te, belirlenen yükleme açılarında gerçekleştirilen da/dN testleri sonrasında numunelerin kırılan yüzeylerinin farklı açılardan genel görünümleri verilmiştir. Gerçekleştirilen da/dN test verileri Bölüm 3.3.5'te mevcut ve iyileştirilmiş mod-I/II/III kriterleri ile birlikte ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.



(a)



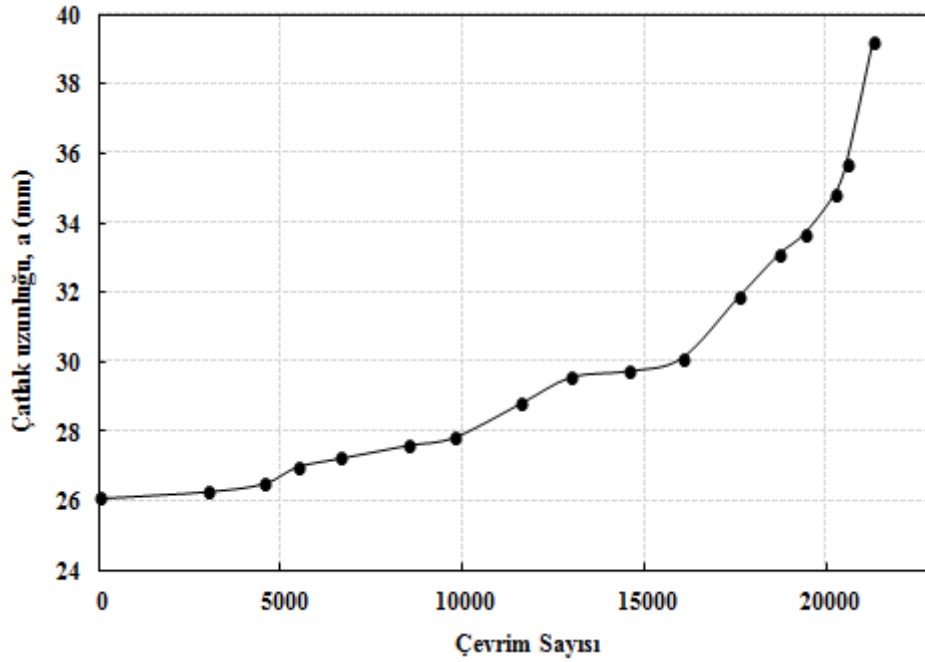
(b)



(c)

Şekil 3.2.114. Farklı yükleme 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° yükleme açıları.

da/dN testleri gerçekleştirilirken numune ön ve arka yüzeyinde bulunan çatlakların çevrim sayılarına göre ilerleyişi kameralar ile kaydedilmektedir. Şekil 3.2.115'te mod-I/II=45°, mod-I/III=45° ve mod-II/III=45° yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testi esnasında çatlakın numune ön yüzeyinde bulunan uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi temsili olarak verilmiştir.



Şekil 3.2.115. Mod-I/II=45°, mod-I/III=45° ve mod-II/III=45° yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testi esnasında çatlakın numune ön yüzeyinde bulunan uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi.

3.2.6 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 yükleme 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 yükleme 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.

3.2.6.1 İki Boyutlu Karışık Mod Kırılma Kriterleri

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 kriter gere göre çatlak, maksimum teğetsel gerilmenin olduğu yönde çatlak ucundan radyal olarak ilerler. Eğer bu teğetsel gerilme değeri kritik bir değeri aşarsa veya eşdeğer gerilme şiddet faktörü (K_{es}) değeri kırılma tokluğu (K_{IC}) değerine ulaşırsa, çatlak ilerlemesi kararsız hale gelir ve kırılma meydana gelir. Bu kriter gere verilen herhangi bir karışık mod-I/II probleminde, K_{es} ve çatlak sapma açısı değerleri aşağıdaki (3.2.4) ve (3.2.5) no.lu denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$K_{es} = \cos \frac{\theta_0}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right] = K_{IC} \quad (3.2.4)$$

$$\theta_0 = -\arccos \left(\frac{3K_{II}^2 + K_I \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \quad (3.2.5)$$

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 ve 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.

Minimum Birim Şekil Değişirme Enerji Yoğunluğu (Minimum Strain Energy Density-MSED) Kriteri:

Bir diğer yaygın kırılma kriteri ise, Sih ve Macdonald (1974) tarafından geliştirilen minimum birim şekil değişirme yoğunluğu kriteridir. Bu kriterde, başlangıç çatlağı minimum birim şekil değişirme yoğunluğu faktörünün olduğu yönde oluşmaktadır. Malzemeye bağlı olarak değişen birim şekil değişirme 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 (3.2.6) ve (3.2.7) no.lu denklemlerde yerine koyularak çatlak sapma açısı, θ hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} & [2 \cos \theta - (\kappa - 1)] \sin \theta k_I^2 + 2 [2 \cos 2\theta - (\kappa - 1) \cos \theta] k_I k_{II} \\ & + [(\kappa - 1 - 6 \cos \theta) \sin \theta] k_{II}^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

$$\begin{aligned} & [2 \cos 2\theta - (\kappa - 1) \cos \theta] k_I^2 + 2 [(\kappa - 1) \sin \theta - 4 \sin 2\theta] k_I k_{II} \\ & + [(\kappa - 1) \cos \theta - 6 \cos 2\theta] k_{II}^2 > 0 \end{aligned} \quad (3.2.7)$$

Maximum Teğetsel Birim Şekil Değişirme Enerji Yoğunluğu (Maximum Tangential Strain Energy Density-MTSED) Kriteri:

Chang (1981) tarafından önerilen maksimum teğetsel birim şekil değişirme kriterini, Koo ve Choy (1991) iyileştirerek maksimum teğetsel birim şekil değişirme kriteri olarak isimlendirilen yeni bir kriter geliştirmişlerdir. Bu kriter gere göre çatlak maksimum teğetsel birim şekil değişirme 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.

$$k_i = \frac{K_i}{\sqrt{\pi}} \quad (i = 1, 2), \quad (3.2.8)$$

$$C = b_{11} \frac{K_I^2}{\pi} + b_{12} \frac{K_I K_{II}}{\pi} + b_{22} \frac{K_{II}^2}{\pi} \quad (3.2.9)$$

$$b_{11} = (1/64\mu)(1 + \cos \theta)(\kappa + 2 + \cos \theta)$$

$$b_{12} = (1/64\mu)(\sin \theta - 3/2 - \kappa - 3 \cos \theta) \quad (3.2.10)$$

$$b_{22} = (1/64\mu)(3 \sin^2 \theta)(\kappa + 3 \cos \theta)$$

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

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial^2 C}{\partial \theta^2} < 0 \quad (3.2.11)$$

Tanaka Kriteri:

Tanaka (1974), karışık modlu koşullar için empirik bir denklem geliştirmiştir. Bu kriter gere göre eşdeğer gerilme şiddet faktörü aşağıda verilen (3.2.12) no.lu denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta K_{eş} = \left[\Delta K_I^4 + 8 \Delta K_{II}^4 \right]^{1/4} \quad (3.2.12)$$

Pook Kriteri:

Düzlem içi karışık mod problemleri için bir diğer empirik denklem ise Pook (1989) tarafından geliştirilmiştir. Bu kriter gere göre mod-I ve mod-II GŞF değerleri aşağıda verilen (3.2.13) no.lu denklemde yerine koyularak eşdeğer GŞF değeri hesaplanmaktadır.

$$\frac{\Delta K_{II}}{\Delta K_{th}} = \left[0.08 \left(\frac{\Delta K_I}{\Delta K_{th}} \right)^2 - 0.83 \frac{\Delta K_I}{\Delta K_{th}} + 0.75 \right]^{1/2} \quad (3.2.13)$$

Richard Kriteri:

Bir diğer 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 (3.2.14) ve (3.2.15) nolu denklemler ile verilen empirik eşitlikler önermiş ve bu eşitlikleri kullanarak çok sayıda doğrulama çalışması gerçekleştirmiştir. Bölüm 3.2.3 'te bu çalışmaların bir kısmına atıfta bulunulmuştur.

$$K_{eq} = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 4(\alpha_1 K_{II})^2} \leq K_{IC} \quad (3.2.14)$$

$$\theta_0 = \mp \left[155.5^\circ \frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right] - 83.4^\circ \left[\frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right]^2 \quad (3.2.15)$$

Denklem (3.2.14) 'te yer alan α_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 kriterleri 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

Bu kritere göre şekilde yer alan φ_0 sapma açısı aşağıda verilen (3.2.17) no.lu denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} & -6K_I \tan\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) - K_{II} \left(6 - 12 \cdot \tan^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)\right) + \left\{ \left[4K_I - 12K_{II} \tan\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \right] \cdot \left[-6K_I \tan\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) - \right. \right. \\ & \left. \left. K_{II} \left(6 - 12 \cdot \tan^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)\right) \right] - 32K_{III}^2 \tan\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \left(1 + \tan^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)\right)^2 \right\} \cdot \left[4K_I - 12K_{II} \tan\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \right]^2 + \\ & 64K_{III}^2 \left(1 + \tan^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)\right)^2 \}^{-1/2} = 0 \end{aligned} \quad (3.2.17)$$

K_I , K_{II} ve K_{III} GŞF değerleri yukarıda verilen denklemde yerine koyularak φ_0 sapma açısı hesaplanmakta ve GŞF değerlerini ve hesaplanan φ_0 sapma açısını kullanarak eşdeğer GŞF değeri $K_{eş}$, aşağıda verilen (3.2.18) no.lu denklem ile elde edilmektedir.

$$K_{eş} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \cdot \left\{ K_I \cos^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) - \frac{3}{2} K_{II} \sin(\varphi_0) + \sqrt{\left[K_I \cos^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) - \frac{3}{2} K_{II} \sin(\varphi_0) \right]^2 + 4K_{III}^2} \right\} \quad (3.2.18)$$

Richard Kriteri:

Bir önceki bölümde iki boyutlu karışık mod kriterleri arasında Richard 'ın geliştirmiş olduğu iki boyutlu kriterin bir özeti verilmişti. Richard vd. (2012) üç boyutlu karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme problemleri için de empirik bir kriter geliştirmişlerdir. Kriterin temeli, Denklem (19) ile verilen eşitliğe dayanmaktadır.

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^u + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^v + \left(\frac{K_{III}}{K_{IIIC}}\right)^w = 1 \quad (3.2.19)$$

$u=1$ ve $v=w=2$ için, yorulmalı çatlak ilerlemesinde (3.2.2) no.lu denklem ile verilen Paris-Erdoğan denkleminde yer alan eşdeğer GŞF değeri üç boyutlu yükleme durumunda aşağıdaki eşitlik ile elde edilmektedir.

$$\Delta K_{eş} = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 5.366 \cdot \Delta K_{II}^2 + 4 \cdot \Delta K_{III}^2} \quad (3.2.20)$$

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

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, $K_{e\vartheta,I,II}$ için bir eşitlik elde etmiş ve sonrasında $K_{e\vartheta,I,II}$ ve K_{III} GŞF değerlerini kullanarak $K_{e\vartheta,I,II,III}$ için bir eşitlik elde etmiştir.

$$K_{e\vartheta,I,II} = \frac{0.83K_I \cdot \sqrt{0.4489K_I^2 + 3K_{II}^2}}{1.5} \quad (3.2.21)$$

$$K_{e\vartheta,I,II,III} = \frac{K_{e\vartheta,I,II} \cdot (1+2\vartheta) + \sqrt{K_{e\vartheta,I,II}^2 \cdot (1-2\vartheta)^2 + 4K_{III}^2}}{1.5} \quad (3.2.22)$$

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

Kikuchi Kriteri:

Bir diğer üç boyutlu kriter, Kikuchi vd. (2012) tarafından önerilmiştir. Pook 'tan farklı olarak Kikuchi kriterinde öncelikle K_I ve K_{III} arasında $K_{e\vartheta,I,III}$ denklemi (3.2.23) tanımlanmış ve sonrasında elde edilen $K_{e\vartheta,I,III}$ ve K_{II} GŞF değerleri kullanılarak, $K_{e\vartheta,I,II,III}$ denklemi (3.2.24) elde edilmiştir.

$$\Delta K_{e\vartheta(I,III)} = \frac{\sqrt{(\Delta K_I - \sqrt{2} \cdot |\Delta K_{III}|)^2 + \Delta K_I^2}}{\sqrt{2}} \quad (3.2.23)$$

$$\Delta K_{e\vartheta(I,II,III)} = \frac{\Delta K_{e\vartheta(I,III)}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_{e\vartheta(I,III)}^2 + 4 \cdot (1.155 \cdot \Delta K_{II})^2} \quad (3.2.24)$$

Tanaka Kriteri:

Tanaka (1974) üç boyutlu yükleme durumları için empirik bir denklem önermiştir. Bu kriter gereği tanımlanan eşdeğer GŞF aşağıdaki denklemde verilmiştir. Denklemden verilen ϑ , Poisson oranını ifade etmektedir.

$$K_{e\vartheta} = \left[K_I^4 + 8 \cdot K_{II}^4 + \frac{8 \cdot K_{III}^4}{1-\vartheta} \right]^{1/4} \quad (3.2.25)$$

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 $K_{e\vartheta}$, malzemenin kırılma tokluğu (Kıc) değerine ulaştığı zaman kararsız çatlak ilerlemesi meydana gelmektedir.

$$K_{e\vartheta} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + (1 + \vartheta) \cdot K_{III}^2} \quad (3.3.26)$$

3.2.6.3 Mod-I/II Karışık Modlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Değerlendirilmesi ve Literatür Modelleri ile Karşılaştırılması

CTS (Richard) Numunesi Sonuçlarının Değerlendirilmesi:

Bölüm 3.2.3.1'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 3.2.24'te 10 mm kalınlıktaki CTS-numuneleri için farklı açılarda gerçekleştirilen mod-I/II kırılma testlerinin sonuçları özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.2.24. $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$ 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
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 3.2.25'te, FCPAS çözümünden elde edilen GŞF değerleri ve Bölüm 3.2.6.1 '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 3.2.25. CTS-numuneleri için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF değerleri ve bu değerlere göre değişik kriterler kullanılarak hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.

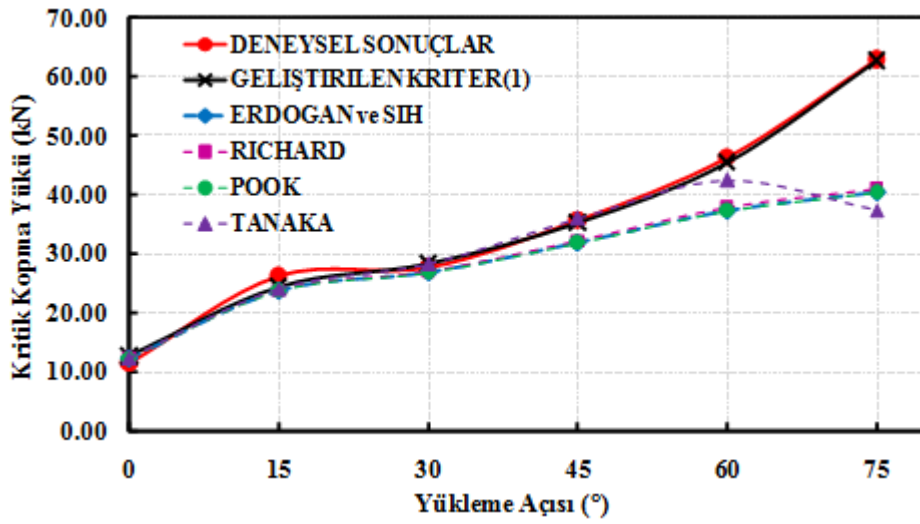
Numune No	Yükleme Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m ^{1/2})			Keş (Mpa*m ^{1/2})			
			K_I	K_{II}	K_{III} (Çatlak ucu kenarı)	RICHARD	ERDOĞAN ve SIH	POOK	TANAKA
CTS-01	0	46.50	9.47	0.00	0.00	9.47	9.47	9.47	9.47
CTS-02	15	46.07	4.88	0.45	0.17	4.94	4.94	4.94	4.88
CTS-03	15	45.96	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 3.2.26'da kriterlerden ve kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri, Şekil 3.2.117'de ise bu yüklerin yükleme açılarına 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 3.2.26. 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 YÜKÜ (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



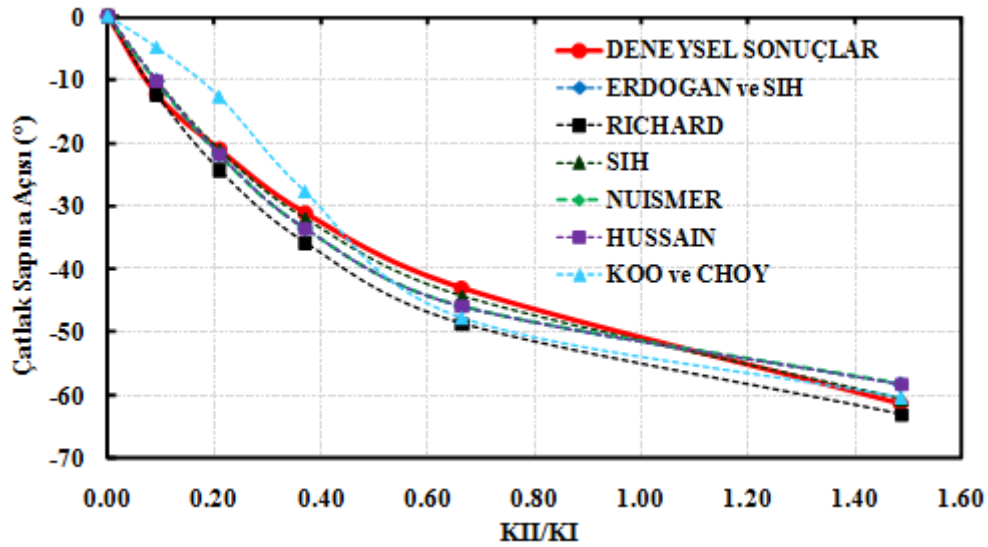
Şekil 3.2.117. CTS-numuneleri için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemme açılarına göre değişim grafiği.

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

Tablo 3.2.27'de kriterlerden ve kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları, Şekil 3.2.118'de ise bu sapma açılarının, K_{II}/K_I oranlarına göre değişimi verilmiştir. Tablo 3.2.27'de yer alan deneysel çatlak sapma açıları, her bir numunenin kırık yüzeylerinden ölçülen çatlak sapma açılarıdır.

Tablo 3.2.27. 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 AÇISI (°)
		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 3.2.118. 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° yüklemeye açısına kadar birbirine yakın bir eğilimde oldukları ancak 60° ve 75° yüklemeye

açılarında kriterler arasında bir miktar sapmalar gözlemlenmektedir. Sih kriterinin deneysel sonuçlara en yakın eğilimde olduğu görülmüştür.

T-Numunesi Sonuçlarının Değerlendirilmesi:

Bölüm 3.2.3.5'te, 25 mm kalınlıktaki T-numuneleri için $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$ yükleme açıları gerçekteştirilen gerilme ve kırılma analizlerinin sonuçları ve sonrasında bu yükleme açıları için gerçekteştirilen 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 3.2.28'de T-numuneleri için farklı açılarda gerçekteştirilen mod-I/II kırılma testlerinin sonuçları özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.2.28. $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$ yükleme açıları gerçekteştirilen 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 3.2.29'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 3.2.29. T-numuneleri için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF ve bu değerlere göre kriterlerden hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.

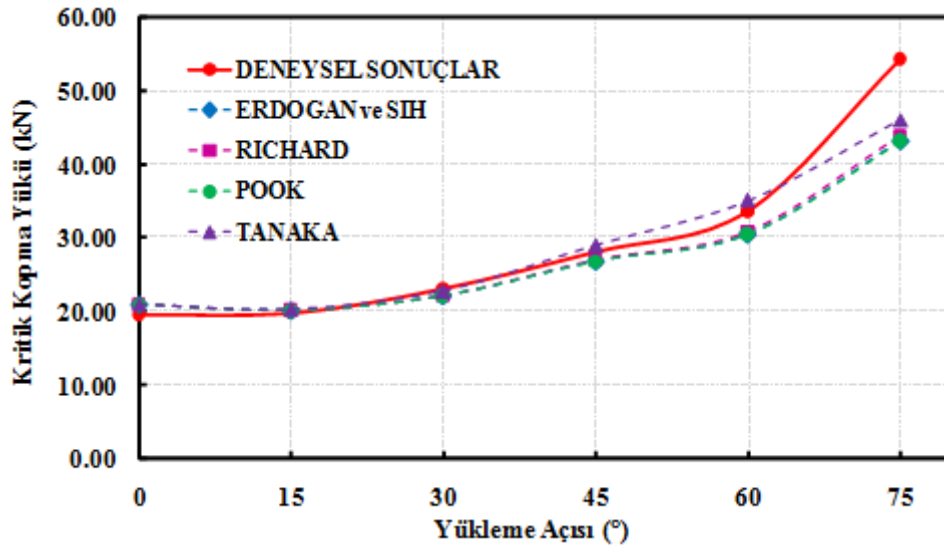
Numune No	Yükleme Açısı	Çatlak Uzunluğu	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m ^{1/2})	Keş (Mpa*m ^{1/2})
-----------	---------------	-----------------	--	-----------------------------

	(°)	(mm)	K _I	K _{II}	K _{III} (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 3.2.30'da, T-numuneleri için kriterlerden ve kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri, Şekil 3.2.119'da ise bu yüklerin yükleme açlarına göre değişimi verilmiştir.

Tablo 3.2.30. $\theta=0^{\circ}-15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-60^{\circ}-75^{\circ}$ yükleme açılarında T numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.

Numune No	Yükleme Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	KRİTERLERE GÖRE KOPMA YÜKÜ (kN)				DENEYSEL KOPMA YÜKÜ (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 3.2.119. T-numuneleri için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açılarına göre değişim grafiği.

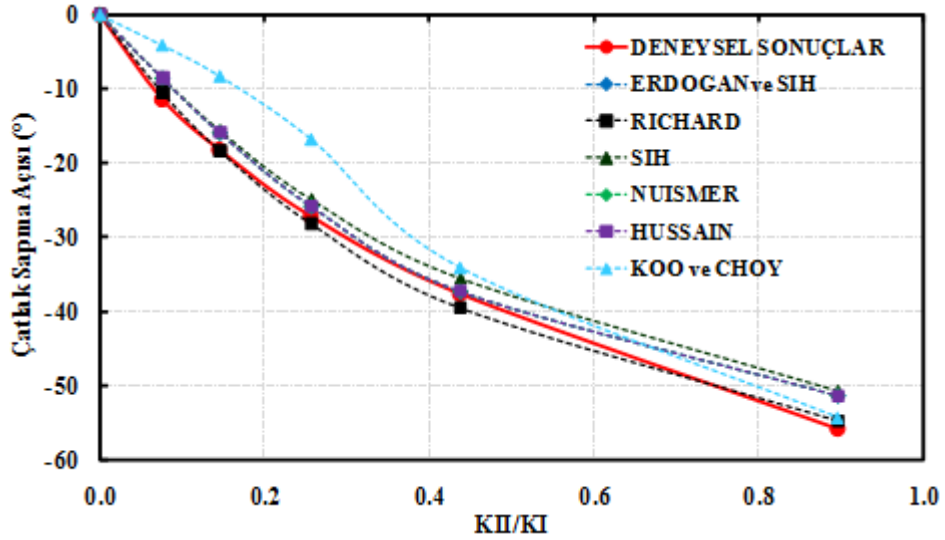
CTS-numunesi kopma yükü sonuçlarında olduğu gibi, T-numunesi için de 45° yüklemeye açısından sonra Erdoğan-Sih, Richard ve Pook kriterlerinde deney sonuçlarından bir miktar sapmalar olduğu gözlemlenmektedir. Ancak özellikle 75° yüklemeye açısında belirgin bir sapma oluşmaktadır. Tanaka kriterinin 60°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

Tablo 3.2.31'de kriterlerden ve kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları, Şekil 3.2.120'de ise bu sapma açılarının, K_{II}/K_I oranlarına göre değişimi verilmiştir.

Tablo 3.2.31. $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$ yüklemeye açılarında T-numuneleri için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak sapma açıları.

Numune No	Yüklemeye Açısı (°)	KRİTERLERE GÖRE ÇATLAK SAPMA AÇISI (°)						DENEYSEL ÇATLAK SAPMA AÇISI (°)
		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 3.2.120. 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° yükleme açısına kadar birbirine yakın bir eğilimde oldukları ancak 60° ve 75° yükleme açıları arasında bir miktar sapmalar olduğu gözlemlenmektedir. T-numunesi için Richard kriterinin diğer kriterlere oranla deneysel sonuçlara daha yakın eğilimde olduğu görülmüştür.

3.2.6.4 Mod-I/III Karışık Modlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Değerlendirilmesi ve Literatür Modelleri ile Karşılaştırılması

Bölüm 3.2.4'te, CTT-numunesi için $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$ ve 90° yükleme açıları 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 3.2.32'de 25 mm kalınlıktaki CTT-numuneleri için farklı açılarda gerçekleştirilen mod-I/III kırılma testlerinin sonuçları özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.2.32. $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ-90^\circ$ yükleme açılarında CTT-numuneleri için gerçekleştirilen kırılma tokluğu test sonuçlarının özeti.

Numune No	Yükleme Açısı (°)	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 yükleme durumunda elde edilen K_{II} değeri, düzlem dışı yönde eğilme etkisinden kaynaklandığı ve bu yüzden çatlak ucu boyunca negatiften pozitif veya pozitiften negatife (yükleme 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 3.2.33'te, çatlak ucu merkezi için, Tablo 3.2.34'te ise çatlak ucu kenarı için FCPAS çözümünden elde edilen GŞF değerleri ve Bölüm 3.2.6.2'de detayları verilen üç boyutlu çatlak ilerleme kriterlerinden, Richard, Irwin, Pook, Tanaka ve Kikuchi kriterlerine göre elde edilen eşdeğer GŞF değerleri verilmiştir.

Tablo 3.2.33. CTT-numuneleri 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 ^{1/2})			Keş (Mpa*m ^{1/2})				
			<u>Çatlak Ucu Merkez</u>			RICHARD	IRWIN	POOK	TANAKA	KIKUCHI
			K _I	K _{II}	K _{III}					
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 3.2.34. CTT-numuneleri çatlak ucu kenarı 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 ^{1/2})			Keş (Mpa*m ^{1/2})				
			Çatlak Ucu Kenar			RICHARD	IRWIN	POOK	TANAKA	KIKUCHI
			K _I	K _{II}	K _{III}					
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
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 3.2.35'te çatlak ucu merkezi için, Tablo 3.2.36'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_{IC}) değerine ulaşması için gerekli olan yükleri temsil etmektedir.

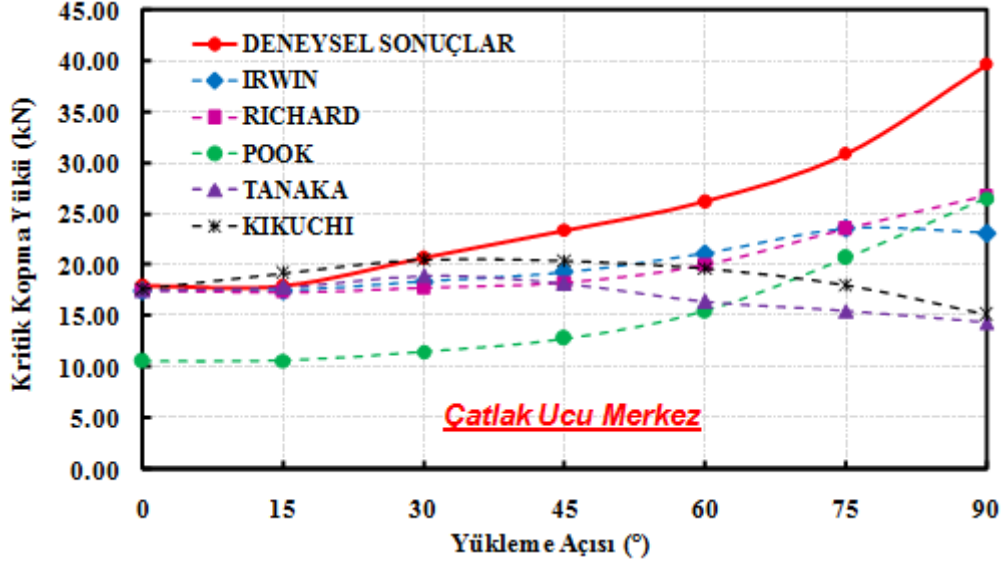
Tablo 3.2.35. CTS-numuneleri çatlak ucu merkezi için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.

Numune No	Yüklemeye Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	KRİTERLERE GÖRE KOPMA YÜKÜ (kN)					DENEYSEL KOPMA YÜKÜ (kN)
			<u>Çatlak Ucu Merkez</u>					
			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

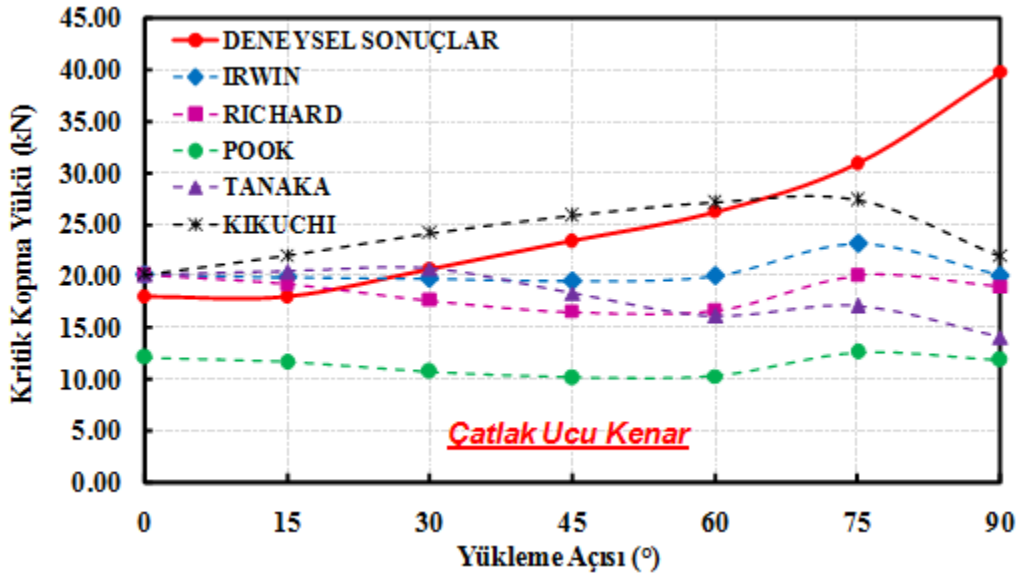
Tablo 3.2.36. CTT-numuneleri çatlak ucu kenarı için kriterlerden ve gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kopma yükleri.

Numune No	Yüklemeye Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	KRİTERLERE GÖRE KOPMA YÜKÜ (kN)					DENEYSEL KOPMA YÜKÜ (kN)
			<u>Çatlak Ucu Kenar</u>					
			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 3.2.121 ve 3.2.122'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 3.2.121. CTT-numuneleri çatlak ucu merkezi için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açlarına göre değişim grafiği.



Şekil 3.2.122. CTT-numuneleri çatlak ucu kenarı için elde edilen kopma yükleri ile kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açlarına göre değişim grafiği.

Çatlak ucu merkezi için elde edilen kopma yüklerinde (Şekil 3.2.121) Pook kriteri hariç tüm kriterler 30° yükleme açısına kadar birbirine yakın eğilim göstermektedirler. Ancak 30° den sonra tüm kriterler deneysel sonuçlardan sapmaktadırlar. Yükleme açısı arttıkça deneylerden elde edilen kopma yükleri artarken, Kikuchi ve Tanaka kriterine göre hesaplanan kopma yükleri 30° yükleme açısından sonra, Kikuchi kriteri ise 75° yükleme açısından sonra azalma yönünde eğilim göstermektedir. Özellikle 90° lik yükleme durumuna, deneysel kopma yüküne en yakın sonuç veren kriter 13-14 kN fark ile deneysel sonuca yaklaşmaktadır.

Çatlak ucu kenarı için elde edilen kopma yüklerinde de (Şekil 3.2.122) 30° yükleme 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.

3.2.6.5 Mod-I/II/III Karışık Modlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Testlerinin Değerlendirilmesi ve Literatür Modelleri ile Karşılaştırılması

Bölüm 3.2.5.2'de, 25 mm kalınlıktaki CTST-numuneleri için $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$ ve 90° yükleme açıları gerçeğe 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 3.2.37'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 3.2.37. CTST-numunesi kırılma tokluğu testleri ile ilgili test matrisi tablosu.

Numune No	Yükleme Açısı (°)			Mod-I-II		Mod-II-III		Mod-I-III		M-I $\cos\alpha \cdot \cos\theta$	M-II $\sin\alpha \cdot \cos\beta$	M-III $\sin\beta \cdot \sin\theta$
	M-I-II (α)	M-II-III (β)	M-I-III (θ)	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	0.93	0.25	0.07
CTST-02	15	15	15	0.97	0.26	0.97	0.26	0.97	0.26	0.93	0.25	0.07
CTST-03	15	45	15	0.97	0.26	0.71	0.71	0.97	0.26	0.93	0.18	0.18
CTST-04	15	45	15	0.97	0.26	0.71	0.71	0.97	0.26	0.93	0.18	0.18
CTST-05	15	75	15	0.97	0.26	0.26	0.97	0.97	0.26	0.93	0.07	0.25
CTST-06	15	75	15	0.97	0.26	0.26	0.97	0.97	0.26	0.93	0.07	0.25
CTST-07	45	15	45	0.71	0.71	0.97	0.26	0.71	0.71	0.50	0.68	0.18
CTST-08	45	15	45	0.71	0.71	0.97	0.26	0.71	0.71	0.50	0.68	0.18
CTST-09	45	45	45	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.50	0.50	0.50
CTST-10	45	45	45	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.50	0.50	0.50

CTST-11	45	75	45	0.71	0.71	0.26	0.97	0.71	0.71	0.50	0.18	0.68
CTST-12	45	75	45	0.71	0.71	0.26	0.97	0.71	0.71	0.50	0.18	0.68
CTST-13	75	45	75	0.26	0.97	0.71	0.71	0.26	0.97	0.07	0.68	0.68
CTST-14	75	45	75	0.26	0.97	0.71	0.71	0.26	0.97	0.07	0.68	0.68
CTST-15	75	60	75	0.26	0.97	0.50	0.87	0.26	0.97	0.07	0.48	0.84
CTST-16	75	60	75	0.26	0.97	0.50	0.87	0.26	0.97	0.07	0.48	0.84
CTST-17	75	75	75	0.26	0.97	0.26	0.97	0.26	0.97	0.07	0.25	0.93
CTST-18	75	75	75	0.26	0.97	0.26	0.97	0.26	0.97	0.07	0.25	0.93

Tablo 3.2.38'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 3.2.38. CTST-numunesi kırılma tokluğu test verileri ve FCPAS çözümleri.

Numune No	Yüklem Açısı (°)			t (mm)	Çatlak Uzunluğu (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		
							K_I	K_{II}	K_{III}	K_I	K_{II}	K_{III}	K_I	K_{II}	K_{III}
CTST-01	15	15	15	25.03	26.56	16.18	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	15.92	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	15.84	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	14.99	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	17.09	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	17.10	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	20.84	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	20.67	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	22.10	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	21.69	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	23.82	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	22.99	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	38.43	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	39.43	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	37.58	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	38.11	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	36.77	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	36.68	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 3.2.39'da verilmiştir.

Tablo 3.2.39. Richard, Tanaka ve Pook kriterine göre elde edilen eşdeğer GŞF değerleri.

Numune No	Mod-I-II Yükleme Açısı (α)	Mod-II-III Yükleme Açısı (β)	Mod-I-III Yükleme Açısı (θ)	Kv (3B RICHARD KRITERINE GORE)			Kv (3B TANAKA KRITERINE GORE)			Kv (3B POOK KRITERINE GORE)					
				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-LT-01-010615-01	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-LT-01-010615-02	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-LT-01-020615-03	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-LT-01-080615-04	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-LT-01-080615-05	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-LT-01-080615-06	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-LT-01-080615-07	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-LT-01-080615-08	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-LT-01-080615-09	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-LT-01-080615-10	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-LT-01-090615-11	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-LT-01-090615-12	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-LT-01-270715-15	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-LT-01-270715-16	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-LT-01-270715-18	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-LT-01-280715-20	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-LT-01-090615-13	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-LT-01-090615-14	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

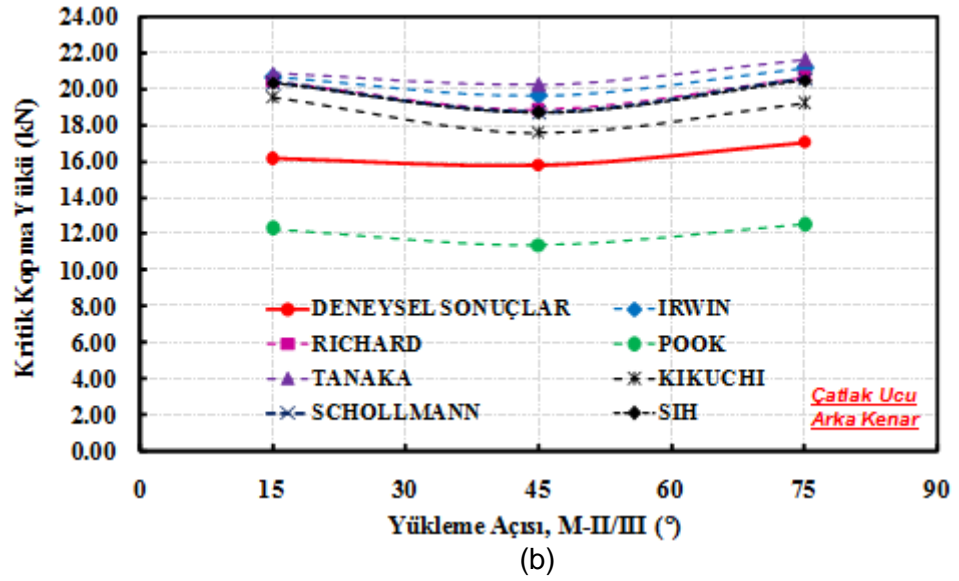
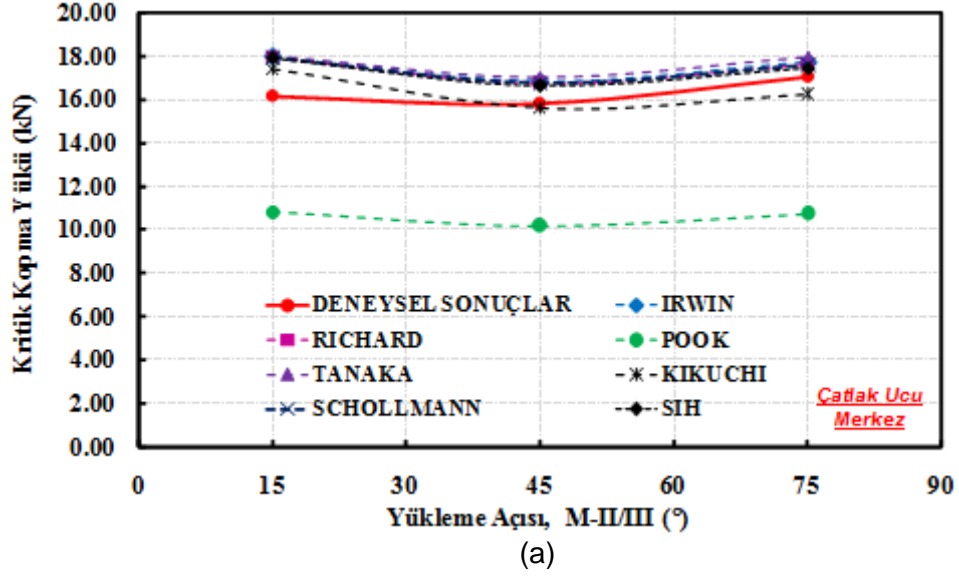
Son olarak bu eşdeğer GŞF değerlerine karşılık gelen kritik kopma yükleri hesaplanarak deneyden elde edilen kopma yükleri ile birlikte Tablo 3.2.40'ta verilmiştir.

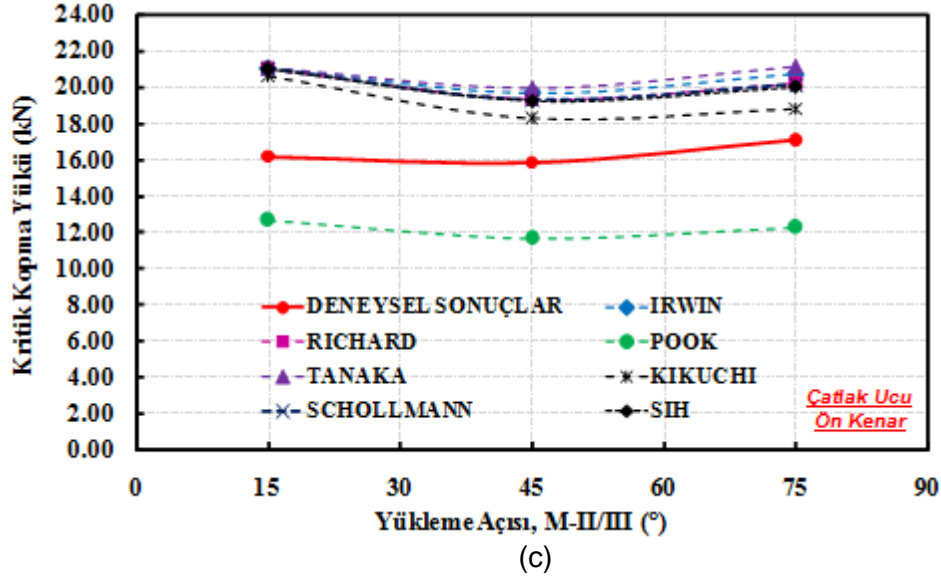
Tablo 3.2.40. Kırılma tokluğu deneylerinden ve Richard, Tanaka ve Pook kriterlerinden elde edilen kopma yükü değerleri.

Numune No	Mod-I-II Yükleme Açısı (α)	Mod-II-III Yükleme Açısı (β)	Mod-I-III Yükleme Açısı (θ)	P kritik (N) (3D RICHARD KRITERINE GORE)			P kritik (N) (3D TANAKA KRITERINE GORE)			P kritik (N) (3D POOK KRITERINE GORE)			P(kritik) Deneyel Sonuçlara göre (N)
				MERKEZ	ARKA KENAR	ÖN KENAR	MERKEZ	ARKA KENAR	ÖN KENAR	MERKEZ	ARKA KENAR	ÖN KENAR	
CTST-LT-01-010615-01	15	15	15	17978	19788	21029	18037	20142	21073	10845	11937	12674	16175
CTST-LT-01-010615-02	15	15	15	17587	19267	20565	17660	19706	20602	10609	11619	12396	15922
CTST-LT-01-020615-03	15	45	15	16785	18469	18775	17039	19520	19221	10204	11183	11359	15835
CTST-LT-01-080615-04	15	45	15	16527	17932	18465	16799	19138	18965	10052	10850	11174	14985
CTST-LT-01-080615-05	15	75	15	17648	20029	19622	17986	20773	20342	10768	12162	11915	17087
CTST-LT-01-080615-06	15	75	15	17683	20063	19677	18022	20809	20389	10789	12183	11949	17101
CTST-LT-01-080615-07	45	15	45	22542	22957	25331	23731	26872	25602	13802	13970	15346	20838
CTST-LT-01-080615-08	45	15	45	20234	19480	23413	21693	22829	23606	12340	11793	14180	20667
CTST-LT-01-080615-09	45	45	45	18853	17459	20718	20246	20347	23551	12327	10817	12908	22095
CTST-LT-01-080615-10	45	45	45	18848	17443	20705	20242	20327	23542	12323	10806	12900	21691
CTST-LT-01-090615-11	45	75	45	17511	15691	16463	17590	17470	18727	12173	9803	10300	23819
CTST-LT-01-090615-12	45	75	45	17496	15665	16438	17574	17438	18696	12162	9786	10284	22985
CTST-LT-01-270715-15	75	45	75	26723	18169	26184	19130	15157	24138	21127	11419	16911	38430
CTST-LT-01-270715-16	75	45	75	26531	17836	25812	19034	14887	23774	20933	11199	16649	39431
CTST-LT-01-270715-18	75	60	75	24997	17609	22200	17127	14912	19353	20858	11097	14200	37575
CTST-LT-01-280715-20	75	60	75	24221	16315	20695	16711	13796	17998	20076	10253	13199	38105
CTST-LT-01-090615-13	75	75	75	21845	16183	17885	14401	13536	15248	19028	10258	11417	36769
CTST-LT-01-090615-14	75	75	75	21379	15235	16995	14146	12792	14415	18576	9628	10813	36680

Tablolarda sonuçları verilen, kriterlere göre yapılan hesaplamalar diğer üç boyutlu kırılma kriterleri için de yapılmıştır. Şekil 3.2.123'te, mod-I/II=15, mod-I/III=15° yüklenme 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.

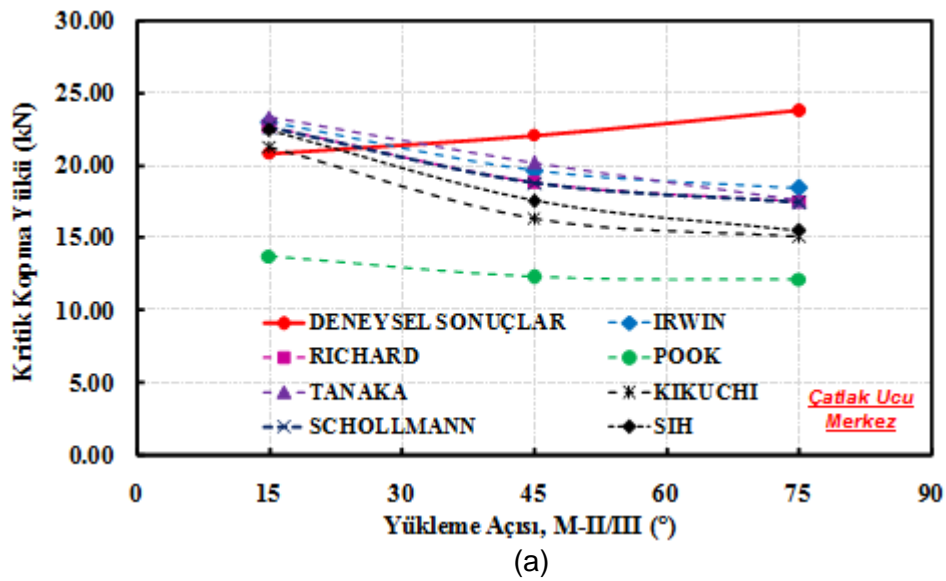


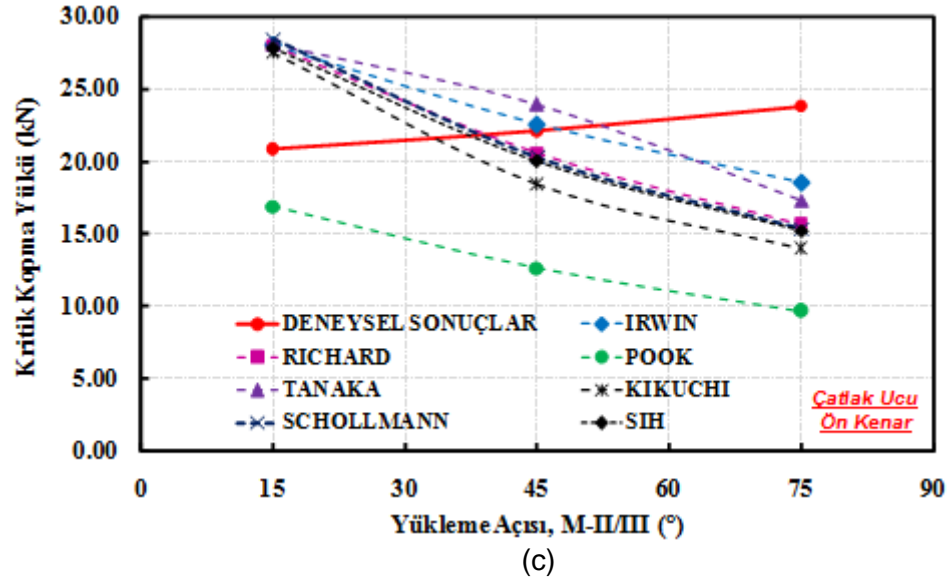
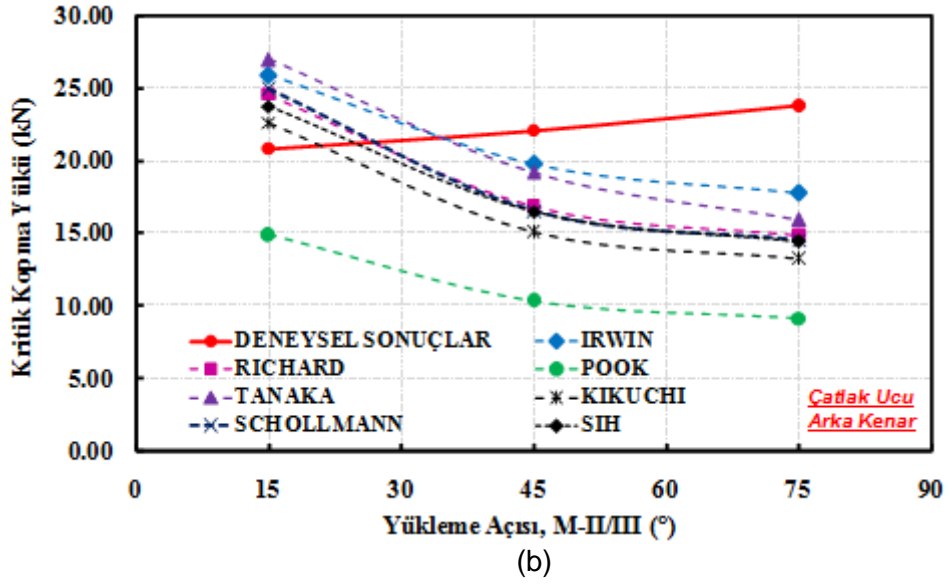


Şekil 3.2.123. Mod-I/II=15, mod-I/III=15° yüklem durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=15°, 45° ve 75° yüklem açlarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı.

Mod-I/II=15, mod-I/III=15° yüklem açısında, deneysel kopma yüklerine en yakın eğilimler çatlak ucu merkezi için çizdirilen dağılım grafiğinde (Şekil 3.2.123-a) görülmüştür. Kikuchi kriteri her üç durum için de deneysel sonuçlara en yakın dağılımı vermektedir.

Şekil 3.2.124'te, mod-I/II=45, mod-I/III=45° yüklem durumunda, çatlak ucu merkezi, ön ve arka kenarı için elde edilen kopma yüklerinin, mod-II/III=15°, 45° ve 75° yüklem açlarına göre değişim grafikleri verilmiştir.

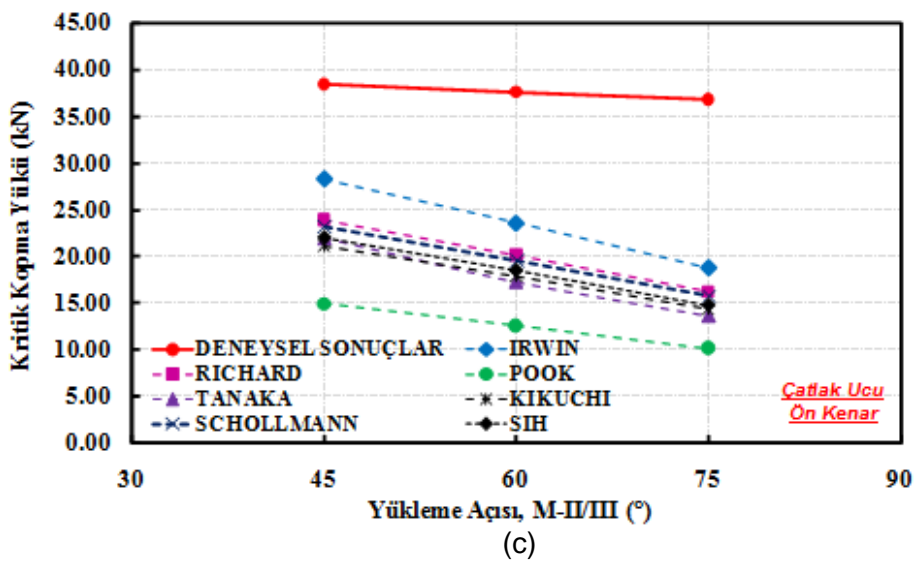
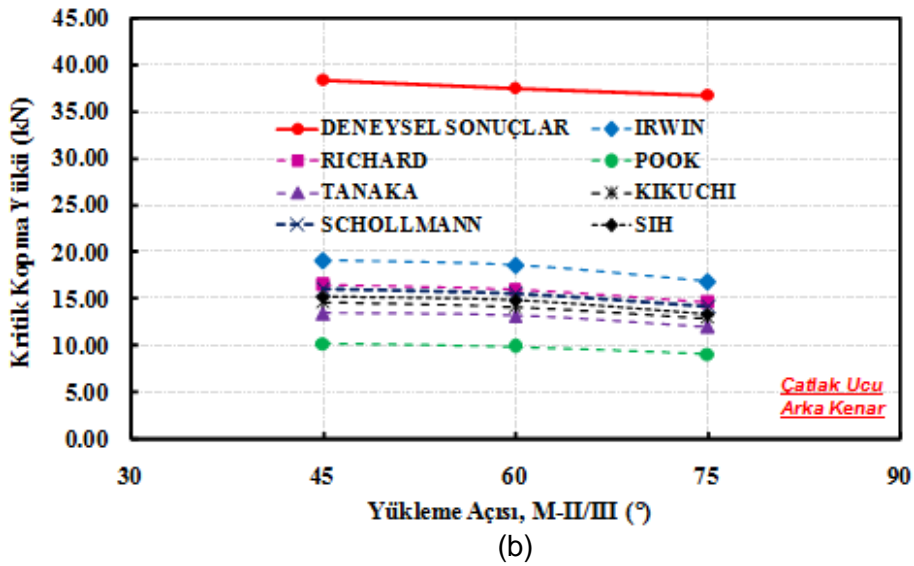
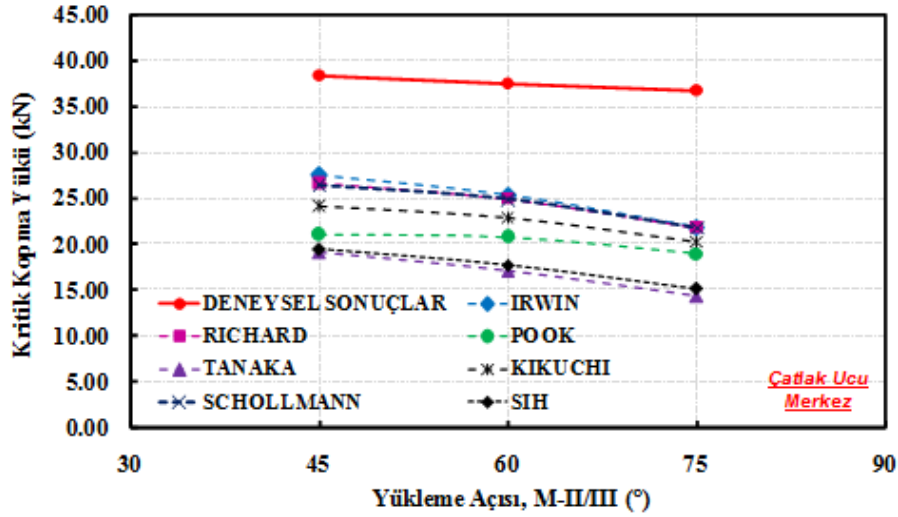




Şekil 3.2.124. Mod-I/II=45, mod-I/III=45° yüklemeye durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=15°, 45° ve 75° yüklemeye açılarına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı.

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 3.2.125'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 3.2.125. Mod-I/II=75, mod-I/III=75° yüklem durumunda, kopma yüklerinin mod-II/III=45°, 60° ve 75° yüklem açısına göre değişimi, (a) çatlak ucu merkezi, (b) arka, (c) ön kenarı.

Bu yükleme açıları, 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 10kN 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.

3.2.7 İki Boyutlu Kırılma ve Çatlak Yüzeyi İlerleme Kriteri Geliştirilmesi

3.2.7.1 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/FAC3D 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_v) kırılma tokluğuna (K_{Ic}) ulaştığı anda numunenin kırıldığı düşünülerek, ölçülen çatlak uzunluğuna karşılık gelen K_v değeri hesaplanmaktadır. Daha sonra DataFit (2015), lineer ve non-lineer regresyon analiz programı yardımıyla en uygun denklemler elde edilerek kriterler geliştirilmiştir. 2. Dönem proje ara raporunun (113M407; Dönem-2) 2h.1.1 no.lu bölümünde CTS-numune verileri ile geliştirilen kriter örnekleri verilmiştir. Daha önceki dönemde geliştirilen bu kriterler, tutarlı terimlerden oluşmadığı için, kriterler yeniden güncellenerek yeni kriter geliştirilmesinde, terimlerin tutarlı olmasına dikkat edilmiştir.

CTS-numuneleri kullanılarak $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ$ 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 (3.2.27) 'de verilmiştir.

$$K_{eş} = (a \cdot K_I^4 + b \cdot K_{II}^4 + c \cdot K_I^2 \cdot K_{II}^2)^{1/4} \quad (3.2.27)$$

Tablo 3.2.41'de, yukarıdaki denklemde yer alan katsayılar verilmiştir.

Tablo 3.2.41. CTS-numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin katsayıları.

a	b	c
0.9151	-0.2401	2.4070

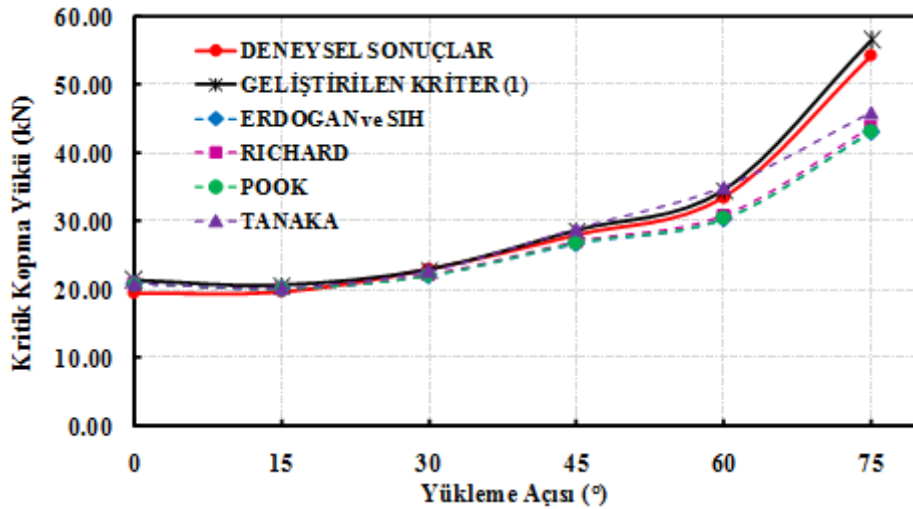
Geliştirilen kritere göre CTS-numune verilerini kullanarak, eşdeğer GŞF değerleri ve kopma yükleri hesaplanmış ve deneysel kopma yükleri ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3.2.42'de verilmiştir.

Tablo 3.2.42. Geliştirilen kritere göre CTS-numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF ile hesaplanan kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Numune No	Yüklemeye Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m ^{1/2})		GELİŞTİRİLEN KRİTERE GÖRE		DENEYSEL KOPMA YÜKÜ (kN)	FARK (%)
			K _I	K _{II}	Keş (Mpa*m ^{1/2})	Kopma Yüğü (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 3.2.126'da CTS-numuneleri için geliştirilen kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açısına göre değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 3.2.126. CTS-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yüklemeye açısına göre değişim grafiği.

Geliştirilen kriterin her bir yükleme 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.

3.2.7.2 CTS-Numune Verileri İle Geliştirilen Kriterin T-Numunesine Uygulanması

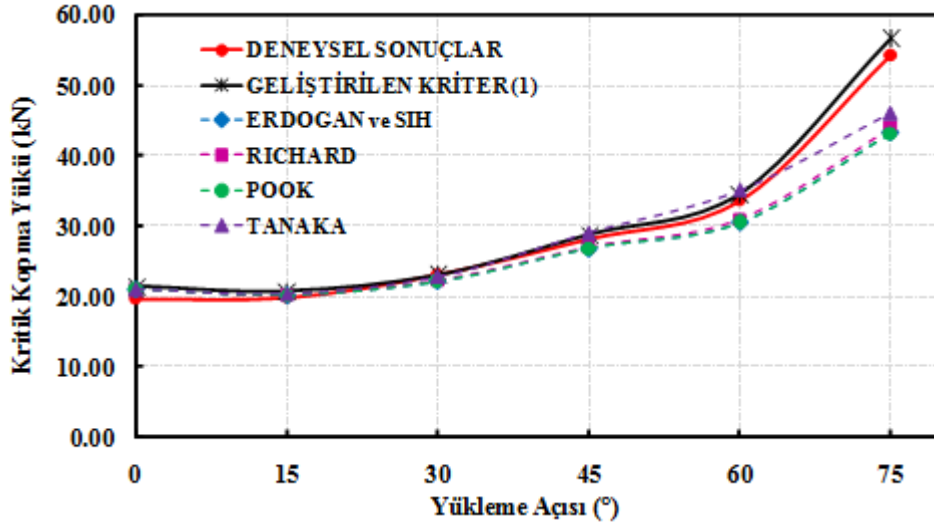
Tablo 3.2.43'te CTS-numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin, T-numunesi için gerçekleştirilen FCPAS analiz sonuçlarına uygulanması sonucu elde edilen GŞF değerleri (K_I ve K_{II}) kullanılarak hesaplanan deneysel kopma yükleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Ortalama % 4.52 hata oranı ile 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 3.2.43. Geliştirilen kriterin (1) T-numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF kullanılarak hesaplanan kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Numune No	Yükleme Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) ($\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$)		GELİŞTİRİLEN KRİTERE GÖRE		DENEYSEL KOPMA YÜKÜ (kN)	FARK (%)
			K_I	K_{II}	Keş ($\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	Kopma Yüğü (kN)		
T-01	0	27.57	14.71	0.00	14.38	20.16	18.82	6.65
T-02	0	26.03	13.73	0.00	13.43	21.48	19.60	8.75
T-03	15	26.93	14.24	1.08	13.98	20.75	19.80	4.58
T-04	15	26.34	14.06	1.04	13.80	20.99	19.70	6.15
T-05	30	26.21	12.69	1.84	12.58	23.03	23.07	0.17
T-06	30	26.90	12.87	1.94	12.77	22.71	20.64	9.11
T-07	45	25.24	9.91	2.54	10.09	28.75	28.09	2.30
T-08	45	25.46	10.06	2.52	10.22	28.38	29.21	2.92
T-09	60	27.13	7.74	3.38	8.36	34.62	33.59	2.98
T-10	60	26.58	7.54	3.14	8.09	35.86	34.76	3.07
T-11	75	26.89	4.00	3.58	5.13	56.64	54.31	4.11
T-12	75	26.70	3.94	3.60	5.08	56.98	55.04	3.40

Şekil 3.2.127'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 3.2.127. T-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği.

3.2.7.3 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° yükleme açılarında gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri ile T numuneleri kullanılarak $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ$ ve 75° 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 (3.2.28)'de verilmiştir.

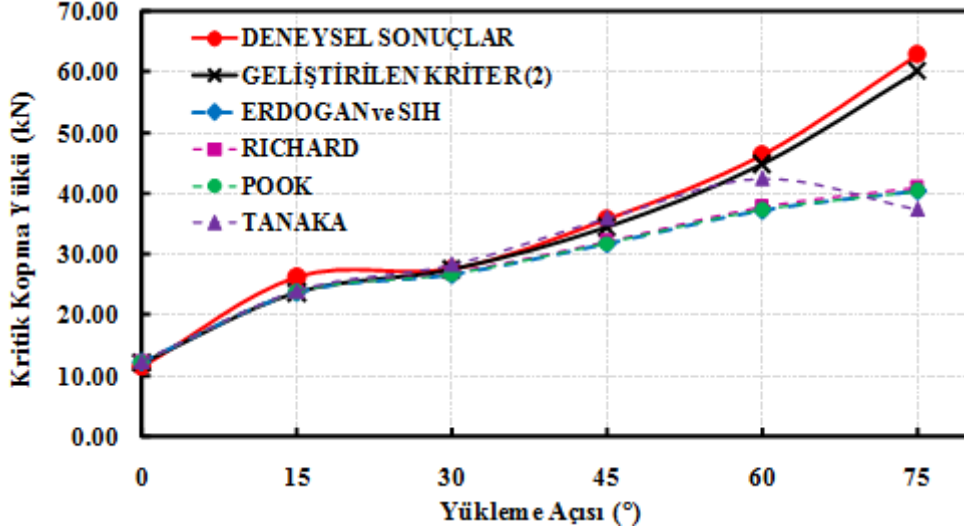
$$K_{e\theta} = (a \cdot K_I^4 + b \cdot K_{II}^4 + c \cdot K_I^2 \cdot K_{II}^2)^{1/4} \quad (3.2.28)$$

Tablo 3.2.44'te, yukarıdaki denklemde yer alan katsayılar verilmiştir.

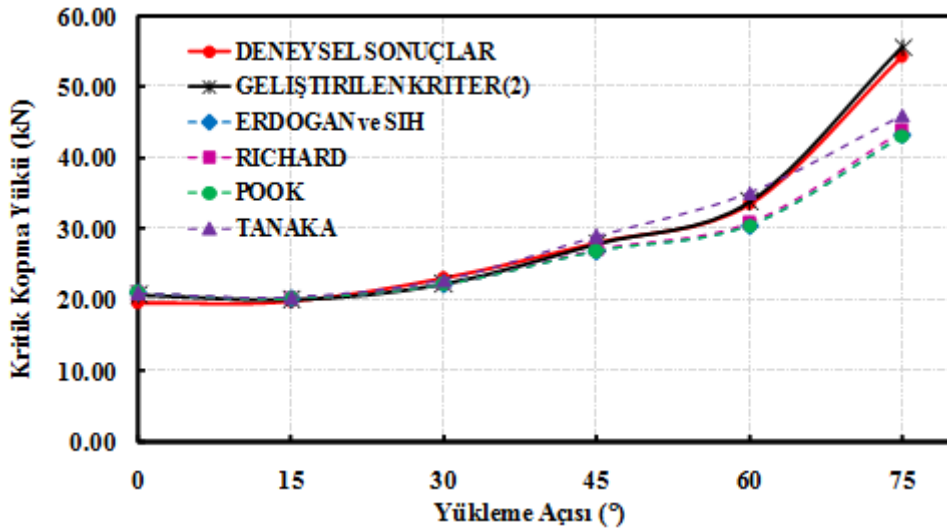
Tablo 3.2.44. CTS ve T-numune verileri kullanılarak geliştirilen kriterin katsayıları.

a	b	c
1.0519	-0.0350	2.3056

Şekil 3.2.128'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 3.2.129'da verilmiştir.



Şekil 3.2.128. CTS-numunesi, deneysel kopma yükleri ile mevcut kriterler ve geliştirilen ikinci kriterden elde edilen kopma yüklerinin yüklem e açısına göre değişim grafiği.



Şekil 3.2.129. T-numunesi, deneysel kopma yükleri ile mevcut kriterler ve geliştirilen ikinci kriterden elde edilen kopma yüklerinin yüklem e 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 kriter de diğer kriterlere oranla deneysel sonuçlara en yakın eğilimi vermiştir.

3.2.7.4 Mod-I/II CTS (Richard) ve T-Numunesi Sonuçlarını Kullanılarak Geliştirilen Çatlak Sapma Açısı Kriteri

CTS ve T-numuneleri kullanılarak $\theta=0^{\circ}-15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-60^{\circ}-75^{\circ}$ yükleme açılarında gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri sonrasında kırılan numune yüzeylerinden ölçülen çatlak sapma açıları ile FCPAS/FAC3D 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 (3.2.29)'da verilmiştir. Kriter gelişiminde diğer kriterlerde olduğu gibi tutarlı terimlerden oluşmasına dikkat edilmiştir.

$$\theta_0 = -\arccos\left(\frac{a \cdot K_{II}^2 + K_I \cdot \sqrt{K_I^2 + b \cdot K_{II} \cdot K_I + c \cdot K_{II} \cdot K_I}}{K_I^2 + d \cdot K_{II}^2}\right) \quad (3.2.29)$$

Denklemden yer alan katsayılar Tablo 3.2.45'te verilmiştir.

Tablo 3.2.45. 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-numunesi ve T-numunesi için elde edilen çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 3.2.46 ve Tablo 3.2.47'de verilmiştir. Diğer kriterler ile karşılaştırılmaması için çatlak sapma açısı için geliştirilen kriter "3" no.lu kriter olarak isimlendirilmiştir.

Tablo 3.2.46. Geliştirilen kriter 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

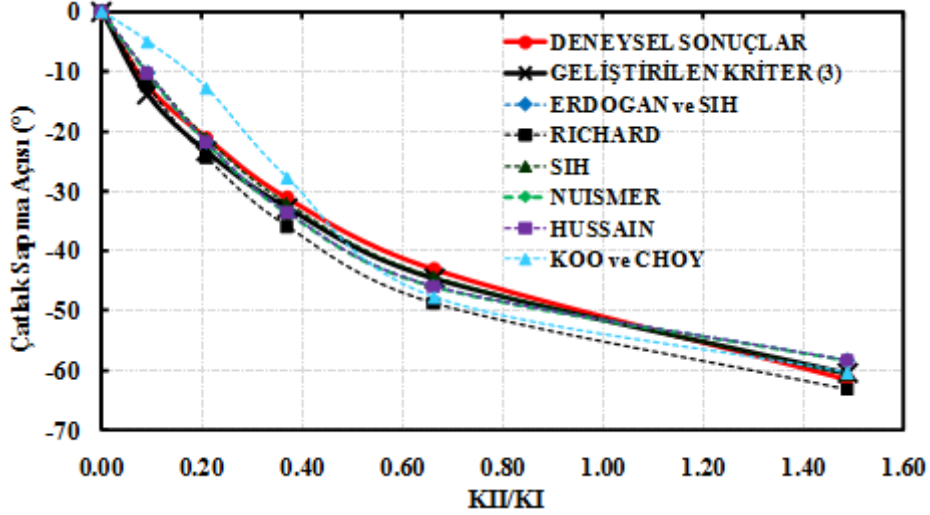
CTS-06	30	-21.87	-24.37	-21.24	-21.87	-21.87	-12.79	-23.42	-20.22
CTS-07	45	-33.64	-35.91	-32.08	-33.64	-33.64	-27.82	-32.82	-31.20
CTS-08	45	-33.03	-35.31	-31.51	-33.03	-33.03	-26.82	-32.31	-31.72
CTS-09	60	-46.00	-48.75	-44.37	-46.00	-46.00	-47.82	-44.63	-43.09
CTS-10	60	-46.13	-48.90	-44.52	-46.13	-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 3.2.47. Geliştirilen kritere ve mevcut kriterlere göre T-numunesi için elde edilen çatlak sapma açısı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

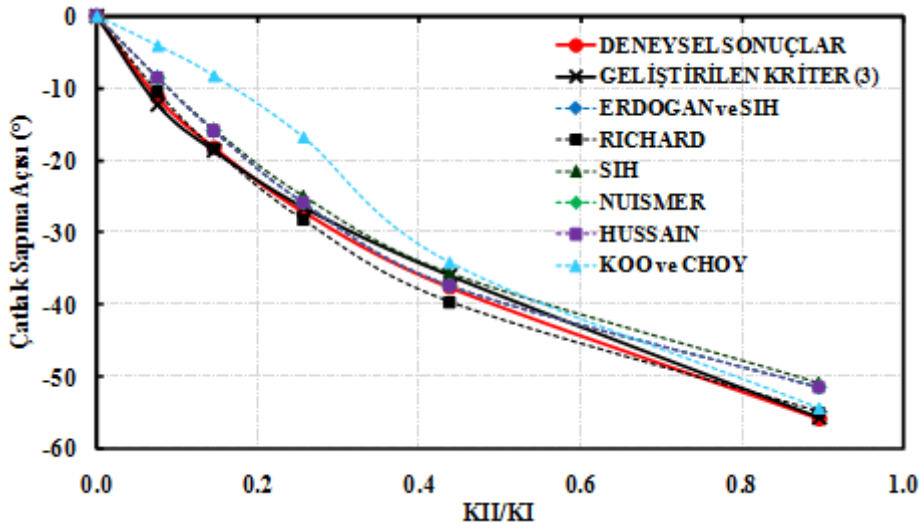
ÇATLAK SAPMA AÇILARI (°)									
Numune No	Yük Açısı (°)	Erdoğan ve Sih	Richard	Sih	Nuismer	Hussain	Koo ve Choy	Geliştirilen Kriter (3)	Deneysel Sonuçlar
T-01	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T-02	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T-03	15	-8.55	-10.52	-8.50	-8.55	-8.55	-4.09	-12.31	-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 3.2.130'da CTS-numunesi için ve Şekil 3.2.131'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° yükleme açısına kadar deneysel sapma açılarına yakın bir eğilim göstermektedirler. Ancak 60° ve 75° yükleme 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 3.2.130. 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 3.2.131. T-numunesi için, deneysel çatlak sapma açıları ile mevcut kriterler ve geliştirilen kriterden elde edilen sapma açılarının K_{II}/K_I oranına göre değişim grafiği.

3.2.8 Üç Boyutlu Kırılma ve Çatlak Yüzeysel İlerleme Kriteri Geliştirilmesi

Bölüm 3.2.4'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

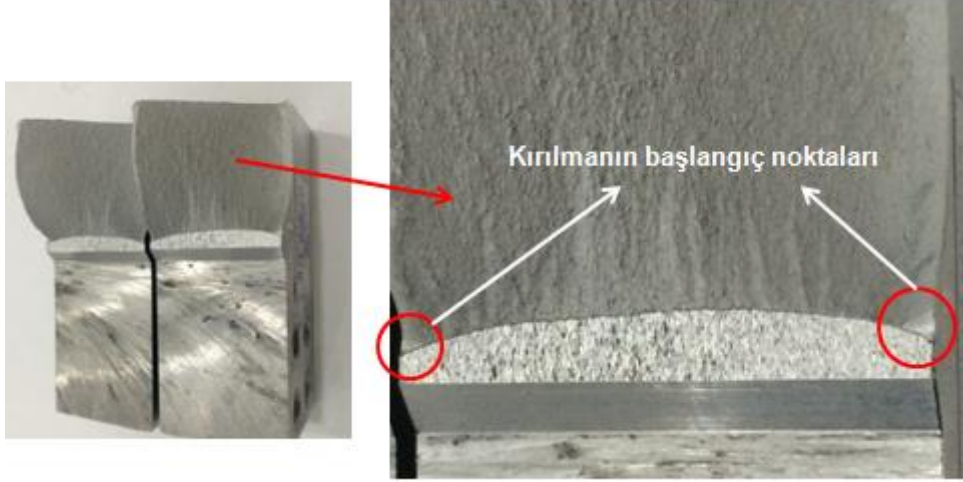
yüzeylerinin çatlak ucu orta noktası etrafında birbirlerine ters yönlü dönme deformasyonu eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden çatlak ucu merkezi ve kenarları için farklı GŞF değerleri elde edilmektedir. Mod-I/II/III CTST-numunesi analiz sonuçlarında ise, hem çatlak ucu merkezi, hem de 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 yükleme 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 kaynaklanan ilave mod-II etkisinden kaynaklanmaktadır. K_{III}'te gözlemlenen durumun sebebi ise, hem yükleme durumundan dolayı çatlak ucunda oluşan mod-III etkisi, hem de Poisson oranının etkisinden kaynaklanan 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° yükleme açısına değiştirilerek belirli bir çevrim sayısı kadar daha numune yorulmaya devam edilmiş ve daha sonra kopma yüküne ulaşıncaya kadar numune düşük hızda yüklenmiş ve numune koparılmıştır. Şekil 3.2.132'de, gerçekleştirilen testten bir kesit verilmiştir.



Şekil 3.2.132. Çatlak ilerleme başlangıç noktasının tespiti için, mod-I/III yükleme açısında CTT-numunesi için gerçekleştirilen testten bir kesit.

Şekil 3.2.133'te ise, kırılan numune yüzeylerinin görünümü verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, çatlak ilerlemesi çatlak ucu kenarlarından (kenarlardaki parlak yüzeylerde yorulma çatlağı 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 3.2.133. Çatlak başlangıcının tespiti için, mod-I/III yükleme açısında CTT-numunesi için gerçekleştirilen test sonrası kırılan numunenin yüzey görünümü.

Bölüm 3.2.6.2'de, literatürde mevcut üç boyutlu kırılma kriterlerinin geniş bir özeti verilmişti. Kriterler incelendiğinde, Pook (1980; 1985) kriterinde, önce K_{I} ve K_{II} arasında bir ilişki tanımlanarak, $K_{eş,I,II}$ için bir eşitlik elde edilmiş ve sonrasında $K_{eş,I,II}$ ve K_{III} GŞF değerleri kullanılarak $K_{eş,I,II,III}$ için bir eşdeğer GŞF denklemi elde edilmiştir. Kikuchi (2012) kriterinde ise, önce K_{I} ve K_{III} arasında $K_{eş,I,III}$ denklemi tanımlanmış ve sonrasında elde edilen $K_{eş,I,III}$ ve K_{II} 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_{III} ve mod-III yüklemesinden kaynaklanan ilave K_{II} GŞF değerleri çatlak ucu boyunca elde edilmektedir. Oluşum sebepleri yukarıda açıklanan kırılma modları arasındaki bu etkileşimden dolayı, kriter gelişiminde öncelikle K_{II} ve K_{III} arasında bir denklem tanımlanarak aşağıda verilmiştir (Denklem 3.2.30). Bu denklem, sadece mod-II ve mod-III etkilerinin olduğu, mod-I/III 90° 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_{II} ve K_{III} GŞF değerleri oluşmaktadır. Basit mod-III yüklemesi için,

$K_{e\check{s}(II/III)}$ değerinin Kıc değerine ulaşması durumunda numunenin kırılacağı varsayılarak $K_{e\check{s}(II/III)}$ denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan $K_{e\check{s}(II/III)}$ denklemi genel üç boyutlu kriter gelişimi için, mod-I/III $\theta=0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ-90^\circ$ ve Tablo 3.2.18'de test matrisi verilen mod-I/II/III yükleme açıları için gerçekleştirilen test ve analiz verilerine uygulanmıştır. Buradan elde edilen $K_{e\check{s}(II/III)}$ ile mod-I/III ve mod-I/II/III analizlerinden elde edilen K_I değerlerini kullanarak Denklem (3.2.31) ile verilen $K_{e\check{s}(I/II/III)}$ denklemi oluşturulmuştur.

$$K_{e\check{s}(II/III)} = \sqrt{a \cdot K_{II}^2 + b \cdot K_{III}^2} \quad (3.2.30)$$

$$K_{e\check{s}(I/II/III)} = \sqrt{c \cdot K_I^2 + d \cdot (K_{e\check{s}(II/III)})^2 + e \cdot K_I \cdot (K_{e\check{s}(II/III)})} + (f \cdot K_I^4 + g \cdot K_I \cdot (K_{e\check{s}(II/III)})^3)^{0.25} \quad (3.3.31)$$

Denklem (3.2.30) ve (3.2.31)'de verilen eşitliklerde yer alan katsayılar Tablo 3.2.48'de verilmiştir. Denklemde görüldüğü gibi, geliştirilen kriter tutarlı terimlerden oluşmaktadır.

Tablo 3.2.48. Mod-I/III ve mod-I/II/III test verilerini kullanılarak geliştirilen eşdeğer gerilme şiddet faktörü kriterinin katsayıları.

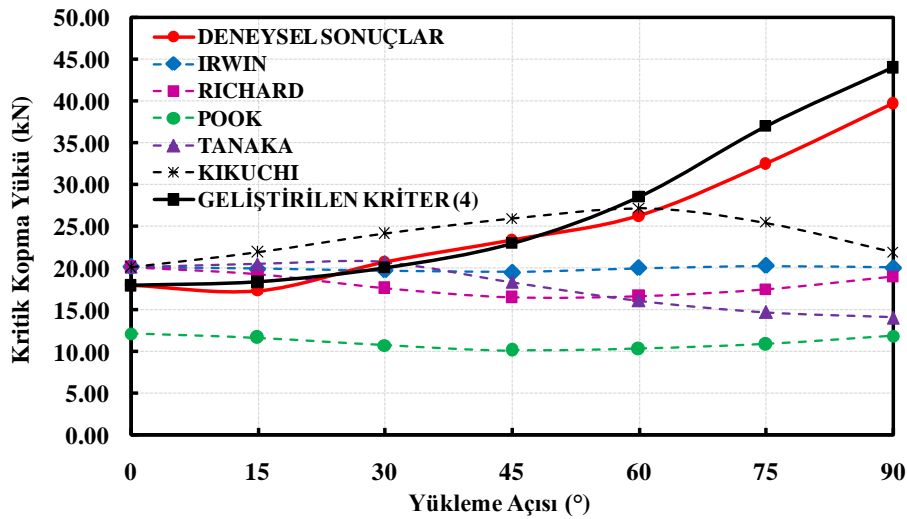
a	b	c	d	e	f	g
0.5263	0.3322	0.5263	0.3322	-0.1112	0.0257	-0.0004

Kırılma anında çatlak başlangıcının tespit edilmesine yönelik yukarıda gerçekleştirilen uygulamda, 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 çatlağın merkezden ilerleyeceği öngörülerek, bu yükleme açıları için veriler çatlak ucu merkezinden alınmıştır. Tablo 3.2.49'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 3.2.49. Geliştirilen üç boyutlu kritere göre CTT-numunesi için elde edilen eşdeğer GŞF ile kopma yüklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

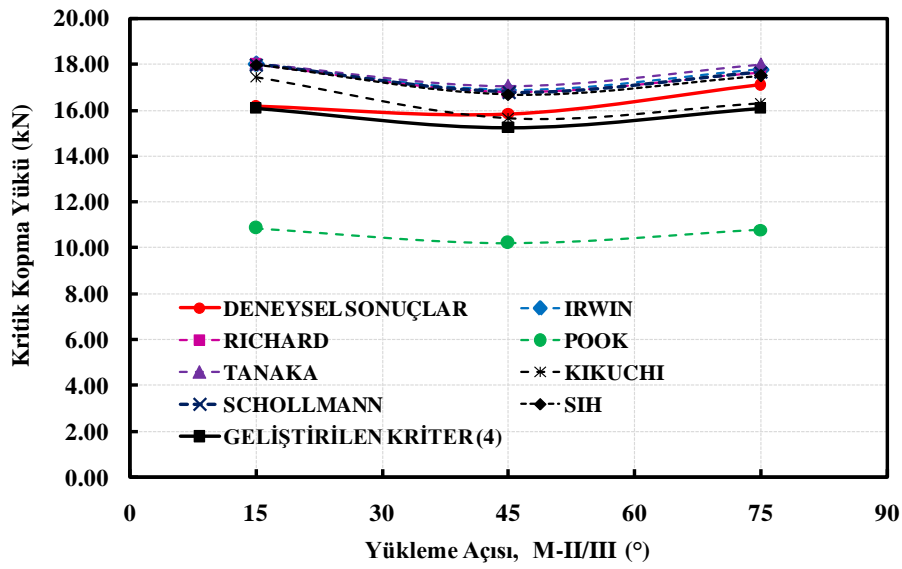
Numune No	Yük Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)	GŞF (FCPAS ÇÖZÜMÜ) (Mpa*m ^{1/2})			GELİŞTİRİLEN KRİTERE GÖRE			DENEYSEL KOPMA YÜKÜ (kN)	FARK (%)
			Çatlak Ucu Kenar			K _{eş(II/III)} (Mpa*m ^{1/2})	K _{eş(I/II/III)} (Mpa*m ^{1/2})	Kopma Yüğü (kN)		
			K _I	K _{II}	K _{III}					
CTT-01	0	26.19	14.41	0.00	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 3.2.134'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.

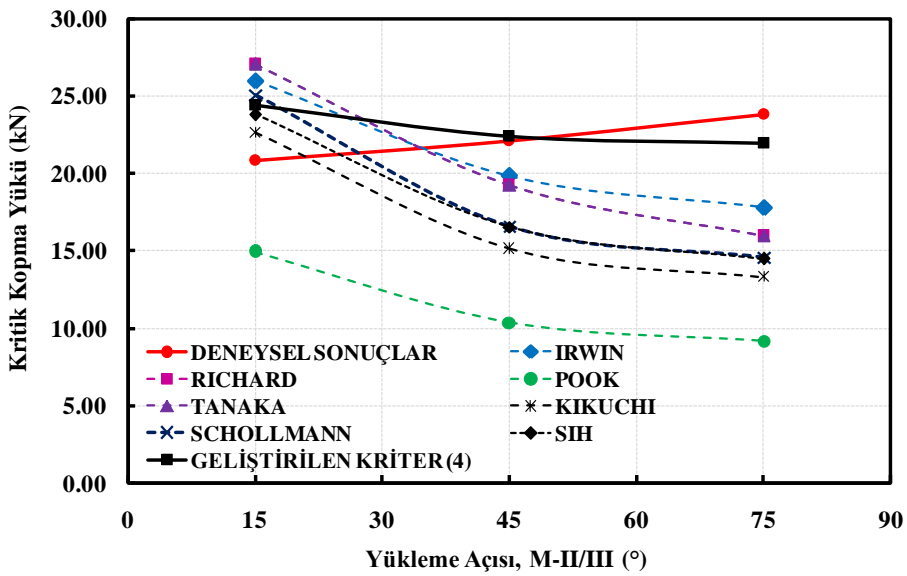


Şekil 3.2.134. CTT-numunesi deneysel kopma yükleri ile mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin yükleme açısına göre değişim grafiği.

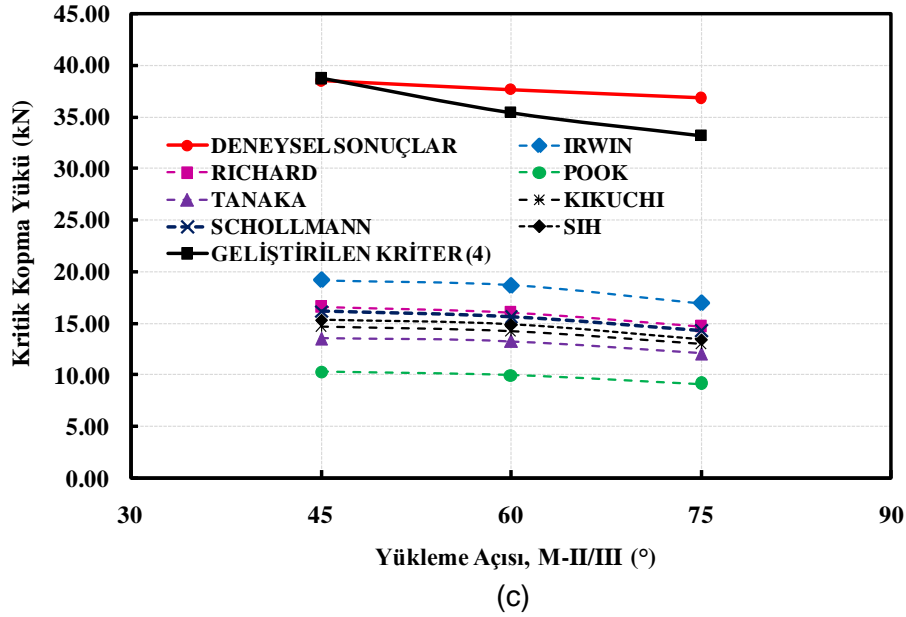
Benzer çalışmalar mod-I/II/III CTST-numunesi için de gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kriter mod-I/II/III CTST-numunesi sonuçlarına uygulanmıştır. Düşük yükleme açılarında çatlağın merkezden ilerlediği öngörüsüne göre, mod-I/II=mod-I/III=15°, mod-II/III=15°-45°-75° yükleme durumları için kriter çatlak ucu merkez değerlerine uygulanmıştır. Diğer tüm yükleme 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 3.2.135'te verilmiştir.



(a)



(b)



Şekil 3.2.135. 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°

Şekilde görüldüğü gibi, özellikle mod-II ve mod-III yükleme tiplerinin baskın olduğu açılarda (Şekil 3.2.115-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.

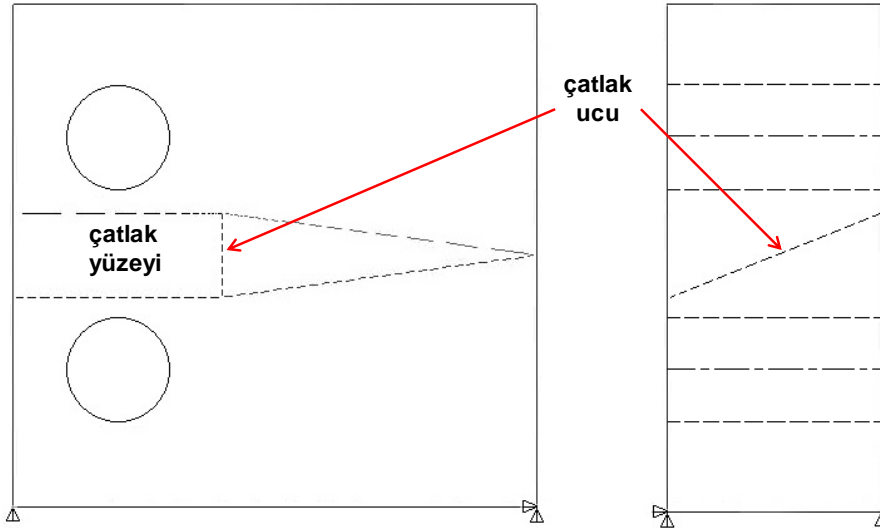
3.3 Karışık Modlu Yükleme Altında Üç-Boyutlu Çatlak İlerleme Analizi Kabiliyeti Geliştirilmesi

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. 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.

3.3.1 FRAC3D'de Karışık Mod Yükleme İçin Çatlak İlerleme Profili Tahmini ve Test Edilmesi

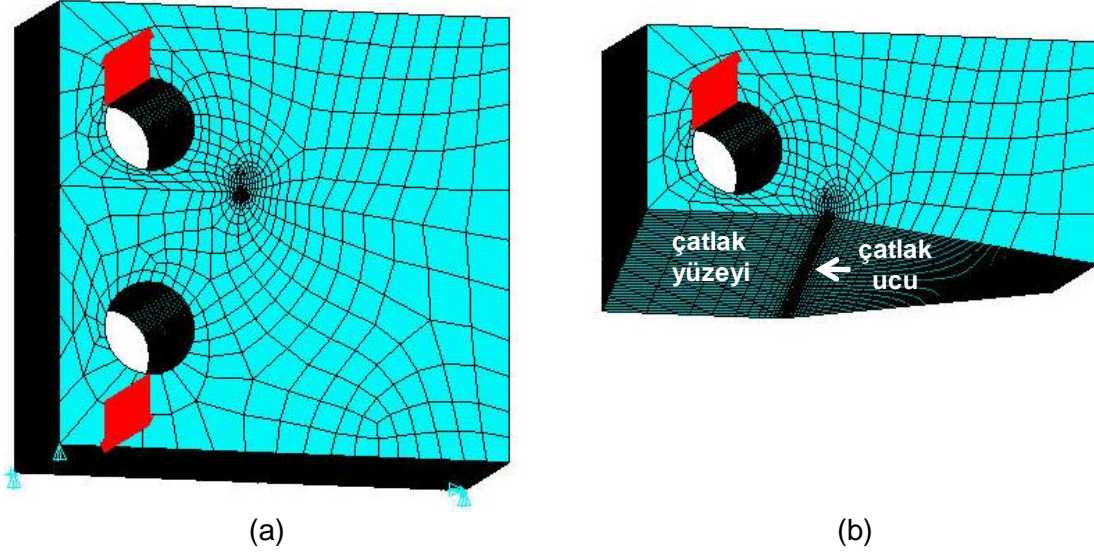
Bu bölümde, düzlemsel olmayan artırımlı çatlak ilerlemesi ve modellenmesinde kullanılan yöntem ve çatlak ilerleme prosedüründe izlenen adımlar detayları ile verilmiştir. Bu kapsamda, çatlaklı yapıların mod-I kırılma tokluğunu (K_{IC}) belirlemede kullanılan standart CT (compact tension) numunesine eğik (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 olduğu 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 bölüntülenerak çatlak ilerleme simülasyonu 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 (compact tension) numunesine eğik (eğim düzlem dışı yöndedir) çatlak yerleştirilerek yüklemeye deliklerinden numuneye dış mod-I yüklemesi uygulanmıştır (Şekil 3.3.1).

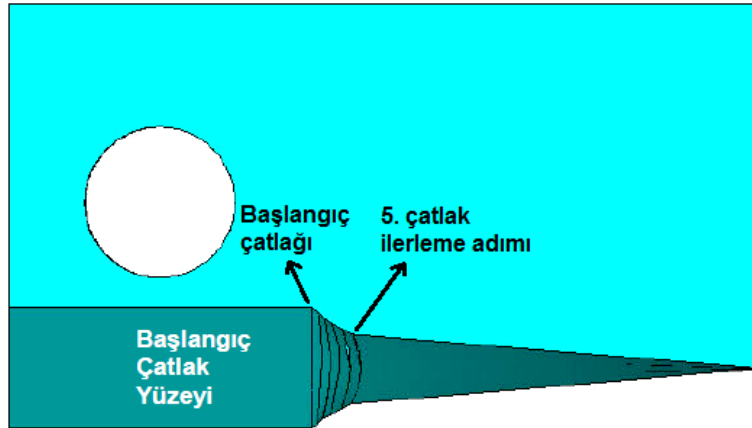


Şekil 3.3.1. Düzlem dışı yönde eğik çatlak yerleştirilen CT numunesinin önden ve yandan görünümü.

Uygulanan yük çatlak yüzeyine düzlem dışı açılı olarak etkidiği için problem karışık mod-I/III yükleme durumunun olduğu üç boyutlu bir problem haline dönüşmektedir. Şekil 3.3.2 'de yük ve sınır şartları uygulanmış numunenin tamamının ve çatlak yüzeyinin üst kısmını oluşturan bölümin sonlu eleman modelinin perspektif görünümü verilmektedir.



Şekil 3.3.2. Yük ve sınır şartları uygulanan numunenin sonlu eleman modeli, (a) modelin tamamı, (b) çatlak yüzeyinden sonraki üst bölümü.



Şekil 3.3.3. 5. çatlak ilerleme adımı için oluşturulan modelde çatlak yüzeyinin önden görünümü.

Adım 1: Çatlak Modellemesi:

Çatlak ilerleme simülasyonları ilk olarak, Şekil 3.3.2'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 3.3.3'te, ilerletilen çatlakın 5. adımı için oluşturulan modelin yarı model görüntüsü verilmektedir.

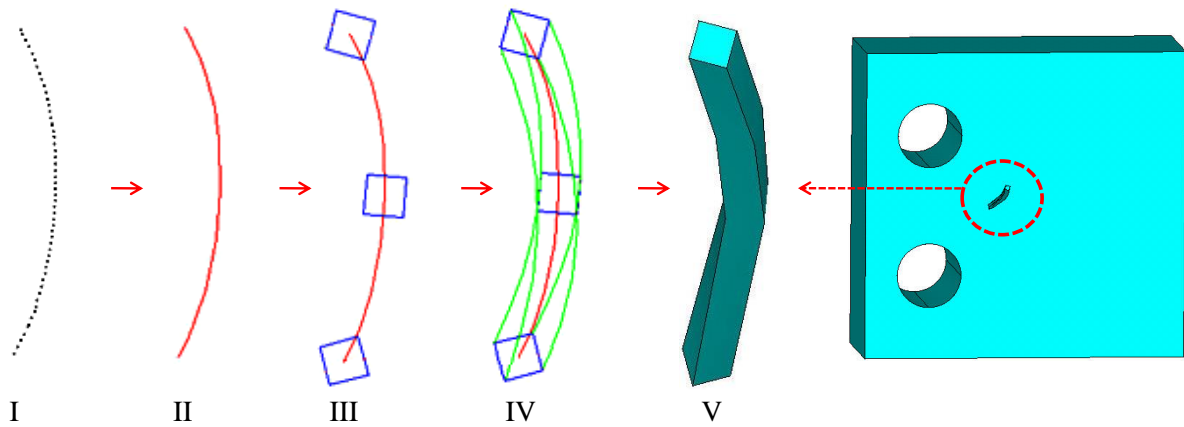
5. çatlak profiline göre FRAC3D çözücüsü ile gerçekleştirilen analizlerinden elde edilen gerilme şiddet faktörü değerleri ve bu değerler ile belirli bir çatlak ilerleme kriteri kullanılarak 6. çatlak profilini oluşturacak düğüm noktalarının konum bilgileri elde edilmektedir. Bu yeni düğüm noktaları koordinatları, Datafit™ (2015) eğri uydurma programı içerisinde kullanılarak, bu noktalardan geçen en yakın polinom eğri uydurulmaktadır (Şekil 3.3.4-Durum I).

İlk olarak 6. çatlak profilinin oluşturulması için, uydurulan eğrinin tüm düğüm noktalarından geçen bir eğri modellenmektedir (Şekil 3.3.4-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 3.3.5-Durum III).

Kare kesitli alanların her birinin köşelerinden geçen eğriler oluşturulmaktadır (Şekil 3.3.4-Durum IV).

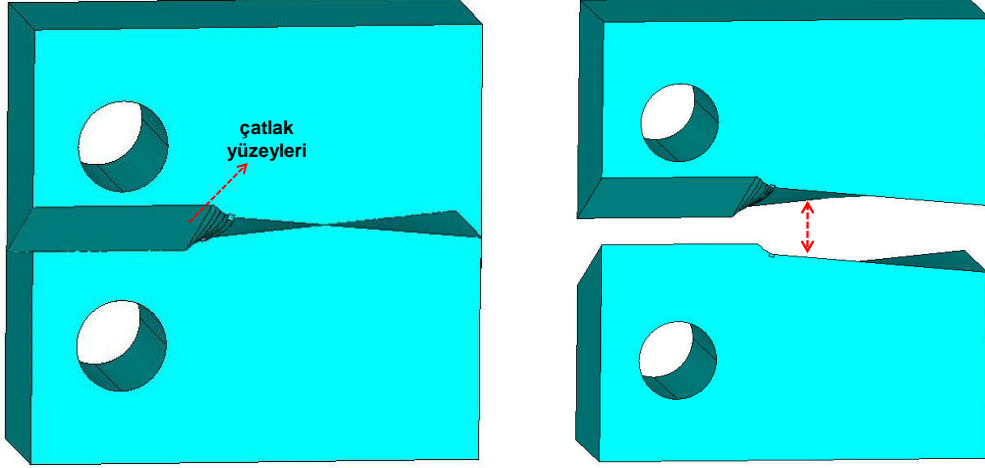
Oluşturulan eğrilerden meydana gelen alanlar ve bu alanlardan meydana gelen bir hacim oluşturularak çatlak civarını çevreleyen bir tünel hacim modellenmektedir (Şekil 3.3.4-Durum V).



Şekil 3.3.4. 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,

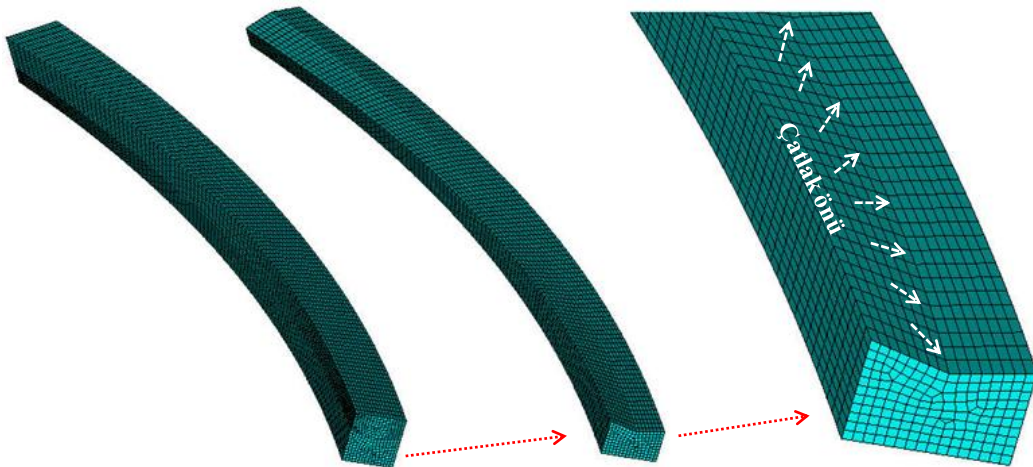
çatlak yüzeyini oluşturan alanlar ile önce bölünmekte ve sonrasında çatlak ucu kenar düğüm noktalarından birleştirilerek düzlemsel olmayan üç boyutlu çatlak profili modelde tanımlanmaktadır (Şekil 3.3.5).



Şekil 3.3.5. Modelin çatlak yüzeyi ile ayrıştırılarak çatlak profilinin tanımlanması.

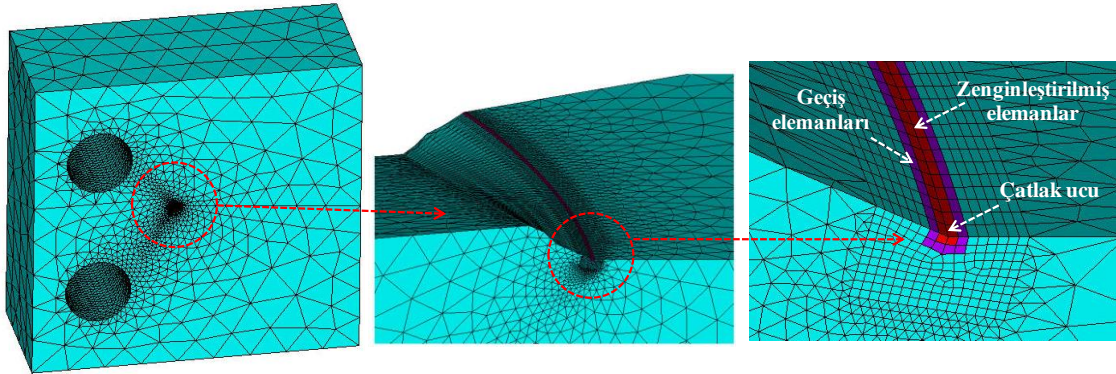
Adım 2: Bölüntüleme İşlemi:

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 3.3.6).



Şekil 3.3.6. Hexahedral elemanlar ile bölüntülenen tünel hacim.

Tünel hacmin bölüntülenmesinin ardından tünel hacim dışında kalan tüm model dört yüzlü tetrahedral elemanlar ile bölüntülenmektedir. Şekil 3.3.7 '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 3.3.7. Sonlu eleman modelinin perspektif ve çatlak ucu civarının yakın görünümü.

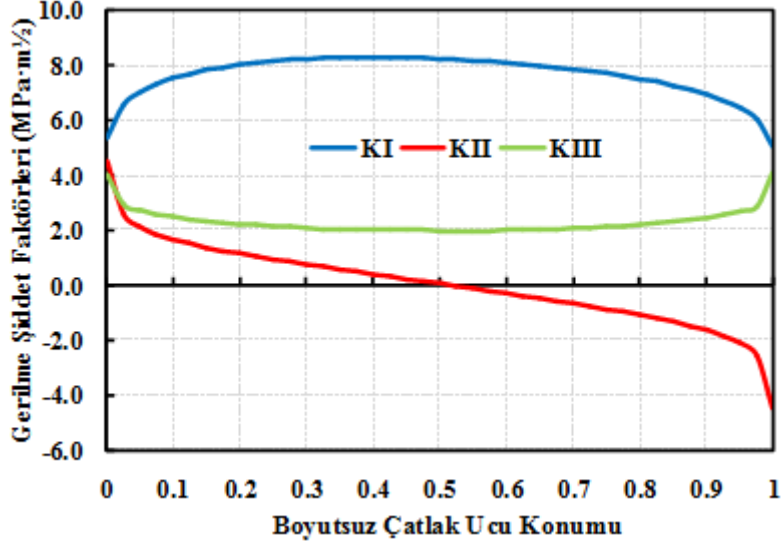
Adım 3: Analiz Parametreleri, Malzeme ve Model Bilgileri:

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.

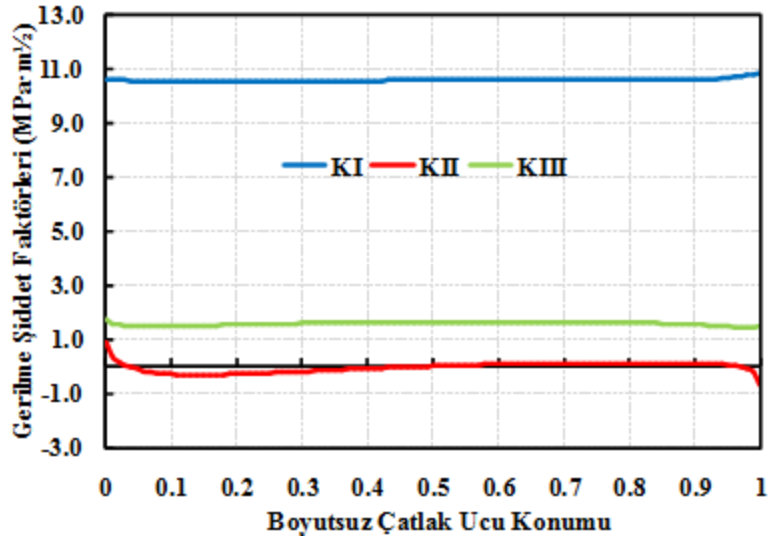
Adım 4: FRAC3D Çözücüsü ile Kırılma Analizinin Gerçekleştirilmesi:

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 3.3.8'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 3.3.8-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 3.3.8-b) görülmektedir. K_{II} ve K_{III} GŞF değeri giderek azalarak sifıra yaklaşmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3.3.8. 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.

Adım 5: Sonraki Çatlak Profili Tahmini:

Bir sonraki çatlak profili tahmini için kırılma analizlerinden elde edilen gerilme şiddet faktörü değerlerini içeren eşdeğer bir GŞF ($\Delta K_{eş}$) 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 (φ_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 geliştirmiş olduğu maksimum teğetsel gerilme kriteri (1963) kullanılmıştır. 6. çatlak profilinden elde edilen gerilme şiddet faktörü değerleri kullanılarak $\Delta K_{eş}$ ve φ_0 hesaplanmaktadır. Bu değerler kullanılarak bir sonraki çatlak profilinin koordinatları elde edilmektedir. Çatlak ilerleme malzeme sabitleri için $C=2.28 \cdot 10^{-7}$ ve $n=3.11$ değerleri kullanılmıştır.

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™ 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.

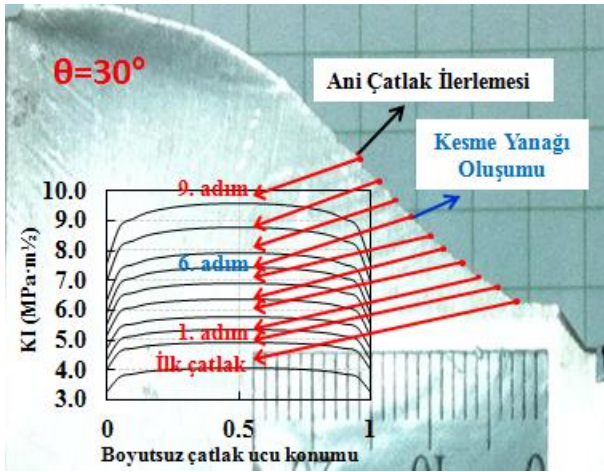
5. çatlak ilerleme adımından 6. çatlak ilerleme profilinin tahminine kadar olan bir adımlık çatlak ilerleme döngüsünde gerçekleştirilen işlem adımları yukarıda detaylı bir şekilde verilmiştir. Çatlak uzunluğu kritik boyuta ulaşına veya $\Delta K_{eş}$ değeri kırılma tokluğu (K_{IC}) değerine ulaşına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

3.3.2 Mod-I/II Richard Numunesi Çatlak İlerleme Testlerinin Modellenmesi

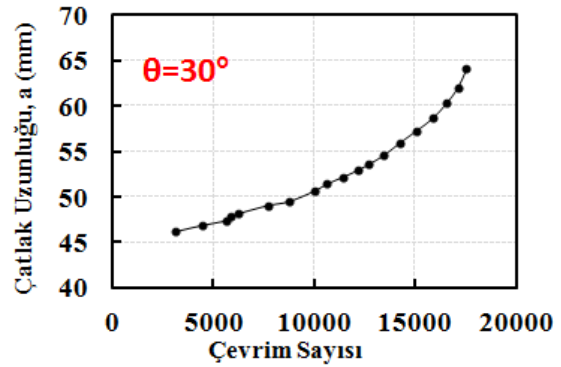
Bölüm 3.2.3.4'te, CTS (Richard) numuneleri için farklı açılarda gerçekleştirilen mod-I/II çatlak ilerleme deneylerinin detayları verilmiş ve bölüm sonunda, $\theta=30^\circ$, 45° ve 60° yüklenme açılarında test edilen CTS-numunelerinin, çevrim sayısına göre çatlak ilerlemelerinin değişimi verilmişti. 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 10kN yük altında gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında çatlak ucu boyunca elde edilen K_I ve K_{II} GŞF değerleri kullanılarak, proje kapsamında geliştirilen iki boyutlu kırılma kriterine (Denklem 3.2.28) 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 3.3.9'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 3.3.10'da ise, bu ilerleme adımlarının her biri için çatlak ucu boyunca elde edilen gerilme şiddet faktörleri K_I , K_{II} ve K_{III} 'ün dağılım grafikleri sırasıyla verilmiştir.

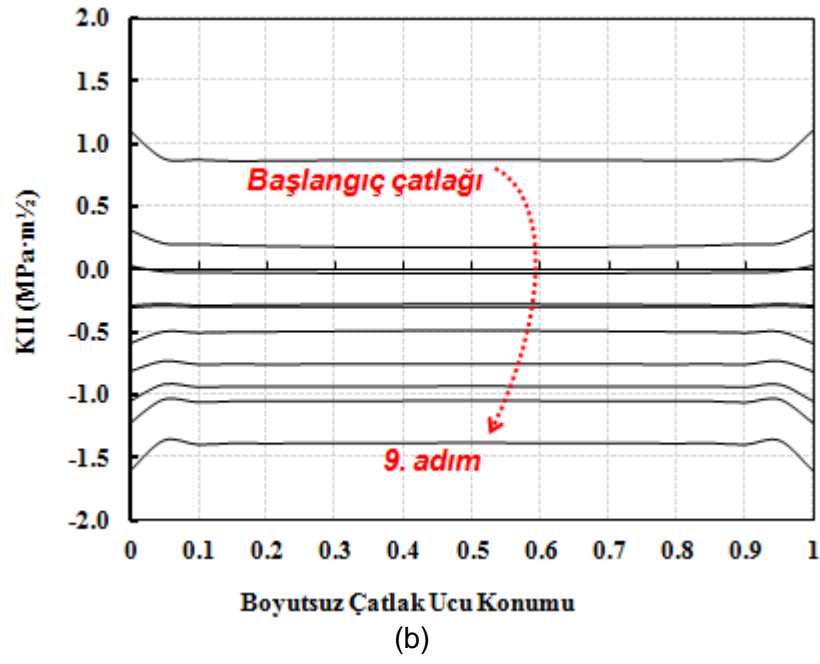
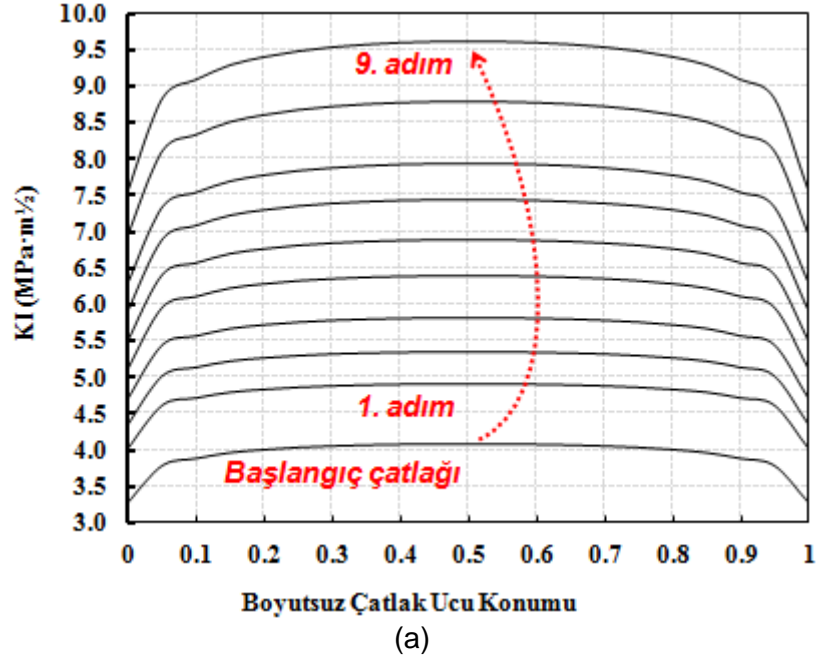


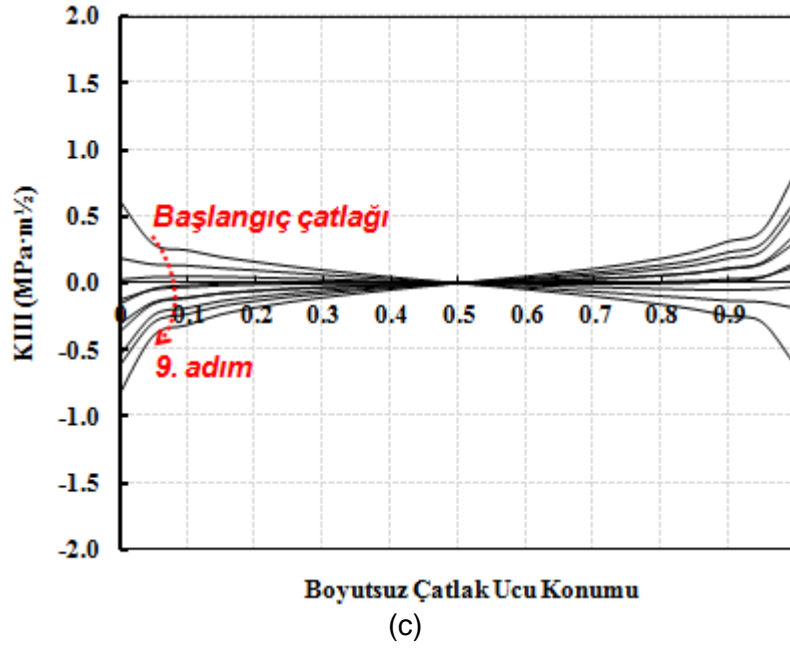
(a)



(b)

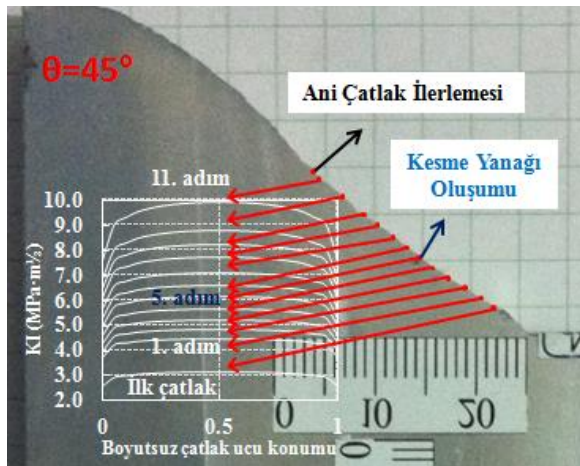
Şekil 3.3.9. $\theta=30^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 9 adım çatlak ilerlemesi modellenerek gerçekleştirilen analizler sonrasında (a) numunenin çatlak ucunda oluşan K_I dağılımının temsil edildiği yerler, (b) çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği.



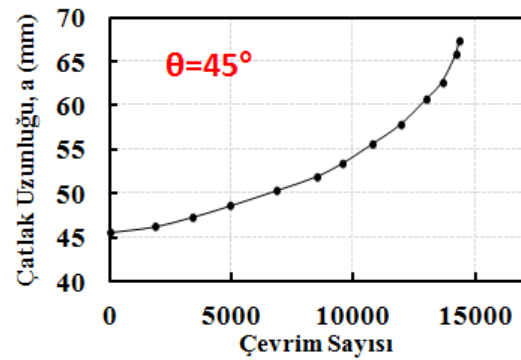


Şekil 3.3.10. $\theta=30^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 9 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a) K_I , (b) K_{II} , (c) K_{III} dağılımı.

Şekil 3.3.11'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 3.3.12'de ise, bu ilerleme adımlarının her biri için çatlak ucu boyunca elde edilen gerilme şiddet faktörleri K_I , K_{II} ve K_{III} 'ün dağılım grafikleri sırasıyla verilmiştir.

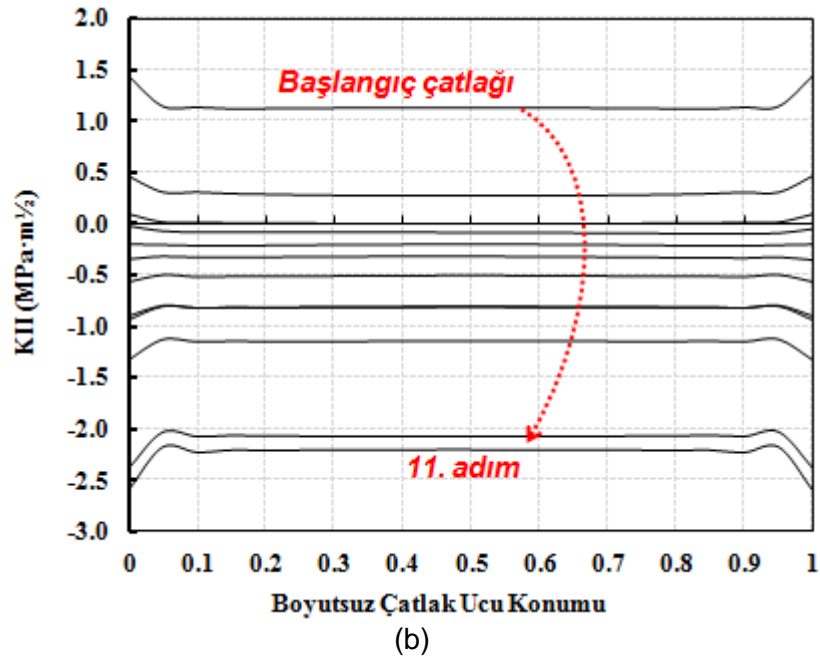
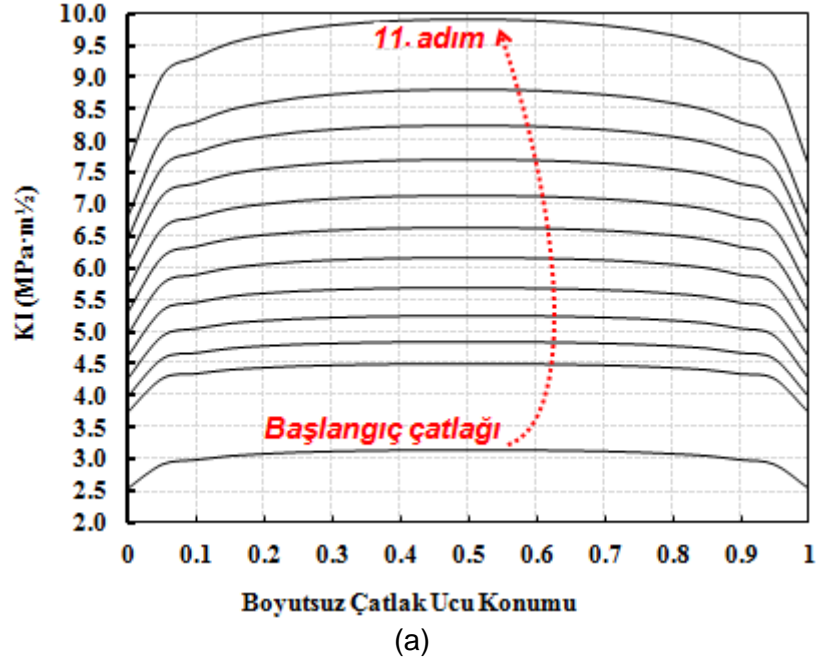


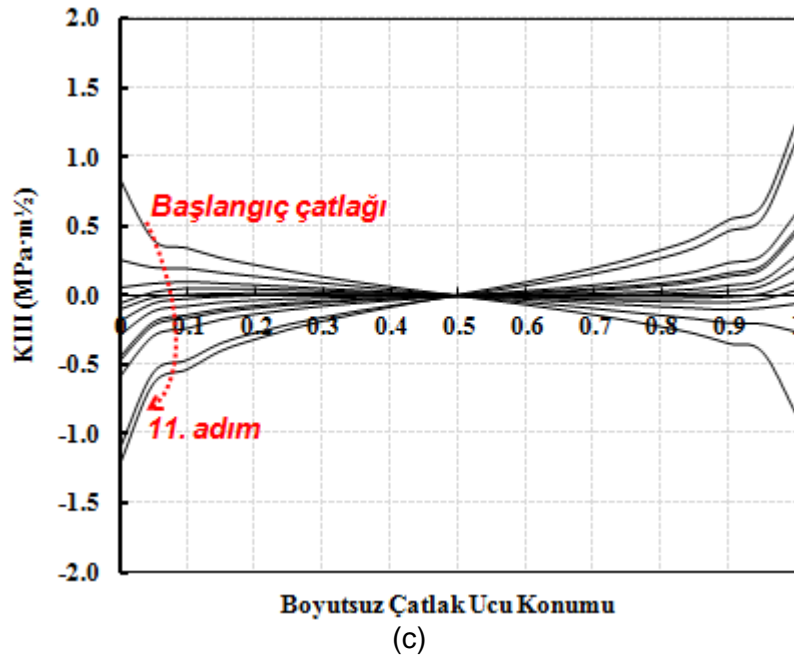
(a)



(b)

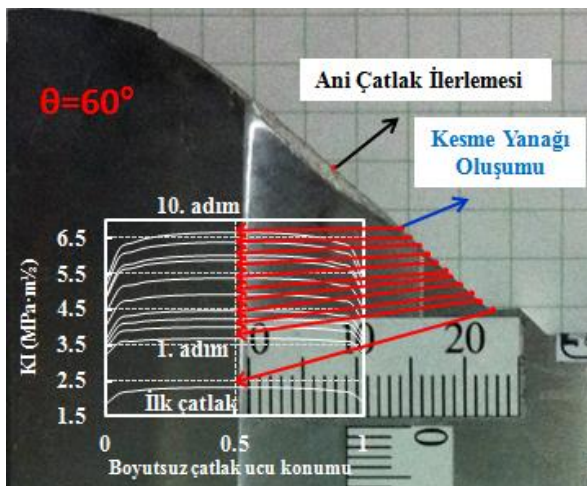
Şekil 3.3.11. $\theta=45^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 11 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen analizler sonrasında (a) numunenin çatlak ucunda oluşan K_I dağılımının temsil edildiği yerler, (b) çevrim sayısına göre çatlak uzunluğunun değişim grafiği.



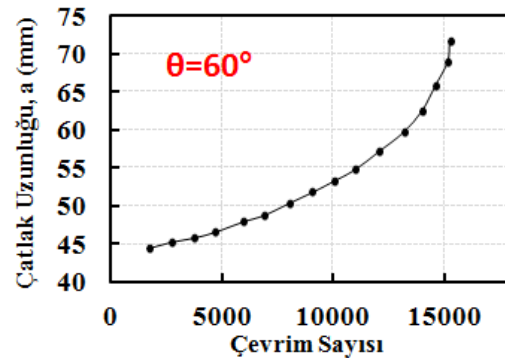


Şekil 3.3.12. $\theta=45^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 11 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a) K_I , (b) K_{II} , (c) K_{III} dağılımı.

Şekil 3.3.13'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 3.3.14'te ise, bu ilerleme adımlarının her biri için çatlak ucu boyunca elde edilen gerilme şiddet faktörleri K_I , K_{II} ve K_{III} 'ün dağılım grafikleri sırasıyla verilmiştir.

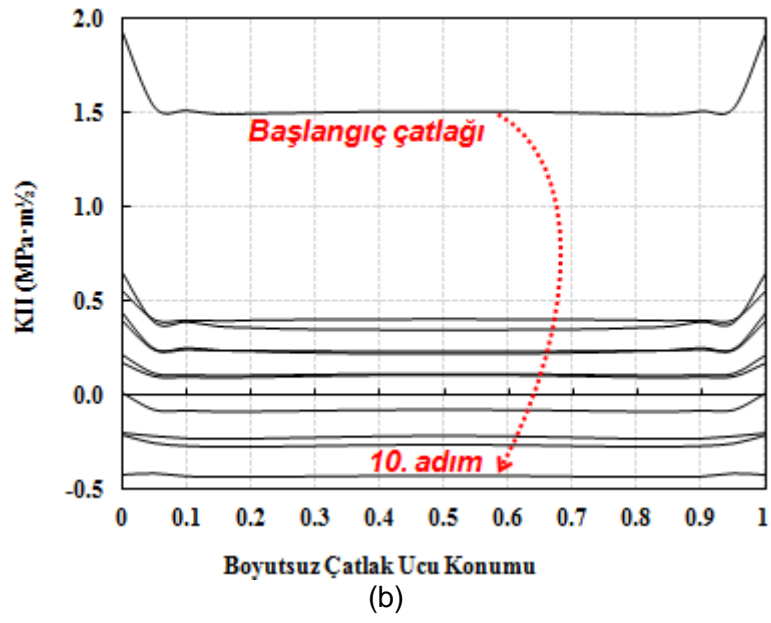
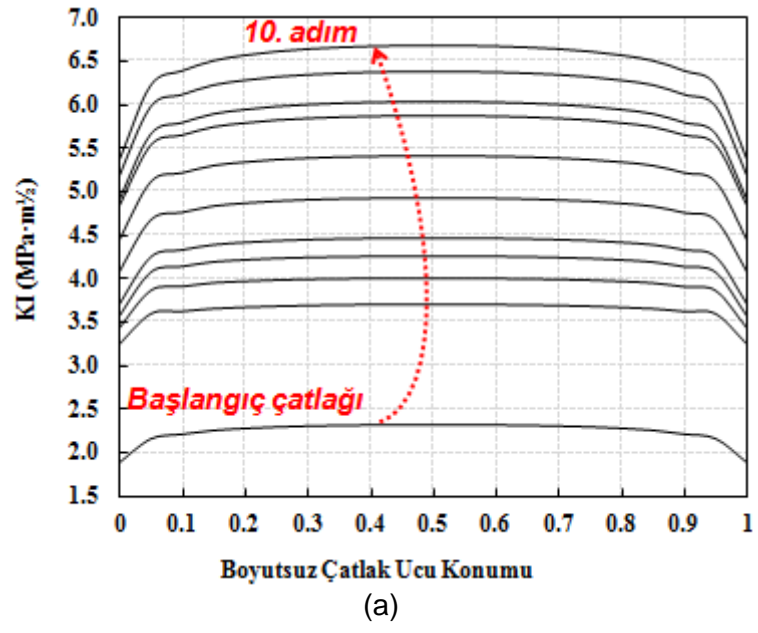


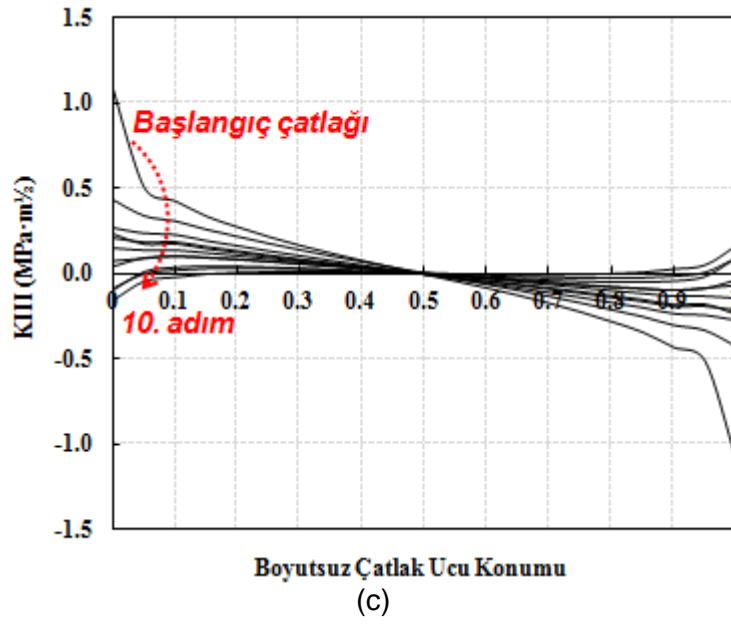
(a)



(b)

Şekil 3.3.13. $\theta=60^\circ$ 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.

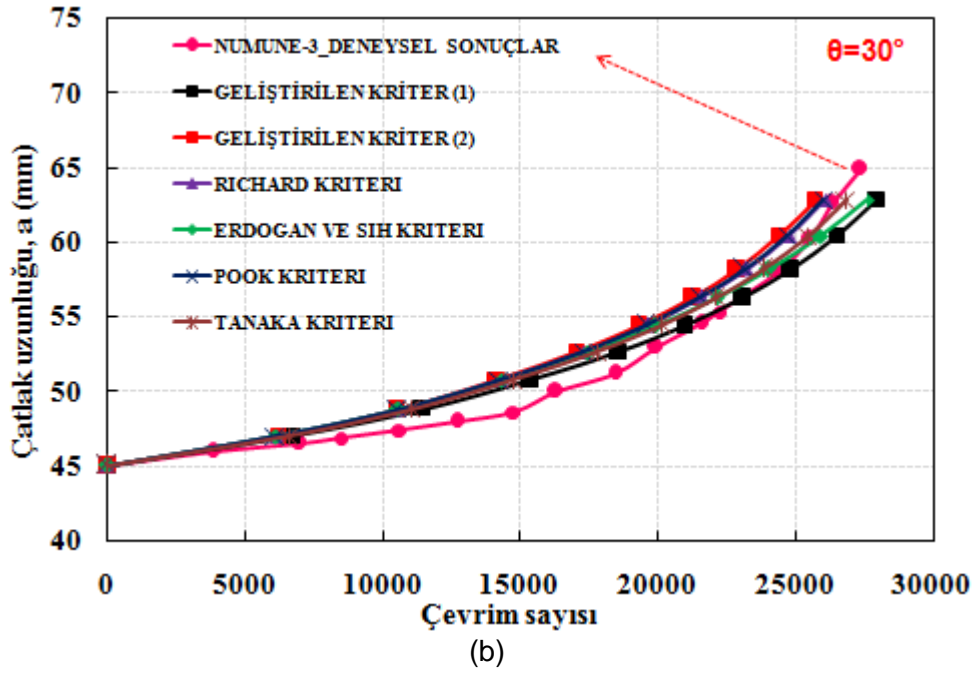
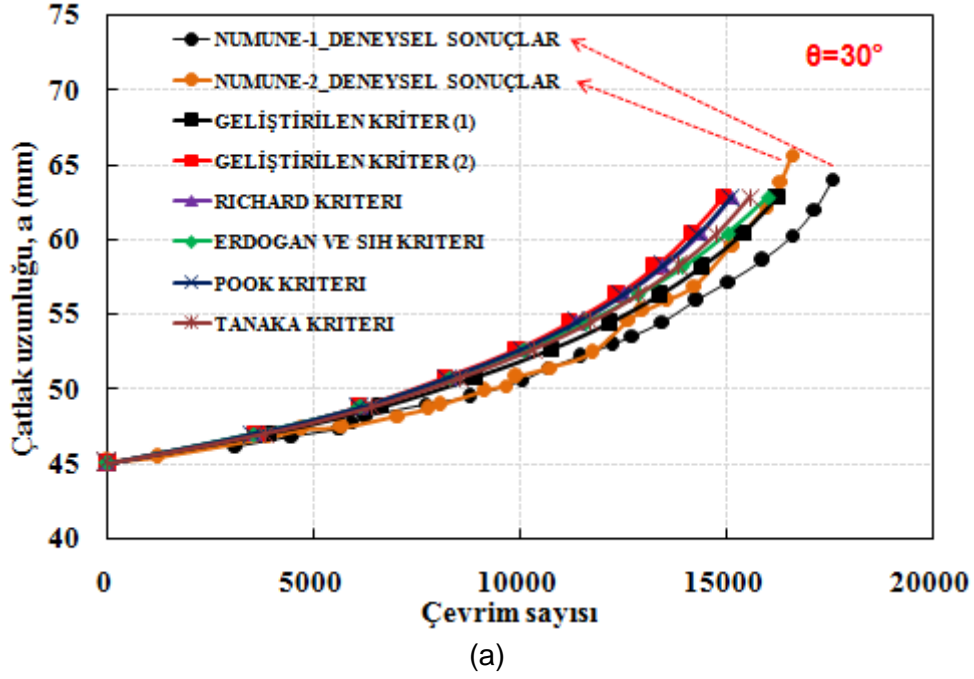




Şekil 3.3.14. $\theta=60^\circ$ yükleme açısında gerçekleştirilen da/dN testinin 10 adım çatlak ilerlemesi birebir modellenerek gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca oluşan (a) K_I , (b) K_{II} , (c) K_{III} dağılımı.

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 3.2.27) ve "2" (Denklem 3.2.28) no.lu kriterlere göre ve mevcut iki boyutlu kriterlere göre ömür tahminleri yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve geliştirilen kriterlerin, ömür tahminleri açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

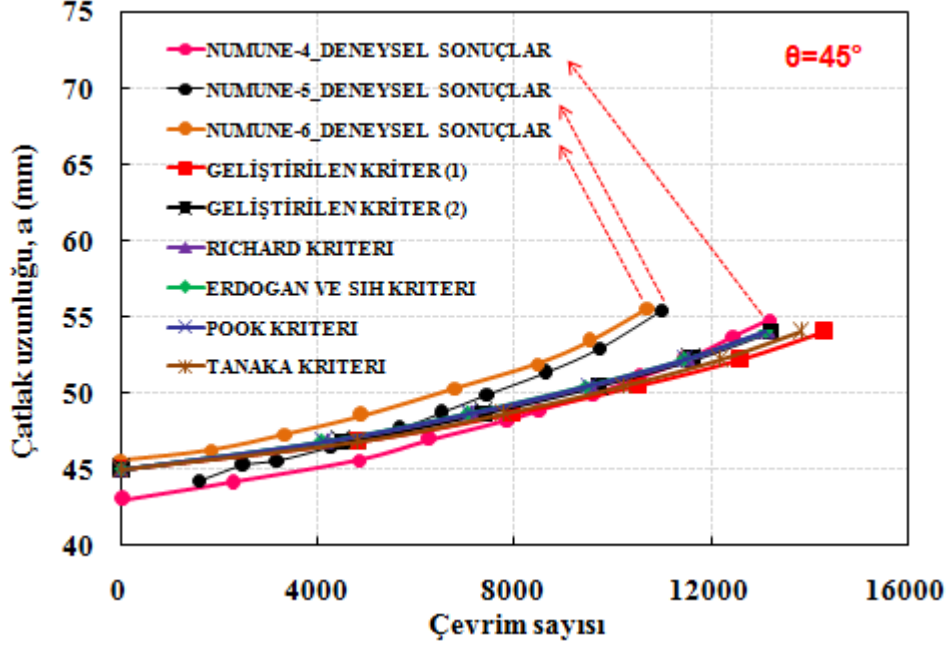
Proje kapsamında standart CT numunesi kullanılarak mod-I şartları altında gerçekleştirilen da/dN testleri sonrasında elde edilen malzeme sabitleri, C ve n değerlerini kullanarak ömür tahminleri yapılmıştır. Analizler sabit 10kN yük altında, deneyler ise farklı yorulma yükleri altında gerçekleştirildiği 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 3.3.15 'te verilmiştir. "Numune-1" ve "Numune-2" için gerçekleştirilen testler 1.1kN-11kN yorulma yüklemesi altında (Şekil 3.3.15-a), "Numune_3" için gerçekleştirilen test ise 0.88kN-8.8kN yorulma yüklemesi altında (Şekil 3.3.15-b) gerçekleştirildiği için sonuçlar ayrı grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 3.3.15. $\theta=30^\circ$ yükleme açısında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin (a) 11kN ($R=0.1$), (b) 8.8kN ($R=0.1$) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması.

"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 gibi, 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 3.3.16'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 1.14kN-11.4kN (R=0.1) yorulma yüklemesi altında test edilmiştir.

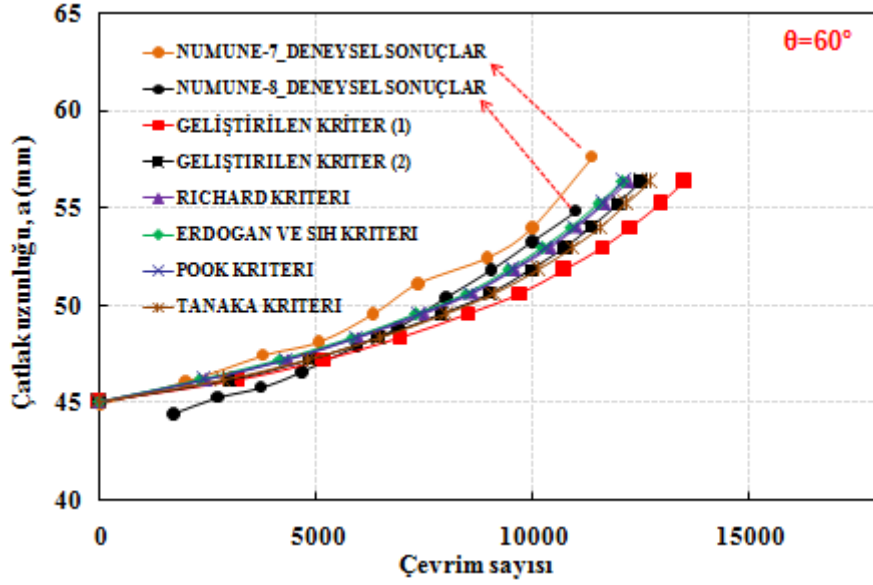


Şekil 3.3.16. $\theta=45^\circ$ yükleme açısında CTS-numuneleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin, 11.4kN (R=0.1) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması.

$\theta=45^\circ$ 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 3.3.17'de verilmiştir. Her iki numune de 1.365kN-13.65kN (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.



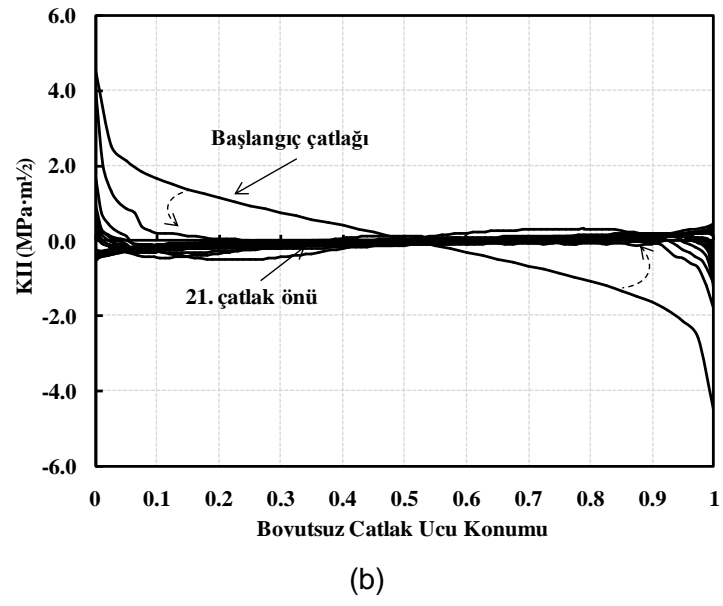
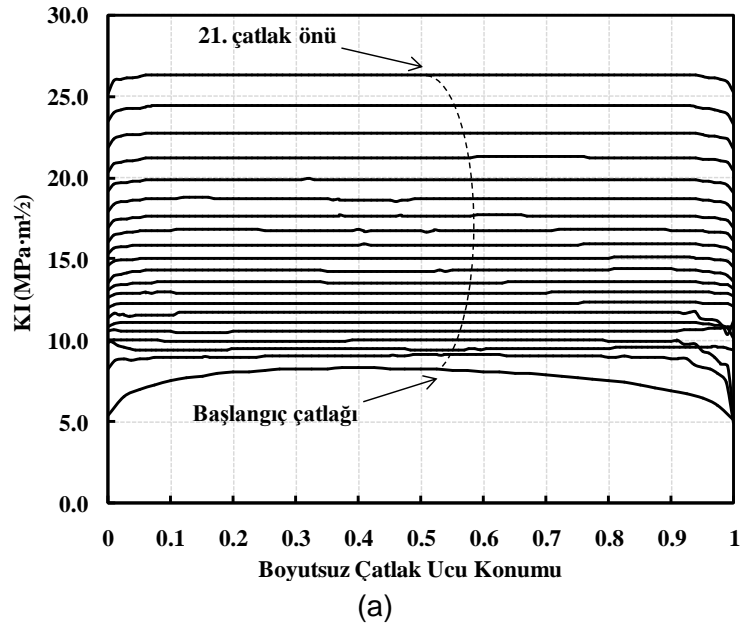
Şekil 3.3.17. $\theta=60^\circ$ yüklemesi altında CTS-örnekleri için, geliştirilen ve mevcut kriterlere göre yapılan ömür tahmininin, 13.65kN (R=0.1) yükte gerçekleştirilen test ömürleri ile karşılaştırılması.

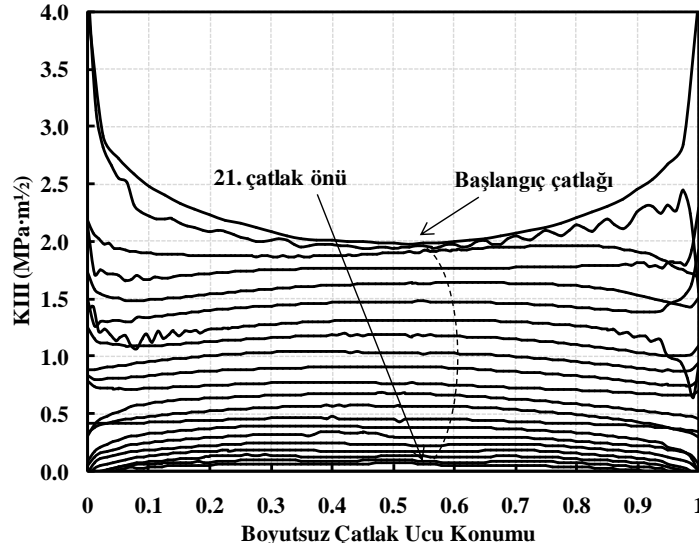
3.3.3 Eğik Çatlak İçeren CT Modeli Analizi

Bölüm 3.3.1'de, eğik çatlak yerleştirilen CT-örneklerinin (Şekil 3.3.1), 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 (compact tension) örneğine eğik çatlak yerleştirilerek mod-I yüklemesi altında çatlakın üç boyutlu modelleme ve çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.3.1'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.

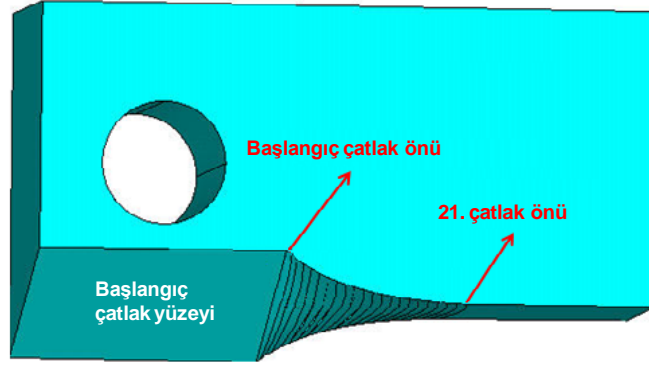
Şekil 3.3.18'de, tüm adımlar için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrasında elde edilen gerilme şiddet faktörleri, K_I , K_{II} ve K_{III} 'ün çatlak ucu boyunca değişimleri sırasıyla verilmiştir.





(c)

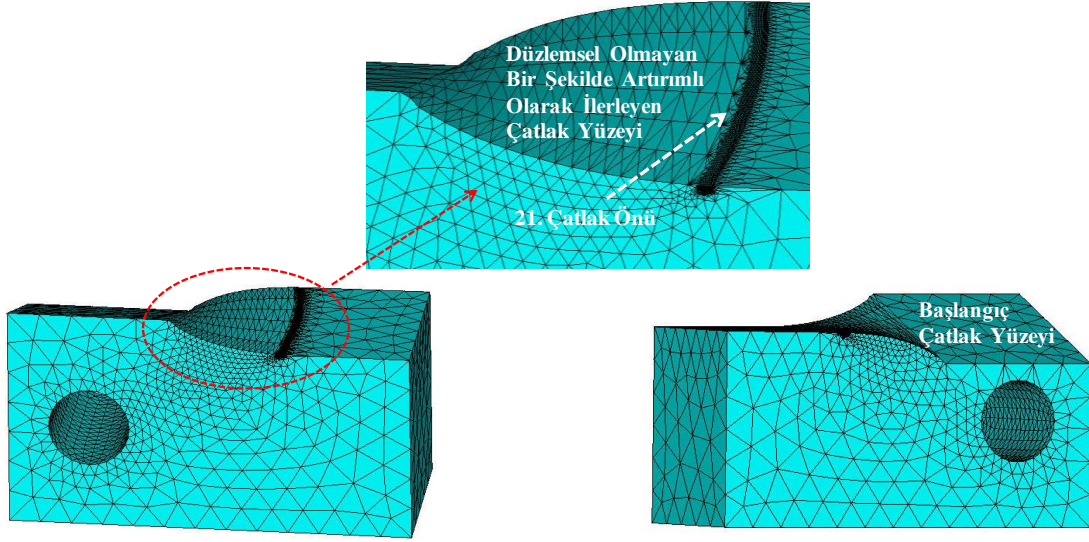
Şekil 3.3.18. Tüm çatlak profilleri için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrası elde edilen gerilme şiddet faktörlerinin çatlak ucu boyunca değişimi (a) K_I , (b) K_{II} ve (c) K_{III} .



Şekil 3.3.19. 21. adım sonunda modellenen çatlak profilinin üst kısmının yarı model görünümü.

Şekilde görüldüğü gibi çatlak ilerledikçe K_I gerilme şiddet faktörü artarken K_{II} ve K_{III} azalarak sifira yaklaşmaktadır. Bir başka deyişle, problem karışık mod-I/III durumundan, K_{II} ve K_{III} 'ün etkinliğinin çatlak ilerleme sürecinde azalmasıyla mod-I çatlak durumuna dönüşmektedir. Şekillerde bazı dağılımlarda gözlemlenen gürültüler, profillere uydurulan eğrilerin düğüm noktalarının dizilimindeki küçük oranda sapmalardan kaynaklanmaktadır. Şekil 3.3.19'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_{III} 'nin etkin bir rol oynadığını doğrulamaktadır.

Şekil 3.3.20'de ise, 21. çatlak adımının sonlu eleman modelinin farklı açılarda görünüşleri 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 3.3.20. 21. çatlak profiline ait sonlu eleman modelinin farklı açılarda görünüşleri.

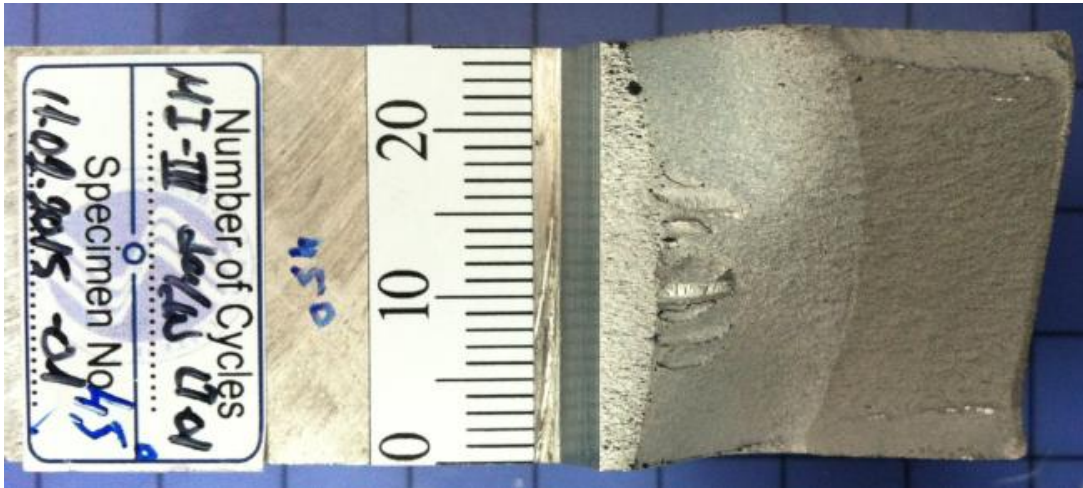
Sonuç olarak bu çalışma kapsamında, çatlakın ilerletilmesinde üç boyutlu karışık mod-I/III probleminde, K_{III} 'ün olmadığı ancak K_{III} 'ün etkisinde oluşan K_{II} 'nin yer aldığı iki boyutlu mod-I/II kriteri kullanılarak, çatlak sapma açısının (φ_0) tespitinde mod-III yüklemesi dolayısıyla oluşan K_{II} 'nin etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, K_{II} '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 (φ_0) değerinin tespiti üzerindeki etkisini belirlemek için gerçekleştirilen analizlerin deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak sonuçların değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden bir sonraki bölümde, mod-I/III yükleme 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.

3.3.4 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 artırımı 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_{III}'ün etkili olup olmadığı, deneysel yüzeyler ile karşılaştırılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

3.3.4.1 Mod-I/III=45° Yükleme Açısında CTT Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri

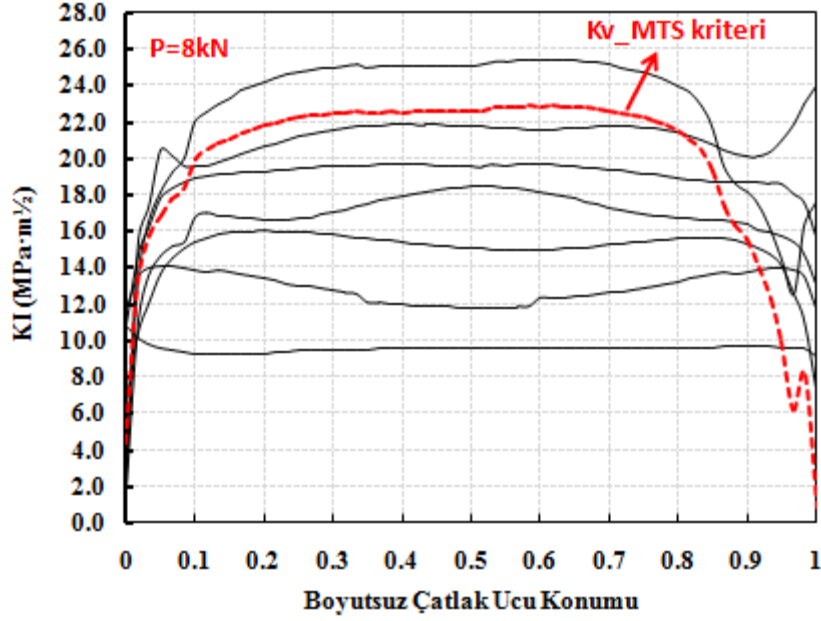
Mod-I/III=45° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT (Compact Tension Tearing) numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyindeki (Şekil 3.3.21) ön çatlak uzunluğu ölçülerek bire bir modellenmiş ve MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme testi saniyede 2 çevrim (2 hertz) 8kN yük altında ve R-oranı 0.1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.



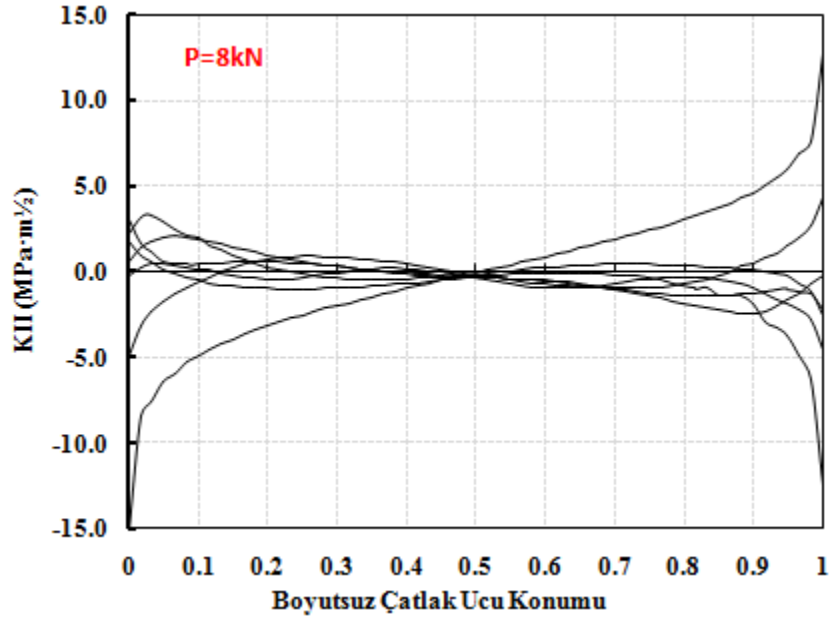
Şekil 3.3.21. Mod-I/III=45° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan yorulma çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

Gerçekleştirilen çatlak ilerleme simülasyonları sonrasında her bir çatlak adımında çatlak ucu boyunca elde edilen K_I, K_{II} ve K_{III} gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.3.22'de sırasıyla verilmiştir. Son çatlak adımı için MTS kriterine göre eşdeğer GŞF değeri ayrıca hesaplanarak Şekil

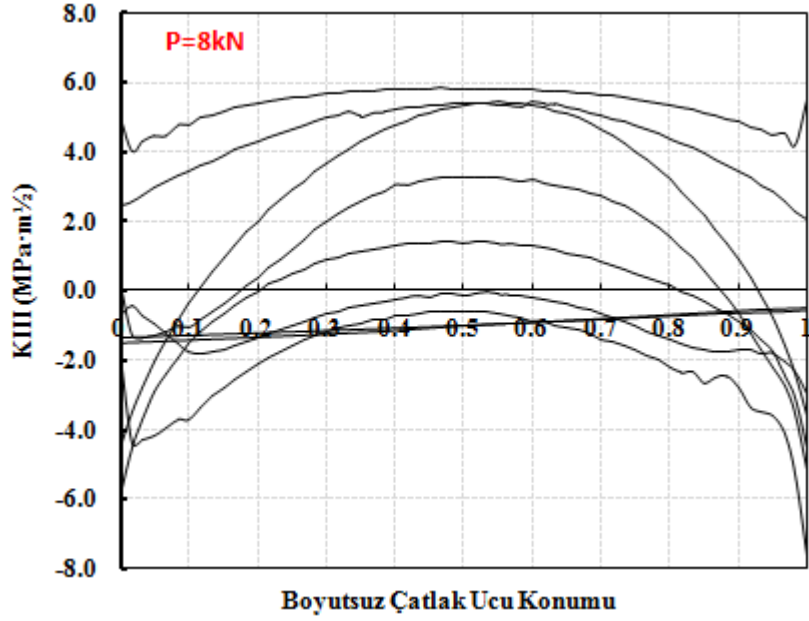
3.3.22-a'da çizdirilmiştir. Bölüm 3.3.6'da her profil için eşdeğer GŞF elde edilerek ömür tahminleri yapılacak ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılacaktır.



(a)



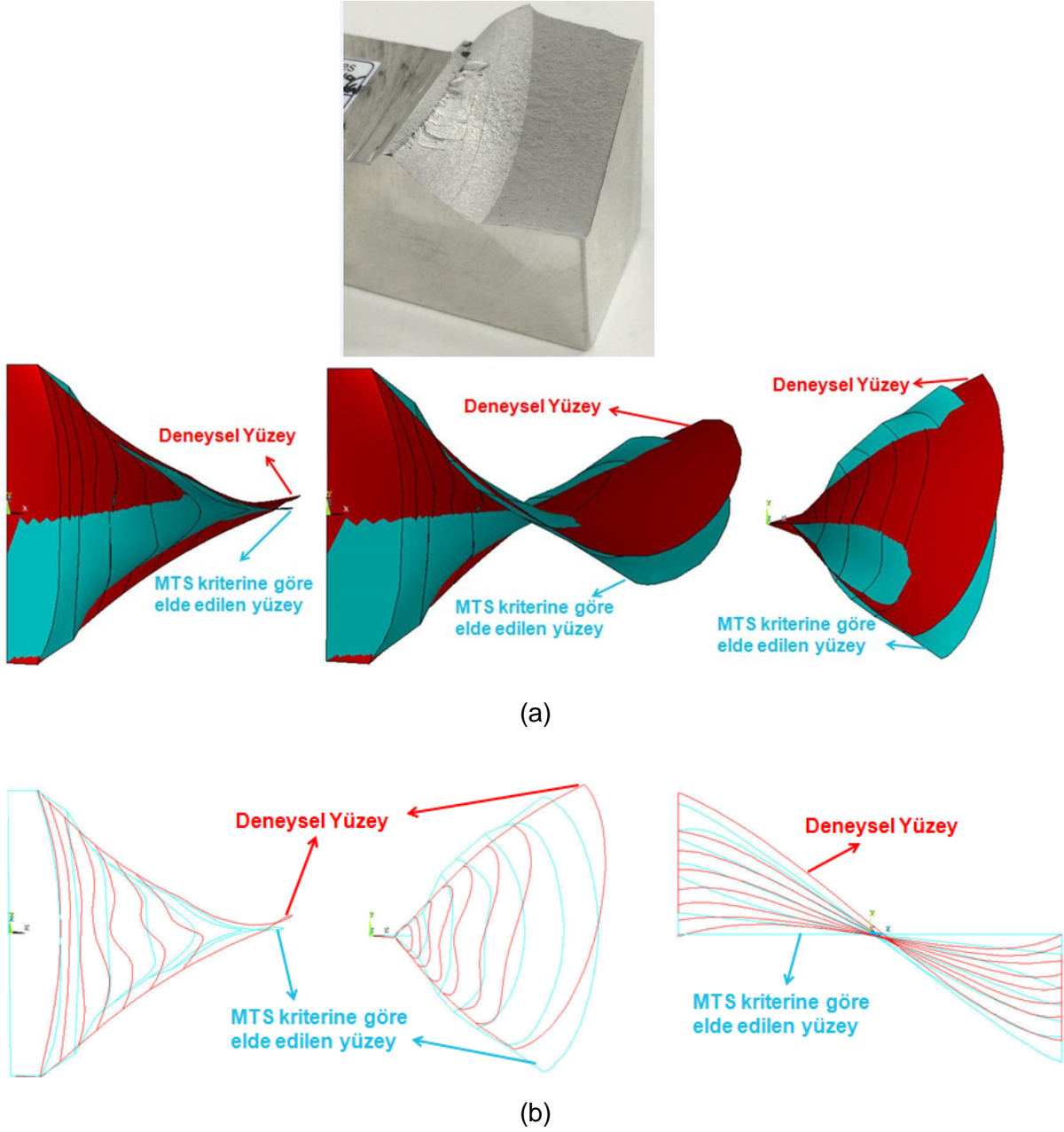
(b)



(c)

Şekil 3.3.22. 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.

MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzey üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı açılardan görünümü Şekil 3.3.23'te verilmiştir. Deneysel 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.

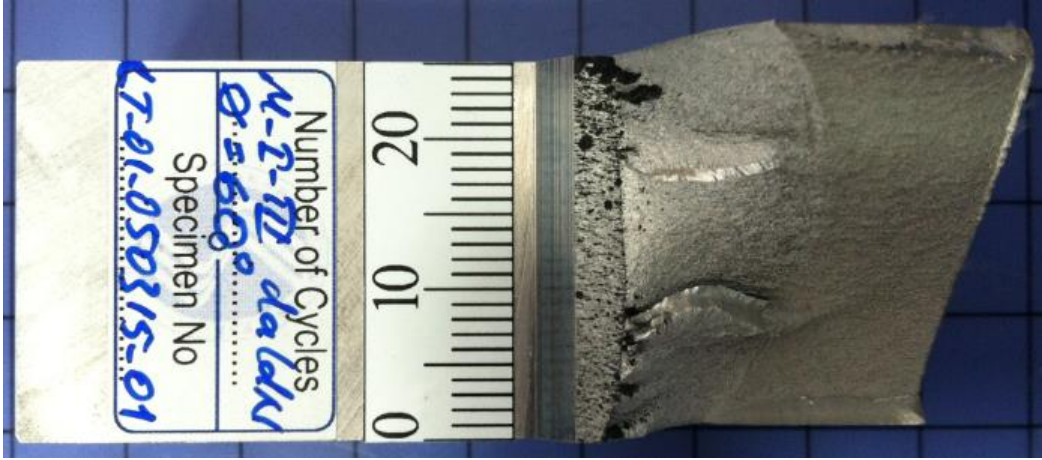


Şekil 3.3.23. Mod-I/III=45° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin (a) yüzeyel, (b) çizgisel karşılaştırılması.

3.3.4.2 Mod-I/III=60° Yükleme Açısında CTT Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri

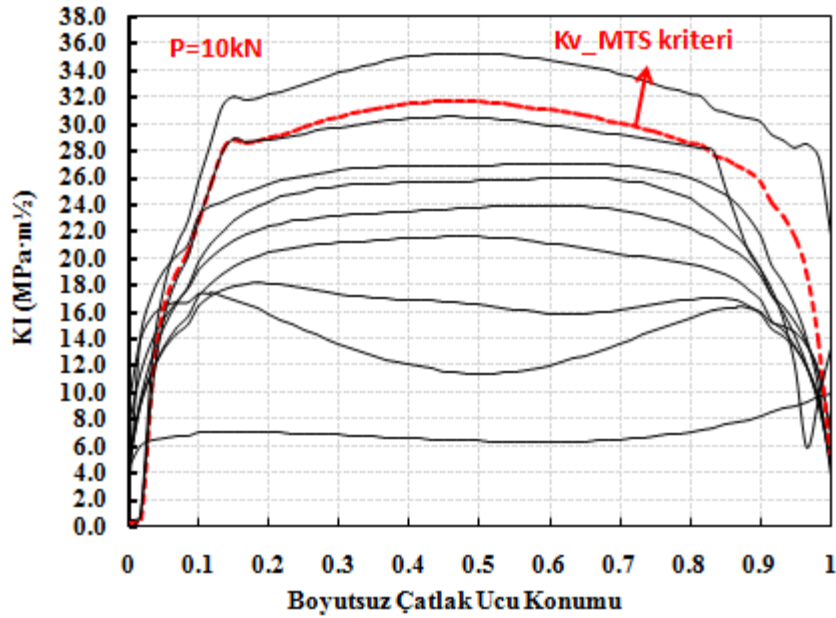
Mod-I/III=60° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numunenin üstten görünümü Şekil 3.3.24'te verilmiştir. Şekilde görülen ön çatlak uzunluğu dijital ölçer yardımıyla ölçülerek bire bir modellenmiş ve MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme açısında

gerçekleştirilen deney 10kN (R=0.1) yorulma yüklemesi altında gerçekleştirildiği için, analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.

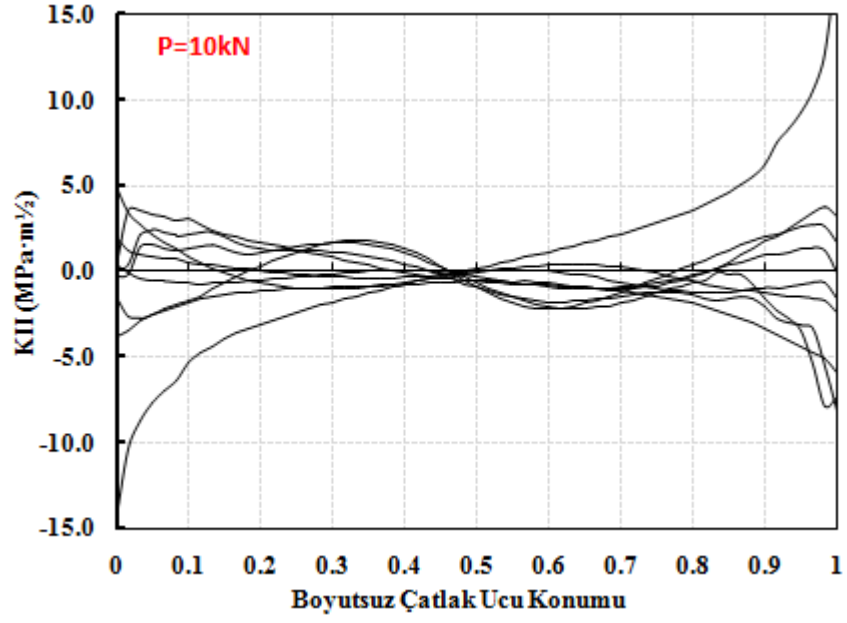


Şekil 3.3.24. Mod-I/III=60° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

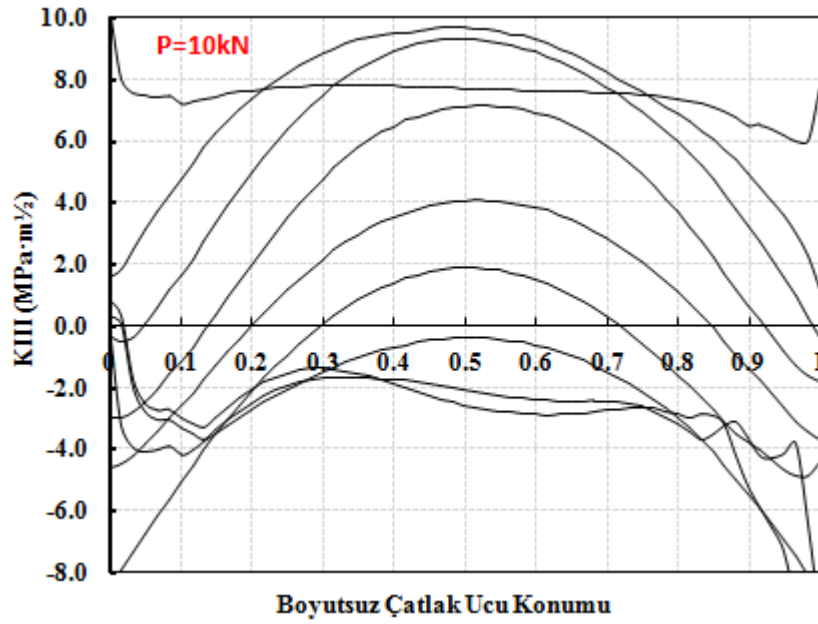
Çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.3.25'te verilmiştir. Son çatlak adımı için MTS kriterine göre eşdeğer GŞF değeri hesaplanarak ayrıca çizdirilmiştir. R-oranı dikkate alınarak eşdeğer GŞF değeri hesaplanmaktadır.



(a)



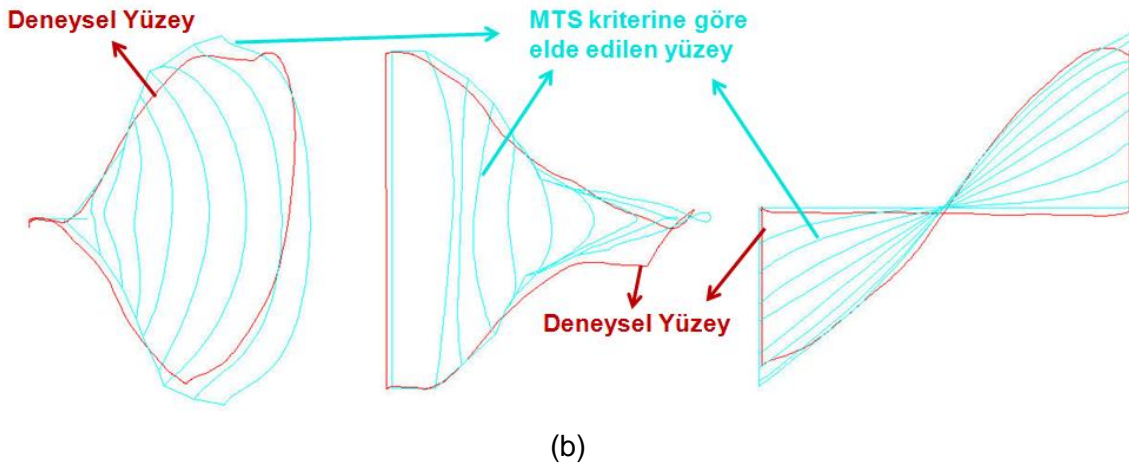
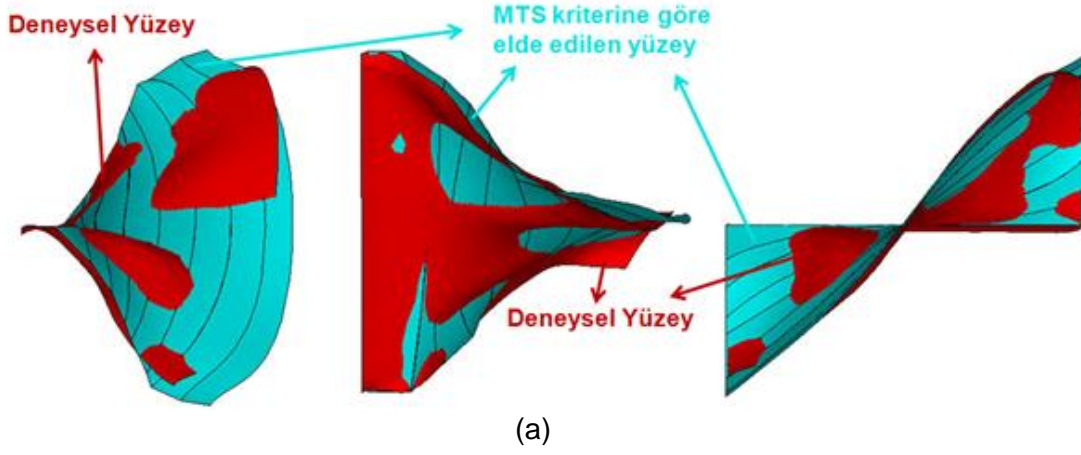
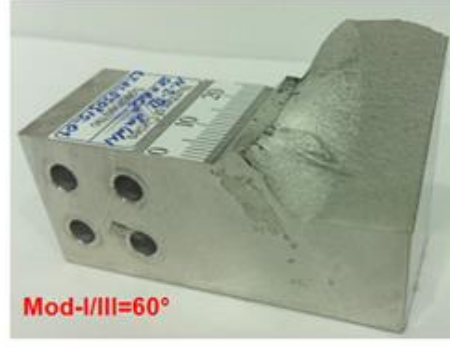
(b)



(c)

Şekil 3.3.25. 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} GŞF değerleri.

Şekil 3.3.26'da, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak elde edilen yüzeylerin karşılaştırması verilmiştir. Her iki yüzeyinde ufak sapmalar dışında birbirine yakın eğilim gösterdiği görülmektedir.

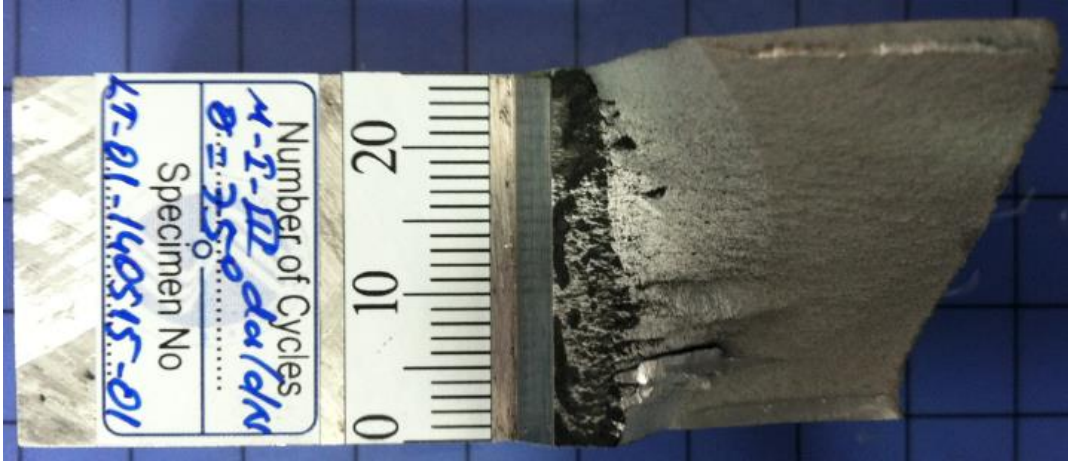


Şekil 3.3.26. Mod-I/III=60° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin (a) yüzeysel, (b) çizgisel karşılaştırılması.

3.3.4.3 Mod-I/III=75° Yükleme Açısında CTT Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri

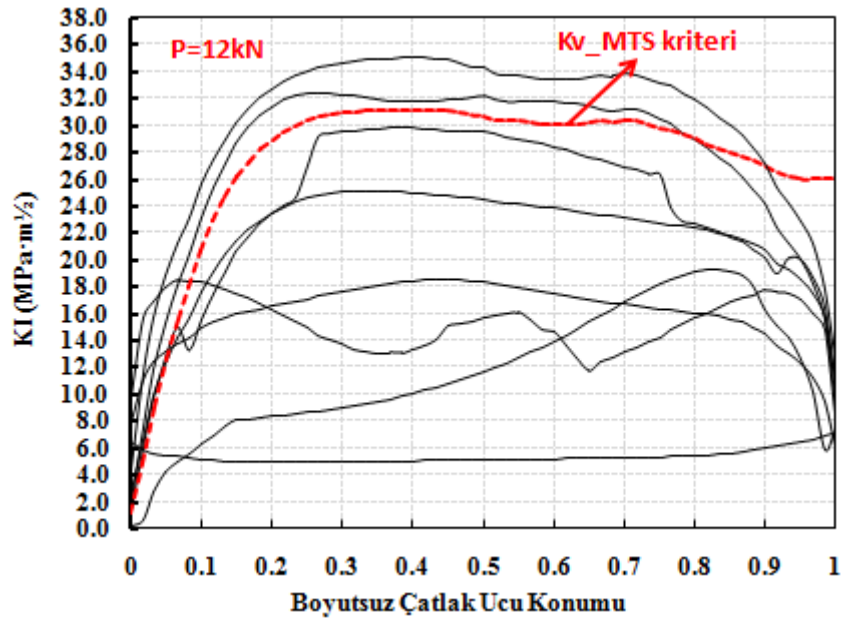
Mod-I/III=75° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyindeki (Şekil 3.3.27) ön çatlak uzunluğu ölçülerek bire bir modellenmiş ve MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonları

gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme testi saniyede 2 çevrim (2 hertz) 12kN yük altında ve R-oranı 0.1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.

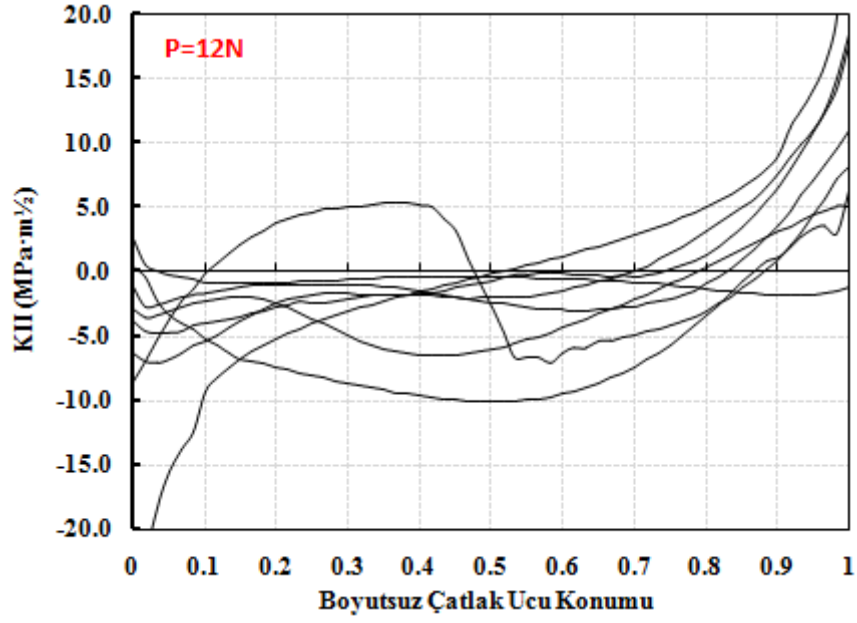


Şekil 3.3.27. Mod-I/III=75° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTT numunesi için yapılan çatlak ilerleme deneyi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

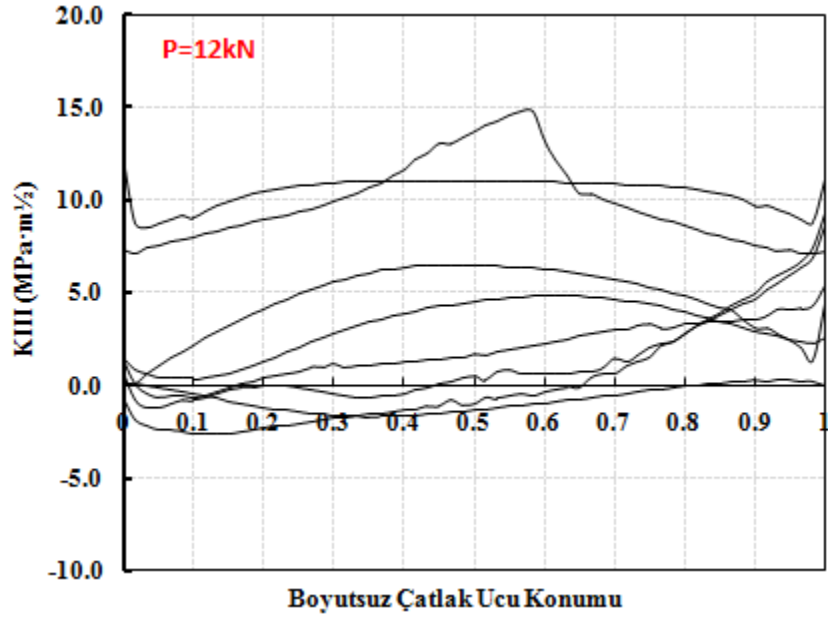
Analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.3.28'de verilmiştir. Bu yükleme durumu için de, son çatlak adımı için MTS kriterine göre eşdeğer GŞF hesaplanarak şekilde çizdirilmiştir.



(a)



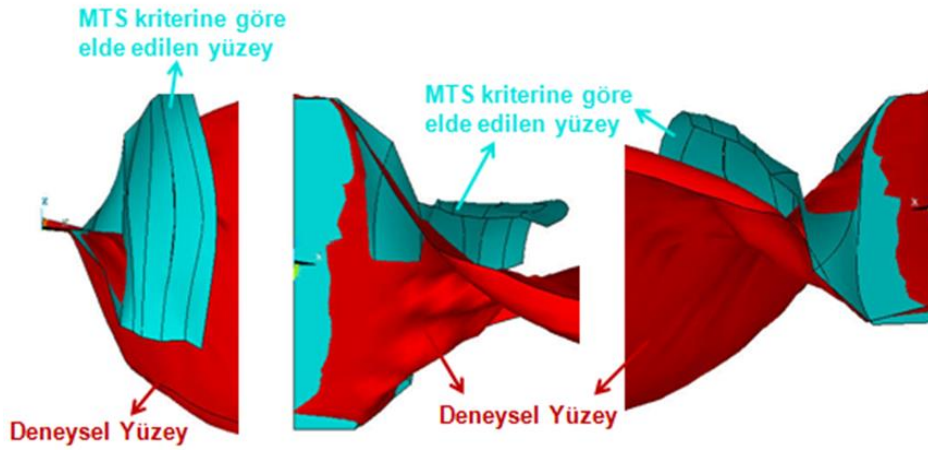
(b)



(c)

Şekil 3.3.28. Mod-I/III= 75° yükleme açısında 25 mm kalınlığına 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 3.3.29'da, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak elde edilen yüzeylerin karşılaştırması verilmiştir. Karışık modlu yüklemenin oldukça yüksek olduğu bu yükleme açısı için, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak tahmin edilen çatlak ilerleme yüzeyinin birbirinden uzak bir eğilim gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 3.3.29. Mod-I/III=75° yükleme 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° yükleme 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° yükleme 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° yükleme 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 yükleme durumlarına olan hassasiyetinin düşüklüğünden kaynaklanabilir. Mod-I/II deneyleri sonrasında da görüldüğü gibi yükleme 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 tepelikler meydana gelmektedir. Bu yüzey bozukluklarının sebebi halen bir araştırma konusudur ve literatürde henüz tam olarak açıklanamamıştır. Bu yüzden, Bölüm 3.3.6 'da MTS kriteri kullanarak tahmin edilen mod-I/III yüzeyleri, çatlak sapma açısı tahmini için bu

proje 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.

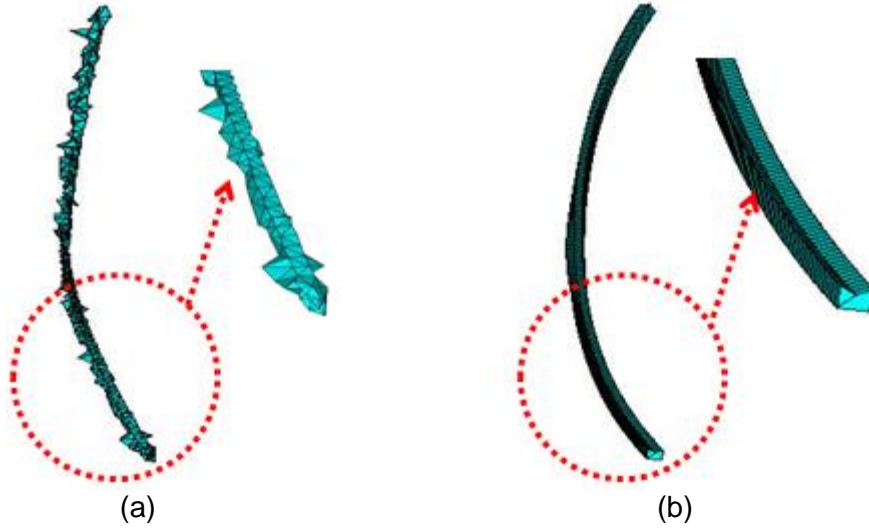
3.3.5 Mod-I/II/III Yükleri Altında CTST Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Maksimum Teğetsel Gerilme Kriteri)

Bu bölümde, farklı yükleme açıları için gerçekleştirilmiş olan mod-I/II/III çatlak ilerleme deneyleri, MTS kriteri kullanılarak çatlak profilleri artırımı olarak ilerletilmiş ve elde edilen çatlak yüzeyleri, deneysel yüzey profilleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece, iki boyutlu kriter ile üç boyutlu çatlak ilerleme deneylerinin modellenmesinde K_{III}'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 modellemesinde 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.

3.3.5.1 Farklı Ağ Yapısı Kullanarak Gerçekleştirilen Üç Boyutlu Çatlak İlerleme Analiz Yöntemi

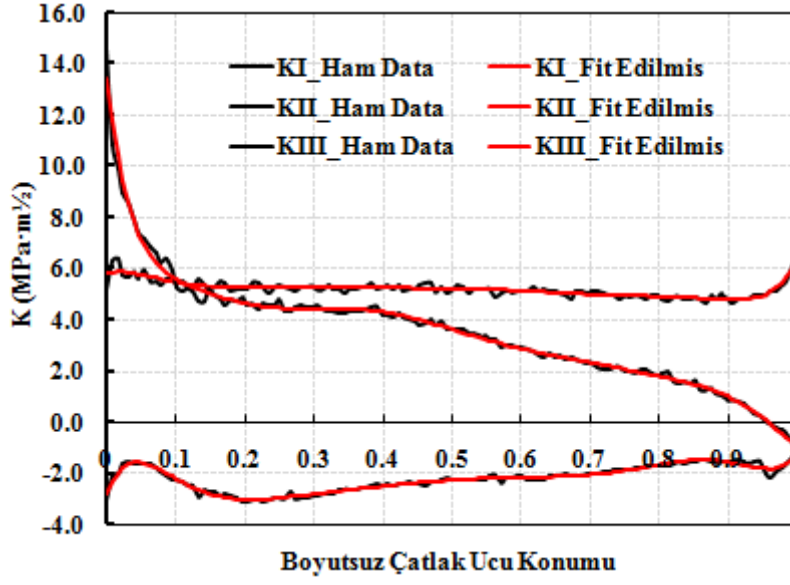
Mod-I/III analizlerinde kullanılan yöntemde çatlağın modellenmesi aşamasında, çatlak ucu civarında tünel hacim oluşturularak, oluşturulan bu tünel hacme altı yüzlü hexahedral elemanlar ile ağ yapısı örülmektedir. Daha sonra bu tünel hacmin dışında kalan tüm yapı dört yüzlü tetrahedral elemanlar ile örülerek 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 şekli nedeniyle, FRAC3D kodu kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonrası çatlak ucu boyunca GŞF değerlerinin dağılımında gürültüler oluşmaktadır. Şekil 3.3.30'da, çatlak ucu boyunca sıralanan tetrahedral ve hexahedral elemanlar gösterilmektedir. Oluşan bu gürültüyü en aza indirmek için şekilde

görüldüğü gibi (Şekil 3.3.30-a) düşük eleman boyutuna sahip ve çatlak ucu boyunca sık dizimli bir ağ yapısı oluşturmak gerekmektedir.

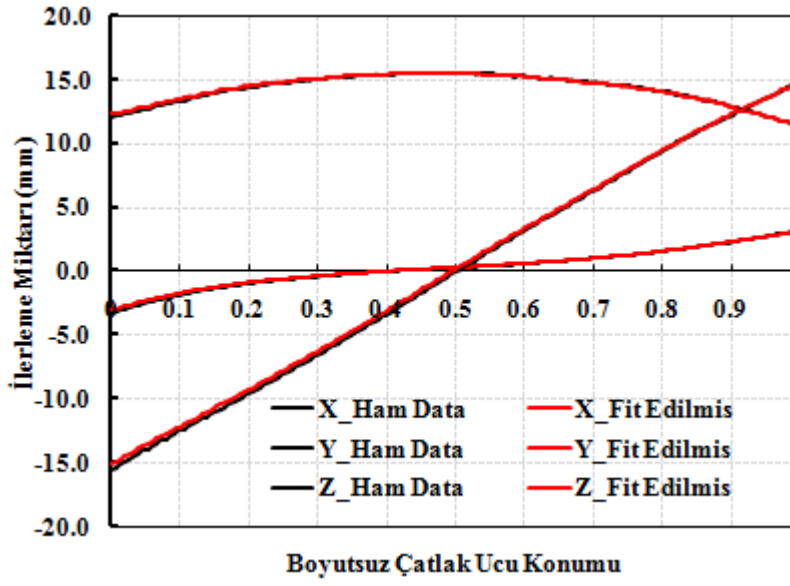


Şekil 3.3.30. Çatlak ucu boyunca sıralanan (a) tetrahedral, (b) hexahedral elemanlar.

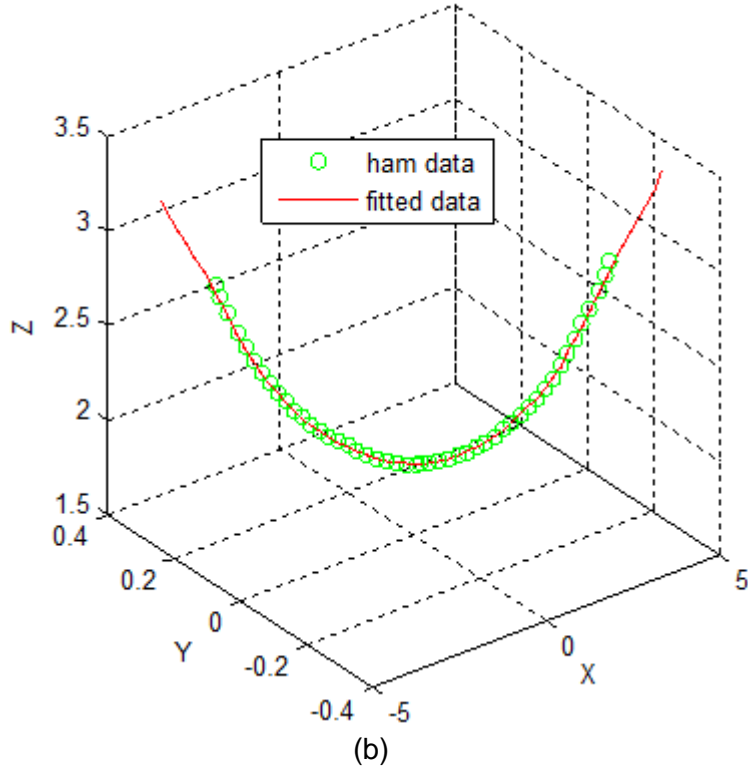
Tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonrası GŞF dağılımlarında oluşan gerçek çözüm dağılımının yakın bölgesindeki gürültünün giderilmesi gerekmektedir. Çünkü mevcut gürültüler bir sonraki profil tahminini olumsuz etkileyecektir. GŞF dağılımına eğri uydurularak gürültüler ortadan kaldırılmıştır. Şekil 3.3.31'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 3.3.32-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 3.3.32-b).



Şekil 3.3.31. Tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen bir analizden çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerlerinin dağılımı.

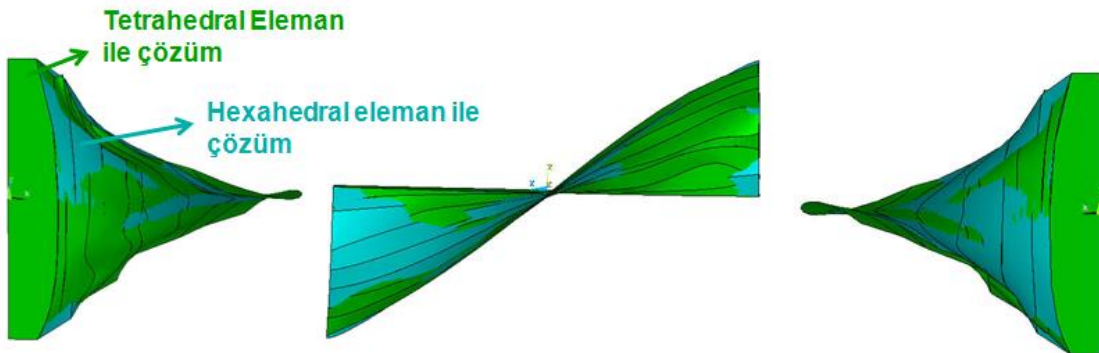


(a)



Şekil 3.3.32. 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° yükleme açısına uygulanarak çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen çatlak yüzeyleri, çatlak ucu boyunca hexahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonrasında elde edilen yüzeyler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.3.33). Şekilde görüldüğü gibi, farklı ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilen her iki analiz sonuçlarından elde edilen yüzeyler de birbiri ile örtüşmektedir.

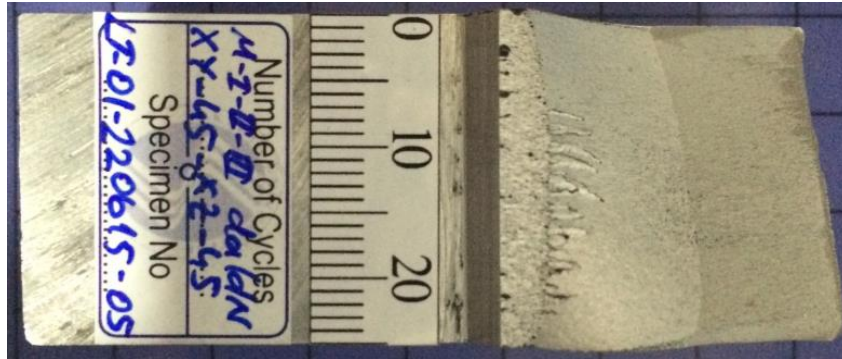


Şekil 3.3.33. Mod-I/III 45° yükleme açısı için, hexahedral ve tetrahedral elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen her iki analiz sonuçlarından elde edilen yüzeyler.

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.

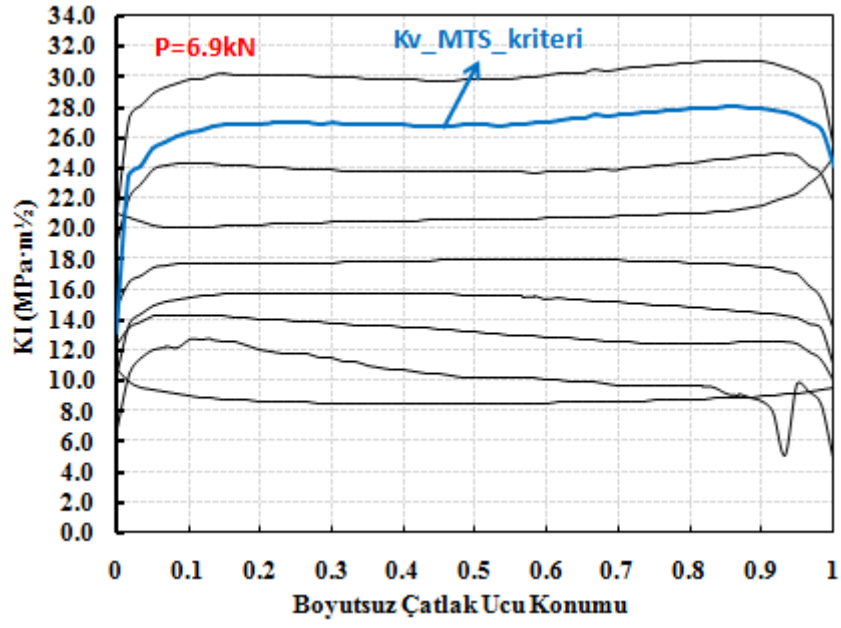
3.3.5.2 Mod-I/II=45°, Mod-II/III=45° Ve Mod-I/III=45° Yükleme Açısında CTST Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri

Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° üç eksenli yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTST (Compact Tension Shearing and Tearing) numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numunenin üstten görünümü Şekil 3.3.34'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) 6.9kN yük altında ve R-oranı 0.1 olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.

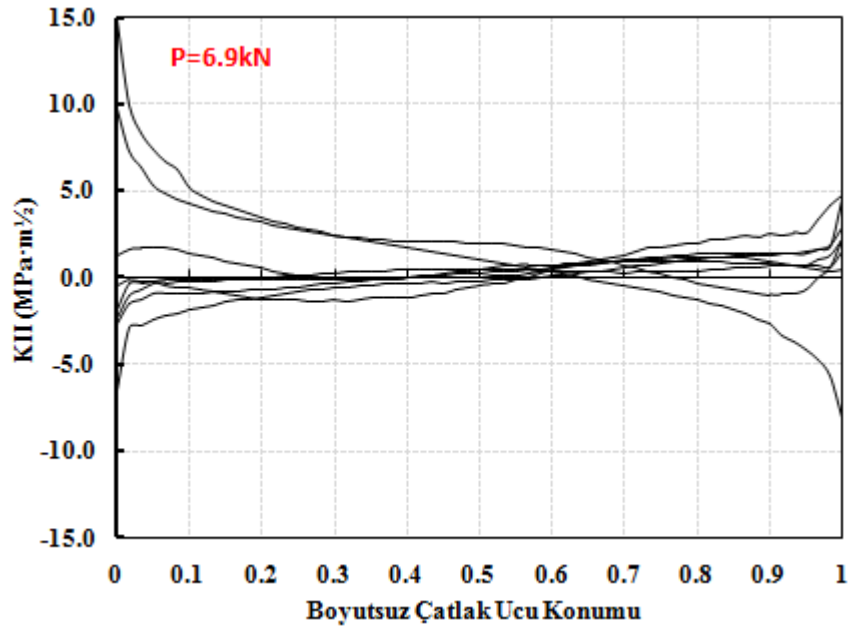


Şekil 3.3.34. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısında 25mm kalınlıkta CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

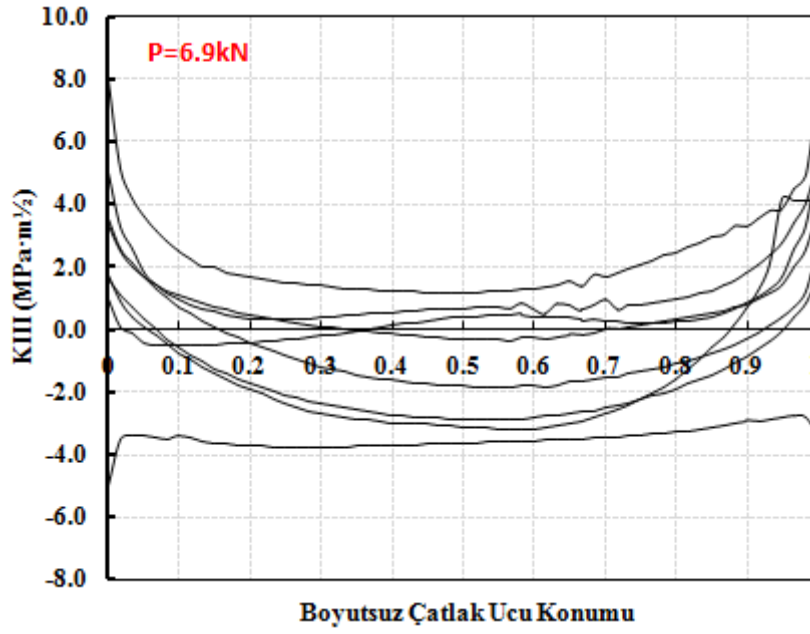
Gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.3.35'te verilmiştir. Son çatlak adımı için hesaplanarak çizdirilen eşdeğer GŞF değeri daha sonra tüm profiller için hesaplanarak Bölüm 3.3.6'da ömür tahminleri yapılacaktır.



(a)

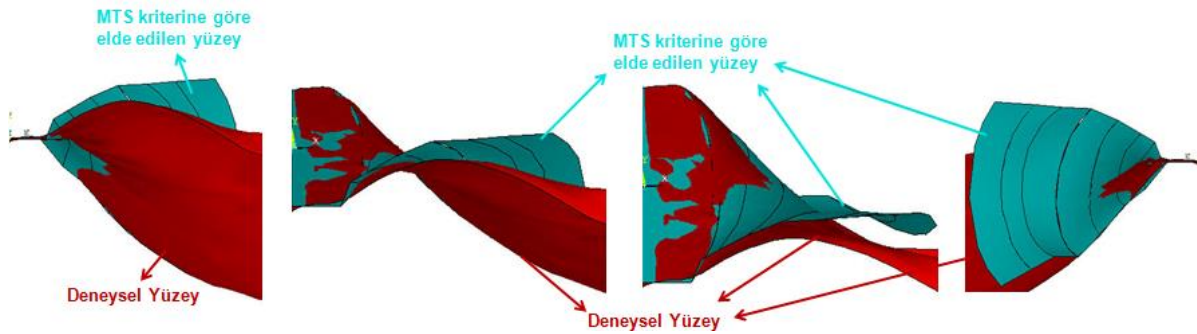


(b)



Şekil 3.3.35. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısında 25mm 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.

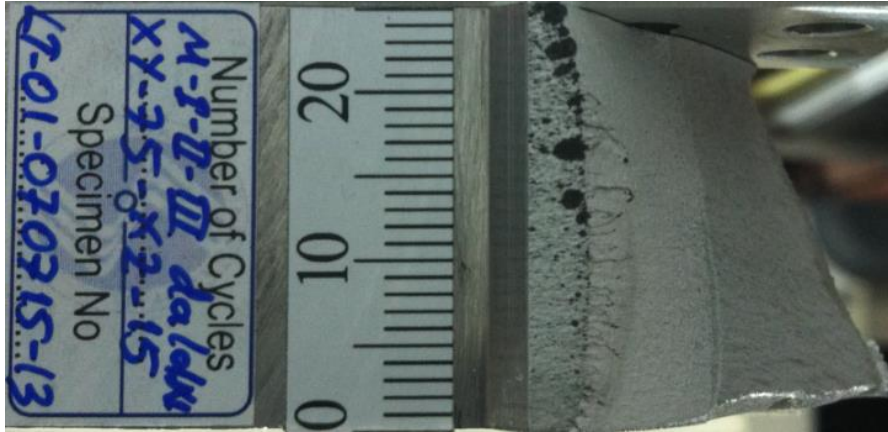
Şekil 3.3.36'da, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak elde edilen yüzeylerin karşılaştırması verilmiştir. Çatlağın bir kenarı deneysel yüzey ile bire bir örtüşürken diğer kenarı ise deneysel yüzeyden sapmıştır. Çatlak merkezi ise deneysel yüzeyden giderek uzaklaşmaktadır.



Şekil 3.3.36. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesinin MTS kriterine göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ile deneysel yüzeyin karşılaştırılması.

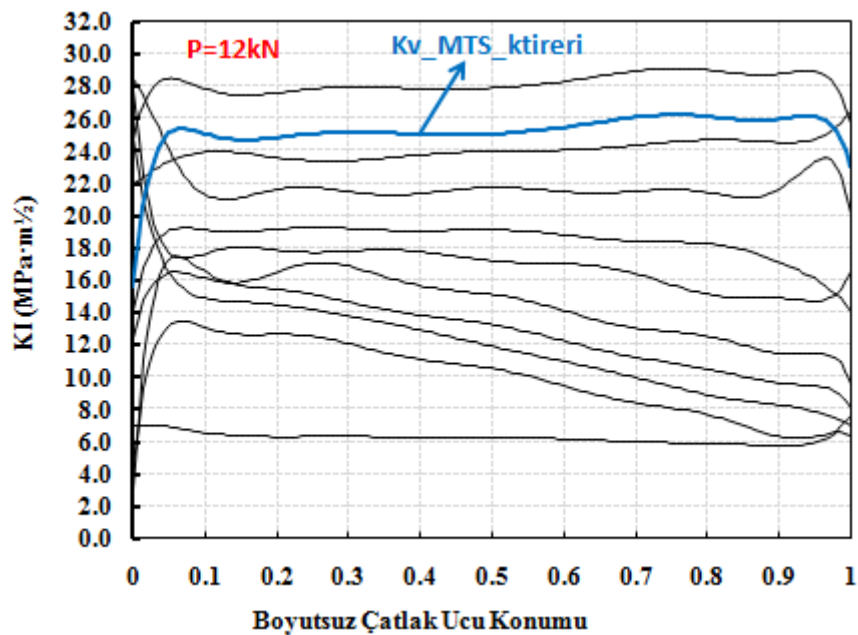
3.3.5.3 Mod-I/II=75°, Mod-II/III=15° Ve Mod-I/III=75° Yükleme Açısında CTST Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri

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 deneyi sonrasında Şekil 3.3.37'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) 12kN yük altında ve R-oranı 0.1 olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.

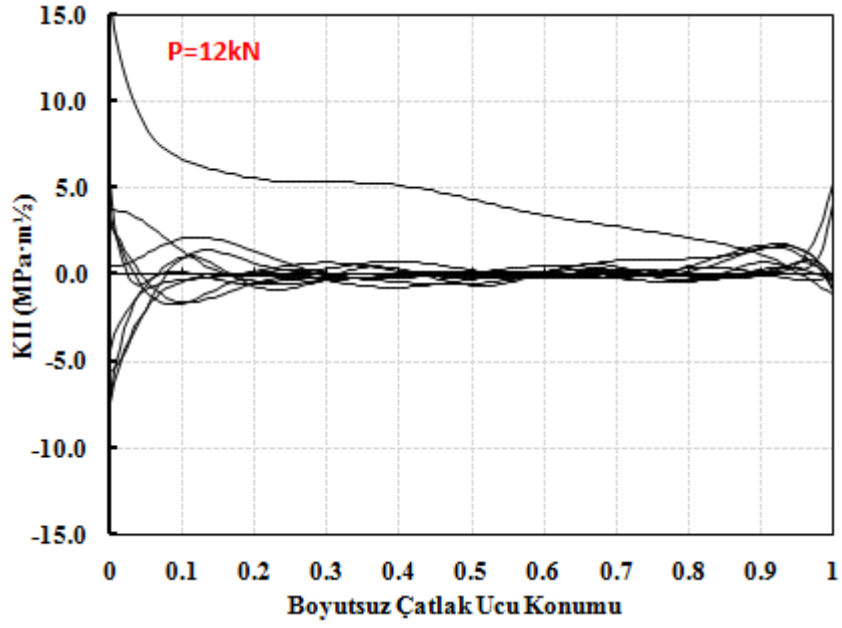


Şekil 3.3.37. Mod-I/II=75°, mod-II/III=15° ve mod-I/III=75° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

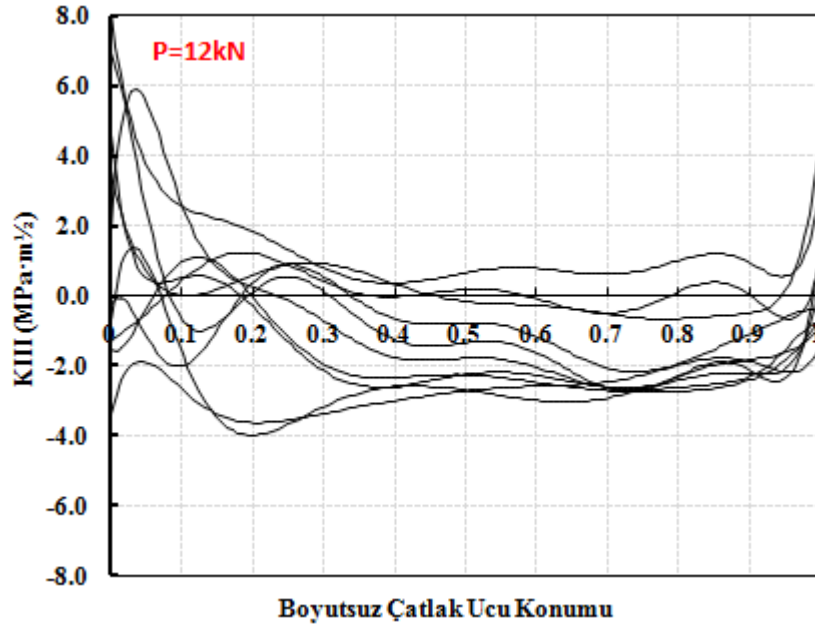
Bu yükleme durumu için gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.3.38'de verilmiştir.



(a)



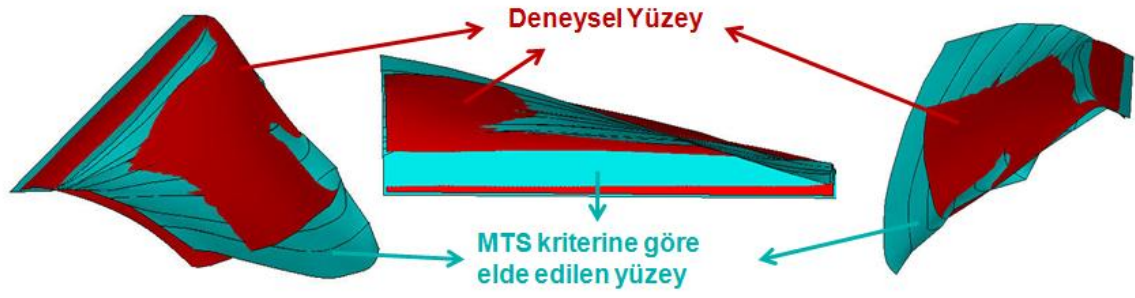
(b)



(c)

Şekil 3.3.38. 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.

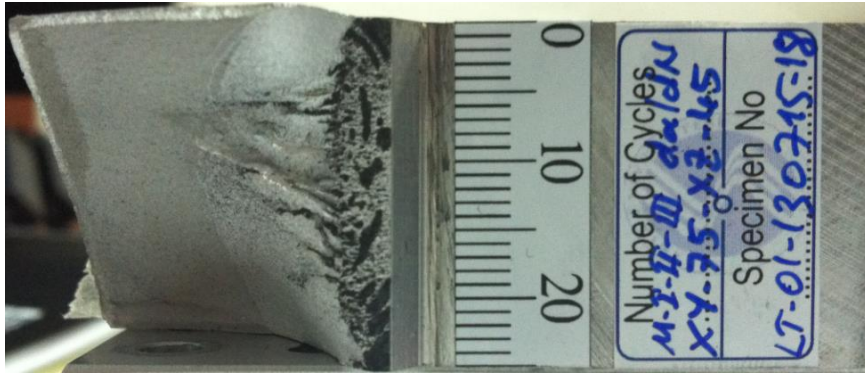
Şekil 3.3.39'da, deneysel yüzey ile MTS kriteri uygulanarak elde edilen yüzeylerin karşılaştırması verilmiştir. Bu yükleme açısı için MTS kriteri kullanarak elde edilen yüzey, küçük sapmaların dışında deneysel yüzeye yakın bir sonuç vermiştir.



Şekil 3.3.39. 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.

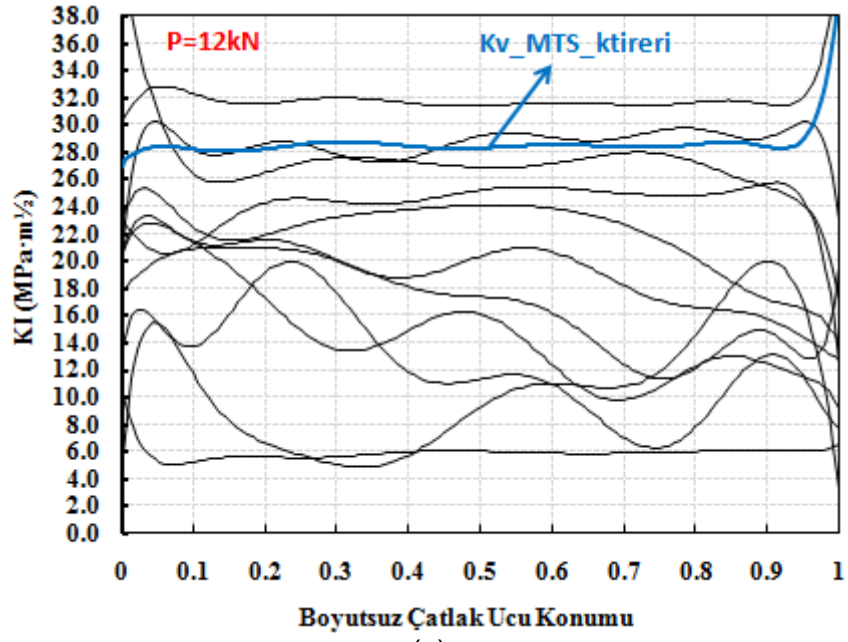
3.3.5.4 Mod-I/II=75°, Mod-II/III=45° Ve Mod-I/III=75° Yükleme Açısında CTST Numunesinin MTS Kriterine Göre Çatlak İlerleme Analizleri

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 3.3.40'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) 12kN yük altında ve R-oranı 0.1 olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları bu yük değeri için verilmiştir.

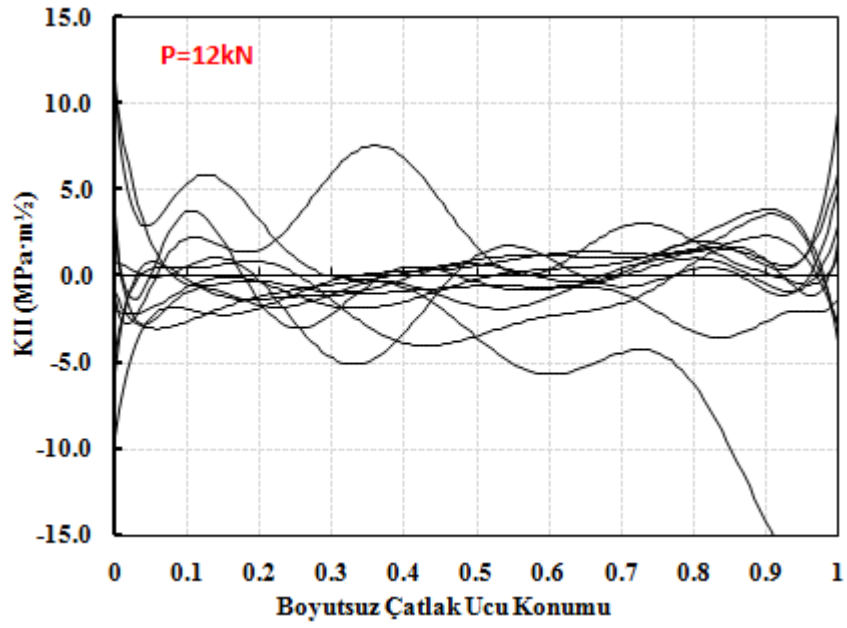


Şekil 3.3.40. Mod-I/II=75°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=75° yükleme açısında 25 mm kalınlığa sahip CTST numunesi için gerçekleştirilen çatlak ilerleme testi sonrasında kırılan numune yüzeyinin görünümü.

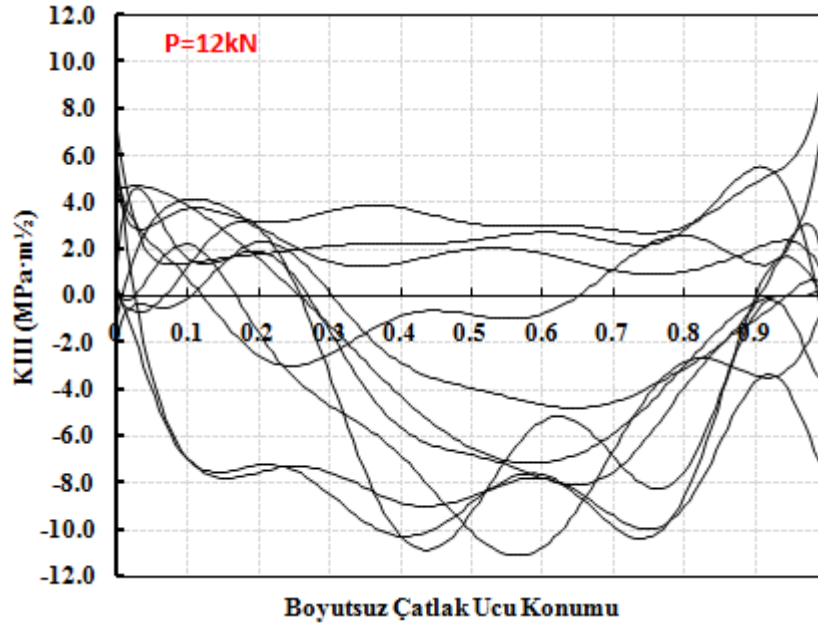
Gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrasında çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri Şekil 3.3.41'de verilmiştir.



(a)

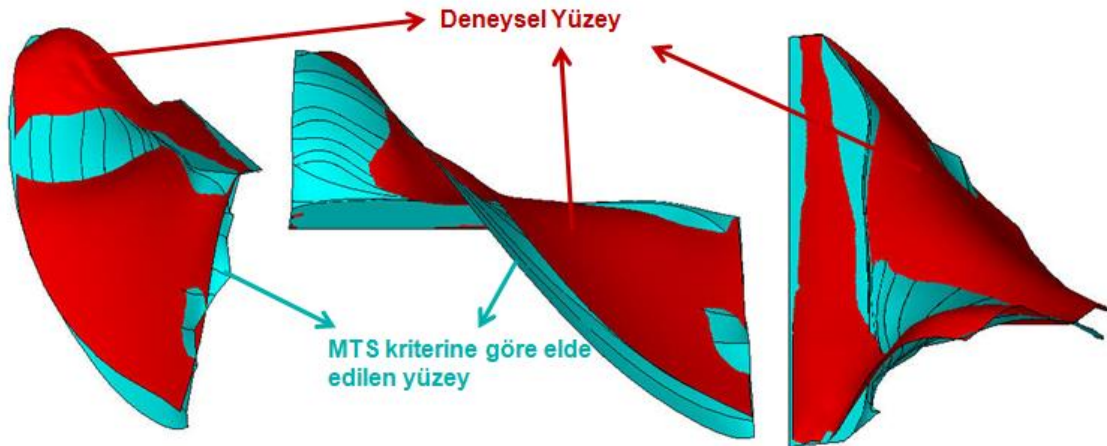


(b)



Şekil 3.3.41. 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 3.3.42'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 3.3.42. 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.

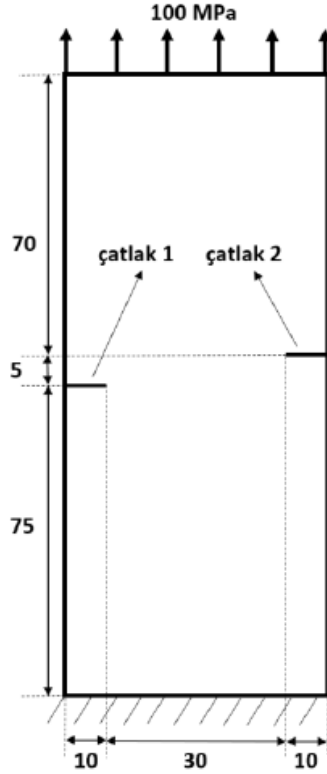
Mod-I/III ve mod-I/II/III çatlak ilerleme testlerinden üçer adet yükleme durumu seçilerek, MTS kriteri kullanarak çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve analizlere göre elde edilen çatlak yüzeyleri deneysel yüzeyler ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarından da görülmüştür ki, K_{III} GŞF 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 Bölüm 3.3.6'da, mod-I/II kırılma deneylerine göre geliştirilen iki boyutlu çatlak sapma açısı kriteri (Denklem 3.2.29), çatlak yüzeylerinin tahmini için ve mod-I/III, mod-I/II/III kırılma testlerine göre geliştirilen üç boyutlu kırılma kriteri (Denklem 3.2.31), eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için 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.

3.3.6 Üç Boyutlu Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Kabiliyetlerini Sağlama Problemleri

Bu bölümde, önceki bölümlerde detayları verilen modelleme, analiz ve deneysel çalışmalar ile geliştirilen iyileştirilmiş kriterler de kullanılarak analiz edilen bağımsız bazı problemler çözümlenerek, uygulanan yöntem ve geliştirilen kriterlerin sağlamaları gösterilmektedir. Bu problemler, alt bölümler halinde aşağıda verilmektedir.

3.3.6.1 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 3.3.43'te verilmiştir.



Şekil 3.3.43. Çoğul çatlak ilerleme analizi yapılacak olan ve iki adet kenar çatlaklı barındıran plakanın geometrisi, ölçüleri ve çatlakların konumları.

Şekil 3.3.43'te 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.

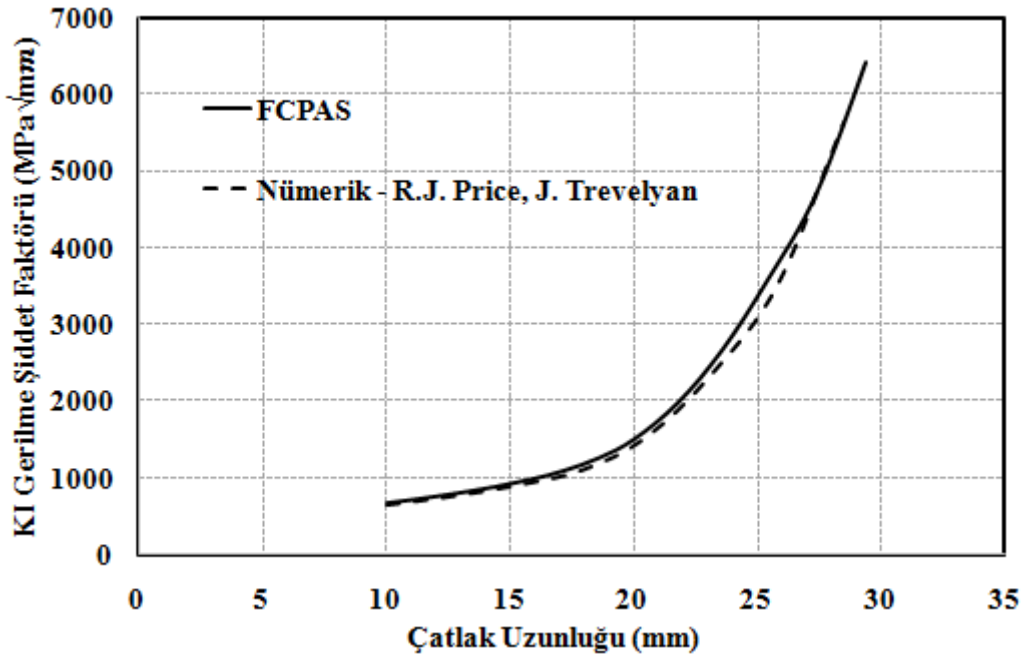
50 mm genişliğindeki ve 150 mm yüksekliğindeki plakada her iki yan kenarda 10'ar mm uzunluğunda iki adet başlangıç çatlaklı bulunmaktadır ve çatlak uçları arasındaki yatay mesafe 30 mm, dikey mesafe 5 mm'dir. Malzeme özellikleri, elastiklik modülü $E=30\text{GPa}$, Poisson oranı $\nu=0.3$, Paris-Erdoğan kuralı sabitleri (malzeme sabitleri) $C=1.0\text{E}-12$, $n=3.0$ 'dir. Plakanın üst alanına 100 MPa çekme yükü uygulanmış ve alt alanından sabitlenmiştir. Çevrimsel gerilme oranı $R=0$ 'dir.

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 arayüzünden oluşturulmuştur.

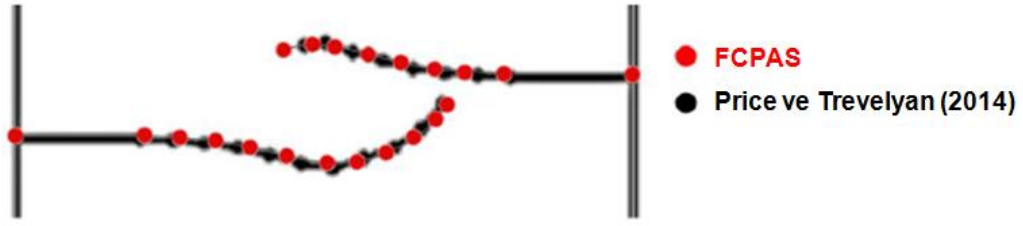
Model oluşturulduktan ve FCPAS ile kırılma analizi gerçekleştirilip çatlak her iki ekseninde düzlemsel olmayan bir şekilde ilerletildikten sonra yeni çatlak ucu koordinatları kullanılarak ANSYS ile yeniden modelleme yapılmaktadır. Bu işlemler tekrarlanarak FCPAS ile düzlemsel olmayan çatlak ilerleme analizi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Bu uygulama hem düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesine hem de çoğul çatlak ilerlemesine birer örnektir.

Çatlak ilerleme analizi tamamlandıktan sonra elde edilen gerilme şiddet faktörü değerlerinin literatürdeki makalede yer alan GŞF değerleriyle kıyaslaması Şekil 3.3.44'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3.44. FCPAS ile yapılan çoğul çatlak ilerleme analizi sonucu elde edilen GŞF değerlerinin literatürdeki veriler ile kıyaslaması (değerler uzun olan çatlaktan alınmıştır).

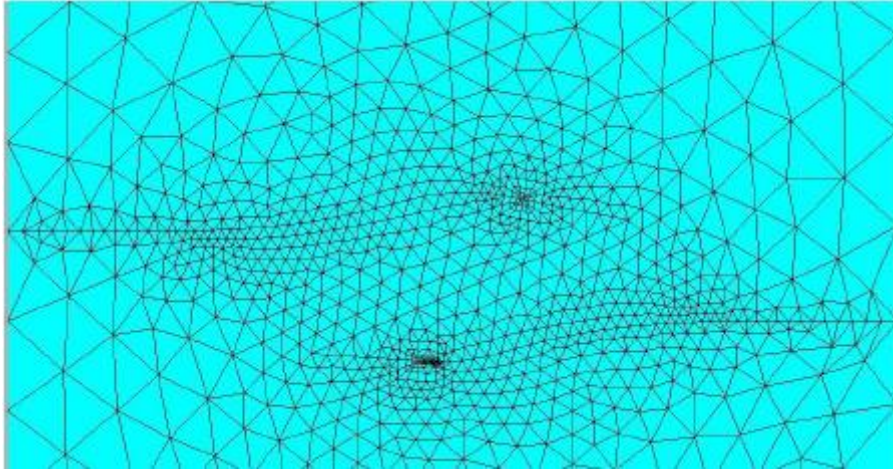
Şekil 3.3.44'den görüldüğü üzere göre GŞF değerleri birbirlerine oldukça yakındır. GŞF değerlerinin karşılaştırılmasının ardından, FCPAS analizi sonucu elde edilen çatlak profilleri literatürdeki veriler ile kıyaslanmış ve elde edilen sonuç Şekil 3.3.45'te gösterilmiştir.



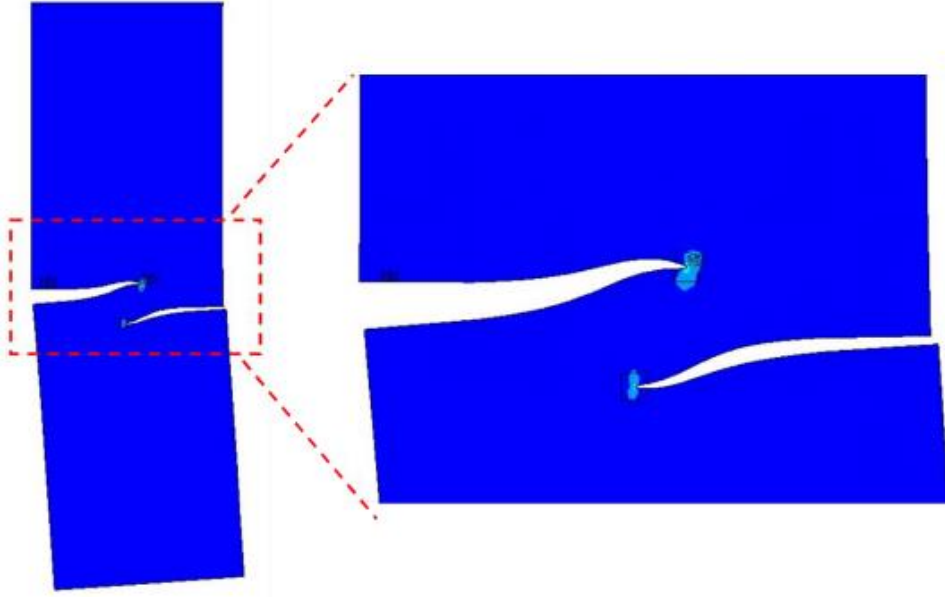
Şekil 3.3.45. FCPAS ile yapılan çoğul çatlak ilerleme analizi sonucu elde edilmiş çatlak profillerinin literatürdeki verilerle karşılaştırılması.

Şekil 3.3.45'den 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 3.3.46 ve Şekil 3.3.47'de verilmiştir.



Şekil 3.3.46. Düzlemsel olmayan çoğul çatlak ilerlemesinin olduğu plakanın ANSYS ile bölüntü oluşturulmuş hali.



Şekil 3.3.47. Düzlemsel olmayan çoğul çatlak ilerlemesinin olduğu plakanın çekme yükü altında deforme olmuş hali.

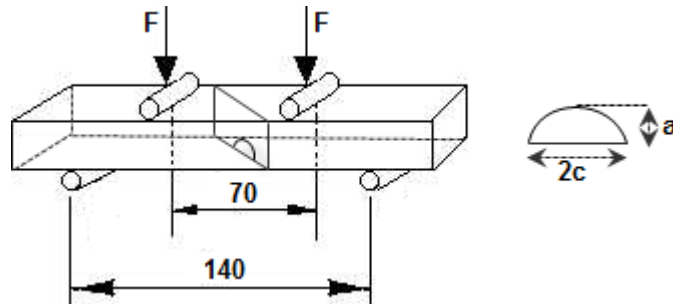
3.3.6.2 Eğik Çatlak İçeren Plakada Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod-I/III) Çatlak İlerleme Analizi

Literatürde, Kikuchi vd. (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 3.3.48). Şekilde mod-I yüklemesi ile ön çatlak oluşturulan plakadan 45° 'lik açı ile kesilen parçanın görünümü verilmiştir.



Şekil 3.3.48. Mod-I yüklemesi altında ön çatlak oluşturulmasının ardından belirli açılarda plakalar kesilerek çatlakların plaka kenarlarına açılı olarak yerleştirilmesinin sağlanması.

Kikuchi vd. (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 3.3.49). Deneylerde 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 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 3.2.24) kullanarak elde edilen çatlak profillerini deneysel profiller ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca, Kikuchi kriteri ve Richard kriterine (Denklem 3.2.20) göre ömür tahminlerinde bulunarak deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır.



Şekil 3.3.49. Yatayla 15° , 30° ve 45° açı yapan ön çatlaklara sahip plakalara uygulanan dört nokta yorulmalı eğme test düzeneği ve oluşturulan çatlak profili boyutları.

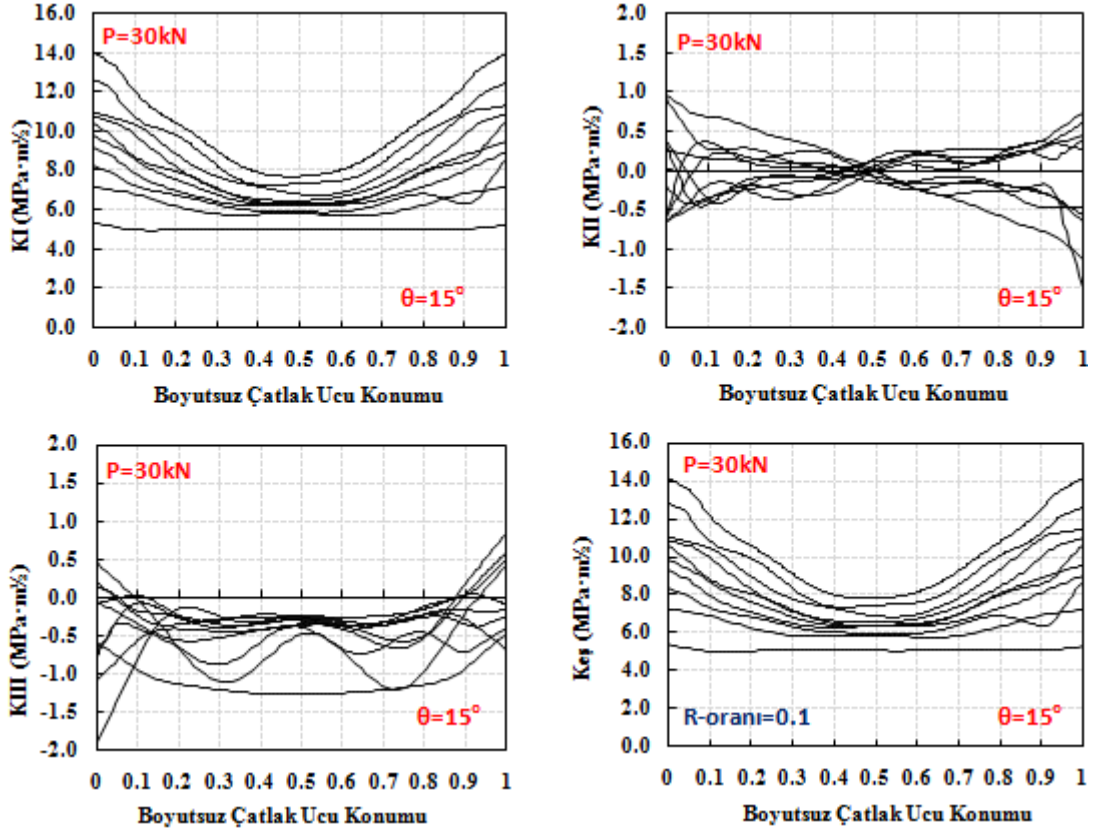
İki yük arası mesafe 70 mm ve destek noktaları arası mesafe 140 mm olarak verilmiştir. Çalışmada kullanılan plaka boyutları 65x160mm olup, plaka kalınlığı 25 mm'dir. Tüm deneylerde oluşturulan ön çatlak uzunluğu $2c=9\text{mm}$ ve $a/c_0=0.7$ olarak verilmiştir.

Bu çalışmada, Kikuchi vd. (2012) yapmış oldukları deneyler ve çatlak ilerleme analizleri, proje kapsamında geliştirilen kriterler kullanılarak tekrar edilmiş ve elde edilen çatlak profilleri

ve geliştirilen kriterlere göre yapılan ömür tahminleri, Kikuchi vd. 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 3.2.2) kullanılan malzeme sabitleri, C ve n değerleri verilmemiştir. Bu yüzden, bu çalışmada gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, proje kapsamında gerçekleştirilen mod-I çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen malzeme sabitleri ($C=1.46191e-06 \text{ mm}/(\text{cycle}*(\text{Mpa}\sqrt{\text{m}})^n$, $n=2.4392$) 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.

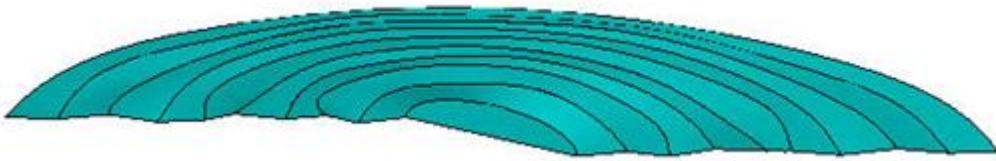
Çatlak ilerleme analizleri Bölüm 3.3.5.1'de verilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çatlak sapma açısı tahmini için, proje kapsamında geliştirilen iki boyutlu çatlak sapma açısı kriteri (Denklem 3.2.29) ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için ise proje kapsamında geliştirilen üç boyutlu kırılma kriteri (Denklem 3.2.31) kullanılmıştır.

Şekil 3.3.50'de, yatayla 15° 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.



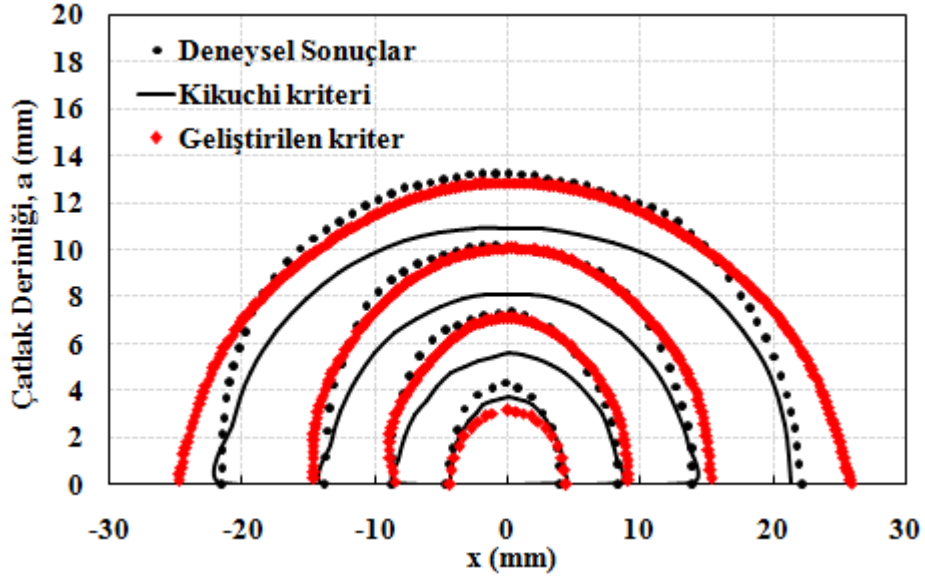
Şekil 3.3.50. Yatayla 15° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF ve bu değerlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerleri.

Şekil 3.3.51'de, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen analizler sonrası elde edilen çatlak yüzeyi verilmiştir.



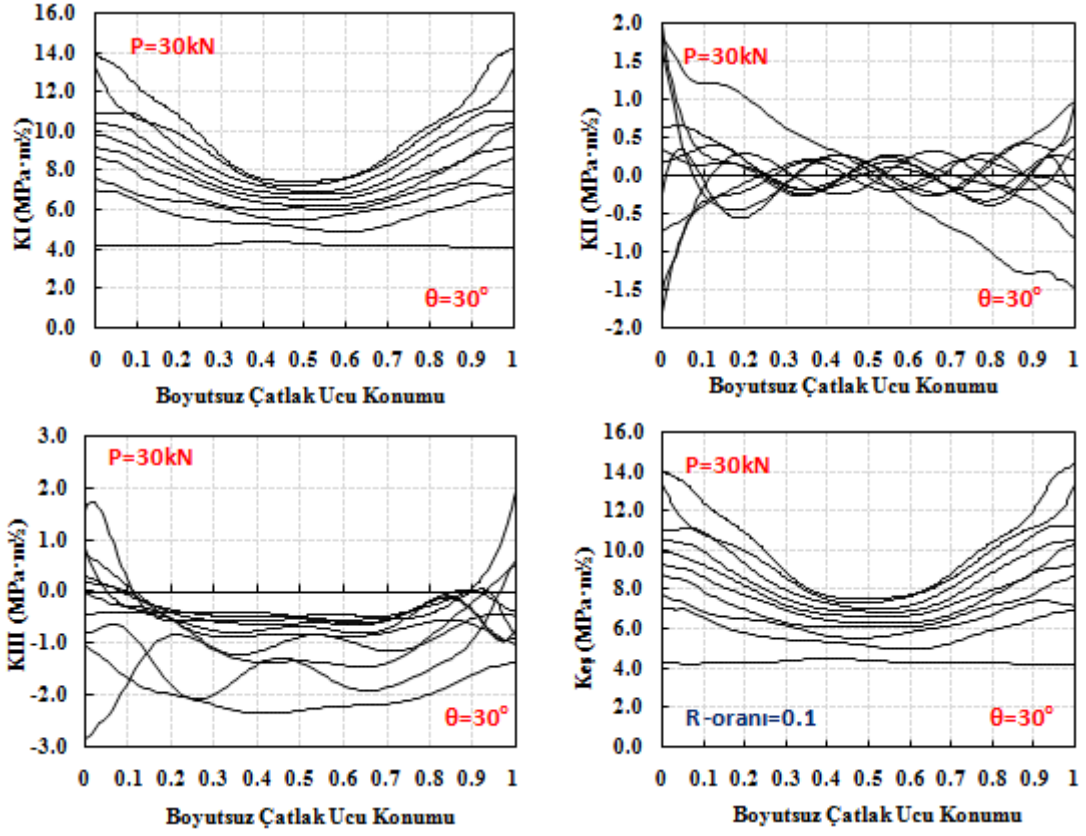
Şekil 3.3.51. Yatayla 15° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi.

Şekil 3.3.52'de ise, yukarıda verilen çatlak yüzey profilinin 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.



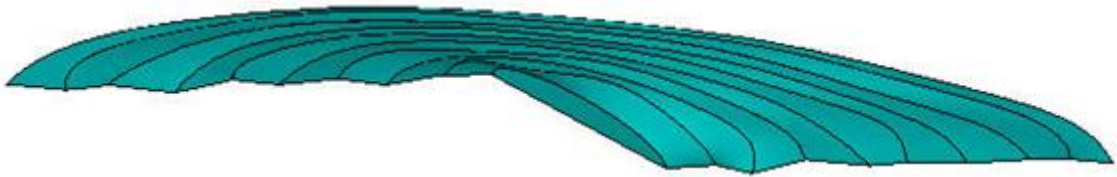
Şekil 3.3.52. Yatayla 15° açı yapan ön çatlaklı plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

Şekil 3.3.53'te, yatayla 30° açı yapan ön çatlaklı 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 çatlaklı analizi sonrası elde edilen K_{I1} ve K_{I11} değerleri artmasına rağmen, karışık mod-I/III yükleme durumunun düşük seviyelerde olduğu analiz sonuçlarından görülmektedir.

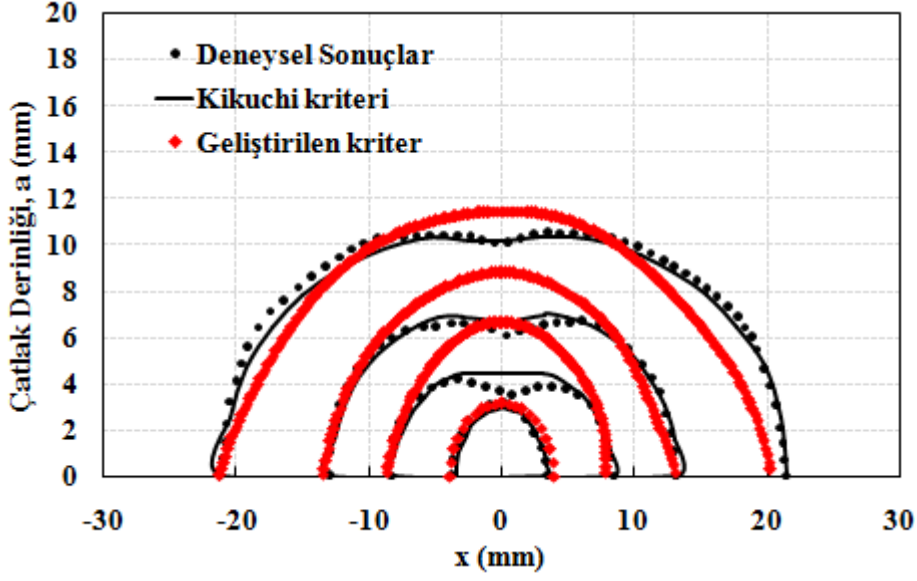


Şekil 3.3.53. Yatayla 30° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

Bu yükleme durumu için elde edilen çatlak yüzey profillerinin perspektif görünümü Şekil 3.3.54'te, profillerin üstten görünümünün literatür verileri ile karşılaştırması ise Şekil 3.3.55'te verilmiştir. Bu yükleme durumu için de, FCPAS analizleri ile elde edilen profillerin literatürdeki deneysel profillere yakın olduğu gözlemlenmiştir.

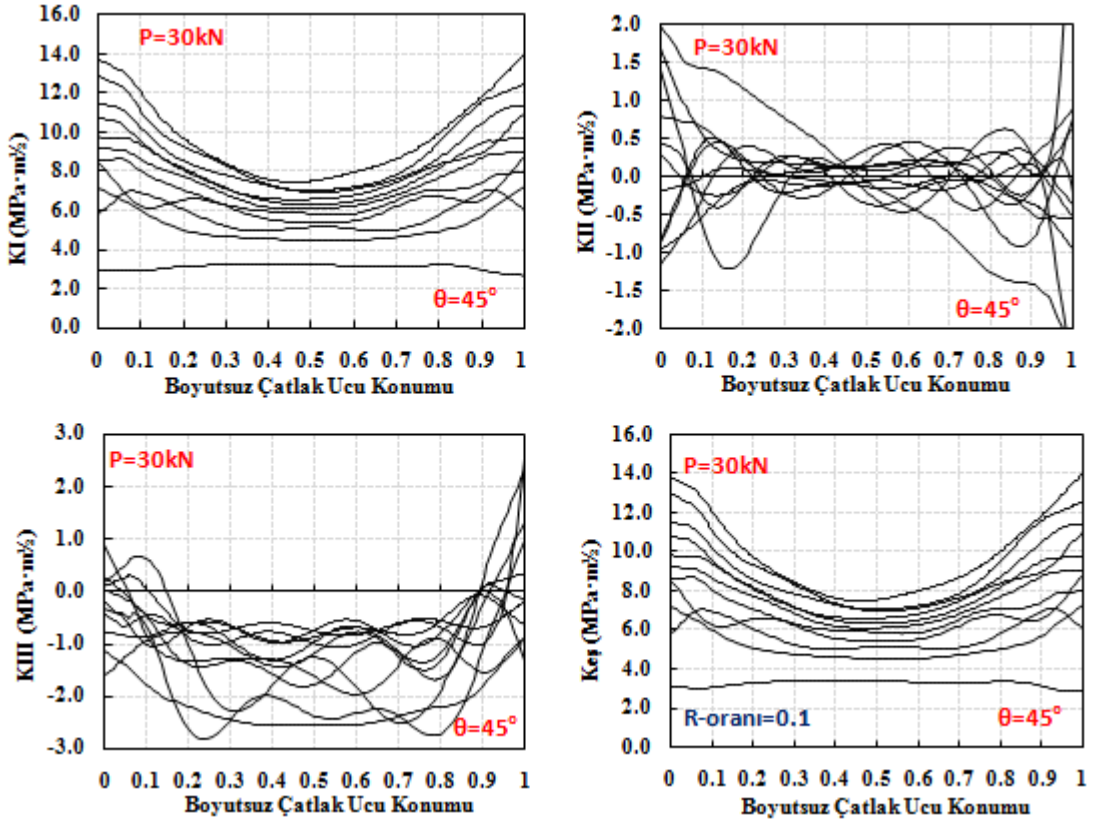


Şekil 3.3.54. Yatayla 30° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi.



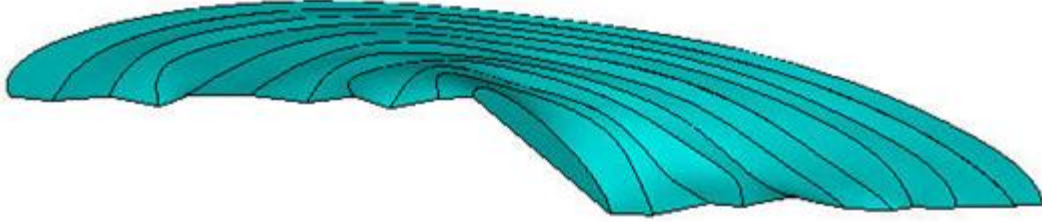
Şekil 3.3.55. Yatayla 30° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

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 3.3.56'da verilmiştir.

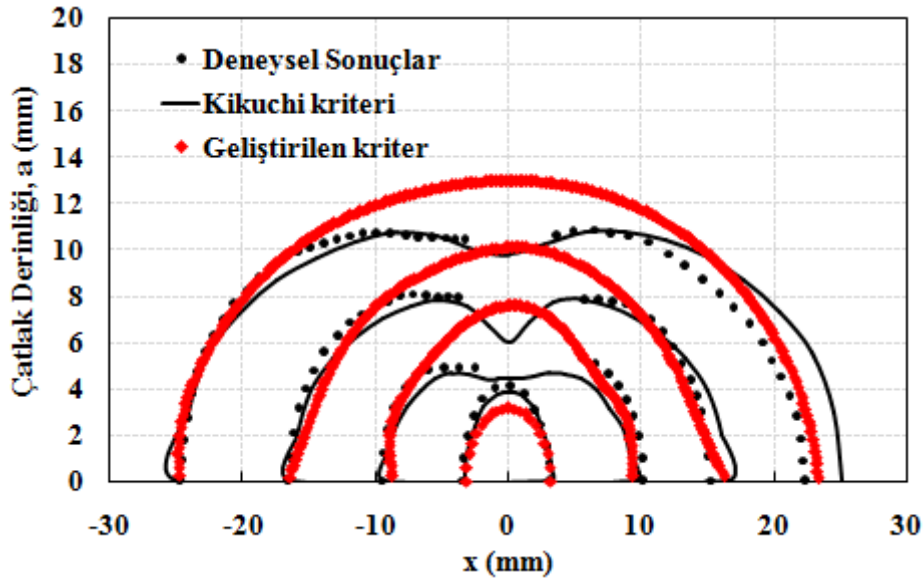


Şekil 3.3.56. Yatayla 45° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

Analizler sonrası elde edilen çatlak yüzey profillerinin perspektif görünümü ve profillerin üstten görünümünün literatür verileri ile karşılaştırılması Şekil 3.3.57 ve Şekil 3.3.58'de sırasıyla verilmiştir. Kırılma anında plakaların son çatlak uzunlukları verilmediği için, profiller kıyaslanarak son profile geline noktada analizler sonlandırılmaktadır.



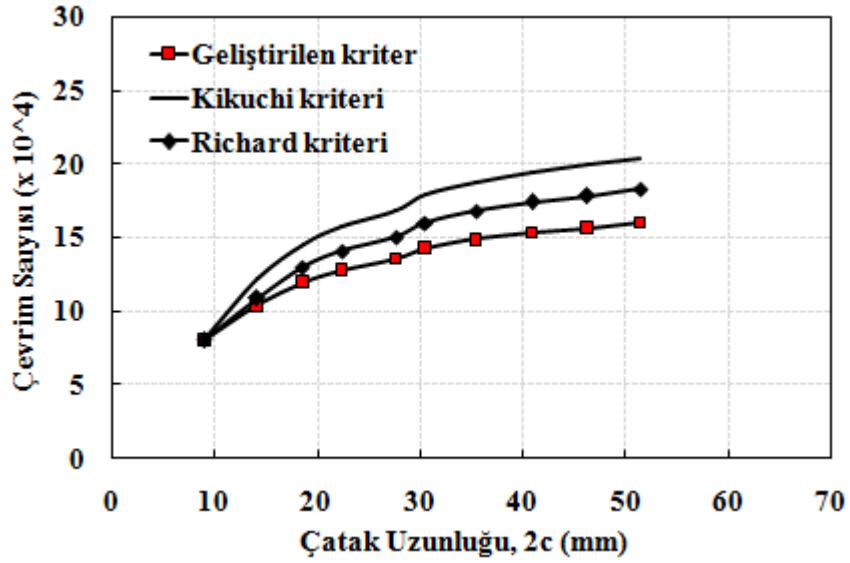
Şekil 3.3.57. Yatayla 45° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için, geliştirilen kriterlere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyi.



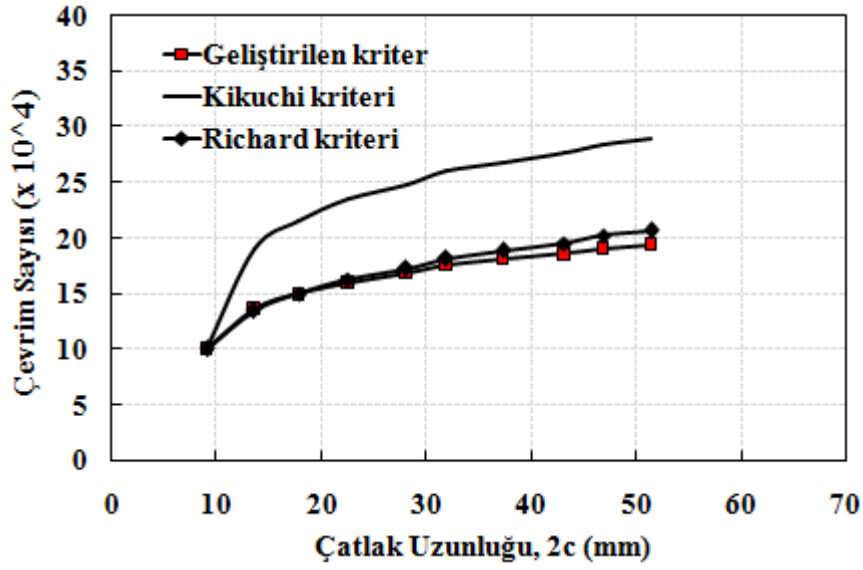
Şekil 3.3.58. Yatayla 45° açı yapan ön çatlığa sahip plaka için elde edilen çatlak profillerinin literatürde elde edilen profiller ile karşılaştırılması.

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 proje kapsamında geliştirilen kriter gere 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.

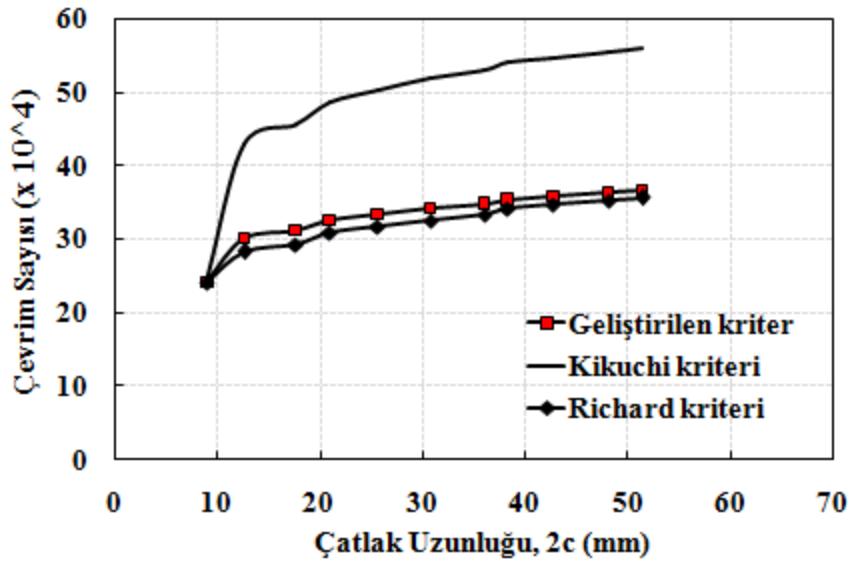
Şekil 3.3.59 'da, farklı oryantasyonda ön çatağa sahip her üç plakanın analizlerinden elde edilen GŞF değerleri kullanılarak, mevcut ve geliştirilen kriterlere göre yapılan ömür tahminleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, her üç durum için de Richard ve geliştirilen kriterlere göre yapılan tahminler birbirine yakın sonuç vermektedir. Ancak, çatlağın 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 kriterlere göre her üç durum içinde benzer ömür tahminlerinin yapıldığı daha net anlaşılmaktadır.



(a)



(b)

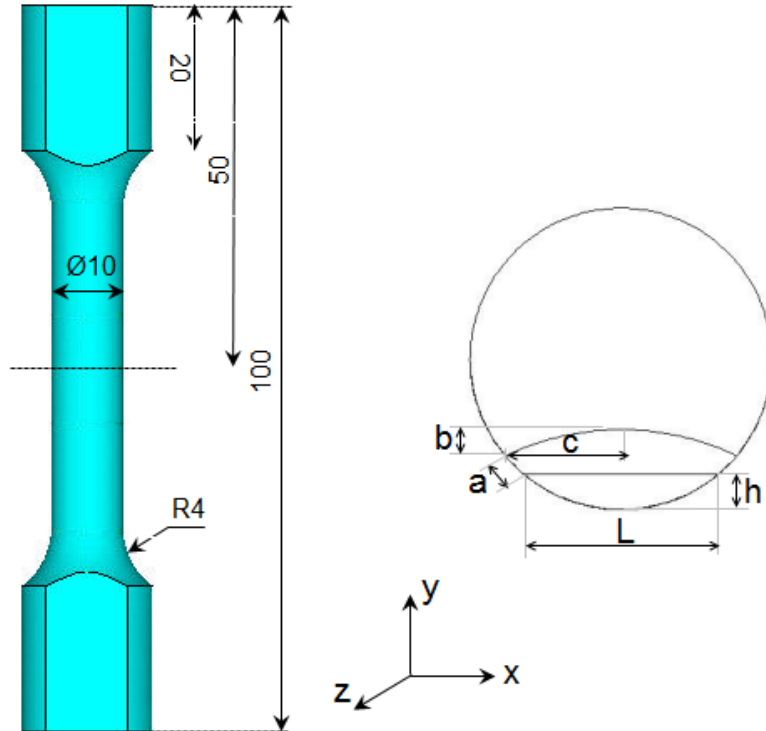


(c)

Şekil 3.3.59. 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.

3.3.6.3 10 mm Çapa Sahip Silindirik Çelik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yüklemesi Altında Çatlak İlerleme Analizi

Citarella vd. (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 Densitiy - Minimum Birim Şekil Değiştirme Enerji Yoğunluğu) kriterine (Denklemler 3.2.16) göre ömür tahminlerinde bulunmuşlardır. Şekil 3.3.60'da deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları verilmiştir. Deneyler R2 M karbon çeliği için R-oranı 0.1 ile maksimum çekme gerilmesi 250 MPa ve maksimum kayma gerilmesi 100MPa olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Paris-Erdoğan malzeme sabitleri için, $C=2.028 \times 10^{-9}$ (mm/(cycle*(Mpa√m)ⁿ) ve $n=3.2046$ alınmıştır. Şekilde verilen uzunluklardan, $L=6.08$ mm, $h=1.14$ mm, $a=0.855$ mm, $b=0.852$ mm, $c=0.852$ mm ve numune çapı 9.78mm boyutlarına sahip numune için gerçekleştirilen deney ve simülasyonlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



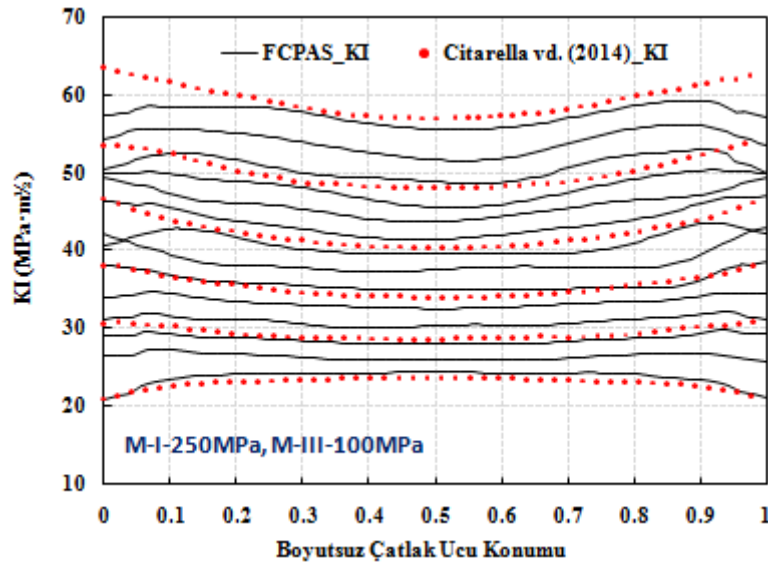
Şekil 3.3.60. Deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları.

Bu çalışmada, Citarella vd. (2014) yapmış oldukları deneyler ve çatlak ilerleme analizleri, proje kapsamında geliştirilen kriterler kullanılarak tekrar edilmiş ve elde edilen GŞF değerleri

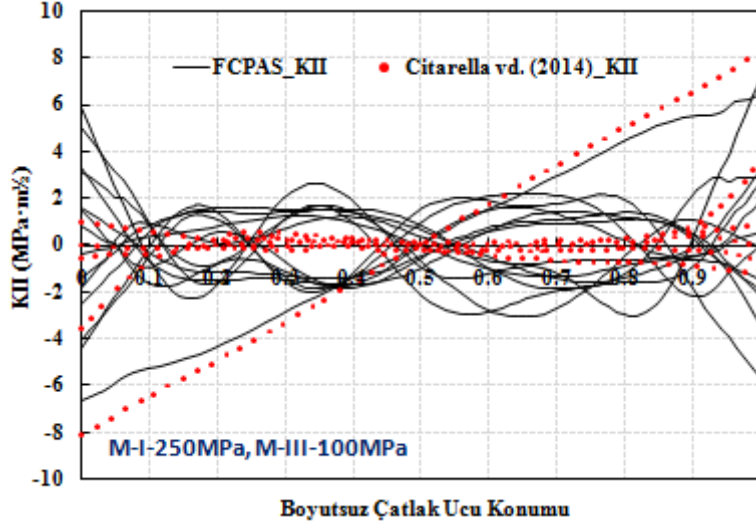
ve geliştirilen kriterlere göre yapılan eşdeğer GŞF hesaplamaları ve ömür tahminleri, Citarella vd. tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Çatlak ilerleme analizleri Bölüm 3.3.5.1'de verilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çatlak sapma açısı tahmini için, proje kapsamında geliştirilen iki boyutlu çatlak sapma açısı kriteri (Denklem 3.2.29) ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için ise proje kapsamında geliştirilen üç boyutlu kırılma kriteri (Denklem 3.2.31) kullanılmıştır.

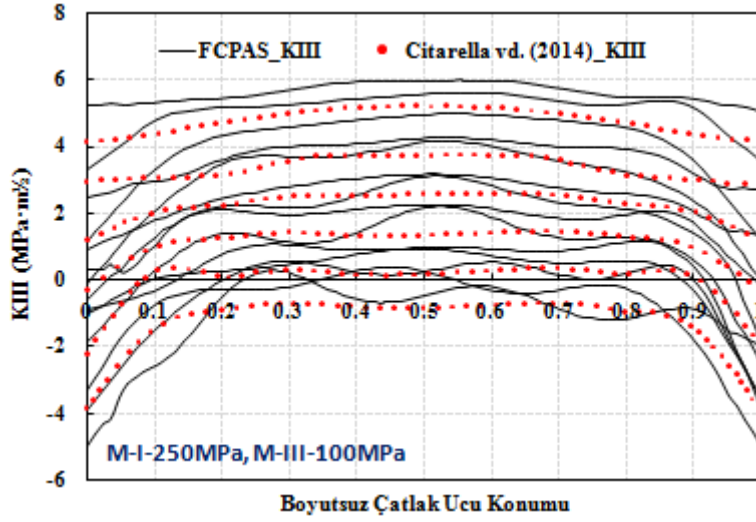
Yukarıda boyutları verilen numune ve çatlak, ANSYS programı kullanılarak modellenmiş, bölüntüleme işleminin ardından sınır şartları ve yükler uygulanarak FRAC3D kodu ile çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneyin birebir simülasyonunun yapılabilmesi için, numunenin 20mm'lik üst bölümündeki 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 250MPa ve maksimum kayma gerilmesi 100MPa 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 3.3.61'de verilerek, Citarella vd. 'nin analizlerinden elde ettikleri değerler ile karşılaştırılmıştır.



(a)



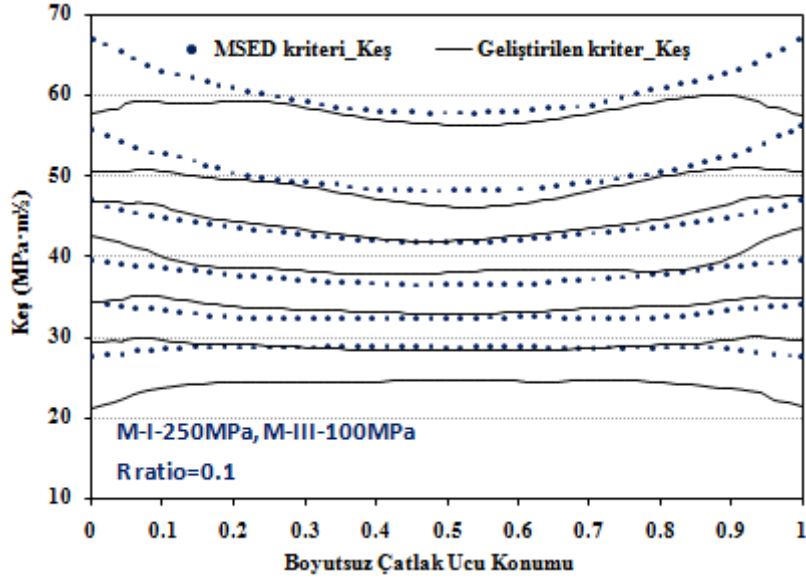
(b)



(c)

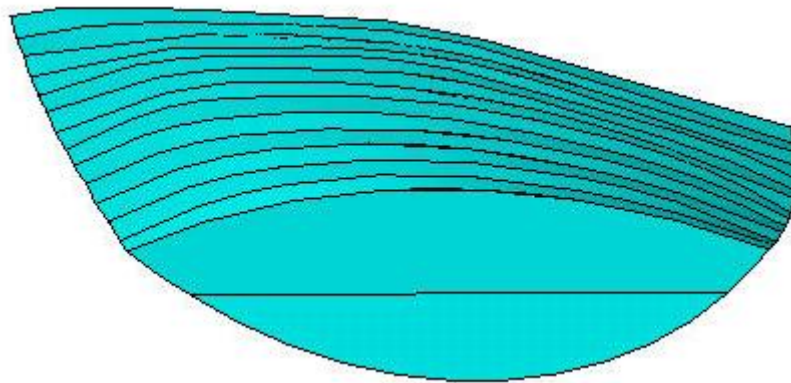
Şekil 3.3.61. Gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen çatlak ucu boyunca GŞF, (a) KI, (b) KII, (c) KIII değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması.

Analiz sonuçlarından görüldüğü gibi literatür verilerine yakın GŞF değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler kullanılarak, proje kapsamında geliştirilen ve Denklem 3.2.31'de verilen eşitlik kullanılarak, eşdeğer GŞF değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.3.62 'de bu değerlerin, Citarella vd.'nin, MSED kriterini kullanarak hesapladıkları eşdeğer GŞF değerleri ile kıyaslaması verilmiştir.



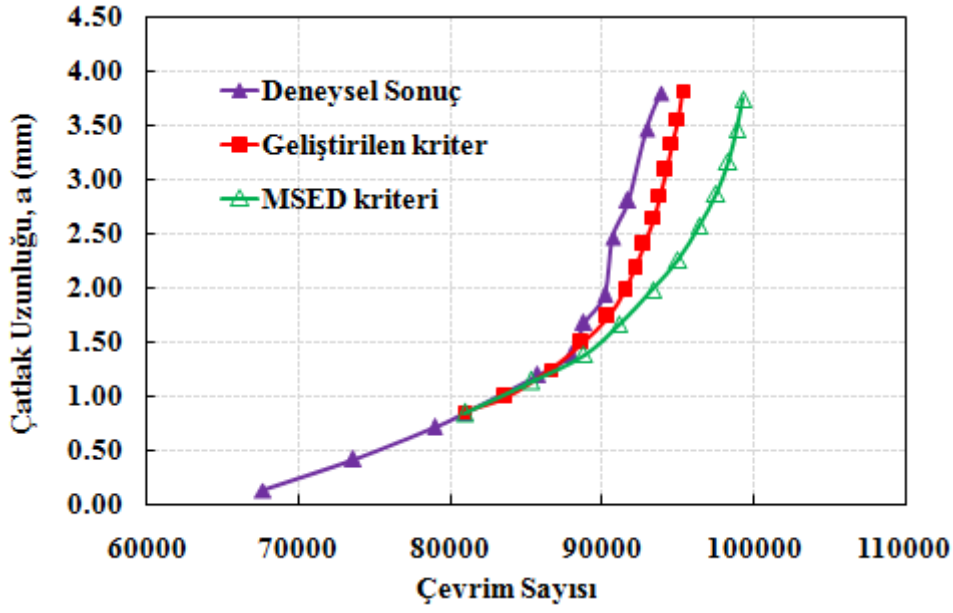
Şekil 3.3.62. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması.

Şekilde görüldüğü gibi kriterlere göre elde edilen eşdeğer GŞF değerleri Citaralle vd.'nin sonuçlarına oldukça yakındır. Citaralle vd. 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 3.3.63'te, 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 3.3.63. Gerçekleştirilen 13 adım çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeyleri.

Son olarak, geliştirilen kriterden elde edilen ömür grafiği, Citaralle vd. tarafından gerçekleştirilen deneyin sonuçları ve yine kullanmış oldukları MSED kriterine göre elde edilen ömür verileri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.3.64).



Şekil 3.3.64. Gerçekleştirilen kritere göre elde edilen ömür verilerinin literatürden alınan veriler ile karşılaştırılması.

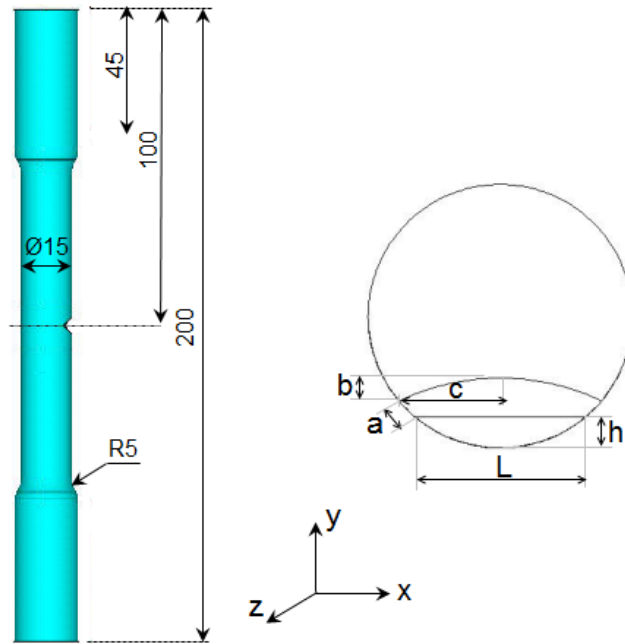
Şekilde görüldüğü gibi, geliştirilen üç boyutlu çatlak ilerleme kriterine göre elde edilen ömür grafiği, üç boyutlu MSED kriterinden daha iyi tahminde bulunarak, deneysel sonuçlara çok yakın bir eğilim vermiştir.

3.3.6.4 15 mm Çapa Sahip Alüminyum Alaşım (Al-7075 T-651) Silindirik Numunenin Eksenel Çekme ve Burulma Momenti Yükleme Altında Kırılma Analizi

Bu çalışmada, proje kapsamında alımı gerçekleştirilen alüminyum alaşım plakalardan (Al-7075 T-651) 15 mm çapında LT çatlak yönlenmesine 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.

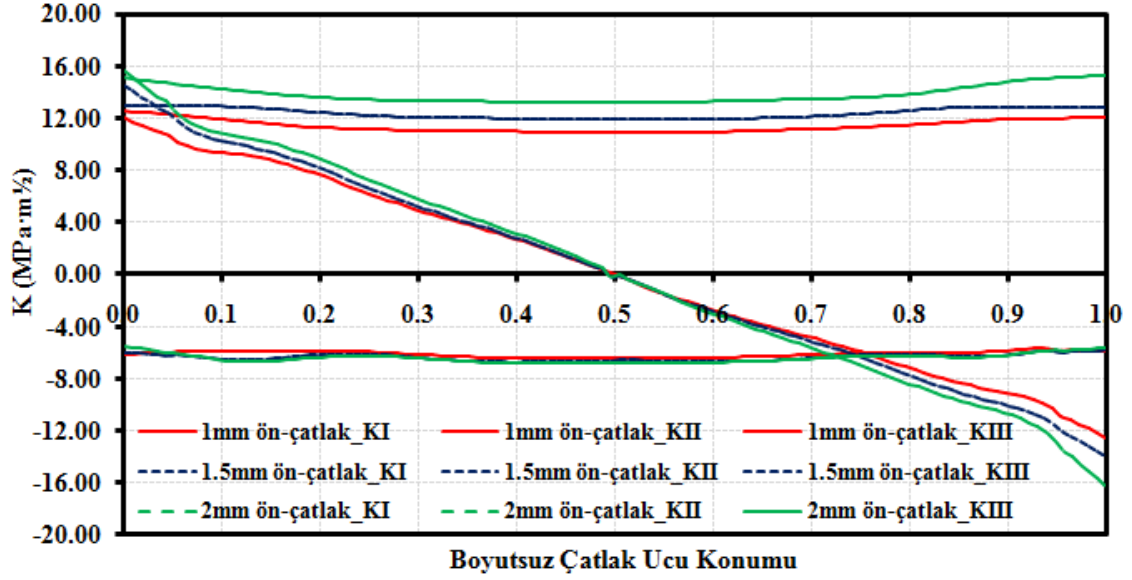
Şekil 3.3.65'te deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları verilmiştir. Bu çalışmada iki adet numuneye aynı yükleme şartları altında kırılma testi gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçekleştirilmeden önce yükleme şartlarını belirlemek için farklı yükleme durumları analiz edilerek uygun yükleme oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Analiz sonuçlarına göre,

mod-I kırılma modunu oluşturacak aksel yük 12.75kN ve mod-II ve mod-III kırılma modlarını oluşturacak tork değerinin de 67.5Nm 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 aksel yükleme hızı 1.275 kN/s, ve torsiyonel yükleme hızı 6.75Nm/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 çatlakla göre tekrar analiz yapmak pratik olmayacağı için, şekilde gösterilen a değerinin 1mm, 1.5mm ve 2mm olduğu durumlar için kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler için, bir önceki literatür uygulamasında uygulanan sınır şartlarının aynısı uygulanmıştır. Aksel yük 12.75kN ve burulma momenti değeri 67.5Nm için kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerde oluşturulan çentiğin açısı 45° ve Şekil 3.3.65'te gösterilen L değeri 11.18 mm, h değeri 2.5 mm'dir.

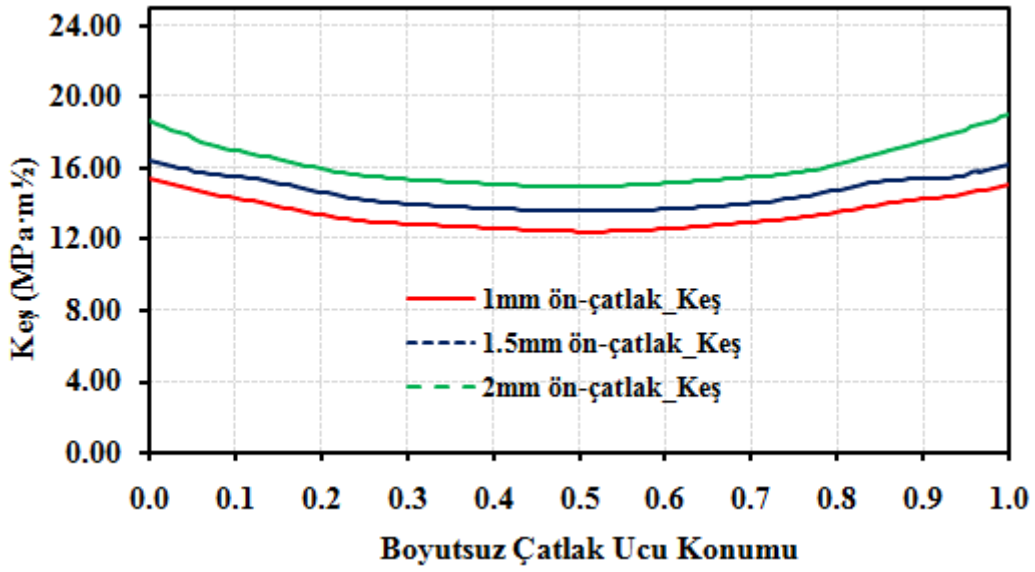


Şekil 3.3.65. Deney ve analizlerde kullanılan numune ve çatlak boyutları.

Farklı ön-çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri ve bu değerler kullanılarak, geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine (Denklemler 3.2.31) göre hesaplanan eşdeğer GŞF dağılımı Şekil 3.3.66 ve Şekil 3.3.67'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.3.66. Farklı ön-çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri.



Şekil 3.3.67. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı.

Şekil 3.3.68'de ise gerçekleştirilen deneylerden bir kesit görünümü ve deneylerde kullanılan ve kırılan numunelerin görünümü verilmiştir.



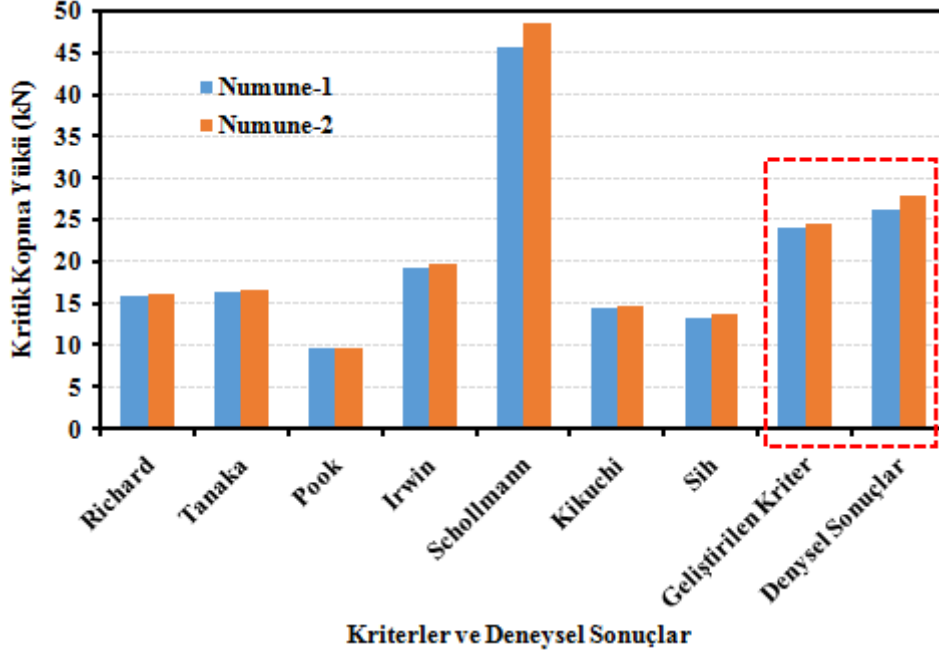
Şekil 3.3.68. Deneylerde kullanılan numuneler ve gerçekleştirilen deneyden bir kesit.

Tablo 3.3.1. Üç boyutlu mevcut ve geliştirilen kriterlere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri.

Kriterler (3 boyutlu)	Numune-1			Numune-2		
	Keş (MPa*m ^{1/2})	Kritik Kopma Yükü (kN)	Deneysel Kopma Yükü (kN)	Keş (MPa*m ^{1/2})	Kritik Kopma Yükü (kN)	Deneysel Kopma Yükü (kN)
Geliştirilen Kriter	15.37	24.05	26.24	15.13	24.44	27.89
Richard	23.42	15.79		23.00	16.08	
Tanaka	22.74	16.26		22.26	16.61	
Pook	38.74	9.54		38.00	9.73	
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 3.3.67'de verilen eşdeğer GŞF değerleri, çatlak kenarları için elde edilen GŞF değerlerine göre

hesaplanmıştır. Tablo 3.3.1'de, üç boyutlu mevcut kriterlere göre ve geliştirilen kriterle göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri ve her iki deneyden elde edilen kopma yükü değerleri verilmiştir. Şekil 3.3.69'da ise, bu değerlerin karşılaştırıldığı grafik verilmiştir.



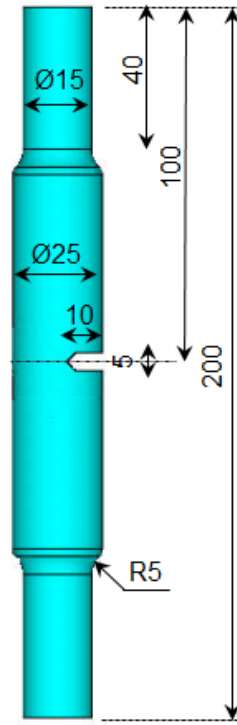
Şekil 3.3.69. Mevcut ve geliştirilen kriterlerden elde edilen kopma yüklerinin, deneysel kopma yükleri ile karşılaştırılması.

Şekilde görüldüğü gibi, deneysel sonuçlara en yakın değerler, geliştirilen kriterle 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.

3.3.6.5 25mm Çapa Sahip Alüminyum Alaşım (Al-7075 T-651) Silindirik Numunenin Eksenel Çekme ve -Burulma Momenti Yükleme Altında Kırılma ve Çatlak İlerleme Analizi

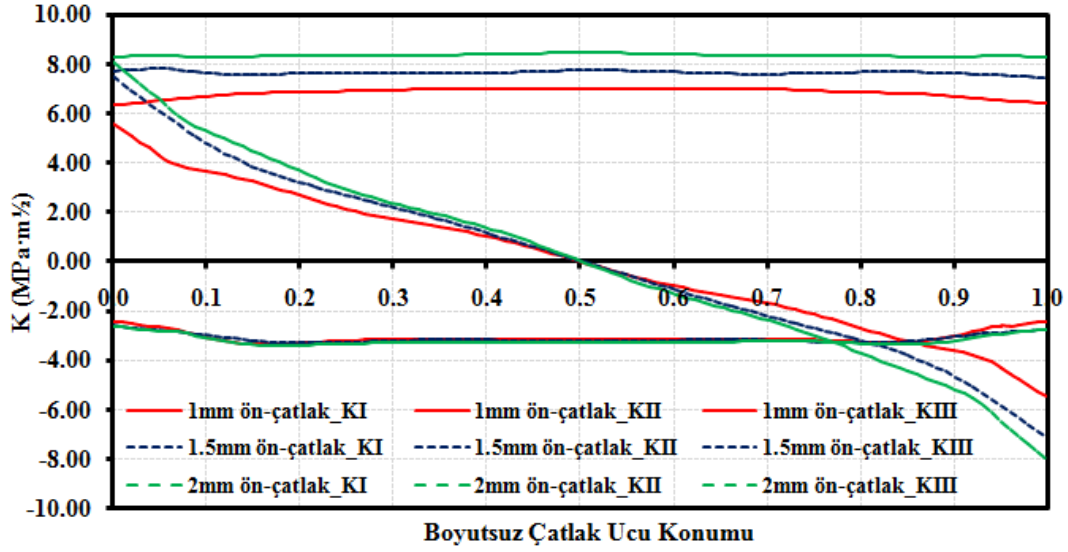
Bu çalışmada, proje kapsamında alımı gerçekleştirilen alüminyum alaşım plakalardan (Al-7075 T-651) 25 mm çapında silindirik numuneler üretilerek, karışık mod yükleme altında numunelere kırılma ve çatlak ilerleme testi gerçekleştirilmiştir. Bir önceki çalışmadan farklı olarak, numuneler için çatlak ilerleme 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 3.3.70'te deney ve simülasyonlarda kullanılan numune boyutları verilmiştir.

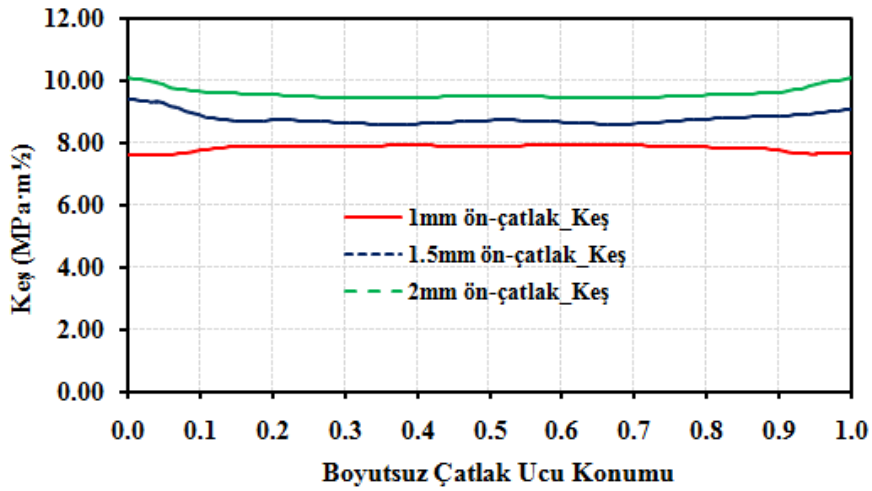


Şekil 3.3.70. Deney ve simülasyonlarda kullanılan numune ve çatlak boyutları.

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 boyuna elde edilen GŞF değerleri ve bu değerler kullanılarak, geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine (Denklemler 3.2.31) göre hesaplanan eşdeğer GŞF dağılımı Şekil 3.3.71 ve Şekil 3.3.72'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.3.71. Farklı ön-çatlak uzunlukları için gerçekleştirilen analizler sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri.

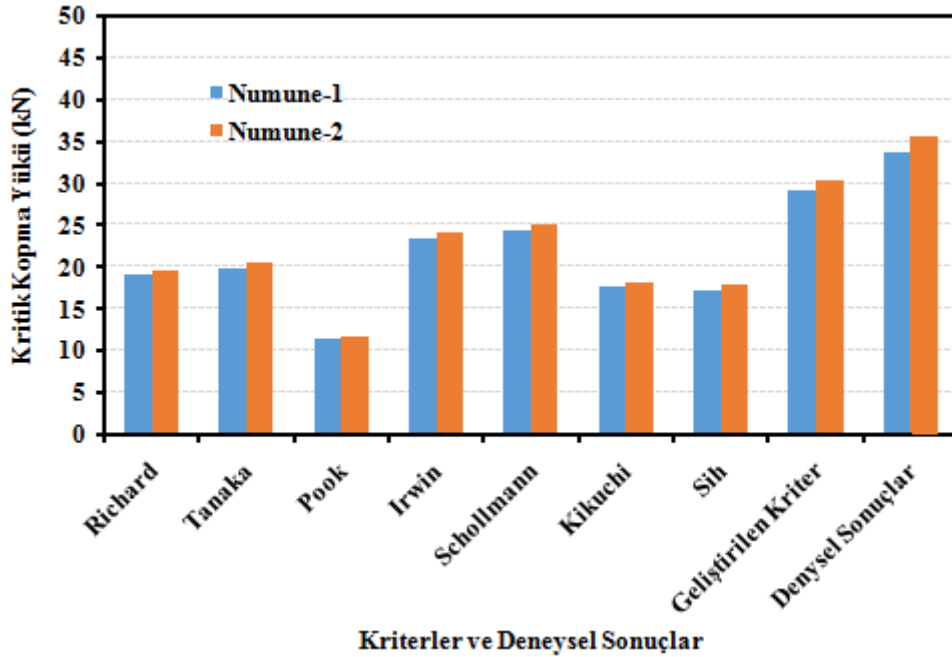


Şekil 3.3.72. Geliştirilen üç boyutlu kırılma kriterine göre hesaplanan eşdeğer GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımı.

Şekilde yer alan eşdeğer GŞF değerleri, çatlak kenarları için elde edilen GŞF değerlerine göre hesaplanmıştır. Tablo 3.3.2'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 3.3.73'te ise, bu değerlerin karşılaştırıldığı grafik verilmiştir.

Tablo 3.3.2. Üç boyutlu mevcut ve geliştirilen kriterlere göre hesaplanan kritik kopma yükü değerleri.

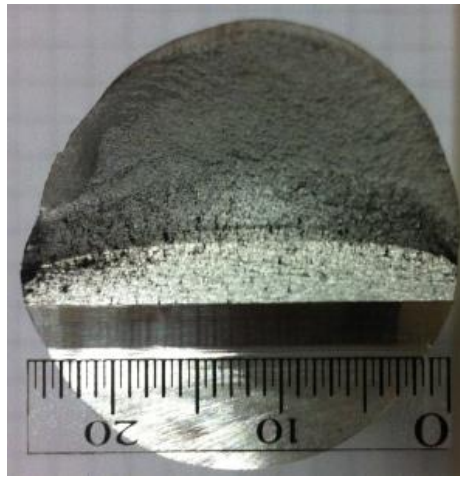
	Numune-1			Numune-2		
Kriterler (3 boyutlu)	Keş (MPa*m ^{1/2})	Kritik Kopma Yükü (kN)	Deneysel Kopma Yükü (kN)	Keş (MPa*m ^{1/2})	Kritik Kopma Yükü (kN)	Deneysel Kopma Yükü (kN)
Geliştirilen Kriter	10.45	27.75	33.73	10.11	28.67	35.70
Richard	15.24	19.03		14.73	19.69	
Tanaka	14.66	19.78		14.14	20.50	
Pook	25.49	11.38		24.62	11.78	
Irwin	12.40	23.40		12.00	24.18	
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 3.3.73. 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 kritere göre 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.

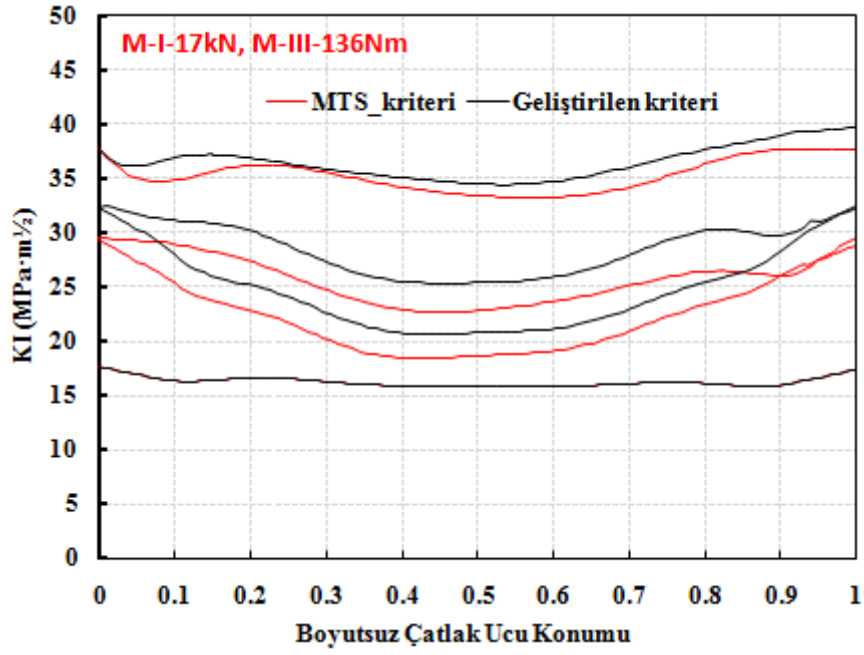
Kırılma tokluğu çalışmalarına ek olarak, bu numuneler için çatlak ilerleme deneyleri ve analizleri de gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme deneylerinde, kırılma analizi sonuçlarına göre belirlenen yüklere uygun olarak yükleme değerleri belirlenmiştir. Eksenel yük değeri, kırılma analizlerindeki eksenel 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 3.3.74'te, gerçekleştirilen test sonrası kırılan numune yüzeyinin üstten görünümü verilmiştir.



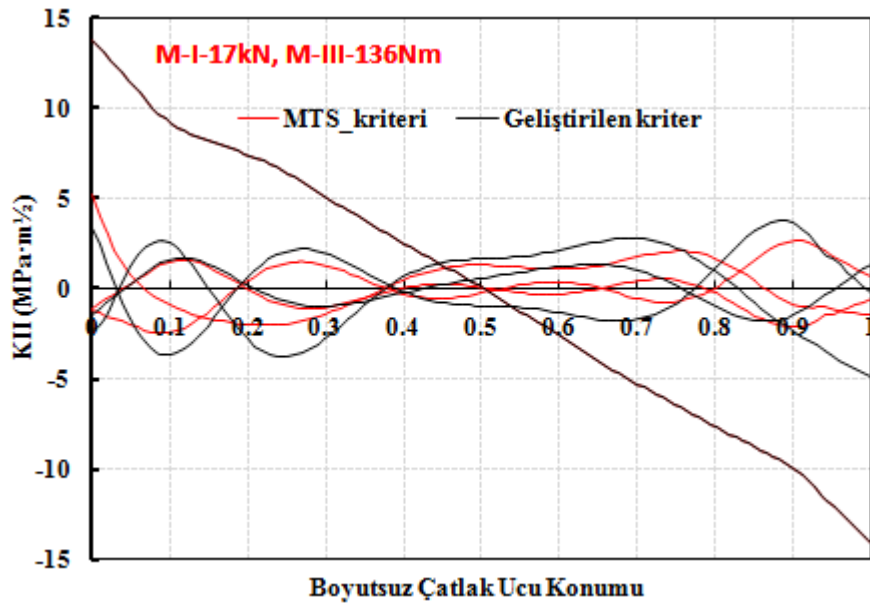
Şekil 3.3.74. 17 kN eksenel yük ($R=0.1$) ve 136 Nm ($R=0.1$) burulma momenti etkisinde kırılan numune yüzeyinin üstten görünümü.

Çatlak ilerleme deneyleri sonrasında şekilde verilen ön çatlak uzunluğu birebir modellenerek, çatlak sapma açısı tahmini için, proje kapsamında geliştirilen iki boyutlu çatlak sapma açısı kriteri (Denklem 3.2.29) ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için ise proje kapsamında geliştirilen üç boyutlu kırılma kriteri (Denklem 3.2.31) 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 3.3.6.3'te silindirik çelik numune için gerçekleştirilen analizlerde uygulanan yöntem ve sınır şartları aynı şekilde uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

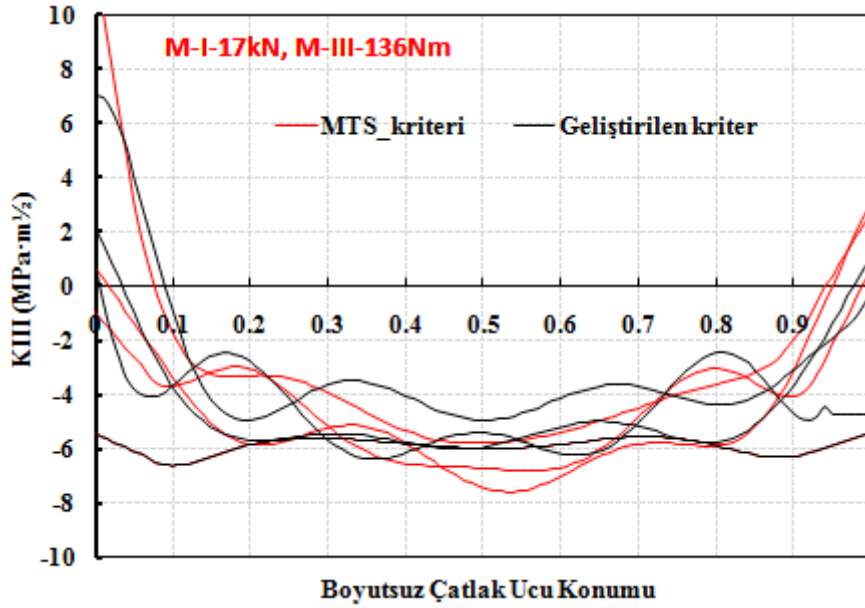
Her iki kritere göre de gerçekleştirilen analizler sonrası, çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF değerleri, K_I , K_{II} ve K_{III} ve bu değerlere göre hesaplanan eşdeğer GŞF dağılımı Şekil 3.3.75'te verilmiştir.



(a)

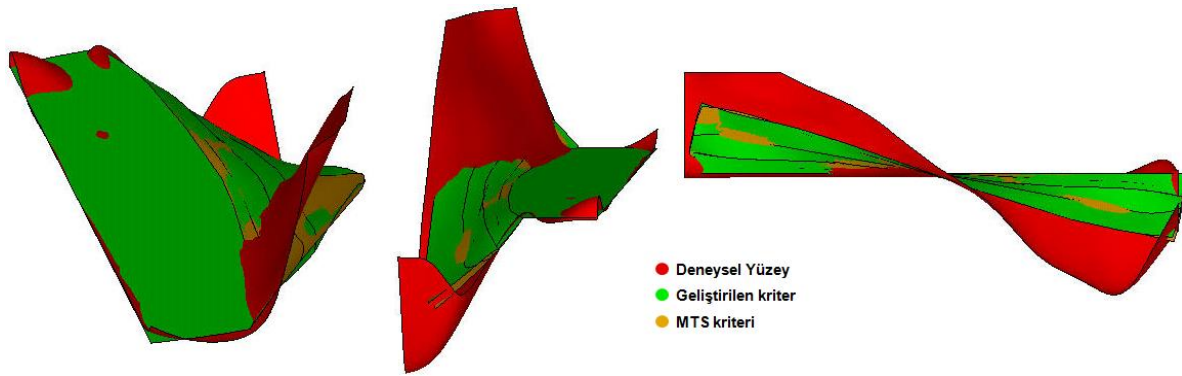


(b)



Şekil 3.3.75. MTS kriteri ve geliştirilen kriterle gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF, (a) K_I, (b) K_{II}, (c) K_{III}, (d) Keş değerleri.

Şekilde görüldüğü üzere, her iki kriter için benzer GŞF dağılımları elde edilmiştir. Şekil 3.3.76'da, her iki kriterle gerçekleştirilen analizlerden elde edilen çatlak yüzeyleri verilmiştir.



Şekil 3.3.76. MTS kriteri ve geliştirilen kriterle gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen çatlak yüzeyleri.

Analizlere göre elde edilen yüzeyler incelendiğinde, geliştirilen kriterle elde edilen çatlak yüzeyinin, MTS kriterine göre elde edilen çatlak yüzeyi ile örtüştüğü verilerden görülmektedir. Başlangıç çatlaklarının 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) numune taramasından elde edilen yüzey olup, yüzey üzerindeki ani zıplama kısmı numunenin silindirik yüzey sınırlarının tam olarak taranamaması sonucu yüzey modelleyici

programının otomatik yüzey uydurması sonucu oluşmaktadır. Yorulma çatlak ilerleme ömür tahminleri konusundaki çalışmaların detaylı bir şekilde devam ettirilmesi planlanmaktadır.

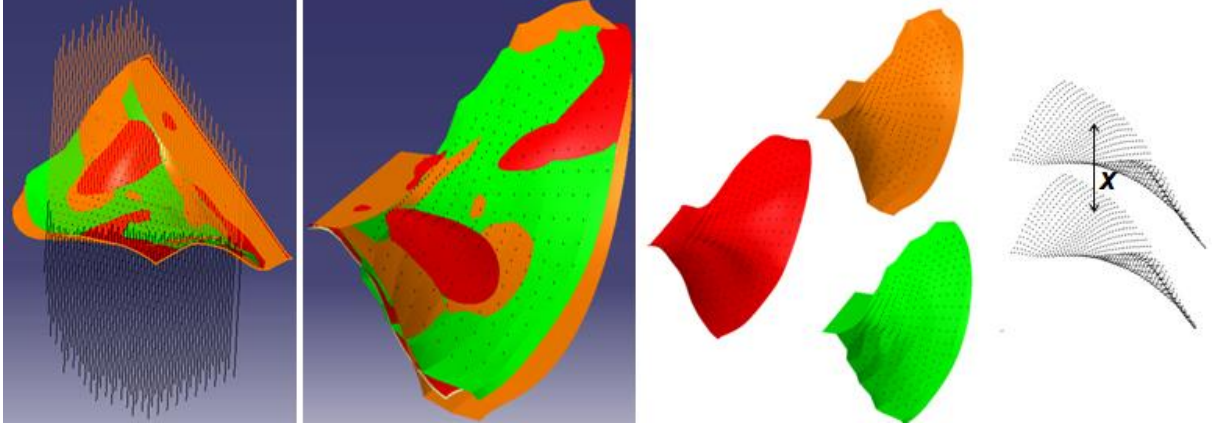
3.3.6.6 Mod-I/III Yükleri Altında CTT Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Geliştirilen Üç Boyutlu Kriter)

Bu çalışmada, daha önce Bölüm 3.3.4'te mod-I/III 45°, 60° ve 75° yükleme açıları için, MTS kriteri (Denklem 3.2.4-5) kullanılarak gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, proje kapsamında geliştirilen üç boyutlu kriter kullanılarak tekrar edilmiş ve kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeyleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen kriter gereğince gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinde, çatlak sapma açısı tahmini için Denklem 3.2.29 ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için ise Denklem 3.2.31 kullanılmıştır. Bazı yükleme açılarında, geliştirilen kriter ve mevcut kriterlere göre ömür tahminleri de yapılmıştır. Geliştirilen kriter gereğince 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 kriter gereğince 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 3.3.1'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 3.3.77'de, gerçekleştirilen işlemlerin görsel hali verilmiştir.

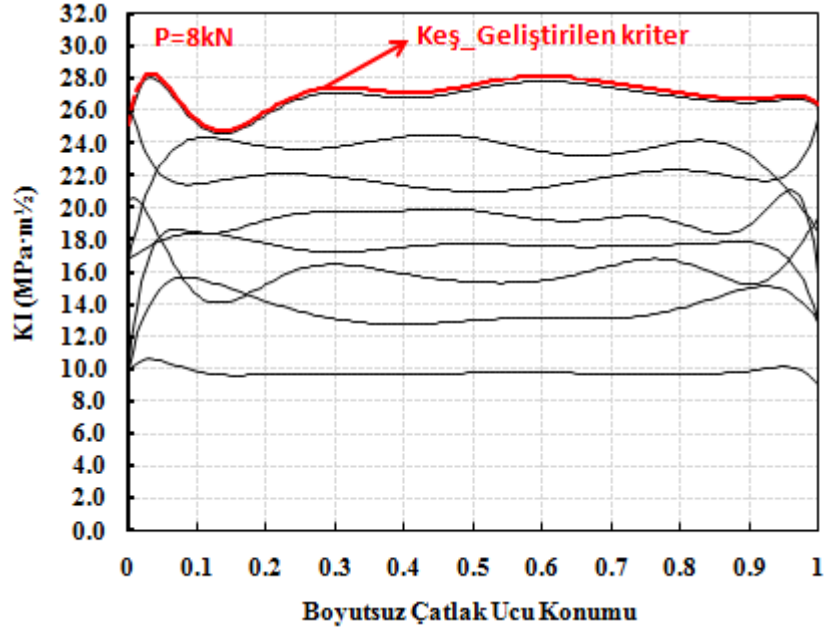
$$x_{ort} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad (3.3.1)$$



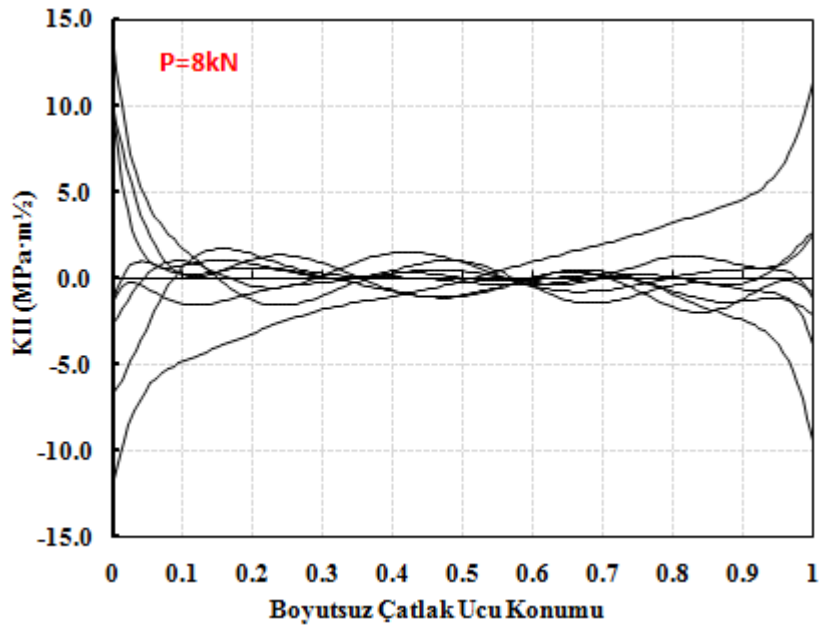
Şekil 3.3.77. Çatlak yüzeylerinin sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için uygulanan yöntem.

Mod-I/III=45° yükleme açısında CTT numunesinin Geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri:

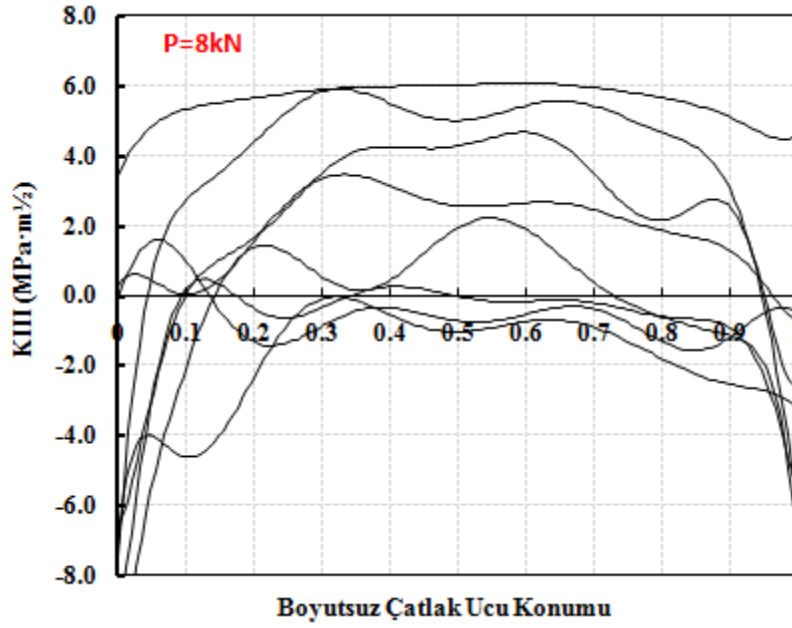
Bölüm 3.3.4.1 'de, mod-I/III=45° yükleme açısında 25 mm kalınlıkta CTT numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kritere göre de tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çatlak ilerleme analizleri Bölüm 3.3.5.1'de verilen yöntem ile çatlak ucu boyunca 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} gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.3.78'de sırasıyla verilmiştir. Son çatlak adımı için geliştirilen kritere göre eşdeğer GŞF değeri ayrıca hesaplanarak Şekil 3.3.78-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.



(a)

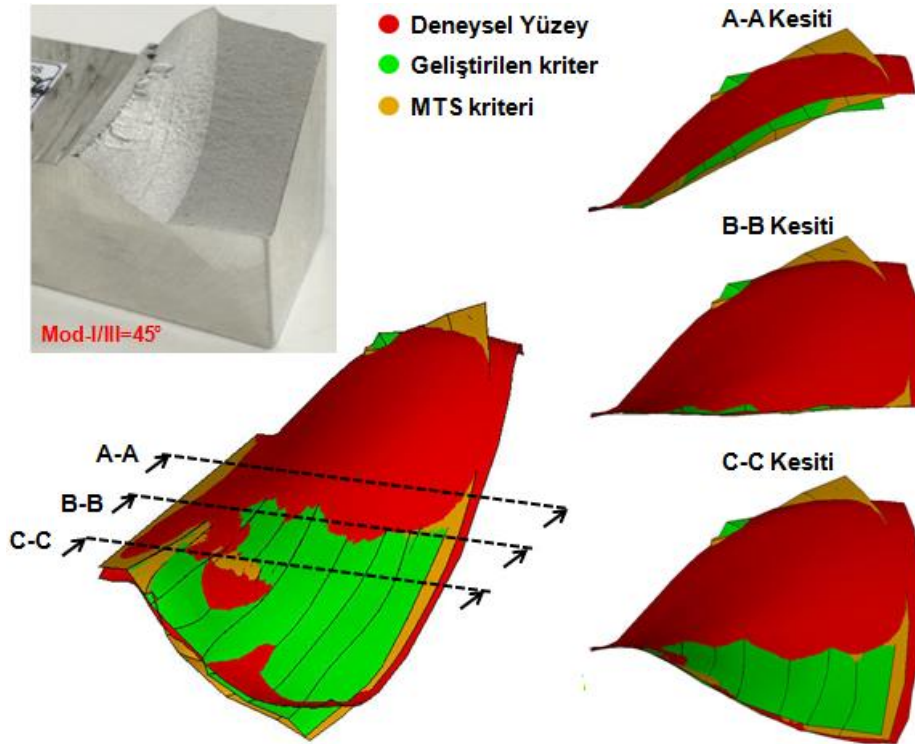


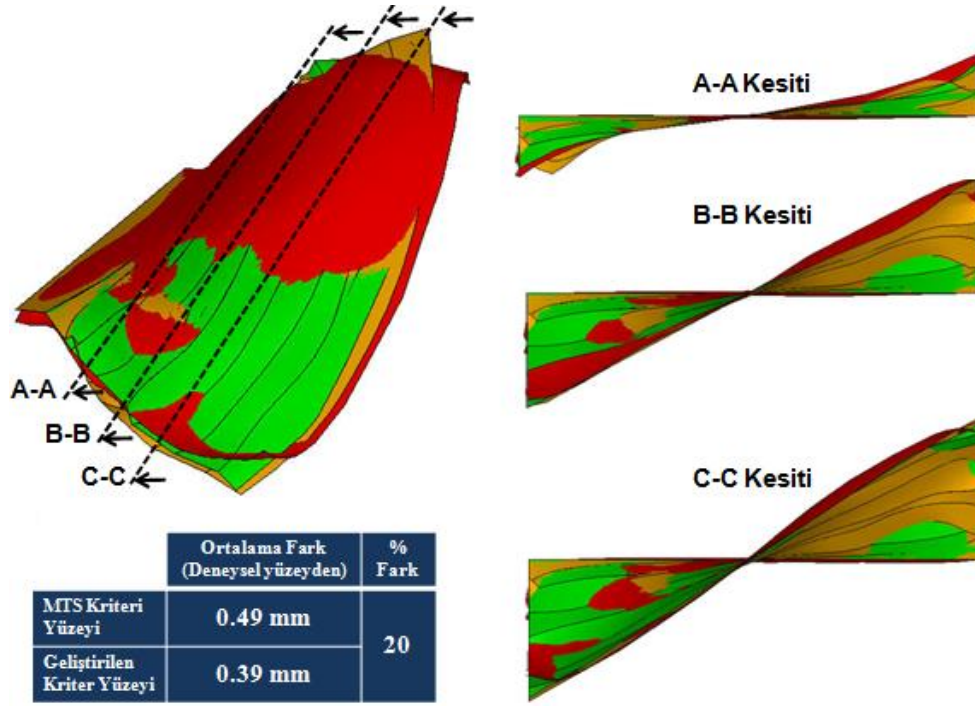
(b)



Şekil 3.3.78. 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.

Geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, Bölüm 3.3.4.1'de MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 3.3.79'da verilmiştir.





(b)

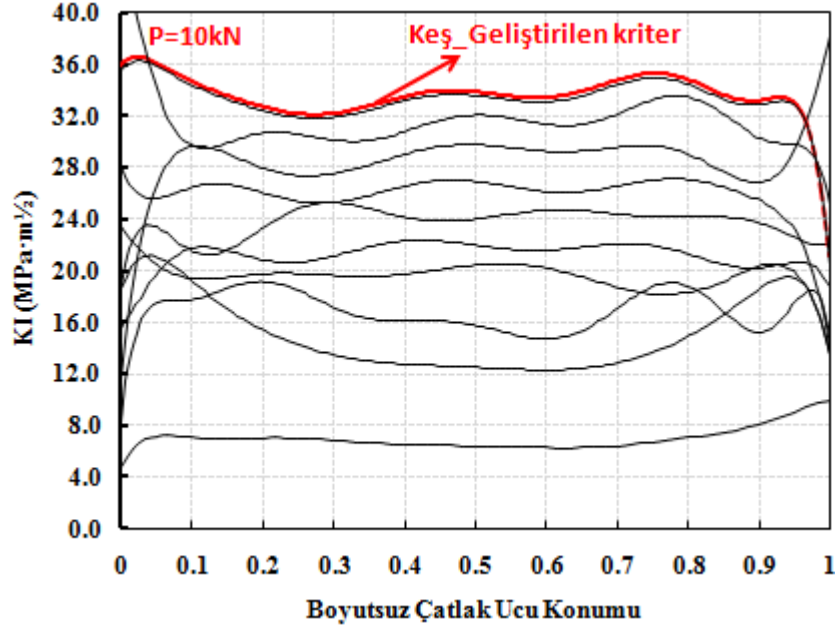
Şekil 3.3.79. Mod-I/III=45° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

Şekilde görüldüğü gibi her iki kriter gere de tahmin edilen yüzeyler deneysel yüzeyler ile örtüşen bir sonuç vermiştir. Geliştirilen kriter gere 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.

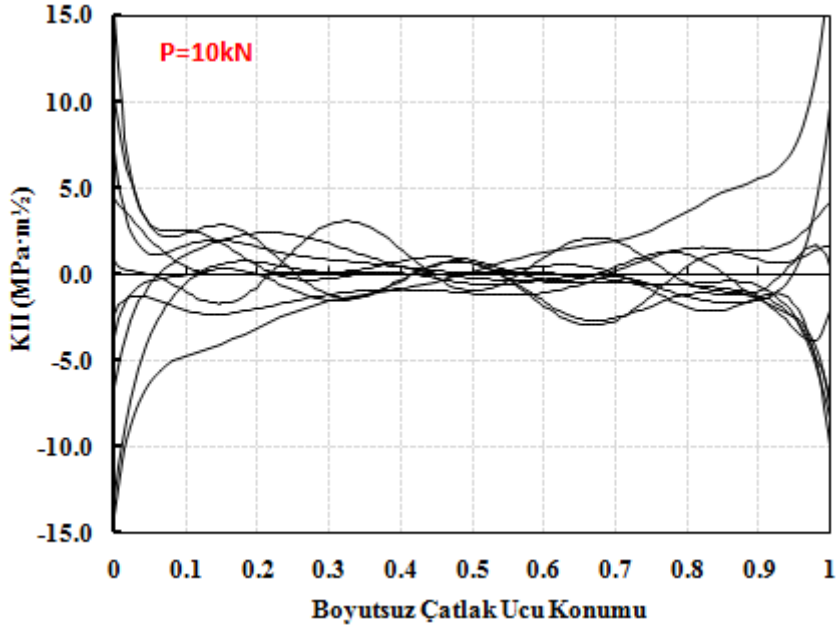
Mod-I/III=60° yükleme açısında CTT numunesinin Geliştirilen kriter gere gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri:

Bölüm 3.3.4.2'de, mod-I/III=60° yükleme açısında 25 mm kalınlıkta CTT numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kriter gere de tekrar edilerek çatlak ucu boyunca elde edilen K_I, K_{II} ve K_{III} GŞF değerleri Şekil 3.3.80'de sırasıyla verilmiştir. Bu yükleme açısı için de, Bölüm 3.3.5.1'de verilen yöntem ile çatlak ucu boyunca tetrahedral elemanlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme deneyi, 10 kN

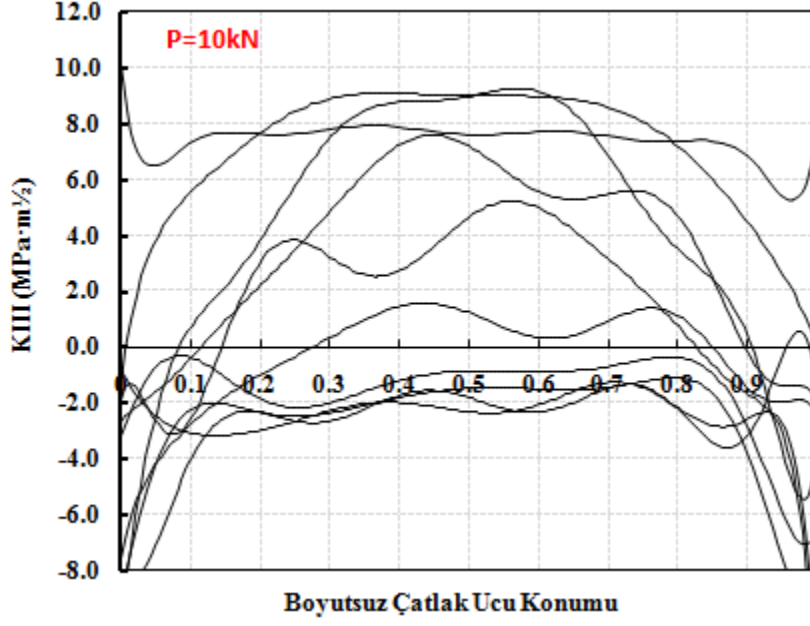
yük altında ve R-oranı 0.1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için 10 kN yük değerine karşılık gelen analiz sonuçları verilmiştir.



(a)



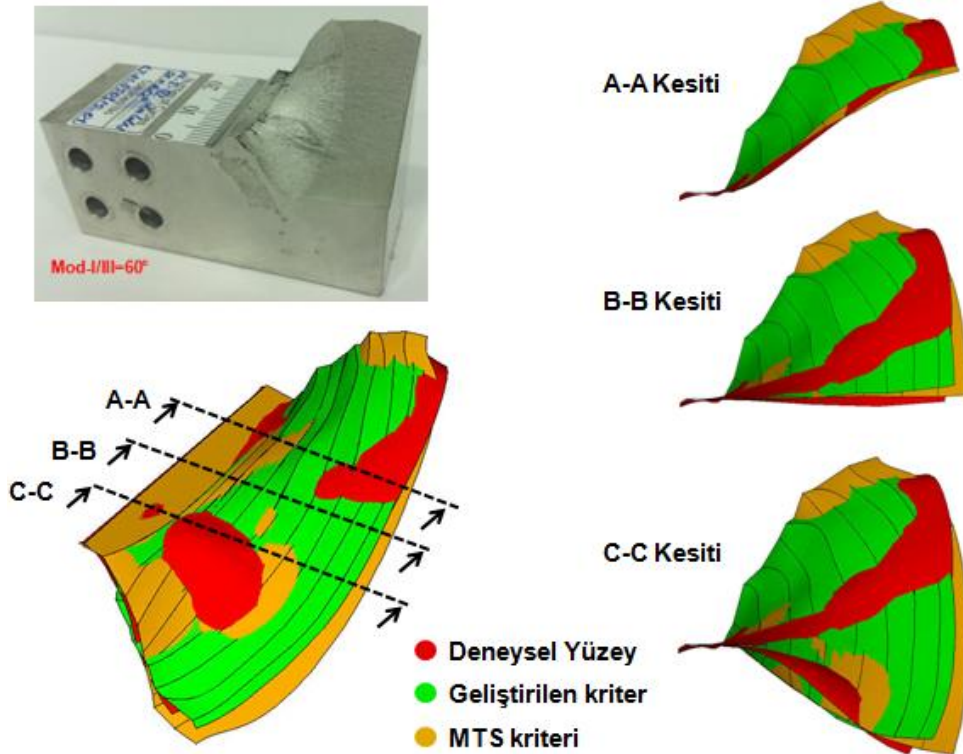
(b)

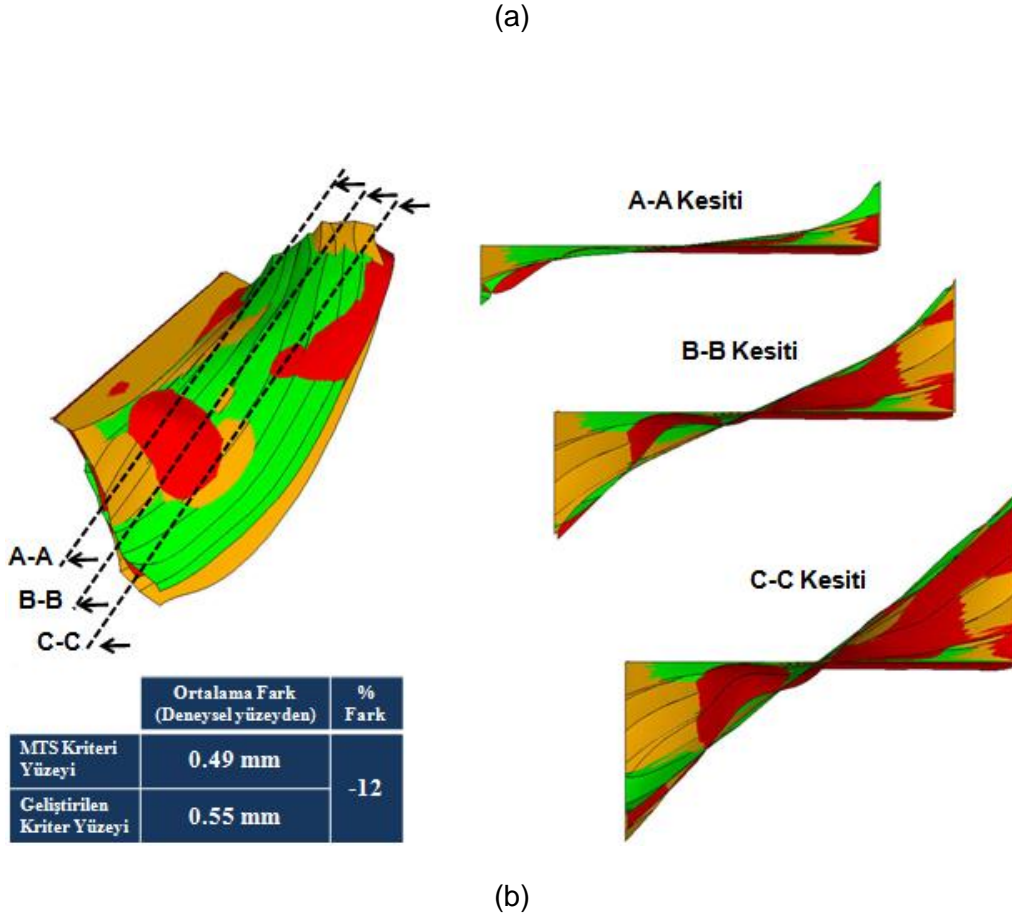


(c)

Şekil 3.3.80. 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.

Geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, Bölüm 3.3.4.2'de MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 3.3.81 'de verilmiştir.





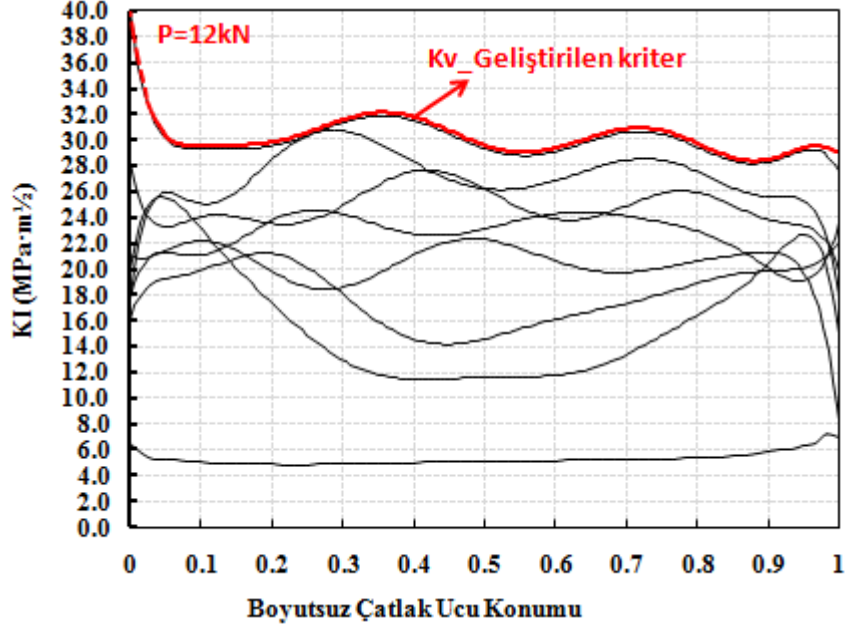
Şekil 3.3.81. Mod-I/III=60° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

Bu yükleme açısı için de her iki kriterden deneysel yüzeylere yakın yüzeyler elde edilmiştir. MTS kriteri, geliştirilen kriterle 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.

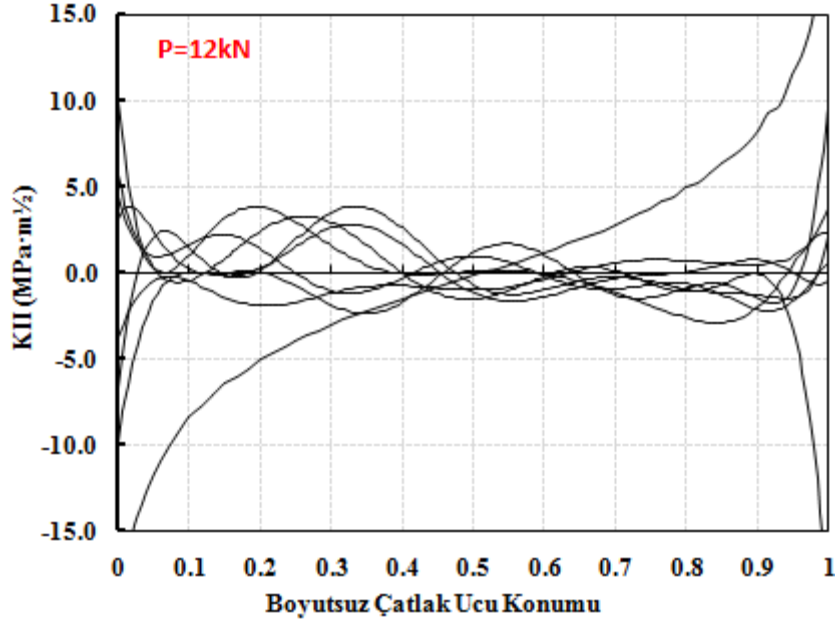
Mod-I/III=75° yükleme açısında CTT numunesinin Geliştirilen kriterle göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri:

Bölüm 3.3.4.3'te, mod-I/III=75° yükleme açısında 25 mm kalınlıkta CTT numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kriterle göre de tekrar edilerek çatlak ucu boyunca elde edilen K_I, K_{II} ve K_{III} GŞF değerleri Şekil 3.3.82'de sırasıyla verilmiştir. Bu yükleme açısı için de, Bölüm 3.3.5.1'de verilen yöntem ile çatlak ucu boyunca tetrahedral elemanlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme deneyi, 12 kN

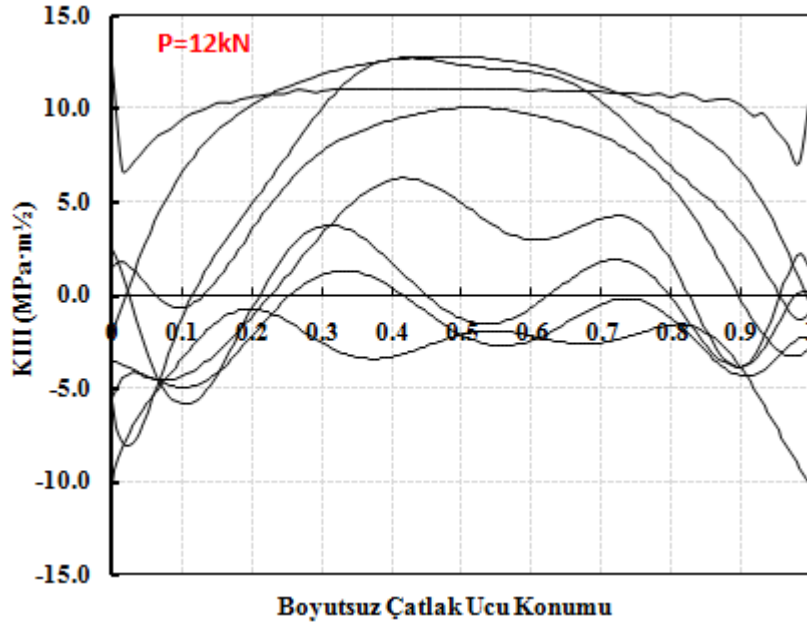
yük altında ve R-oranı 0.1 olacak şekilde gerçekleştirildiği için 12 kN yük değerine karşılık gelen analiz sonuçları verilmiştir.



(a)



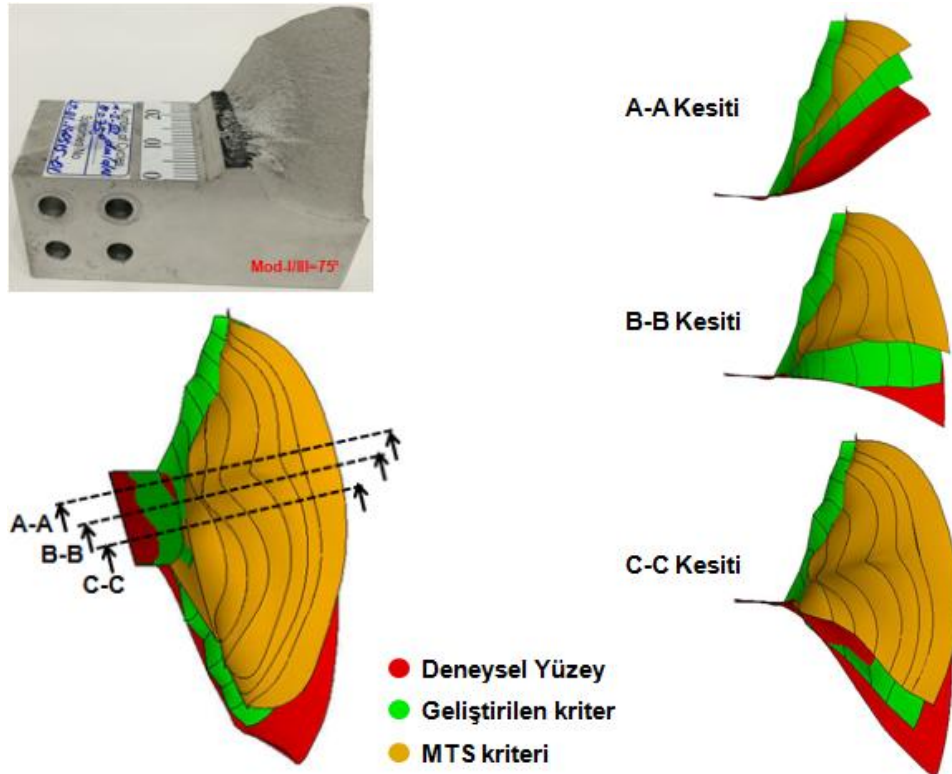
(b)



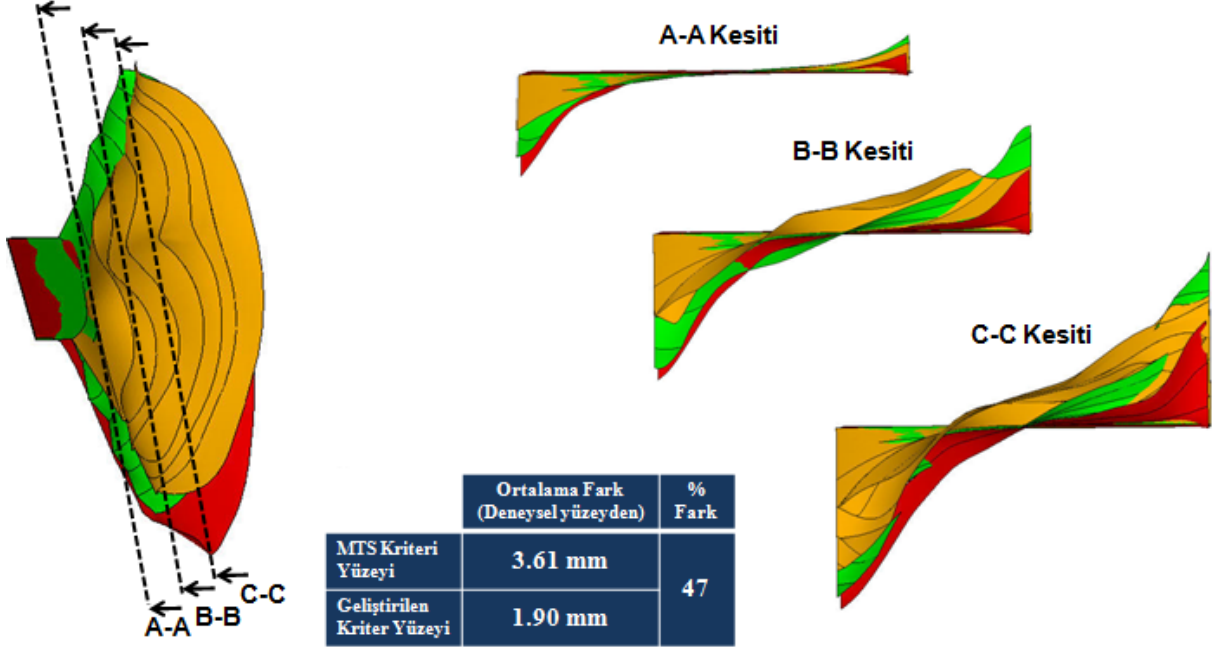
(c)

Şekil 3.3.82. 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.

Geliştirilen kritere göre çatlak ilerleme simülasyonu sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, Bölüm 3.3.4.3'te MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste çakıştırılarak yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 3.3.83'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.3.83. Mod-I/III=75° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

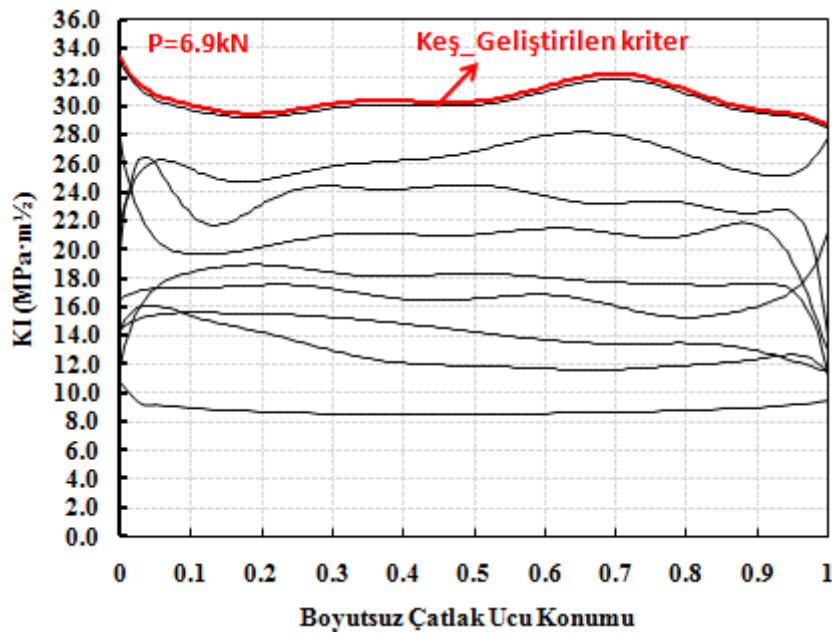
Karışık mod yüklemenin oldukça yüksek olduğu bu yükleme açısında, geliştirilen kriter ile MTS kriterinin yüzey tahminleri arasında %47 oranında büyük bir fark oluşmuştur. Kırılma test sonuçlarında da 75° yükleme açısı için, mevcut kriterlere göre yapılan kopma yükü tahminlerinde büyük farkların olduğu 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 3.3.82'de verilen analiz sonuçları incelendiğinde, başlangıç çatlak 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 tepelikler 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.

3.3.6.7 Mod-I/II/III Yükleri Altında CTST Numunesi Çatlak İlerleme Analizleri (Geliştirilen Üç Boyutlu Kriter)

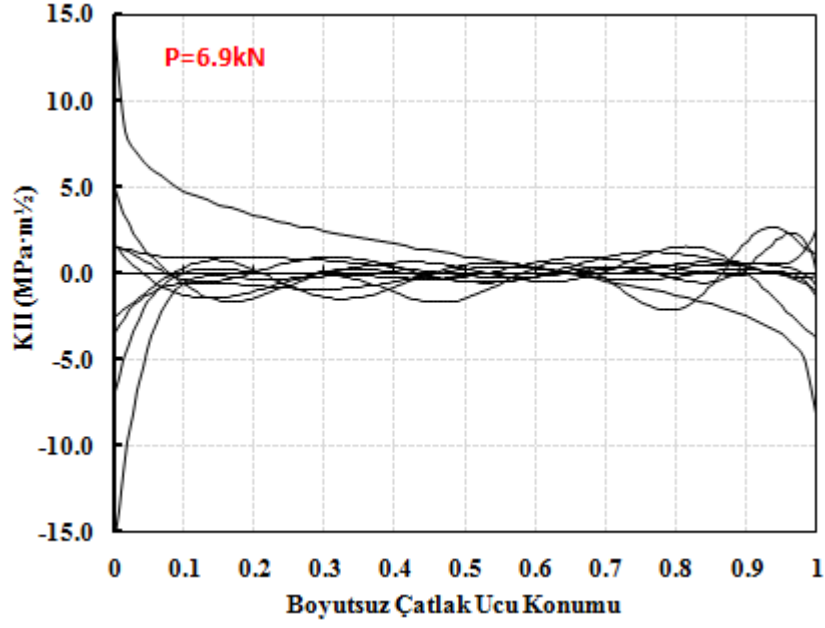
Bu çalışmada, daha önce Bölüm 3.3.5'te üç farklı yükleme durumu için, MTS kriteri (Denklem 4-5) kullanılarak gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, proje kapsamında geliştirilen üç boyutlu kriter kullanılarak tekrar edilmiş ve kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeyleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen kriter gereğince gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinde, çatlak sapma açısı tahmini için Denklem 3.2.29 ve eşdeğer GŞF değerinin hesaplanması için ise Denklem 3.2.31 kullanılmıştır.

Mod-I/II=45°, Mod-II/III=45° ve Mod-I/III=45° yükleme açısında CTST numunesinin geliştirilen kriter gereğince gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri:

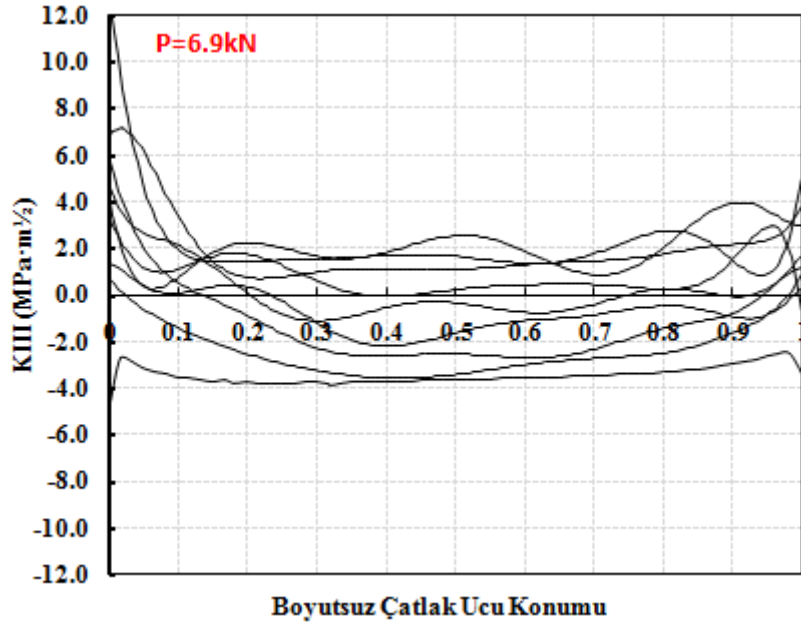
Bölüm 3.3.5.2 'de, mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° üç eksenli yükleme açısında 25 mm kalınlıkta CTST numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kriter gereğince gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çatlak ilerleme analizleri, çatlak 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} gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.3.84'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.



(a)



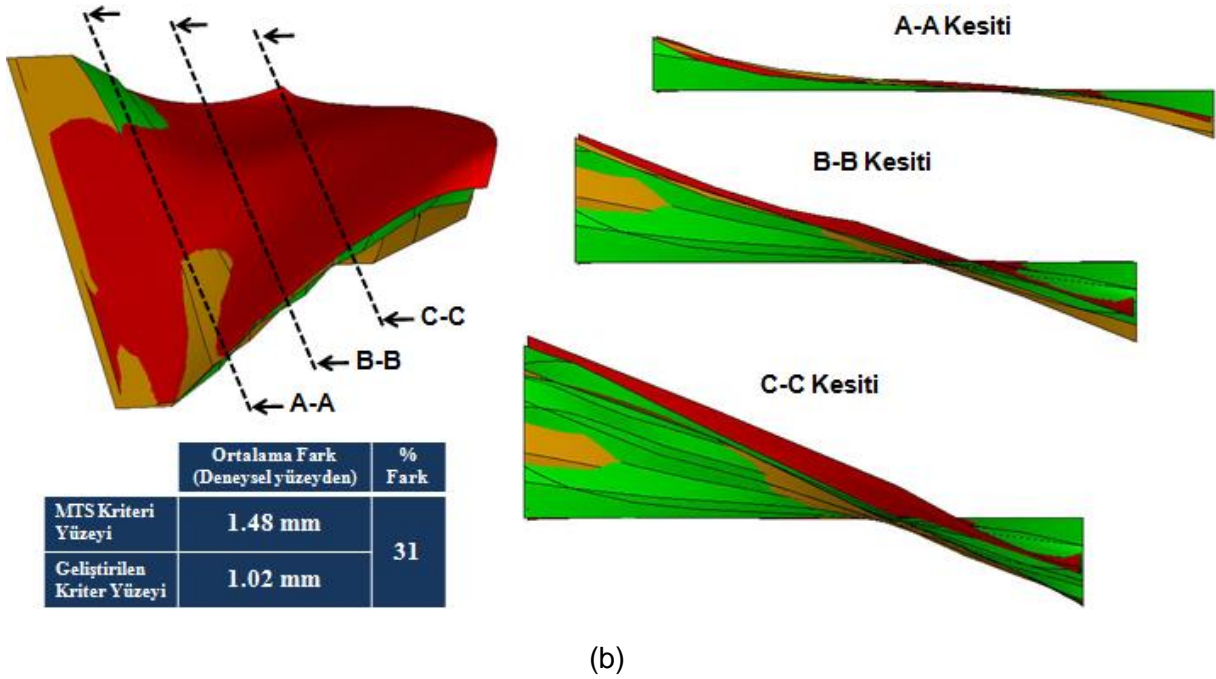
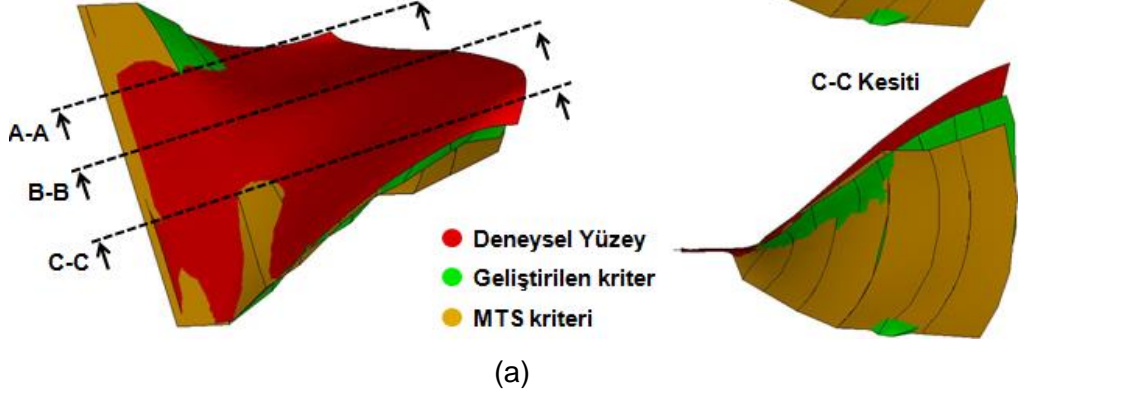
(b)



(c)

Şekil 3.3.84. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısında 25mm kalınlıkta CTST numunesinin geliştirilen kriter göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) KI, (b) KII, (c) KIII GŞF değerleri.

Geliştirilen kriter göre çatlak ilerleme simülasyonları sonucu elde edilen çatlak yüzeyi, Bölüm 3.3.5.2'de MTS kriteri ile elde edilen yüzey ve deneysel yüzey ile üst üste karşılaştırılarak yüzeylerin farklı kesitlerden görünümü Şekil 3.3.85'te verilmiştir.

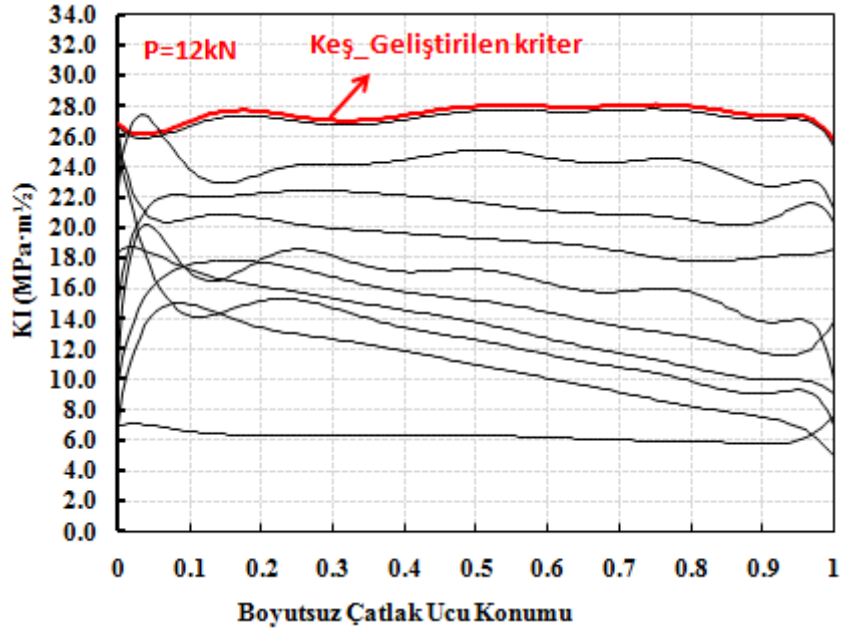


Şekil 3.3.85. Mod-I/II=45°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=45° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

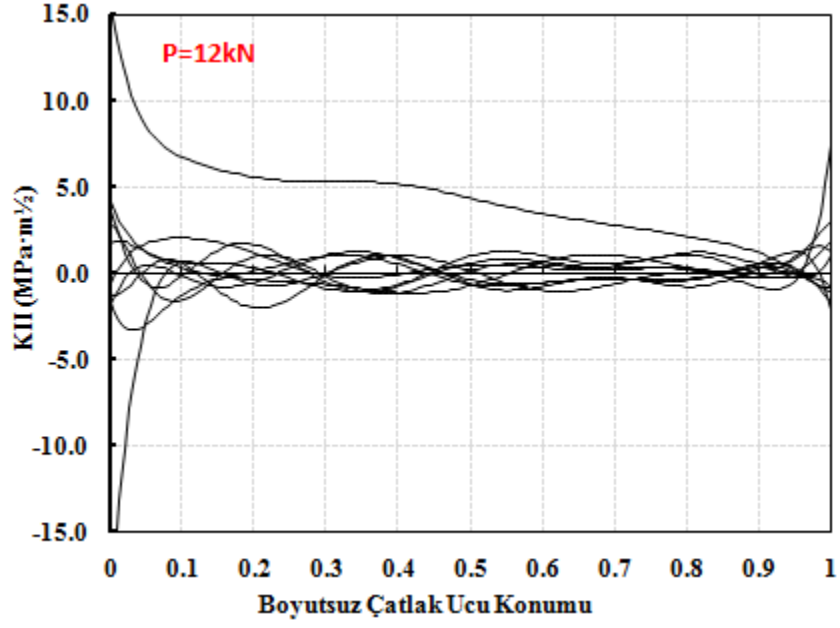
MTS kriteri kullanılarak elde edilen yüzey ile deneysel yüzey arasında ortalama 1.48 mm fark elde edilirken, geliştirilen kritere göre ortalama 1.02 mm fark elde edilmiştir. Geliştirilen kriter yaklaşık %31'lik bir oranla deneysel yüzeyi daha iyi tahmin etmiştir.

Mod-I/II=75°, Mod-II/III=15° ve Mod-I/III=75° yükleme açısında CTST numunesinin Geliştirilen kritere göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri:

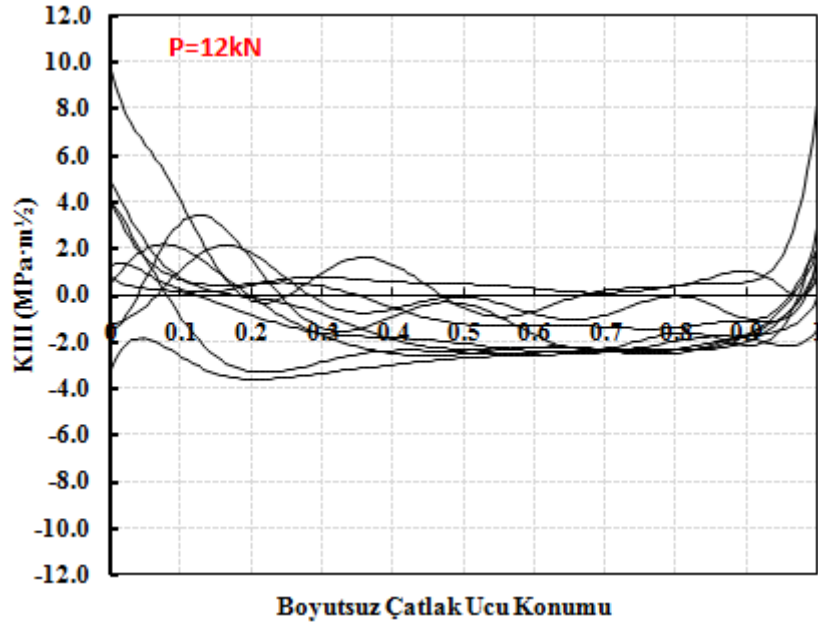
Bölüm 3.3.5.3'te, mod-I/II=75°, mod-II/III=15° ve mod-I/III=75° üç eksenli yükleme açısında 25 mm kalınlıkta CTST numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kritere göre de tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çatlak ilerleme analizleri, çatlak 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} gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.3.86'da 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)



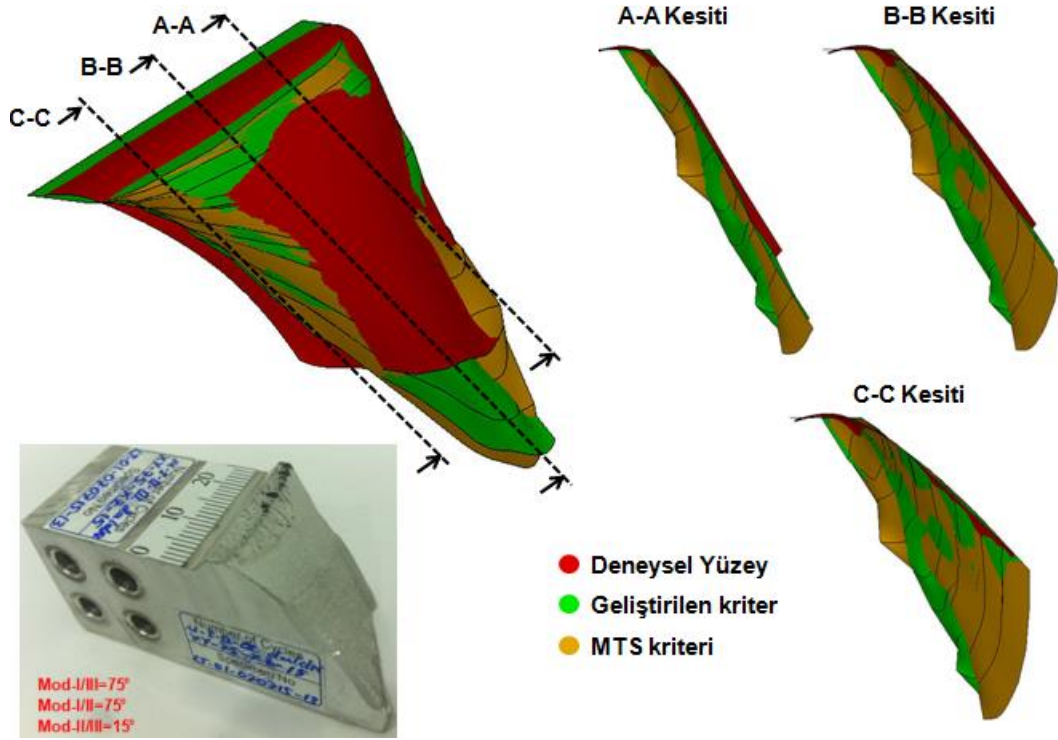
(b)



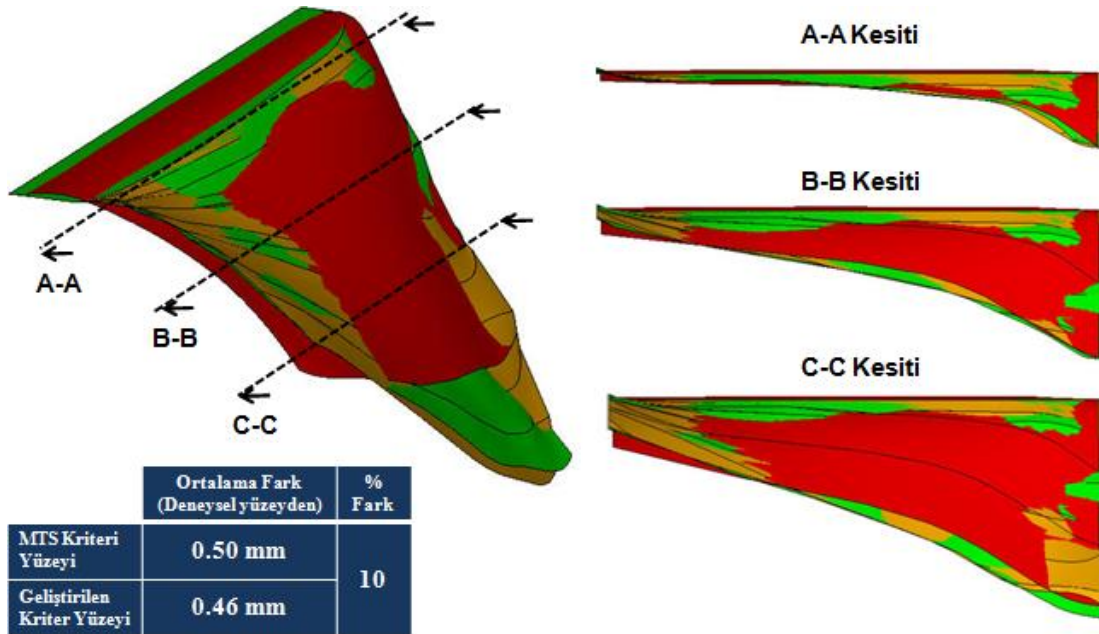
(c)

Şekil 3.3.86. Mod-I/II=75°, mod-II/III=15° ve mod-I/III=75° yükleme açısında 25mm 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.

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 3.3.87 'de verilmiştir.



(a)



(b)

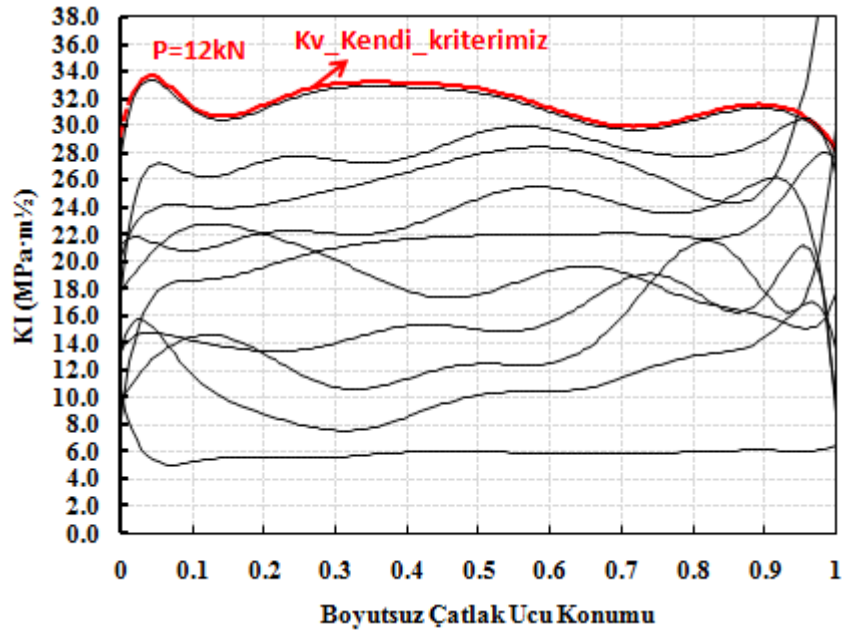
Şekil 3.3.87. Mod-I/II=75°, mod-II/III=15° ve mod-I/III=75° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeylerinin deneysel yüzeylerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

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

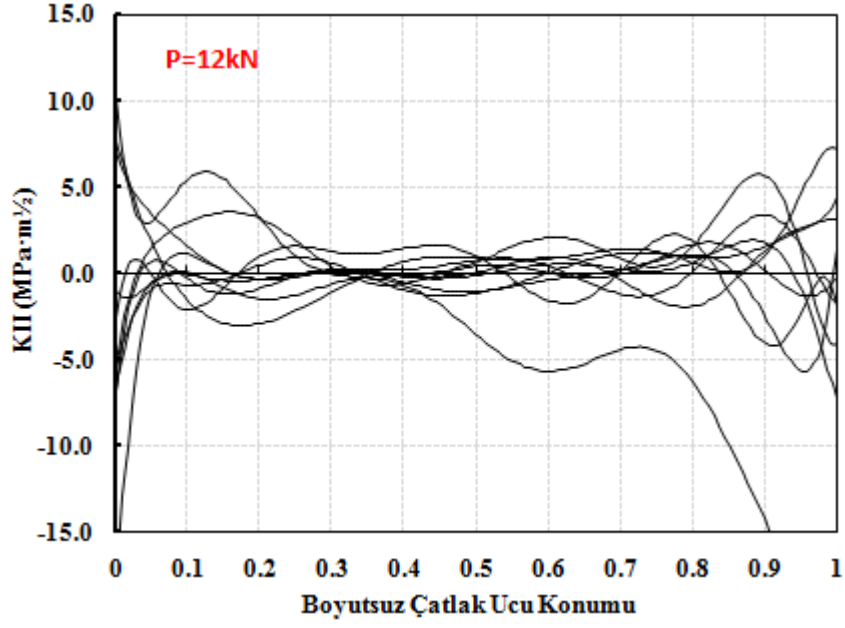
mm, geliştirilen kriter ile deneysel yüzey arasında da ortalama 0.46 mm fark hesaplanmıştır. %10'luk bir farkla geliştirilen kriter daha iyi yüzey tahmininde bulunmuştur.

Mod-I/II=75°, Mod-II/III=45° ve Mod-I/III=75° yükleme açısında CTST numunesinin Geliştirilen kriter gere gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri:

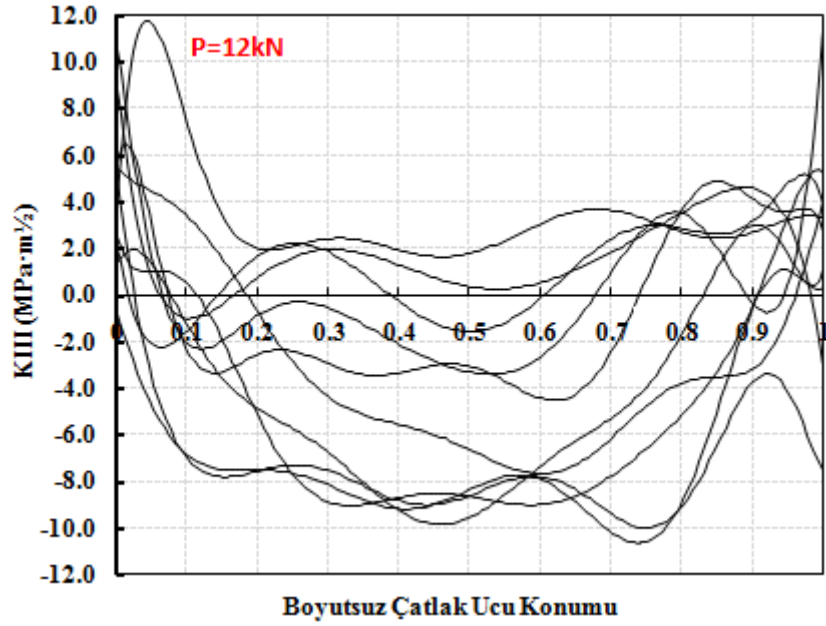
Son olarak mod-II ve mod-III yükünün çok baskın olduğu, mod-I/II=75°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=75° üç eksenli yükleme açısında 25 mm kalınlıkta CTST numunesi için MTS kriterine göre gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri, geliştirilen kriter gere de tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu yükleme 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} gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.3.88 '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)



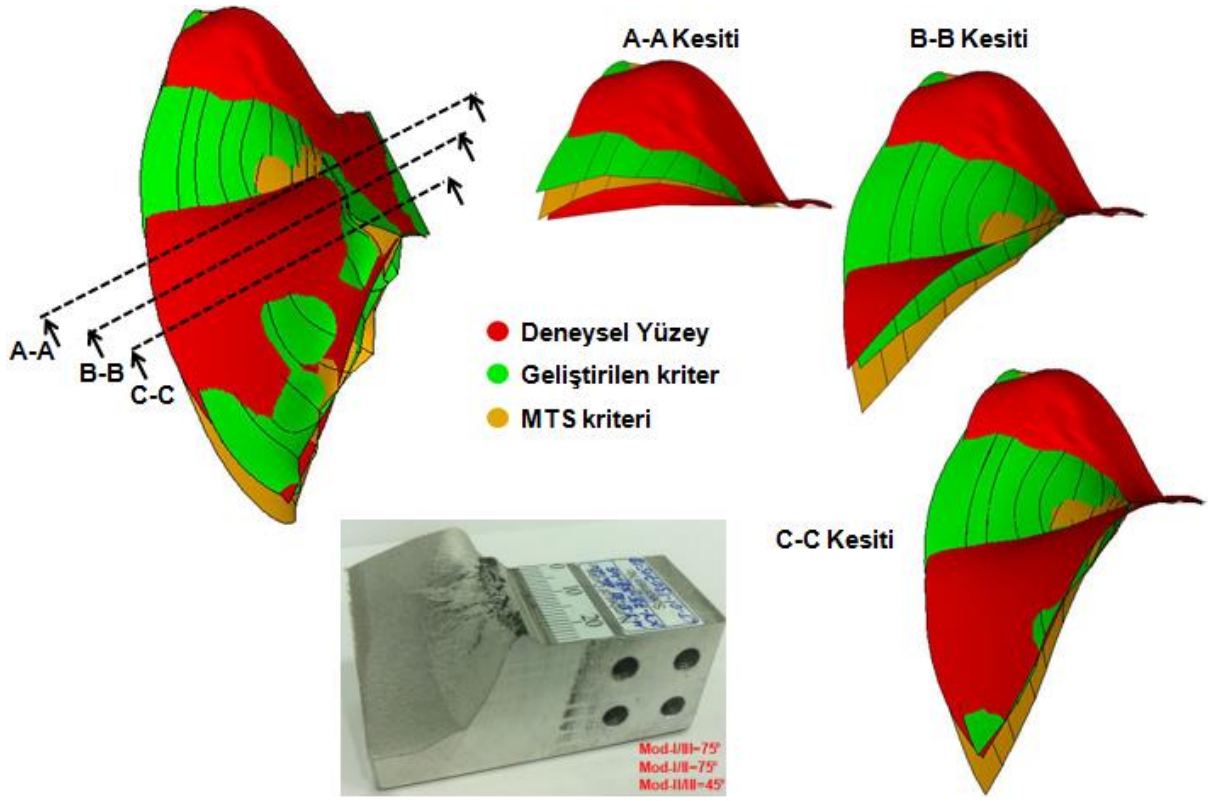
(b)



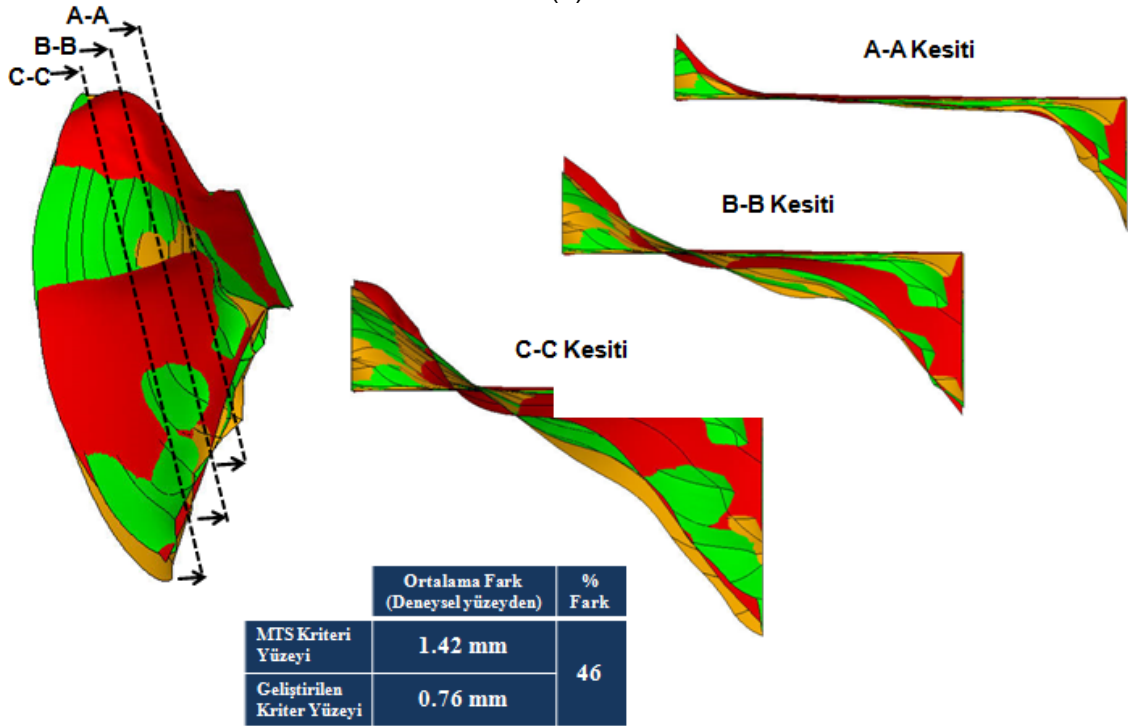
(c)

Şekil 3.3.88. Mod-I/II=75°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=75° yükleme açısında 25mm 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.

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 3.3.89'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.3.89. Mod-I/II=75°, mod-II/III=45° ve mod-I/III=75° yükleme açısı için kriterlere göre elde edilen çatlak yüzeýlerinin deneysel yüzeýlerin farklı kesitler alınarak karşılaştırılması, (a) yan kesit, (b) ön kesit.

Yüksek oranda mod-II ve mod-III 'ün baskın olduğu bu yükleme durumu için geliştirilen kritere 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 yükleme açısında iki kriterin tahminleri arasında büyük fark oluşmuş ve geliştirilen kriter, deneysel sonuçlara MTS kriterinden %46 oranında daha yakın tahminde bulunmuştur.

Proje önergesinde beş adet sağlama problemi öngörülmekle beraber, bu kısımda altı adet sağlama problemi verilmiştir. Ayrıca, Bölüm 3.3.2'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 düşünülmalıdır.

3.3.7 Hadde Yönünün Kırılma Tokluğu ve Çatlak İlerleme Davranışına Etkisi (LT ve TS)

Proje önergesinde olmamasına rağmen, bu çalışmada, hadde yönünün kırılma tokluğuna ve çatlak ilerleme davranışına olan etkisi açısından ön çalışmaların yapılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak Al 7075-T651 malzemesi için LT ve TS yönlendirilmesine sahip numunelerin kırılma tokluğu davranışları hem Mod I (CT numunesi) hem de Mod I-II (Richard numunesi) için kıyaslanmıştır. Daha sonra, çatlak ilerleme davranışı ($da/dN-\Delta K$) aynı şekilde hem CT hem de Richard numuneleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Bu projenin 1. ve 3. dönemlerinde gerçekleştirilen CT ve Richard Numunelere ilişkin kırılma tokluğu test düzeneği aşağıda Şekil 3.3.90'da sunulmuştur.

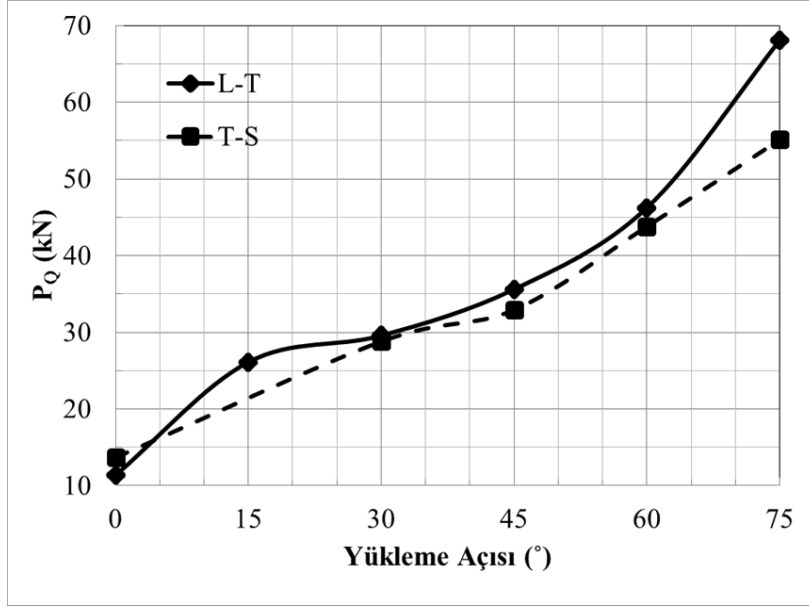


Şekil 3.3.90 CT ve Richard Numuneleri Kırılma Tokluğu Testi Görüntüleri

Literatürde, oda sıcaklığında yapılan kırılma tokluğu ölçümleri için L-T ve T-S kıyaslaması bulunamamıştır. Ancak, diğer hadde yönlerinde yapılan kıyaslamalar mevcuttur. Örneğin Campbell (2008) tarafından sunulan verilere göre L-T ve S-L hadde yönlerinde kırılma toklukları Al 7075 için $32 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ve $21 \text{ MPa.m}^{1/2}$ olarak bildirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, proje 3. Gelişme Raporunda CT numuneler için kırılma tokluğu değerleri L-T ve T-S yönü için sırasıyla $29.11 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ve $30.40 \text{ MPa.m}^{1/2}$ olarak bulunmuştu. Bu değerlere göre, T-S numunenin kırılma tokluğu, L-T 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, bu proje sonucunda elde edilen veriler ışığında, L-T ve T-S numuneler için kırılma tokluğu değerleri arasında önemli bir fark olmadığı söylenebilir.

Karışık Mod'lu yükleme olarak, Mod I-II karışık yüklemesi için yine L-T ve T-S numunelerin kıyaslaması 3. rapor döneminde yapılmıştır. Karışık mod için kırılma tokluğu değeri kriterlere göre değişmektedir. Bu sebeple, Mod I-II yüklemesi için, direkt olarak kırılma yüklemesi değerleri kıyas edilmiştir. Richard tipi numuneler için farklı yükleme açılarında elde edilen kırılma yükleri, L-T ve T-S numuneler için Şekil 3.3.91'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.3.91 Mod I-II yüklemesi altında, L-T ve T-S çatlak yönü için kırılma yük değerlerinin açığa bağlı olarak karşılaştırılması

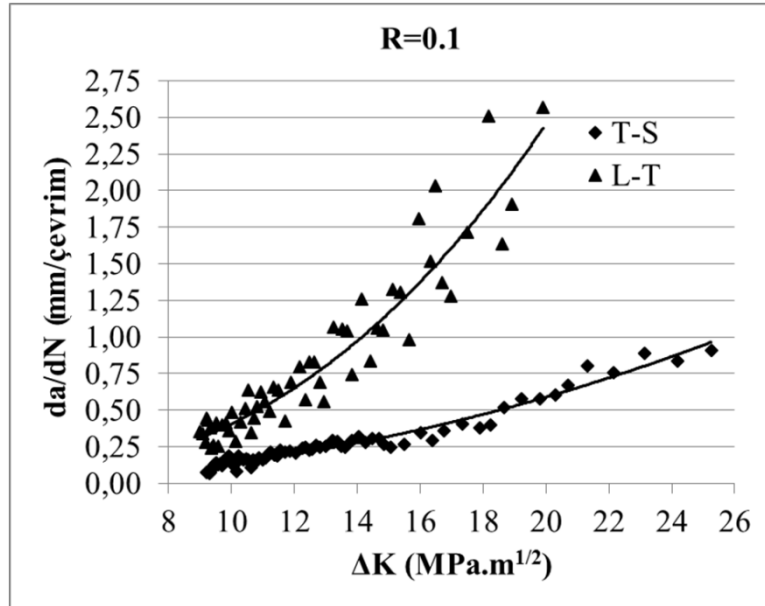
Şekilde görüldüğü gibi, 0° için (Mod I) T-S numune daha yüksek bir yük değerinde kırılırken, 15° ve üstü değerlerde, T-S numune L-T numuneyle kıyasla daha düşük yük değerlerinde kırılmaktadır. Ayrıca açı değeri arttıkça, yani Mod II daha baskın bir yükleme haline geldikçe, T-S ve L-T arasındaki fark açılmaktadır. Ancak genel olarak bakıldığında, yine kırılma yüklerinin L-T ve T-S yüklemelerde çok farklı değerler almadığı görülmektedir. Bu durum, Mod I için kırılma tokluğu ölçümlerinde elde edilen sonuca benzer bir sonuçtur. Bu sonuç da, 3. Dönem Gelişme Raporunda belirtilmişti.

Mod I (CT) için çatlak ilerleme davranışı, L-T numuneler için 1. Dönem Gelişme Raporunda detaylı olarak incelenmişti. Projenin son rapor döneminde, aynı metodoloji kullanılarak T-S numuneler için çatlak ilerleme davranışı araştırılmıştır. Dört adet CT numunesi için çatlak ilerleme testi yapılmış olup, iki numunede de benzer bir davranış tespit edilmiş ve deneyin tekrarlanabilirliği sağlanmıştır. Kırılan numunelerin fotoğrafı Şekil 3.3.92'de sunulmuştur.



Şekil 3.3.92 TS Hadde yönünde mod I çatlak ilerleme davranışının tespiti için kullanılan CT numunelerin kırılmış halleri

Elde edilen verilere göre, Paris-Erdoğan bölgesindeki ΔK -da/dN eğrisi hem T-S hem de L-T numuneler için birarada Şekil 3.3.93'te verilmiştir.



Şekil 3.3.93 T-S ve L-T haddeleme yönleri için ΔK -da/dN değerleri

Şekilde görüldüğü gibi, T-S numunesindeki çatlak, L-T numunesindeki çatlığa kıyasla, çok daha yavaş olarak ilerlemektedir. Her iki numunede düşük ΔK değerlerinde birbirine yakın çatlak ilerleme hızı gösterirken, ΔK arttıkça aralarındaki fark da artmaktadır. Paris-Erdoğan bölgesinde, L-T numunesi için ΔK değerleri 10 ile 20 MPa.m^{1/2} arasında değişirken, T-S numunesi için 10 ile 26 MPa.m^{1/2} arasında değişmektedir.

Bu eğriler üstel fonksiyona fit edildiğinde elde edilen C ve n değerleri aşağıdaki Tablo 3.3.3'te verildiği gibidir.

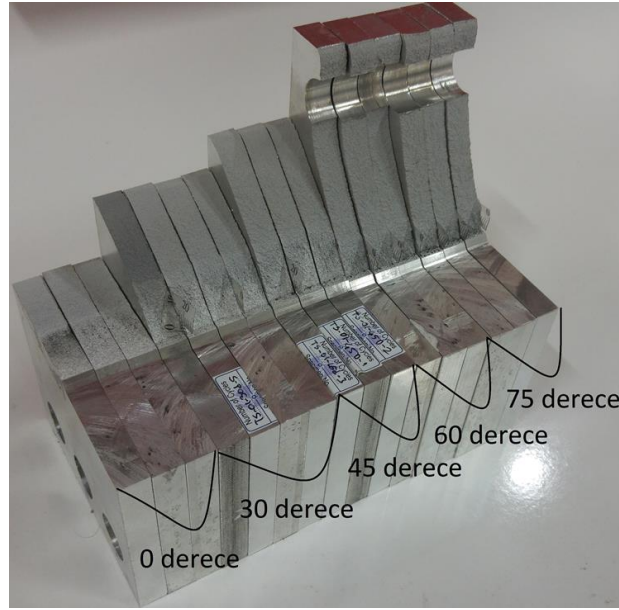
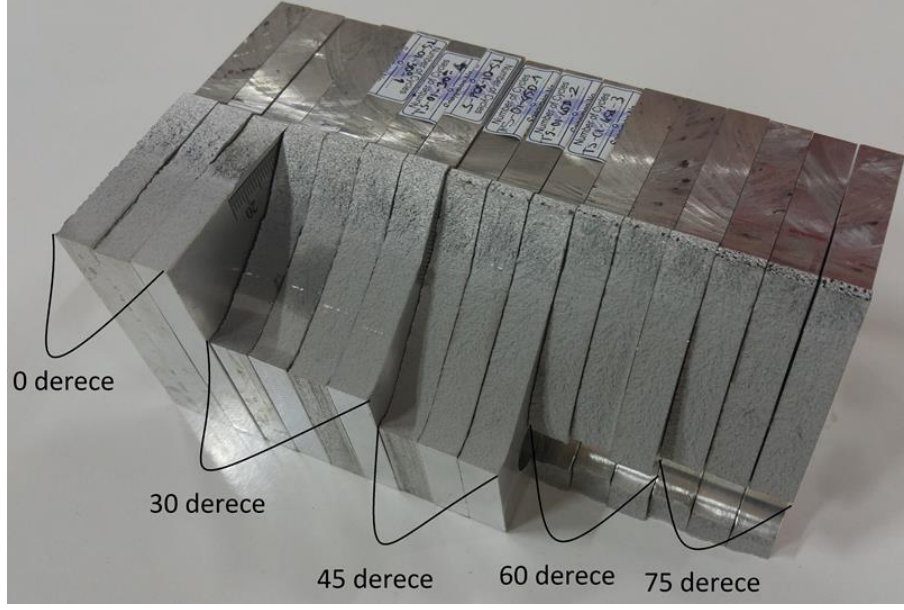
Tablo 3.3.3 L-T ve T-S yönleri için Paris-Erdoğan çatlak ilerleme hızı parametreleri

	C	n
L-T	1.4619(10)⁻⁶	2.4392
T-S	1.0446(10)⁻⁶	2.1147

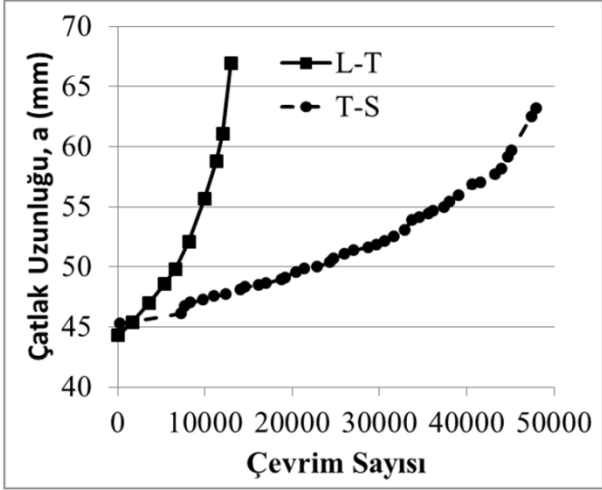
Aynı malzeme için, korozyon koşulları altında elde edilen da/dN-ΔK eğrileri, L-T, T-S ve birçok hadde yönü için Scütze ve ark. (2010) tarafından verilmiştir. L-T ve T-S arasındaki fark, Şekil 3.3.93'te verilen farka yakındır.

Kırılma toklukları arasında önemli bir fark olmamasına rağmen çatlak ilerleme hızı davranışları bazı nedenler olabilmekle beraber tanecik yönelmesi ana nedenlerden biri olabilir. L-T numunede çatlak ince uzun taneleri yarararak ilerlemeye çalışırken, T-S yönünde daha ince yapılı ve eş boyutlu taneleri ayırarak büyümeye çalışacaktır. Bu sebeple, L-T yönünde daha az bir direnç varken, T-S yönünde daha yoğun bir direnç olacaktır. Kırılma tokluğu deneyleri daha fazla yük altında ve daha hızlı olarak gerçekleştiğinden, bahsedilen direnç unsuru olarak ikinci faz parçacıkların ve tane yönelimlerinin etkisi daha az olacaktır. Bu sebeple kırılma tokluğu ölçümlerinde çok büyük bir fark yaratmayacaktır. Ancak, da/dN testlerinde, küçük yük değerlerinde ancak tekrarlı olarak uygulanan yüklemelerde, bu ikinci fazlar yeni çatlak üretme ve direnci zayıflatma potansiyeline kavuşacaktır.

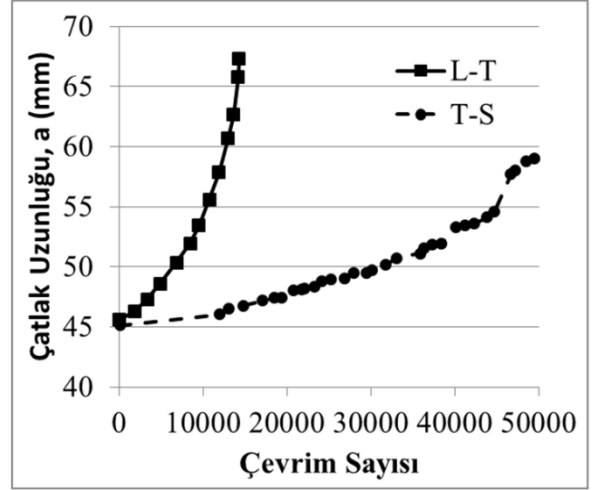
Mod I-II yüklemelerde (Richard numunelerinde, Şekil 3.3.94) çatlak ilerleme davranışına bakıldığında, benzer bir durum söz konusudur. Aşağıda Şekil 3.3.95'te 30°, 45° ve 60°'lik yükleme açıları için çatlak uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi hem L-T, hem de T-S yönleri için gösterilmiştir.



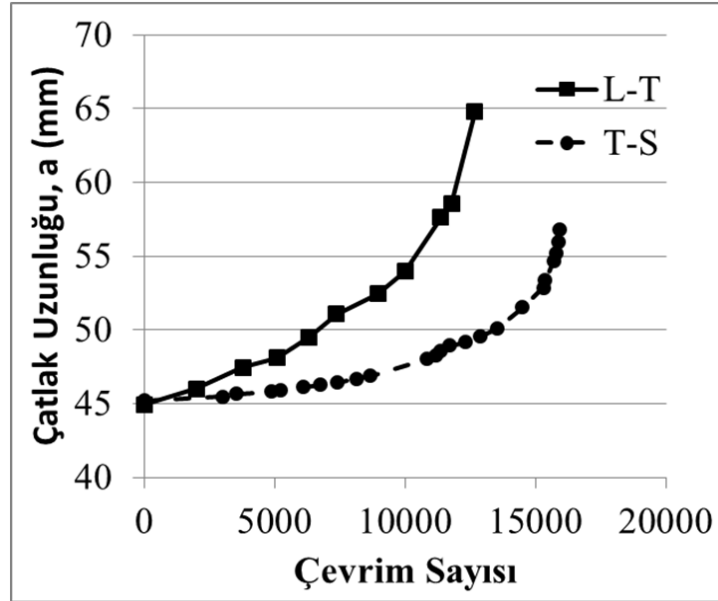
Şekil 3.3.94 T-S Hadde yönü karışık modlu çatlak ilerleme testinde kırılmış olan numuneler



(a)



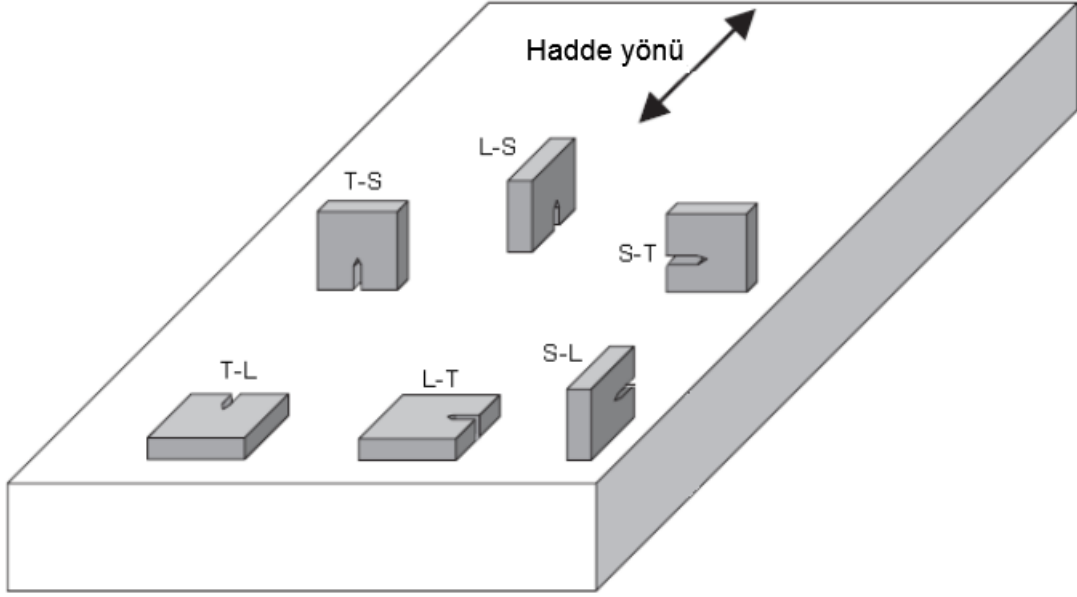
(b)



(c)

Şekil 3.3.95 T-S ve L-T Haddelme Yönlerine göre karışık modlu yükleme için çatlak uzunluğunun çevrim sayısına göre değişimi (a) 30° (b) 45° (c) 60°

Şekil 3.3.95'te görüldüğü gibi, Mod I (CT) yükleme durumuna benzer şekilde, T-S yönlü çatlak daha yavaş bir ilerleme göstermektedir. Ancak aradaki fark, yükleme açısı arttığında (mod II etkisi daha baskın olduğunda) azalmaktadır. Ayrıca açı büyüdüğünde, Hem L-T hem de T-S yönünde, kritik çatlak uzunluğuna daha az bir çevrimde ulaşılmaktadır.



Şekil 3.3.96 Hadde yönlerine göre numunelerde çatlak yerleşimi

Mod I yükleme durumuna ilişkin yapılan yorumlara benzer yorumlar, mod I-II yükleme için de yapılabilir. Yani T-S yönünde bulunan direnç unsurları daha fazla olduğundan çatlak daha yavaş ilerlemektedir. Ancak mod II yükleme daha baskın olmaya başladığında bu direnç azalmaktadır. Aslında bu beklenen bir durumdur ve Şekil 3.3.95'ten görülmektedir. Çünkü, Mod II yüklemesi, L-T numunede çatlağın hadde yönüne paralel ilerlemesini teşvik edecektir (Şekil 3.3.96). T-S numunede Mod II yüklemesi ise çatlağın uzun kenara (long transverse) paralel ilerlemesini teşvik edecektir. Her ikisi de daha az dirençli yönlerdir. Yükleme açısı arttıkça T-S ve L-T'nin birbirine yaklaşması ise, hadde yönündeki ve uzun kenar yönündeki dirençlerin birbirine yakın olması ile izah edilebilir.

Hadde yönüne bağlı olarak davranış özetlenecek olursa aşağıdaki listelen hususlar önem kazanmaktadır:

- Literatürde, T-S numune için çok kısıtlı bir veri bulunmaktadır.
- Kırılma tokluğu değerleri, L-T ve T-S hadde yönleri için önemli bir fark göstermemektedir.
- Çatlak ilerleme hızı, T-S numunelerde daha azdır ve dolayısıyla çatlak ilerlemesine daha dirençlidir.
- Bu durumun malzemede ikinci faz partiküllerle ve tanelerin çatlak yönüne göre relatif yönelmeleri ile yakından ilgisi olduğu düşünülmektedir.
- Mod II yükleme etkisi baskın hale geldiğinde, çatlak ilerleme hızı hem L-T hem de T-S için artmaktadır ve iki durum birbirine yaklaşmaktadır.

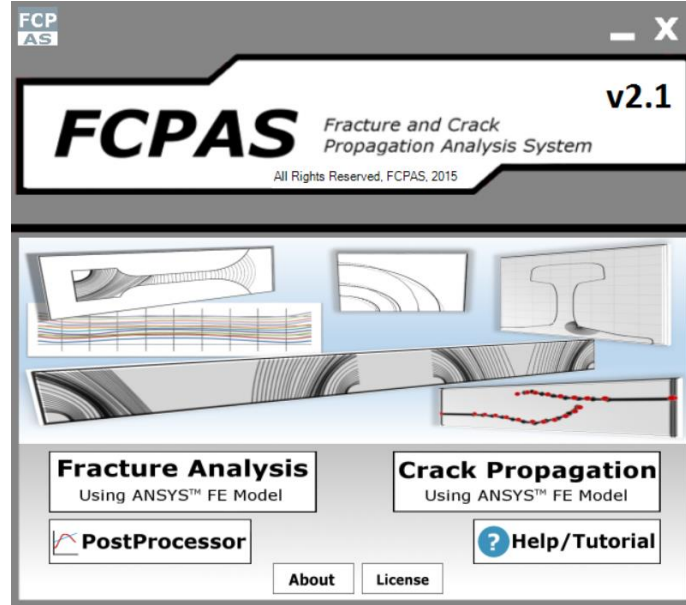
3.4 FCPAS – Aşama 2 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Geliştirilmesi ve Güncellemeler

Ara yüzde yapılan güncellemeler ile FCPAS v2.1 sürümü hazırlanmıştır.

Bu güncellemeler;

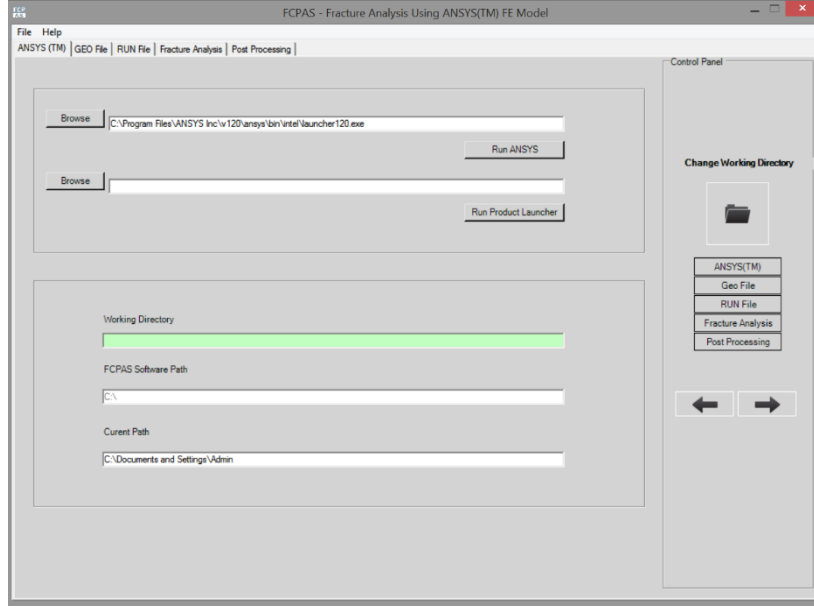
- Bazı hata düzeltmeleri
- FCPAS analiz sonuçlarının görüntülenmesi için bir yazılım (FCPAS Post-Processor) geliştirilmesi
- Önceden hazırlanmış bazı yeni çatlak ilerleme makrolarının eklenmesi
- ANSYS™ makrosu hazırlama yardımcısının geliştirilmesi
- Ara yüz tasarım güncellemesidir.

Ayrıca eğitim/kılavuz dokümanı üzerinde de güncellemeler yapılmıştır. FCPAS v2.1 çalıştırıldığında ekrana çıkan ara yüz Şekil 3.4.1’de gösterilmiştir.



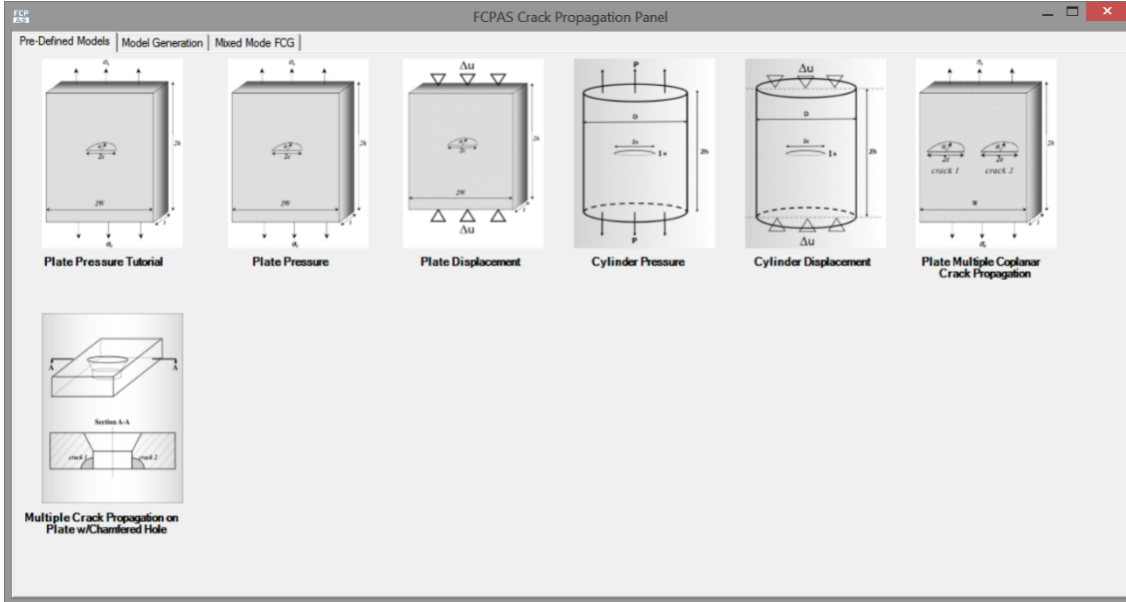
Şekil 3.4.1. FCPAS ana ekranı.

FCPAS ana penceresindeki “Fracture Analysis Using ANSYS FE Model” (ANSYS Sonlu Elemanlar Modelini Kullanarak Kırılma Analizi) butonuna tıklandığında açılan ara yüz penceresi (Şekil 3.4.2) vasıtasıyla kırılma veya çatlak ilerleme analizi yapılabilmektedir. Bu ara yüzden yapılabilecek analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli ANSYS™ (ANSYS, 2009) yazılımıyla oluşturulmaktadır ve gerekli verilerin (eleman, düğüm noktası/node, yük, sınır şartı listeleri) çıktıları alınmaktadır. Bu işlemler için sırasıyla “ANSYS™” ve “GEO File” sekmeleri kullanılmaktadır. Sonra “RUN File” sekmesi kullanılarak analiz seçenekleri ve malzeme bilgileri belirlenmektedir.



Şekil 3.4.2. “Using ANSYS FE Model” butonuna tıklandığında açılan ara yüz penceresi.

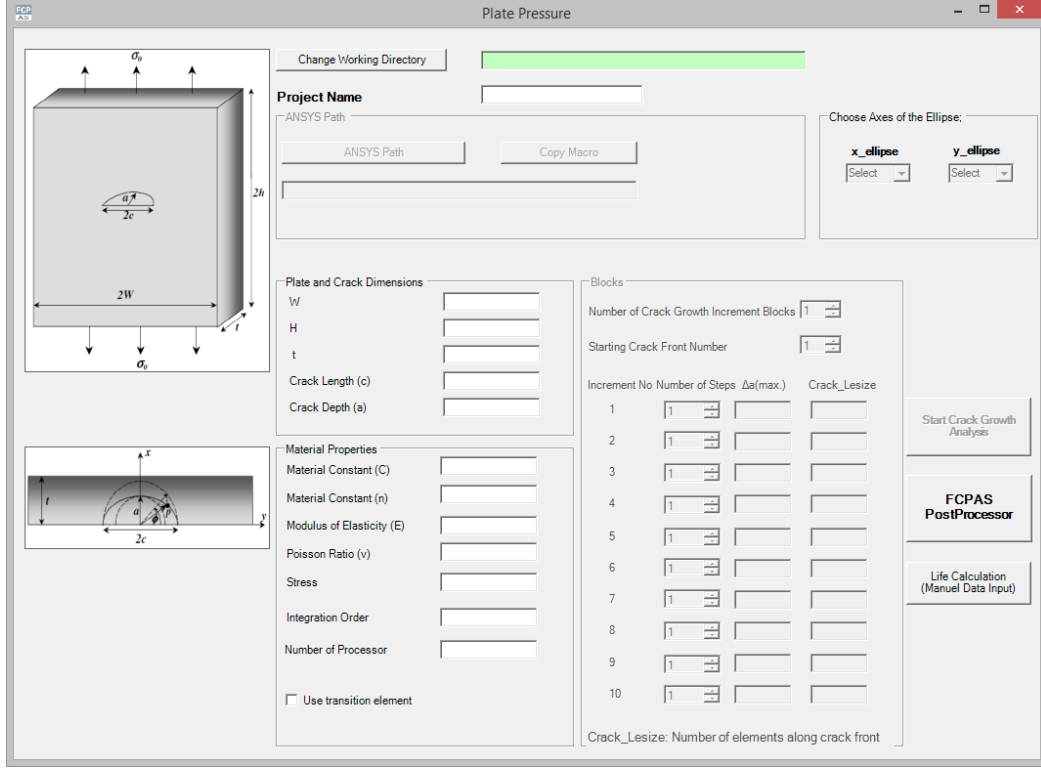
Yine FCPAS ana penceresinden “Crack Propagation using ANSYS FE Model” butonu aracılığı ile açılan pencereden (Şekil 3.4.3) yorulma çatlak ilerleme analizi gerçekleştirilebilmektedir. Bu pencerede, bazı temel geometriler için önceden hazırlanmış ANSYS makroları bulunmaktadır ve bu makrolar, plakada yük kontrollü çatlak ilerleme analizi, plakada yer değiştirme kontrollü çatlak ilerleme analizi, silindirde yük kontrollü çatlak ilerleme ve silindirde deplasman kontrollü çatlak ilerleme analizi yapabilmektedir.



Şekil 3.4.3. Bazı temel geometriler ANSYS makrolarına erişim penceresi.

Analizi yapılmak istenen hazır model seçilerek açılan yeni pencerede gerekli geometri, yük, malzeme bilgileri ve çatlak ilerleme adımları bilgileri girilerek parametrik ANSYS makrosu çalıştırılmaktadır. Bu makro ile sonlu elemanlar modeli saniyeler içerisinde oluşturulmakta ve

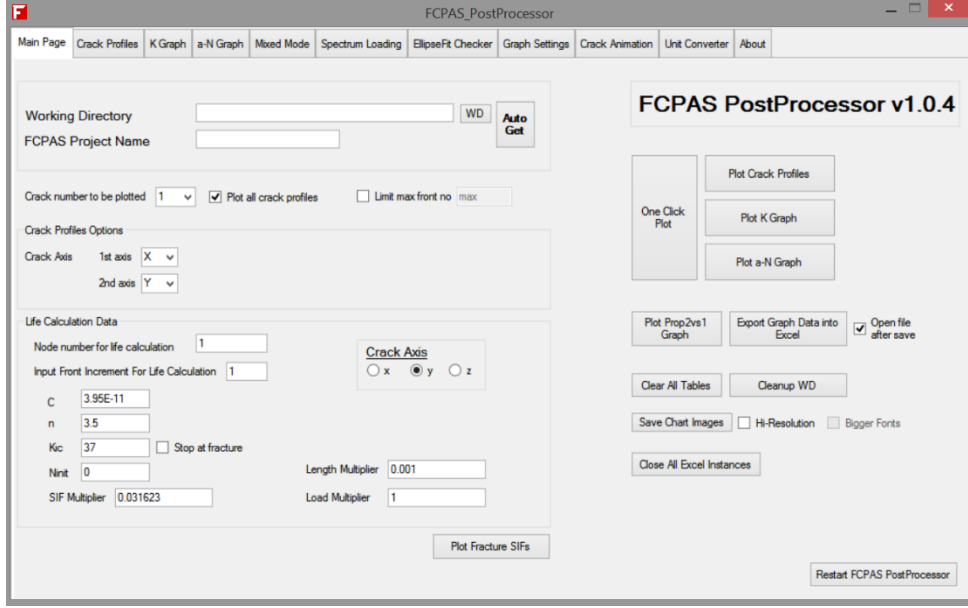
FCPAS çözücüsü frac3d ile çözülmekte, ardından da çatlak ilerleme tahmini yapılmaktadır. Plakada yük kontrollü otomatik çatlak ilerlemesi yapabilmek için verilerin girildiği FCPAS ara yüzü Şekil 3.4.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4.4. Otomatik çatlak ilerlemesi için veri giriş ekranı.

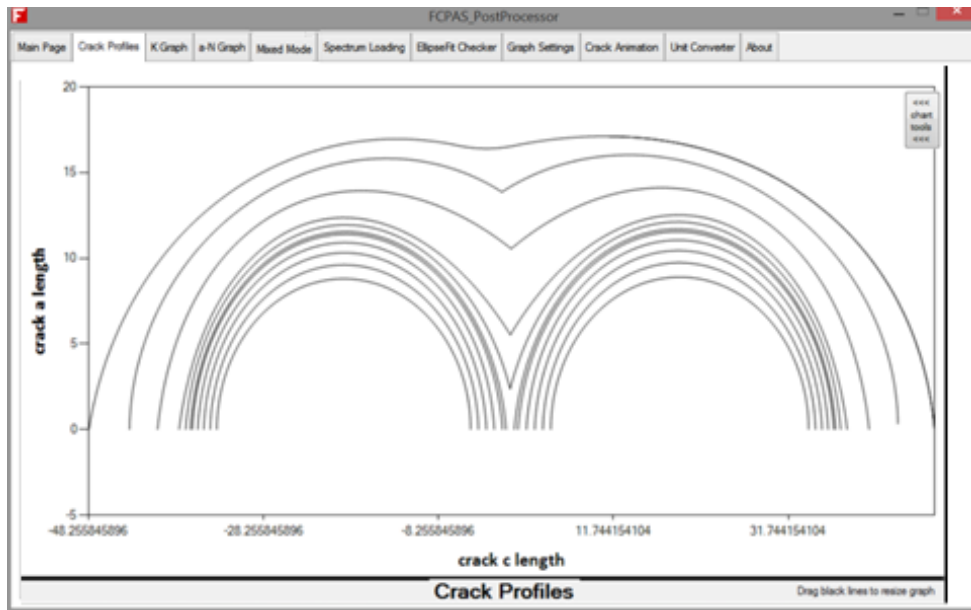
FCPAS analiz sonuçlarını görüntülemek için geliştirilen diğer bir araç ise FCPAS PostProcessor olarak adlandırılmıştır ve Visual C# programlama diliyle Microsoft Visual Studio Microsoft Corporation, (2012) derleyicisi kullanılarak yazılmıştır. FCPAS PostProcessor, çok sayıda çatlak adımından oluşan FCPAS analiz sonuçlarını daha hızlı görüntülemek ve bazı pratik araçlar sunmak amacıyla Excel'den bağımsız olarak geliştirilen bir ara yüzdür.

İçerdiği çeşitli fonksiyonların farklı sekmelerle ulaşılabilir olduğu FCPAS PostProcessor açıldığında ekrana gelen ana sekme Şekil 3.4.5'te gösterilmiştir.

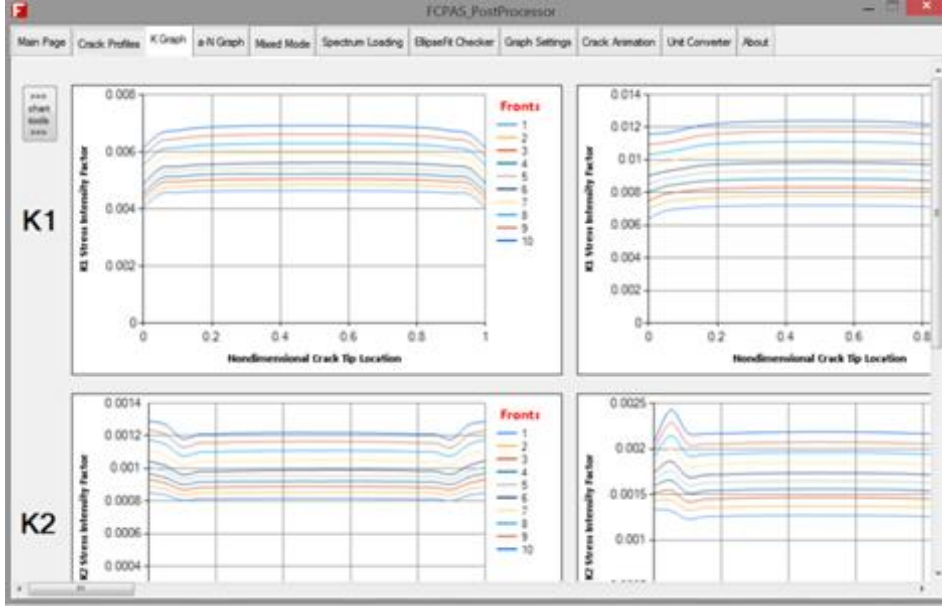


Şekil 3.4.5. FCPAS Post-Processor ana ekranı.

FCPAS Post-Processor uygulamasıyla çatlak profilleri ve gerilme şiddet faktörlerini görüntülemek için çalışma dizini ve FCPAS proje adının girilmesi yeterlidir. Ardından “Plot Crack Profiles” butonu ile çatlak profillerinin, “Plot K Graph” butonu ile gerilme şiddet faktörlerinin verilerinin çalışma dizininden okunması ve grafiklerin çizdirilmesi mümkündür. Uygulama tarafından grafikler çizildikten sonra “Crack Profiles” sekmesinden çatlak profillerinin, “K Graph” sekmesinden de KI, KII ve KIII gerilme şiddet faktörlerinin görüntülenmesi mümkündür. Şekil 3.4.6 ve Şekil 3.4.7’de çatlak ilerleme analizleri sonucunda çizdirilen çatlak profilleri ve gerilme şiddet faktörleri görülmektedir.

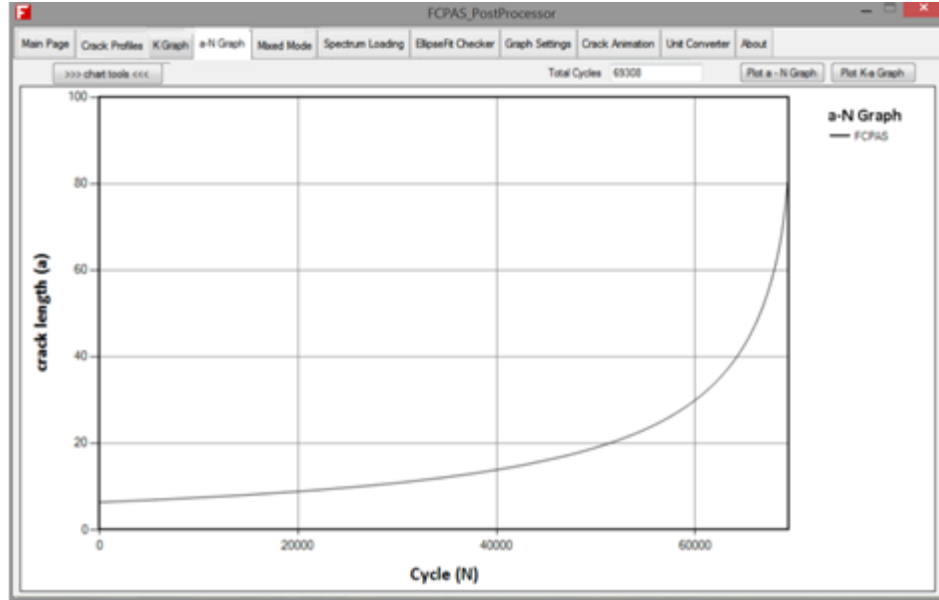


Şekil 3.4.6. Çatlak ilerleme adımları.



Şekil 3.4.7. Gerilme Şiddet Faktörleri.

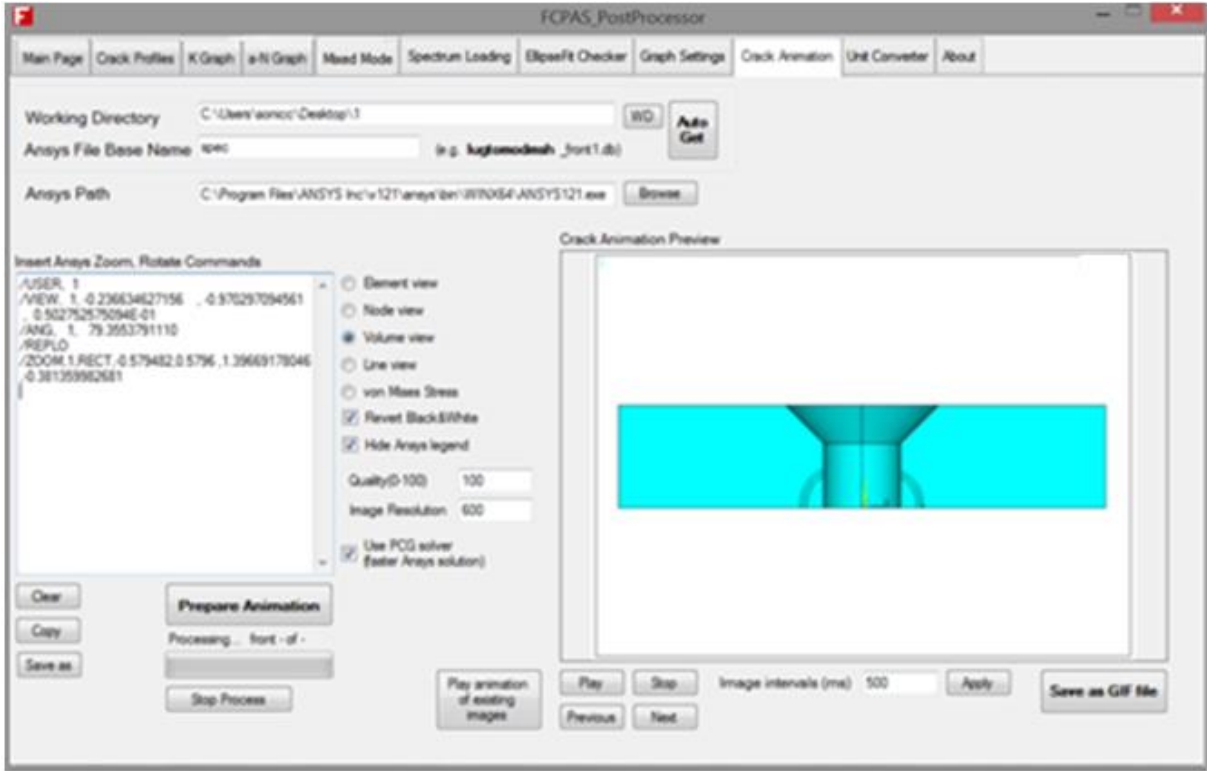
Ömür tahmini grafiğini oluşturabilmek için bazı ek bilgilerin daha ara yüze girilmesinin ardından ömür tahmini grafiğini çizdir (Plot a-N Graph) butonuna basılmasıyla ömür tahmini grafiği çizdirilmektedir. Ömür tahmini grafiği ise, “a-N Graph” sekmesinden görüntülenebilir. Şekil 3.4.8’de ömür tahminine ait grafik verilmektedir.



Şekil 3.4.8. Çatlak uzunluğuna karşılık çevrim sayısı grafiği.

Çatlak ilerleme animasyonunu oluşturmak için “Crack Animation” sekmesi (Şekil 3.4.9) seçilmelidir. Her bir çatlak adımı için ilgili ANSYS çatlak ilerleme adımından alınan resimlerde

çatlak ölçüsü git gide artacağı için, resimlerin sırayla görüntülenmesiyle de bir çatlakın ilerlemesinin animasyonu oluşturulmuş olacaktır



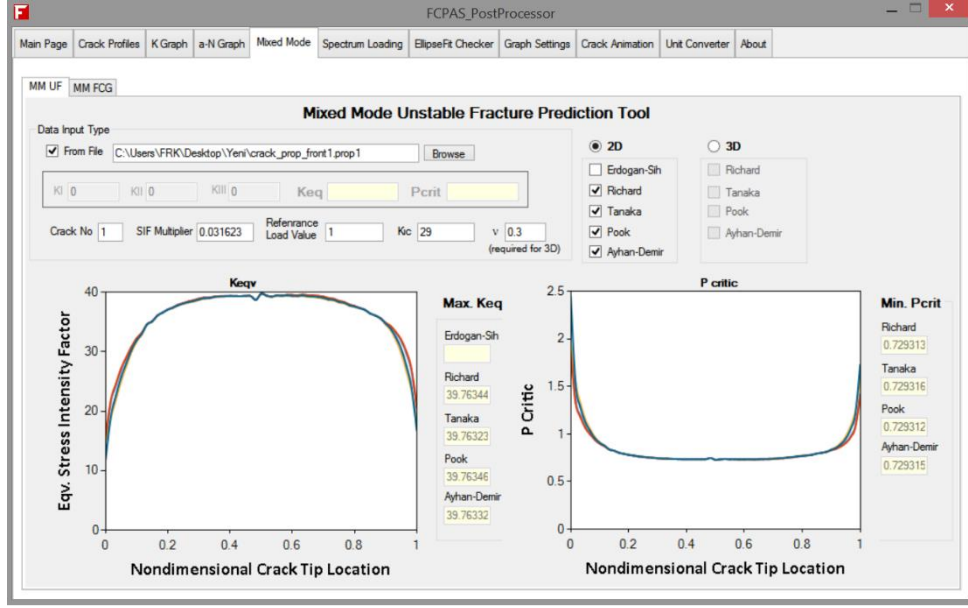
Şekil 3.4.9. Çatlak ilerleme animasyonu sekmesi.

3.4.1 FCPAS Ara Yüzünün Karışık Modlu Çatlak İlerleme Modellemesi için Yapılan Güncellemeler

FCPAS ara yüzüne, karışık modlu çatlak için yeni bir sekme eklenmiştir. Bu sekme altında çatlak ilerlemesi ve çatlak analizleri ile ilgili işlemler yapılabilmektedir. Güncelleştirme ile ilgili detaylar ekran görüntüleri ile aşağıda açıklanmaktadır.

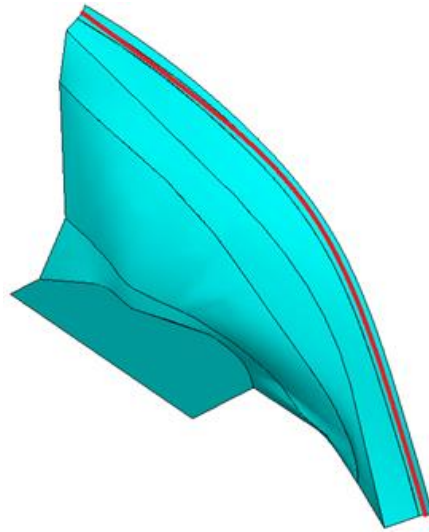
Şekil 3.4.10'de görüldüğü gibi FCPAS ana ekranında görülen üstteki beşinci sekme karışık modlu çatlak sekmesi olarak ayarlanmıştır. Sekme içerisinde iki alt sekme bulunmaktadır. Bu sekmelerden birisi karışık modlu kırılma analizleri, diğeri ise karışık modlu çatlak ilerlemesi için kullanılmaktadır.

Mixed Mode Unstable Fracture Prediction Tool (MM UF) olarak adlandırılan sekme içerisinde bir nokta için gerilme şiddet faktörü değerleri manuel olarak girilerek gerilme şiddet faktörü hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamada üç veya iki boyutlu kriterler kullanılabilir. Aynı zamanda kritik yük değeri de hesaplanmaktadır. Hem kritik yük değerleri hem de eşdeğer gerilme şiddet faktörü grafik olarak görülebilmektedir.

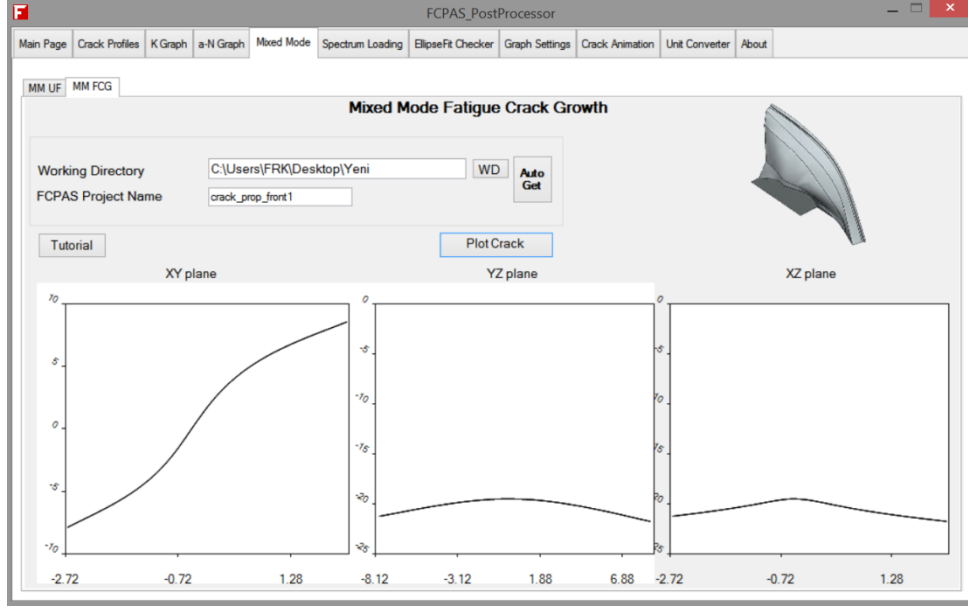


Şekil 3.4.10. Karışık modlu kırılma mekaniği kriterlerine göre eş değer GŞF hesaplanması.

Şekil 3.4.11’de, düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlak yüzeyinin ANSYS programından alınan görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.4.12’de ise, Mixed Mode Fracture Crack Growth (MM FCG) sekmesi içerisinde belirli bir dizinde bulunan prop1 dosyasından yararlanarak çatlak ucunun üç görünüşü (ön, alt ve sol yandan görünüşler) çizdirilmektedir. Böylece, çatlak ucunun şekli ve üç-boyutlu geometrisi hakkında bilgi sahibi olunabilecektir. Bu sekme altındaki “tutorial” butonuna tıklandığında ekte (113M407_Ali_Osman_AYHAN_Ek1.pdf) sunulan düzlemsel olmayan karışık modlu çatlak ilerlemesi dokümanına erişilebilmektedir. Kullanıcılar dokümandaki adımları izleyerek, karışık modlu çatlak için modelleme ve analiz yapabilirler.

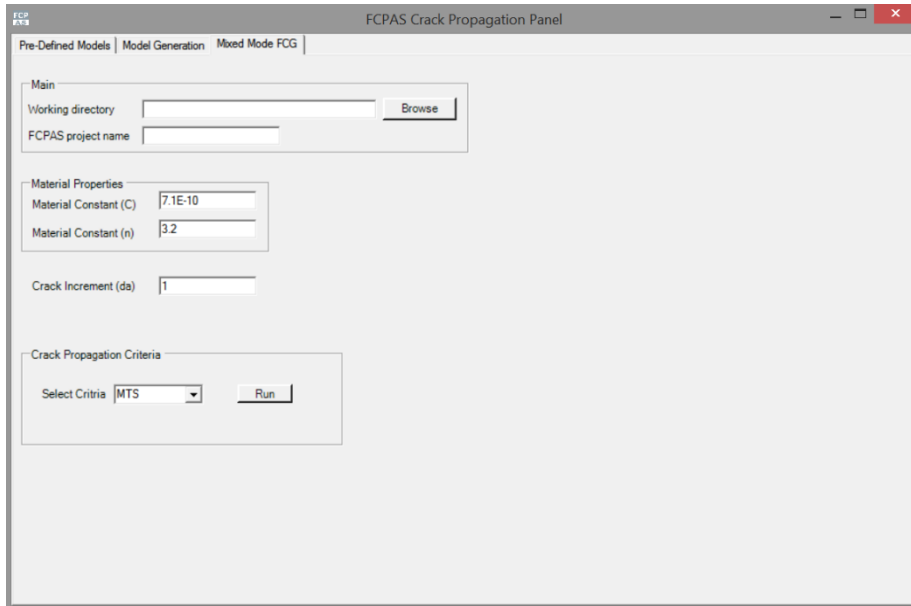


Şekil 3.4.11. Karışık modlu yük altında düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlak yüzeyi.



Şekil 3.4.12. Karışık modlu çatlak ilerlemesi için çatlak profili.

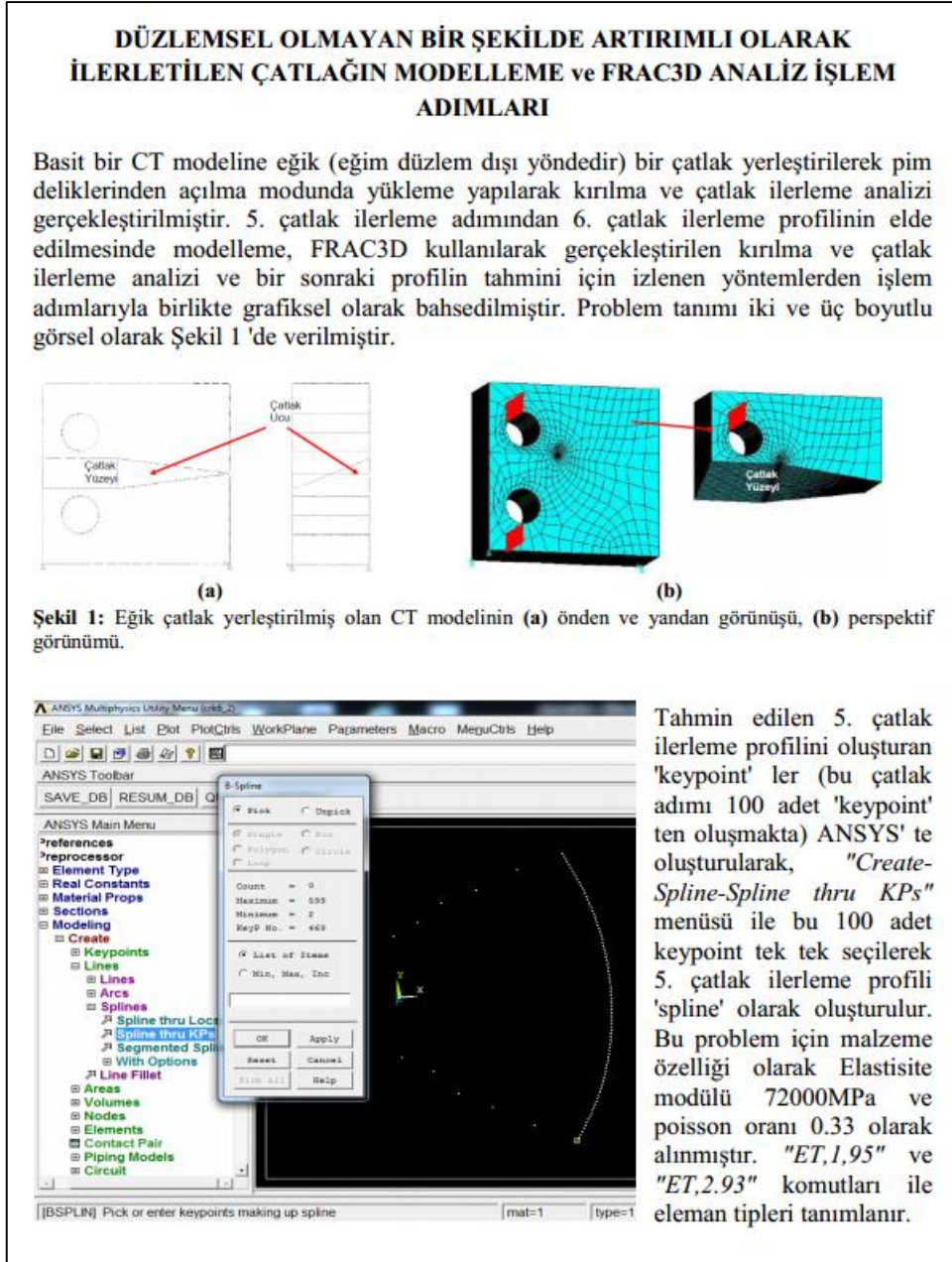
Karışık modlu çatlak için yapılan ara yüz güncellemelerinde bir diğeri ise “Crack Propagation using ANSYS™ FE Model” butonu aracılığı ile açılan pencere içinde yapılmıştır. Bu pencere içine (Şekil 3.4.3) içerisine (Mixed Mode Fatigue Crack Growth - MM FCG) sekmesi eklenmiştir. Bu sekme yardımı ile literatürde bulunan farklı çatlak ilerleme kriterlerine göre çatlak ilerleme profili tahmin edilebilmektedir. FCPAS’ın bu tahmini yapabilmesi için mevcut çatlak durumundaki gerilme şiddet faktörlerinin bulunmuş olması gerekmektedir. MM FCG sekmesinin ekran görüntüsü Şekil 3.4.13’te verilmiştir.



Şekil 3.4.13. Karışık modlu çatlak ilerlemesi için farklı kriterlere göre profil tahmini.

3.4.2 Ara Yüz Kullanılarak Karışık Modlu Çatlak İlerleme Analizi İçin Örnek Uygulama

Düzlemsel olmayan karışık modlu çatlak ilerleme analizi Compact Tension (CT) numunesi üzerinde detaylı olarak anlatılmıştır. Hazırlanan bu dokumana MM FCG sekmesi içinden "Tutorial" butonu ile doğrudan erişilebilmektedir. Dokumanın ilk sayfasından görüntü Şekil 3.4.14'te verilmiştir.



Şekil 3.4.14. Karışık modlu düzlemsel olmayan çatlak ilerlemesi için yardımcı doküman.

Proje kapsamında yapılan çalışmalar ile güncellenen ve kurulama hazır ara yüz dosyası, “113M407_Ali_Osman_AYHAN_Ek2”, lisans dosyasına gerek olmadan alışan FRAC3D ana üzücü çalıştırılabilir dosyası (frac3d.exe) “113M407_Ali_Osman_AYHAN_Ek3” olarak rapor kapak dosyası ekinde, CD ile TÜBİTAK'ın kayıtları ve gerekirse kullanımı için gönderilmektedir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Havacılık ve Uzay teknolojilerinin önemli alt alanlarından biri de Kırılma Mekaniği'dir. Havacılık ve Uzay teknolojileri alanlarında dünyada önde gelen ülkelerin, aynı zamanda Kırılma Mekaniği alanında da bilimsel ve teknolojik açıdan oldukça ileride oldukları görülmektedir. Örneğin, Havacılık ve Uzay alanında dünyada en saygın kurum olan NASA'nın web sayfasındaki teknik dokümanlar veritabanında "kırılma" ("fracture") kelimesi yazılarak doküman araması yapıldığında, binlerce doküman ile karşılaşmakta ve bunlar içerisinden ciddi sayıdaki dokümanın ise son yıllarda yapıldığı, yani Kırılma Mekaniği alanındaki ileri teknolojiler üzerinde halen çalışıldığı gözlemlenmektedir. Kırılma Mekaniği alanında, güncel üç boyutlu modelleme ve deneysel yöntemlerin geliştirildiği ve kullanıldığı bu proje ile de, bu alandaki bilgi ve teknoloji birikimine katkıda bulunulması ve lisansüstü derecelerine sahip uzmanlaşmış araştırmacı yetiştirilmesi hedeflenmiştir. Aşağıda, proje çalışmaları ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmekte ve projede elde edilen kazanımlar ile gelecekte yapılabilecek çalışmalar belirtilmektedir.

4.1. Proje Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar ve Kazanımlar

2. Bölümde de belirtildiği üzere, proje çalışmaları dört ana grup içerisinde sınıflandırılmıştır. Bu gruplar; Aşama 1 projesinde geliştirilen mod-I çatlak ilerleme analiz kabiliyetlerinin Enerji, Havacılık, Enerji ve Savunma alanlarında karşılaşılan pratik ve karmaşık geometri içeren problemlere uygulanarak doğrulanması, karışık modlu yükler altında çatlak ilerleme tahminleri için yeni deneysel kabiliyetlerin geliştirilmesi, karışık modlu yükler altında çatlak ilerleme tahminleri için yeni analiz kabiliyetlerinin geliştirilmesi ve FCPAS ara yüzüne proje gelişmelerine istinaden ilave özellikler eklenerek güncellenmesi olarak özetlenebilir. Aşağıda, her bir ana grup için elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir.

4.1.1 FCPAS – AŞAMA 1 Kabiliyetlerinin Pratik Uygulamalarla Sağlaması

Bu çalışmada, Aşama 1 projesinde geliştirilen yöntemlerin, Enerji, Ulaştırma, Havacılık ve Savunma gibi teknolojik alanlarda karşılaşılan pratik ve daha karmaşık geometri içeren çatlak

ilerleme problemlerine uygulanması ve doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ilgili teknoloji alanlarında karşılaşılan kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin FCPAS ile doğru bir şekilde çözümlenerek, çatlak ilerleme ömrü ve profilleri açısından çatlak davranışının belirlenebileceğini göstermiştir.

4.1.2 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 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. Son olarak, üç-boyutlu test sistemleri üzerinde çalışmalar yapılarak literatürde bulunmayan yeni test sistemleri geliştirilmiş, elde edilen veriler ile iyileştirilmiş kırılma kriterleri oluşturulmuştur.

4.1.3 Üç Boyutlu Karışık Modlu Yükleme Altında Çatlak İlerleme Analizi Kabiliyeti ve Kriter 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, birçok kırılma ve çatlak ilerleme problemine uygulanarak, kırılma/kopma yükü, çatlak ilerleme ömrü ve çatlak ilerleme yüzey profilinin doğru bir şekilde tahmin edilebildiği gösterilmiştir.

4.1.4 FCPAS – Aşama 2 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Geliştirilmesi ve Güncellemeler

Kırılma ve çatlak ilerleme analizlerinin tutarlı ve daha verimli bir şekilde yapılabilmesi amacıyla, kullanılan alt programlar ve ana çözücü FRAC3D programını aynı ortam içerisinde toplayan FCPAS ara yüz geliştirilmesi çalışmalarına devam edilmiştir. Ara yüz, C# programlama dili kullanılarak proje kapsamındaki gelişmeleri de içerecek şekilde güncellenmiştir. Böylece, kullanıcının karışık modlu yükler altında daha kolay ve tutarlı analiz yapabilmesi sağlanmaktadır.

4.2. Gelecekte Yapılabilecek Bilimsel Çalışmalar

Aşama 1 ve Aşama 2 projelerinde, mod-I ve karışık modlu yükler altında bulunan çatlakların yorulma yükü altında ilerleme simülasyonlarının yapılabilmesi veya kritik yük değerlerinin belirlenmesi konularında ciddi gelişmeler elde edilmiş olup, bu çalışmalarda kullanılan alt programları kapsayan bir kullanıcı ara yüzü de geliştirilmiştir. Yapılan analizlerde, mod-I ve 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 hesaplama 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, özellikler havacılık ve enerji alanlarında kullanılan ve oldukça pahalı ileri teknoloji içeren ve değişken yüklere maruz kalan parçaların ihtimale dayalı ömür hesapları yapılarak, emniyetli işletme ve ekonomik sürdürülebilirlik için gerekli olan mekanik ömür tahminlerinde bulunulabilir. Bu çalışmaların, projenin gelecek bir aşaması (Aşama 3) olarak yapılması planlanmaktadır.

5. YAYINLAR, KONFERANSLAR VE SUNUMLAR

Proje kapsamında yapılan bilimsel çalışmalar ile değişik kategorilerde yayınlar ve sunumlar gerçekleştirilmiştir. Bu yayın ve sunumlar, Uluslararası Dergi Yayınları – SCI Kapsamında, Uluslararası Dergi Yayınları, Patent Başvurusu, Konferans Bildirileri, Sunum ve Seminerler, Tezler alt grupları ile aşağıda verilmektedir.

5.1 Uluslararası Dergi Yayınları – SCI Kapsamında

Dündar, H., Ayhan A.O., 2015 "Three-dimensional fracture and fatigue crack propagation analysis in structures with multiple cracks", *Computers & Structures* 158, 259-273.

Dündar, H, Ayhan A.O., 2016, "Non-planar crack growth analyses of multiple cracks in thin-walled structures", *International Journal of Fatigue*, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.02.09.

Demir, O., Ayhan, A.O., 2016, "A New Specimen for Mixed Mode-I/II Fracture Tests -Part 1: Modeling and Analyses", *Engineering Fracture Mechanics*, *Hakem Değerlendirmesinde*.

Ayhan, A.O., Demir, O., İriç, S., 2016, "A New Specimen for Mixed Mode-I/II Fracture Tests – Part 2: Experiments and Fracture Criterion Development", *Engineering Fracture Mechanics*, *Hakem Değerlendirmesinde*.

5.2 Uluslararası Dergi Yayınları

Dündar, H., Ayhan, A.O., 2016 "Multiple and non-planar crack propagation analyses in thin structures using FCPAS", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 35, 360-367.

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 Integrità Strutturale*, 35, 330-349.

Bozkurt, M., Ayhan, A.O., Yaren, M. F., Siriç, S., 2016, "Finite element modeling and experimental studies on mixed mode-I/III fracture specimens", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 35, 350-359.

Ayhan, A.O., Demir O.,. 2016, "Investigation of mixed mode-I/II fracture problems-Part 2: evaluation and development of mixed mode-I/II fracture criteria", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 35, 340-349.

5.3 Patent Başvurusu

Ayhan A.O., İriç S., Demir O., "Çatlak İçeren Numuneler İçin Mod-I/II/III Karışık Modlu Yükleme Tutucusu", 2016, Türk Patent Enstitüsü başvurusu için hazırlık aşamasında.

5.4 Konferans Bildirileri

Ayhan A.O. (Davetli Konuşmacı), "Fracture and Crack Propagation Analysis System", 10th International Fracture Conference, 2014, Kayseri, TÜRKİYE, 363-379.

Demir, O., Nart, E., Kurtiş, C., Ayhan, A.O., "Case Studies on Mode-I Fatigue Crack Propagation Using Fully Unstructured Finite Elements", 10th International Fracture Conference, 2014, Kayseri, TÜRKİYE, 47-58.

Derya, M., Ayhan, A.O., "Numerical Simulation of Three-Dimensional Mode-I Crack Propagation Using FCPAS: First Set of Practical Case Studies", 10th International Fracture Conference, 2014, Kayseri, TÜRKİYE, 18-27.

Dündar, H., Ayhan, A.O., "Finite Element Modeling of Growing Multiple Cracks Under Cyclic Loads", 10th International Fracture Conference, 2014, Kayseri, TÜRKİYE, 28-36.

Demir, O., Dündar, İriç, S., Ayhan, A.O., "Three-Dimensional Fracture Analyses of Compact Tension Shear Specimen Under In-Plane Mixed Mode Loading", 10th International Fracture Conference, 2014, Kayseri, TÜRKİYE, 37-46.

5.5 Sunum ve Seminerler

Ayhan A.O., “Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 2”, İTÜ Makine Fakültesi Teknoloji Seminerleri, Mart, 2016, İstanbul, TÜRKİYE.

5.6 Tezler

Dündar H., “FCPAS ile Üç Boyutlu Çoğul Çatlakların Kırılma Analizleri ve İlerleme Simülasyonları”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.

Derya M., “FCPAS ile Endüstriyel Problemlerdeki Çatlakların Kırılma ve İlerleme Simülasyonları”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (yazım aşamasında), 2016.

Kurt E., “Basınçlı Küresel Kaplarda Bulunan Eğik Üç-Boyutlu Çatlakların FCPAS ile Analizi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (yazım aşamasında), 2016.

Demir O., “Karışık Modlu Yükler Altında Bulunan Üç-Boyutlu Çatlakların Deneysel ve Sayısal Analizi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (yazım aşamasında), 2016.

Yukarıda verilen listede görüldüğü üzere, farklı kategorilerde birçok yayın yapılmış olup, SCI kapsamındaki uluslararası dergi yayınları çalışmalarına devam edilmektedir.

KAYNAKLAR

ANSYS Version 12.0. 2009. Ansys Inc., Canonsburg, PA, USA.

Aliha, M. R. M., Bahmani, A., Akhondi, S. 2015. "Numerical analysis of a new mixed mode I/III fracture test specimen". Engineering Fracture Mechanics, 134, 95-110.

Arora, P., Singh, P. K., Bhasin, V., Vaze, K. K., Ghosh, AK., Pukazhendhi, D. M., Gandhi, P., Raghava, G. 2011. "Predictions for fatigue crack growth life of cracked pipes and pipe welds using RMS SIF approach and experimental validation", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 88 (10), 384-394.

ASM Aerospace Specification Metals Inc.,
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024T4>, Son erişim tarihi: 2016.

ASTM International, "E399 – 12, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials". 2013.

ASTM International, "E647 – 13, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", 2014.

Awaji, H., Sato, S. 1978. "Combined mode fracture toughness measurement by the disk test". Journal of Engineering Materials and Technology, 100(2), 175-182.

Ayatollahi, M. R., Saboori, B. 2015. "A new fixture for fracture tests under mixed mode I/III loading". European Journal of Mechanics-A/Solids, 51, 67-76.

Ayhan, A. O., & Demir, O. 2016. "Investigation of mixed mode-I/II fracture problems-Part 2: evaluation and development of mixed mode-I/II fracture criteria". Frattura ed Integrità Strutturale, (35), 340.

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.

Boljanovic, S. Maksimovic, S. 2014. "Fatigue crack growth modeling of attachment lugs", International Journal of Fatigue, 58, 66-74.

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.

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.

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, 451-6, Milan, Italy.

Campbell, F. C., 2008. Sf. 238. Elements of metallurgy and engineering alloys. Ohio: ASM International.

Carpinteri, A., Paggi, M. 2007. "Are the PARIS' law parameters dependent on each other?", Atti del Congresso IGF19 Milano, 2-4.

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. Oakdale Engineering, Oakdale, 2015; PA 15071.

Demir, O., Siriç, S., Ayhan, A. O., Lekesiz, H. 2016. "Investigation of mixed mode-I/II fracture problems-Part 1: computational and experimental analyses". *Frattura ed Integrità Strutturale*, (35), 330.

Demir O., 2016, "Karışık Modlu Yükler Altında Bulunan Üç-Boyutlu Çatlakların Deneysel ve Sayısal Analizi", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (yazım aşamasında).

Derya M., 2016, "FCPAS ile Endüstriyel Problemlerdeki Çatlakların Kırılma ve İlerleme Simülasyonları", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (yazım aşamasında).

Desimone, H., Beretta, S. 2006. "Mechanisms of mixed mode fatigue crack propagation at rail butt-welds". *International journal of fatigue*, 28(5), 635-642.

Desmukh, N., Pandey R. K., Mukhopadhyay, A. K. 2005. "Influence of Scandium on The Kinetics of Fatigue Crack Growth in 7010 Al – Alloy", *International Conference on Fracture*.

Dündar H., 2015, "FCPAS ile Üç Boyutlu Çoğul Çatlakların Kırılma Analizleri ve İlerleme Simülasyonları", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

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.

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. 1921. "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.

Guagliano, M., Pau, M. 2007. "Analysis of internal cracks in railway wheels under experimentally determined pressure distributions". *Tribology International*, 40(7), 1147-1160.

- 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.
- Hakimi, A., Le Grogneq, P., & Hariri, S. 2008. "Numerical and analytical study of severity of cracks in cylindrical and spherical shells". *Engineering Fracture Mechanics*, 75(5), 1027-1044.
- 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.
- Irwin, G. R. 1997. "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate". *Spie Milestone series MS*, 137(167-170), 16.
- 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.
- Jeong, D. Y. 2005. "Mixed Mode Fatigue Crack Growth Using the Strain Energy Density Theory for Widespread Fatigue Damage", U.S. Department of Transportation, Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts 02142, USA.
- Jin, Y., Cai, P., Wen, W., Nagaumi, H., Xu, B., Zhang, Y., & Zhai, T. , 2015. The anisotropy of fatigue crack nucleation in an AA7075 T651 Al alloy plate. *Materials Science and Engineering: A*, 622, 7-15.
- 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.
- Judt, O. P., Ricoeur, A. 2015. "Crack growth simulation of multiple cracks systems applying remote contour interaction integrals", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 75, 78–88.
- 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.
- Kamat, S. V., Srinivas, M., Rao, P. R. 1998. "Mixed mode I/III fracture toughness of Armco iron", *Acta materialia*, 46(14), 4985-4992.
- Kikuchi, M., Wada, Y., Ohdama, C. 2012. "Effect of KIII on fatigue crack growth behavior". *Journal of Engineering Materials and Technology*, 134(4), 041009.

- 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.
- Kotsikos, G., Grasso, M. 2012. "Assessment of Fatigue Cracks in Rails", *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 48, 1395-1402.
- Kumar, A. M., Hirth, J. P., Hoagland, R., Feng, X. 1994. "A Suggested Test Procedure to Measure Mixed Mode I–III Fracture Toughness of Brittle Materials". *Journal of testing and evaluation*, 22(4), 327-334.
- Kurt E., 2016, "Basıncılı Küresel Kaplarda Bulunan Eğik Üç-Boyutlu Çatlakların FCPAS ile Analizi", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (yazım aşamasında).
- 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.
- Leek, T. H., Howard, I. C. 1996. "An Examination of Methods of Assessing Interacting Surface Cracks by Comparison with Experimental Data", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 68 (2), 181-201.
- 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.
- Microsoft Office 2013, Excel Version 15.0, Microsoft
- 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.
- 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., & Raju, I. S. 1986. "Stress-intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads". *Computational methods in the mechanics of fracture*, 2, 311-334.

- 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.
- Nishimura, T., Noguchi, Y., Uchimoto, T. 1990. "Damage Tolerance Analysis of Multiple-Site Cracks Emanating from Hole Array", *Journal of Testing and Evaluation*, 18 (6), 401-407.
- Nuismer, R. J. 1975. "An energy release rate criterion for mixed mode fracture". *International journal of fracture*, 11(2), 245-250.
- 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.
- Park, C. Y., Grandt Jr., A. F., Suh, J. J. 2006. "Stress intensity factors for surface cracks at countersunk holes", *Engineering Fracture Mechanics*, 73 (13), 1878–1898.
- Peng, D., Jones, R., Constable, T. 2012. "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. 2012. "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. 2000. "Linear elastic fracture mechanics for engineers: theory and applications". *Computational Mechanics*.
- Pook, L.P. 1980. In: *Fracture and Fatigue: Elasto-Plasticity, Thin Sheet and Micromechanism Problems*, pp. 143-153, Radon, J.C. (Ed.) Pergamon Press, Oxford.
- Pook LP. 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. 1989; 247-263.
- 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.
- 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.

Rayes, M, Darwish, S. 2006. "Effect of Heat Treatment on Fatigue and Toughness Properties of Steel", King Saud University College of Engineering Research Center.

Richard, H.A., 1984. Some theoretical and experimental aspects of mixed mode fractures. In: Valluri SR et al., editors. *Advances in fracture research*. Oxford: Pergamon Press. p. 3337-44.

Richard HA. Fracture mechanical predictions for cracks with superimposed normal and shear loading. Düsseldorf: VDI-Verlag [in German] 1985.

Richard, H.A. 1987. "In: Structural failure, product liability and technical insurance", Rossmanith (Ed.), Inderscience Enterprises Ltd., Genf.

Richard, H. A. 1989. "Specimens for investigating biaxial fracture and fatigue processes", *Biaxial and Multiaxial Fatigue*. Brown W, Miller K. J. London.

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., 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., Fulland, M. 2013. *Fatigue Crack Paths under Complex Loading*". FCP2003.

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. 2003. "Theoretical crack path determination". *Int Conf on Fatigue Crack Paths*, Parma (Italy).

Richard, H. A., Schramm, B., Schirmeisen, N. H. 2014. "Cracks on mixed mode loading—theories, experiments, simulations". *International Journal of Fatigue*, 62, 93-103.

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.

Rigby, R. Aliabadi, M. H. 1997. "Stress intensity factors for cracks at attachment lugs", *Engineering Failure Analysis*, 4 (2), 133-146.

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.

Rollett, A. D., Campman, R., & Saylor, D., 2006. Three dimensional microstructures: statistical analysis of second phase particles in AA7075-T651. In *Materials science forum* (Vol. 519, pp. 1-10). Trans Tech Publications.

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. 2011. "Investigations on fatigue crack growth under variable amplitude loading in wheelset axles". *Engineering Fracture Mechanics*, 78(5), 754-763.
- 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.
- Schütze, M., Wieser, D., & Bender, R. , 2010. *Corrosion resistance of aluminium and aluminium alloys*. Frankfurt: John Wiley & Sons.
- 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.
- 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.
- 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.
- Seifi, R., Omidvar, N. 2013. "Fatigue crack growth under mixed mode I+ III loading", *Marine Structures*, 34, 1-15.
- 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.
- Sih, G. C. 2012. "Mechanics of fracture initiation and propagation: surface and volume energy density applied as failure criterion" (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
- 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 Alloy Cast Steels at Room or Low Climate Temperature". Carbon and Low Alloy Steel Technical Research Committee Steel Founders' Society of America, (94A).

Tan J. T., Chen, B. K. 2013. "A new method for modelling the coalescence and growth of two coplanar short cracks of varying lengths in AA7050-T7451 aluminium alloy", *International Journal of Fatigue*, 49, 73–80.

Tanaka, K. 1974. "Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis". *Engineering Fracture Mechanics*, 6(3), 493-507.

Tiong, U. H., Jones, R. 2009. "Damage tolerance analysis of a helicopter component", *International Journal of Fatigue*, 31 (6), 1046–1053.

TUSAŞ-TAI (2014)

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 MA, Yan J, Cheng CS, 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.

Yan, X. 2007. "Automated simulation of fatigue crack propagation for two-dimensional linear elastic fracture mechanics problems by boundary element method", *Engineering Fracture Mechanics*, 74 (14), 2225–2246.

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>

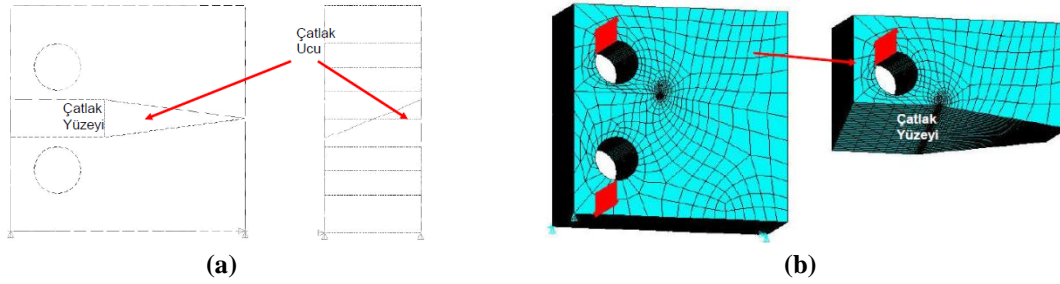
Zhao, J., Guo, W. 2012. "Three-parameter $K-T-T_z$ characterization of the crack-tip fields in compact-tension-shear specimens". *Engineering Fracture Mechanics*, 92, 72-88.

Zhuang, W., Molent, L. 2010. "Analytical study of fatigue crack growth in AA7050 notched specimens under spectrum loading". *Engineering Fracture Mechanics*, 77(11), 1884-1895.

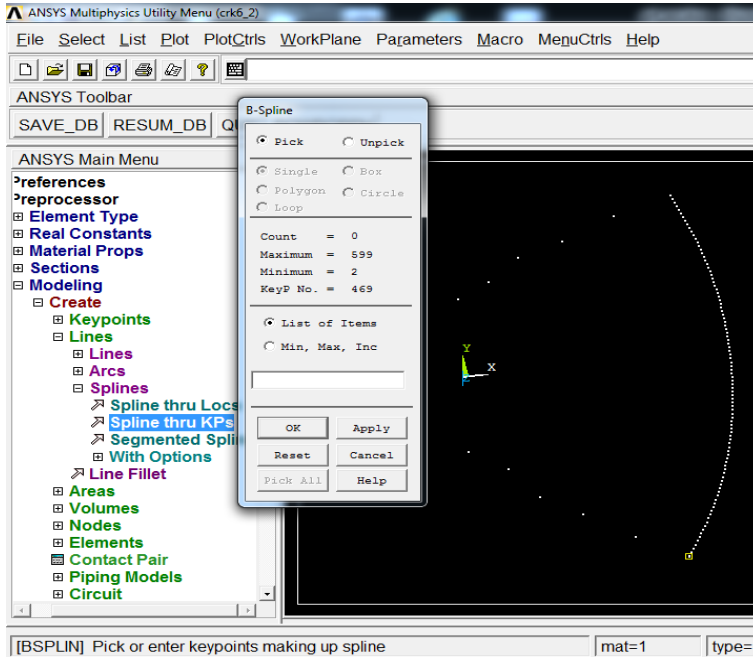
Zhuang, W., Barter, S., Molent, L. 2007. "Flight-by-flight fatigue crack growth life assessment". *International Journal of Fatigue*, 29(9), 1647-1657.

DÜZLEMSEL OLMAYAN BİR ŞEKİLDE ARTIRIMLI OLARAK İLERLETİLEN ÇATLAĞIN MODELLEME ve FRAC3D ANALİZ İŞLEM ADIMLARI

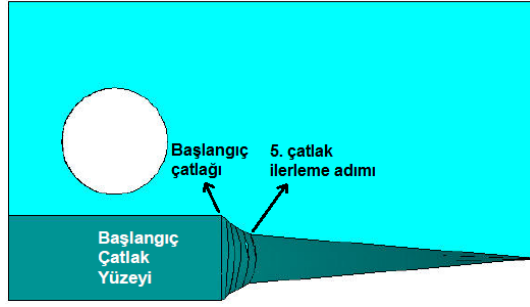
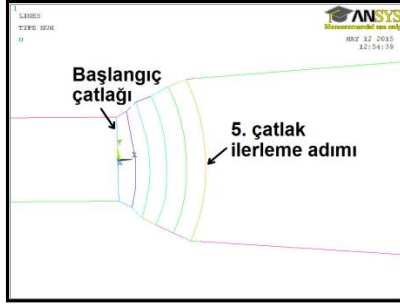
Basit bir CT modeline eğik (eğim düzlem dışı yöndedir) bir çatlak yerleştirilerek pim deliklerinden açılma modunda yükleme yapılarak kırılma ve çatlak ilerleme analizi gerçekleştirilmiştir. 5. çatlak ilerleme adımından 6. çatlak ilerleme profilinin elde edilmesinde modelleme, FRAC3D kullanılarak gerçekleştirilen kırılma ve çatlak ilerleme analizi ve bir sonraki profilin tahmini için izlenen yöntemlerden işlem adımlarıyla birlikte grafiksel olarak bahsedilmiştir. Problem tanımı iki ve üç boyutlu görsel olarak Şekil 1 'de verilmiştir.



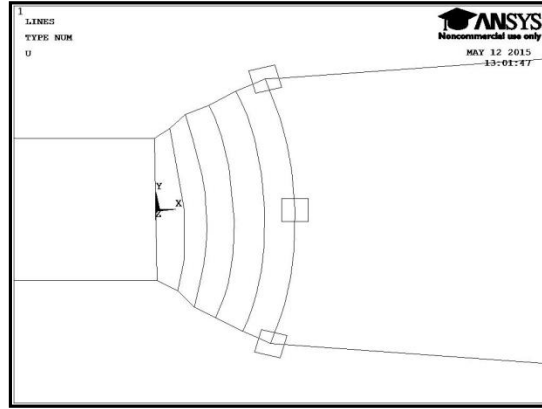
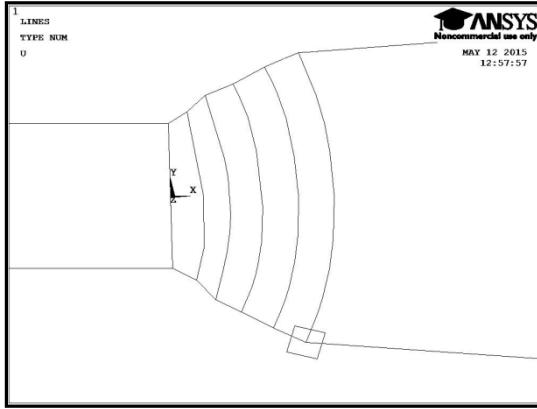
Şekil 1: Eğik çatlak yerleştirilmiş olan CT modelinin (a) önden ve yandan görünüşü, (b) perspektif görünümü.



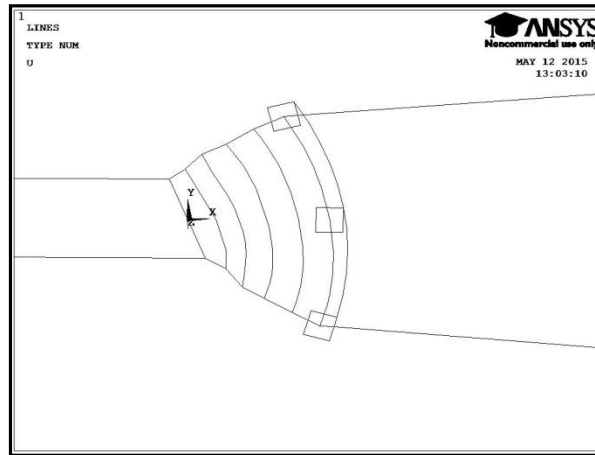
Tahmin edilen 5. çatlak ilerleme profilini oluşturan 'keypoint' ler (bu çatlak adımı 100 adet 'keypoint' ten oluşmakta) ANSYS' te oluşturularak, "Create-Spline-Spline thru KPs" menüsü ile bu 100 adet keypoint tek tek seçilerek 5. çatlak ilerleme profili 'spline' olarak oluşturulur. Bu problem için malzeme özelliği olarak Elastisite modülü 72000MPa ve poisson oranı 0.33 olarak alınmıştır. "ET,1,95" ve "ET,2,93" komutları ile eleman tipleri tanımlanır.



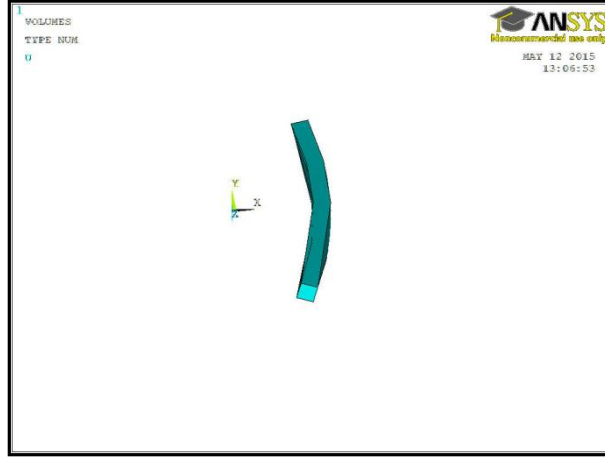
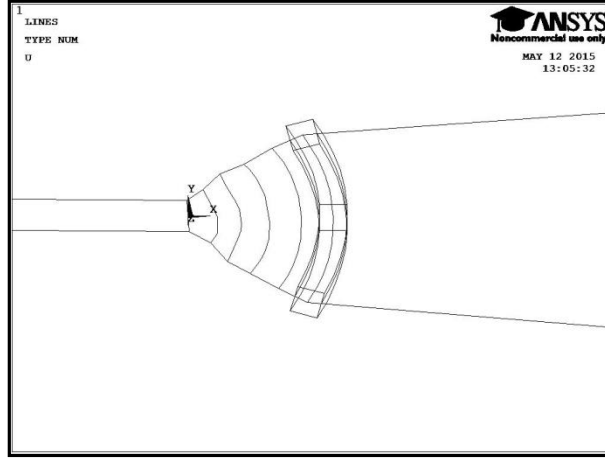
Çatlak ucu civarında 'refine' mesh oluşturmak ve bunu hacmin tamamından bağımsız gerçekleştirmek için, çatlak ucu civarında hacim oluşturmak gerekmektedir. Bu oluşturulan hacimde 'mesh' in istediğimiz şekilde süpürülebilmesini sağlamak için, çatlak ucu civarında ve ortasında karesel 'line' lar oluşturulur.



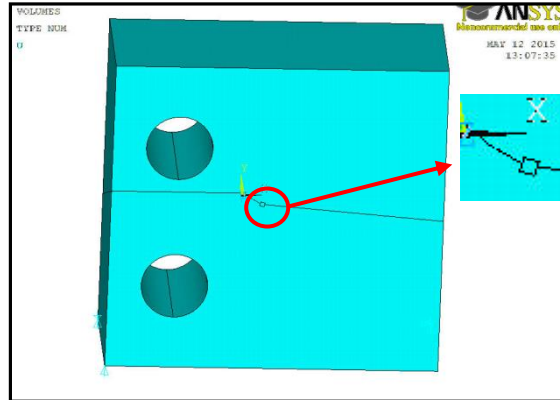
Karelerin köşeleri, "Create-Spline-Spline thru KPs" menüsü ile birleştirilir.



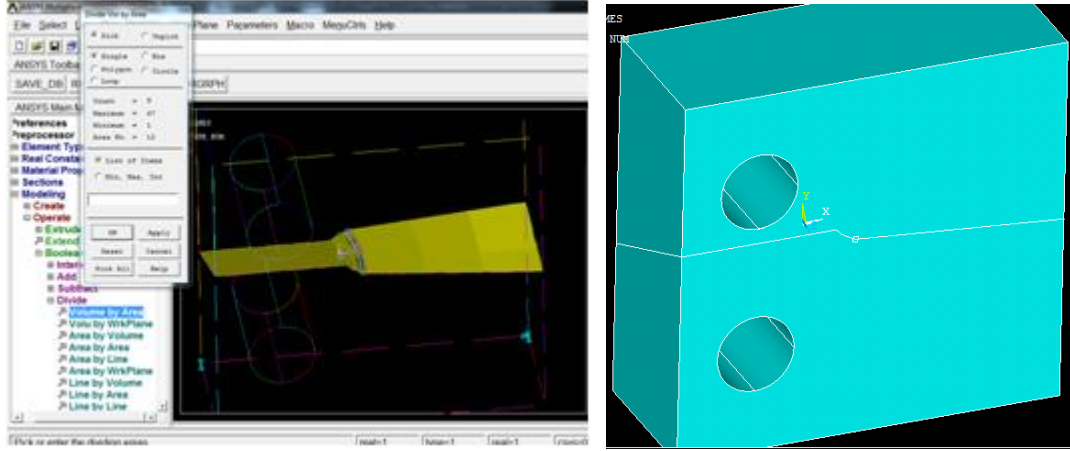
Çatlak ucu civarında yer alan kareleri oluşturan ve bu kareleri birleştiren 'spline' lar kullanılarak alanlar oluşturulur. Daha sonra bu alanlar "Create-Arbitrary-By Areas" menüsü ile hacim haline getirilir.



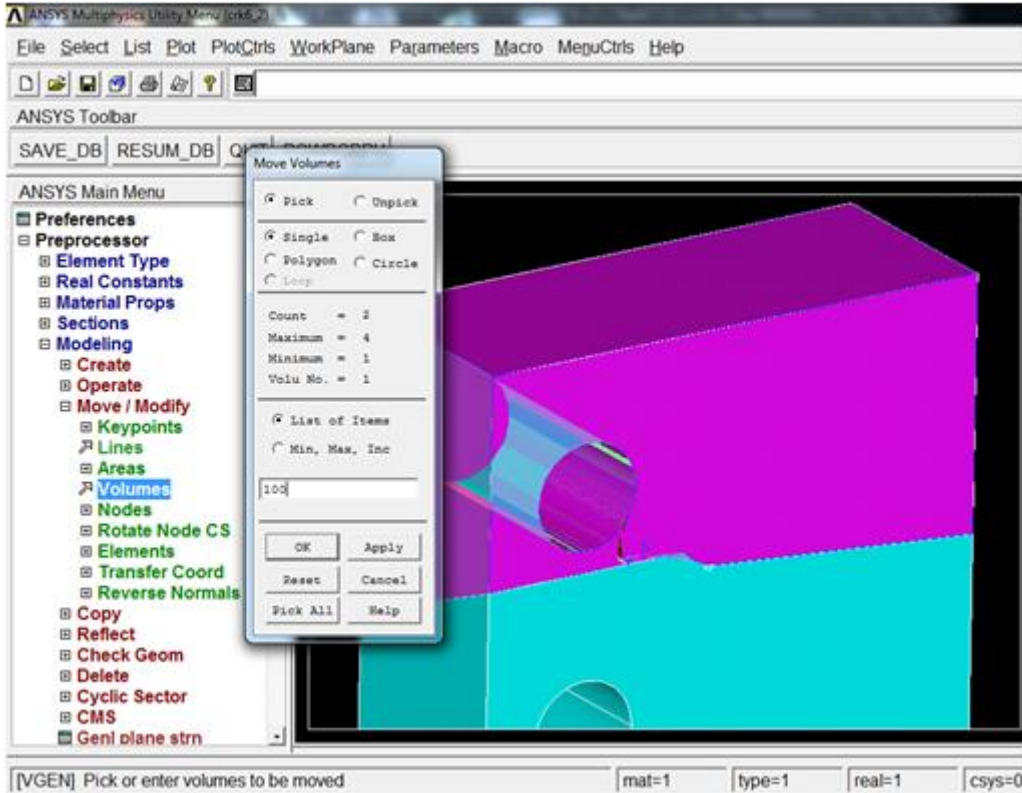
"Operate-Subtract- With Options- Volumes" menüsü tıklanarak oluşturulan hacmin dışındaki hacim seçilir "Ok" tıklanır daha sonra oluşturulan hacim seçilerek "Ok" tıklanır ve "Subtracted vols will be Kept" olacak şekilde 'Substract' işlemi gerçekleştirilir.



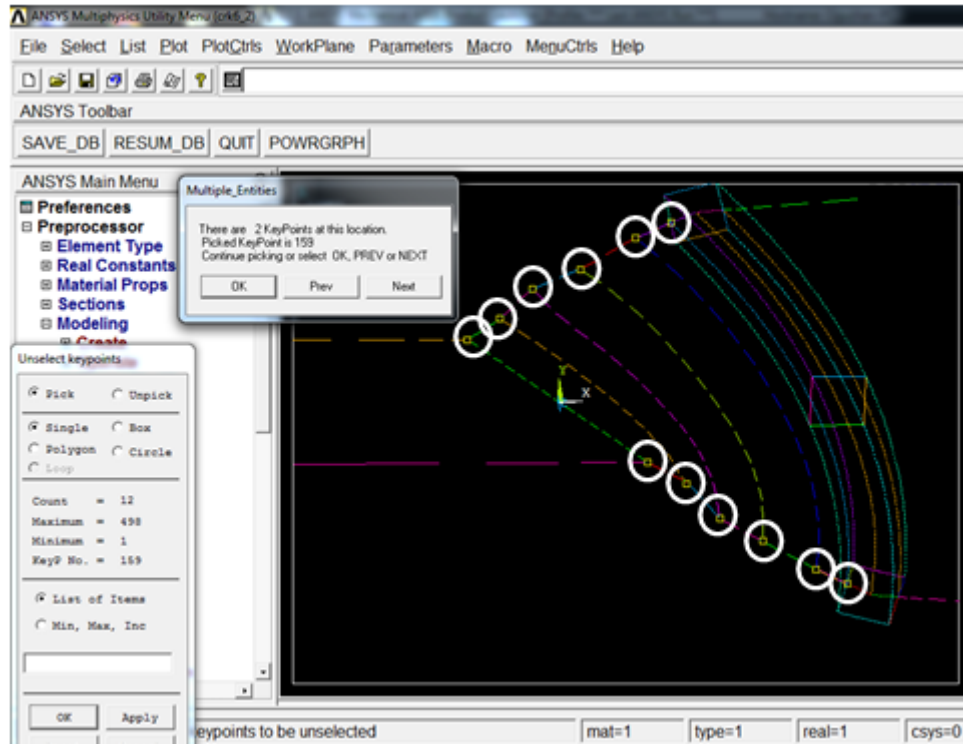
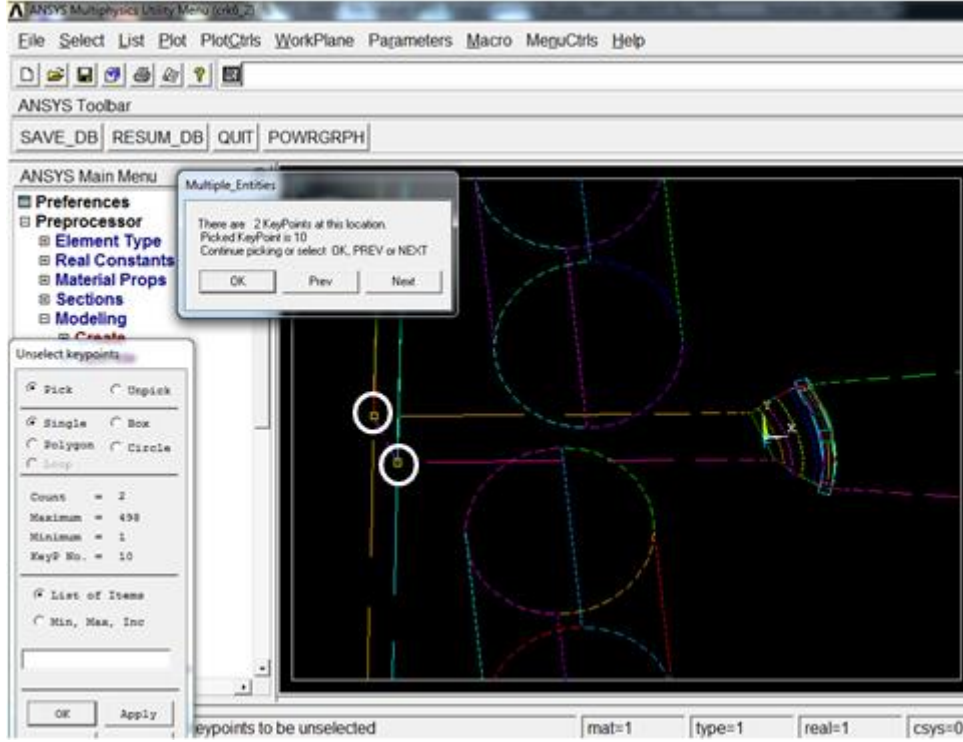
"Operate-Divide-Volume by Area" menüsü ile iki hacim çatlak yüzeyleri ve çatlağın uç noktalarını birleştiren yüzey ile ayrılır.



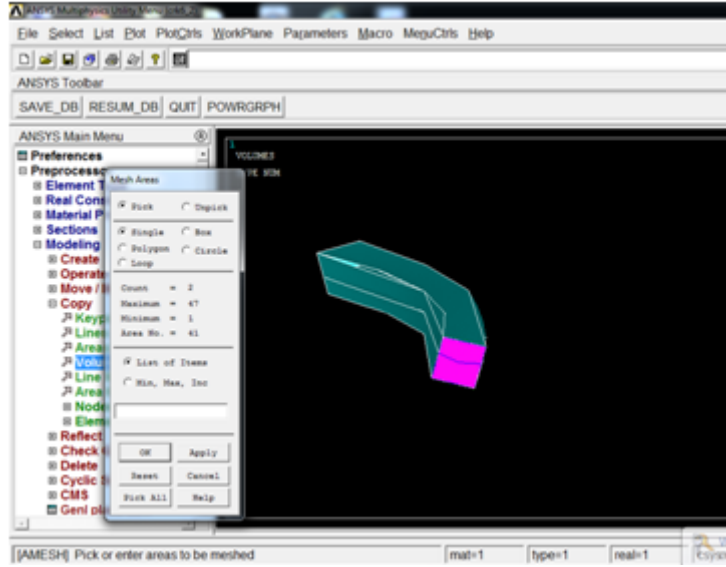
İki ayrıık çatlak yüzeyi oluşturmak için üst kısımda kalan hacimler seçilerek ile belirli bir mesafeye taşınıp tekrar önceki konumuna "Modeling-Move/Modify-Volumes" menüsü tekrar kullanılarak geri getirilir ve bu şekilde alt ve üst yüzey çatlakları oluşturacak yüzeyler elde edilmiş olur.



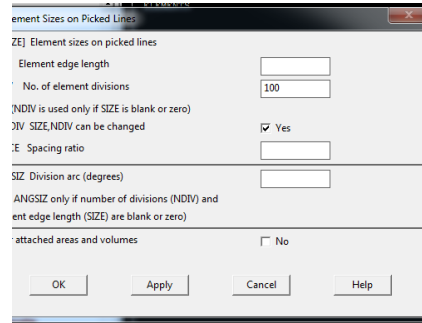
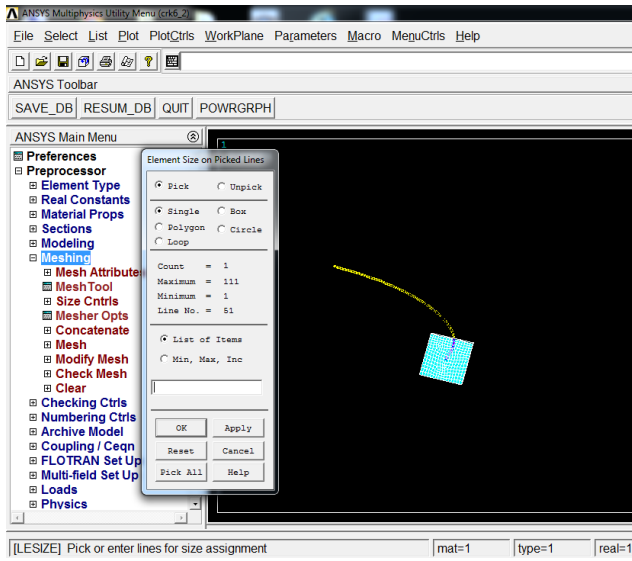
Çatlak yüzeylerinin tanımlanabilmesi için "*ksel,u,p*" komutu ile çatlak yüzeylerini oluşturan 'keypoint' ler (çatlak ucundaki 'keypoint' ler hariç) seçilerek bunlar dışında kalan 'keypoint' ler "*Nummrg, kp*" komutu ile birleştirilir ve çatlak oluşturulan yüzeyler tanımlanmış olur.



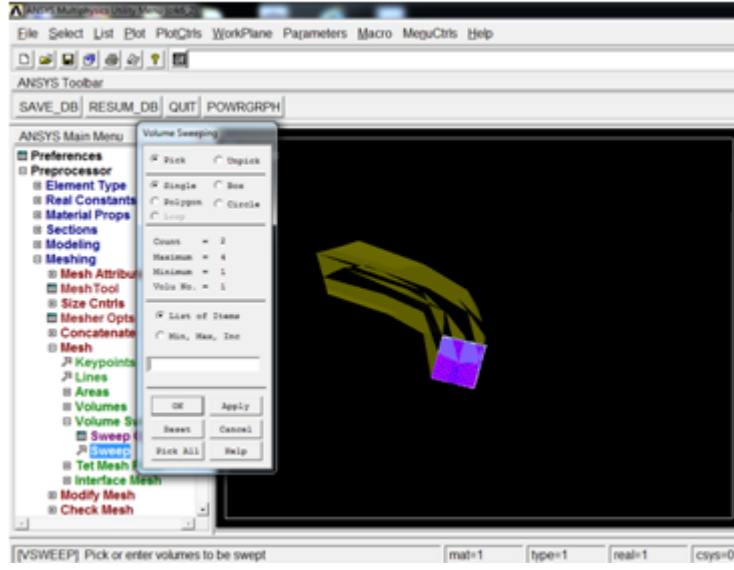
"Amesh,p" komutu ile çatlak ucu kenarında yer alan alanda iki boyutlu 'mesh' oluşturulur. İnce 'mesh' oluşturmak için alan üzerinde eleman boyutu tanımlanabilir.



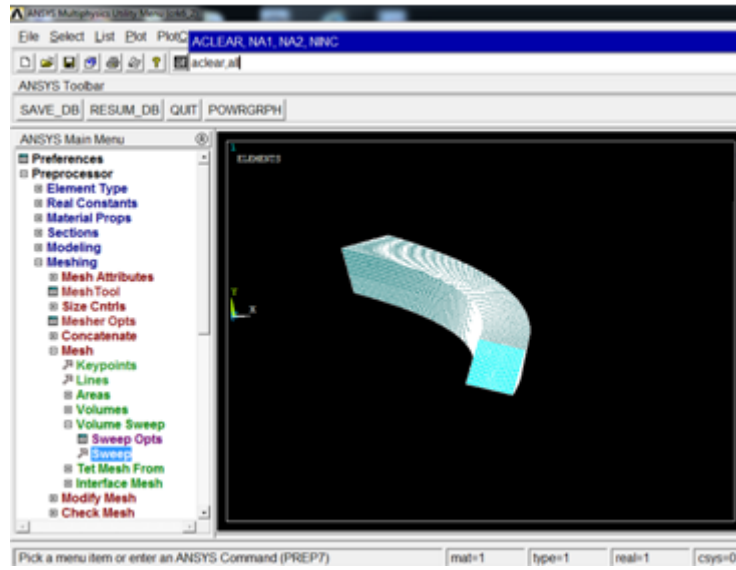
Alan 'mesh' ini istediğimiz sıklık ve eşit aralıkta süpürerek üç boyutlu 'mesh' oluşturmak için çatlak ucuna eleman boyutu tanımlamak gerekmektedir. "lesize,p" komutu ile çatlak ucu 'line' seçilerek "No. of element divisions" kısmına istenen aralık girilir (bu problem için çatlak ucunda 100 adet eleman olması istendiği için 100 değeri girildi).



"Meshing-Mesh-Volume Sweeping-Sweep" menüsü ile oluşturulan hacim seçilerek üç boyutlu mesh oluşturulmaktadır.

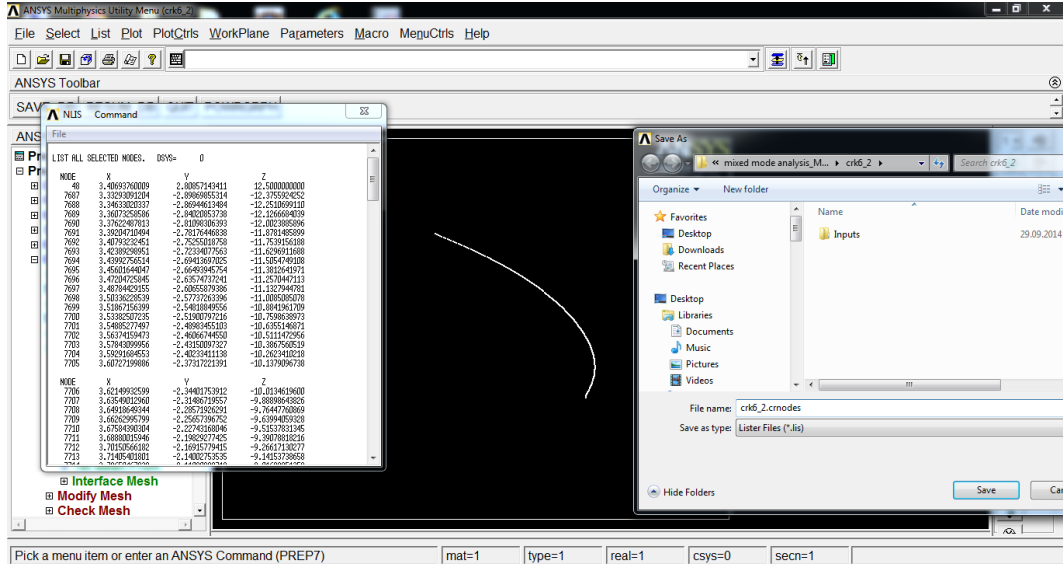
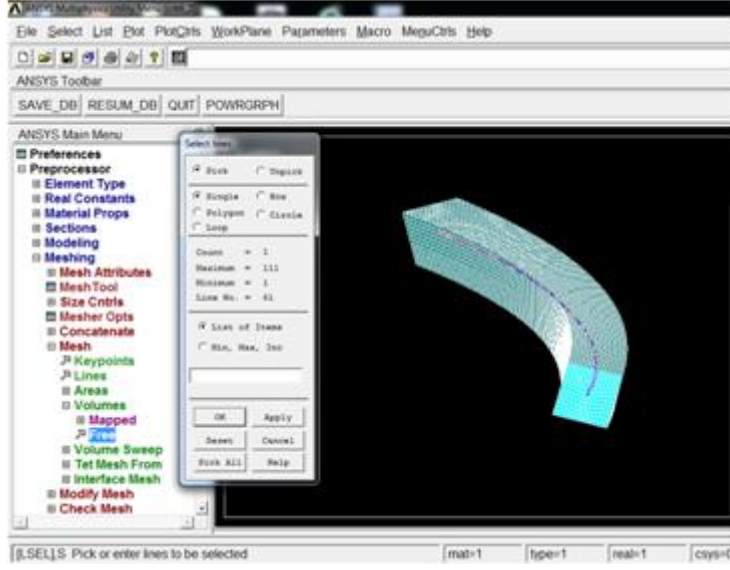


Ardından "*aclear,all*" komutu girilerek iki boyutlu alan 'mesh' leri silinmektedir.



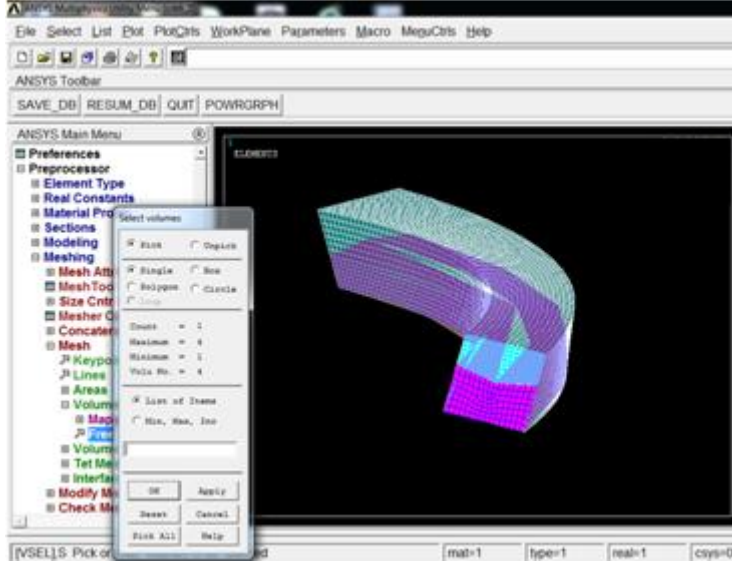
Çatlak ucu civarı için istenen 'refine mesh' oluşturulduktan sonra, FRAC3D' ye çatlak ucu bilgilerinin listeler halinde aktarılması için, ANSYS' ten alınan çatlak ucu ile ilgili "element" ve "node" listelerini içeren bilgilerin, FRAC3D koduna uygun uzantılarda listelenerek FRAC3D kodu için kullanılmak üzere kaydedilmesi gerekmektedir.

"*lsel,,p*" komutu ile çatlak ucu 'line' seçilir ve "*nsll,,1*" komutu, ardından "*nlis,,,,coord*" komutu tıklanarak çatlak ucunda yer alan 'node' lar listelenmektedir. Bu liste "farklı kaydet" seçeneği ile "calismaismi.cnodes" uzantısı ile çalışmanın bulunduğu klasöre kaydedilir.

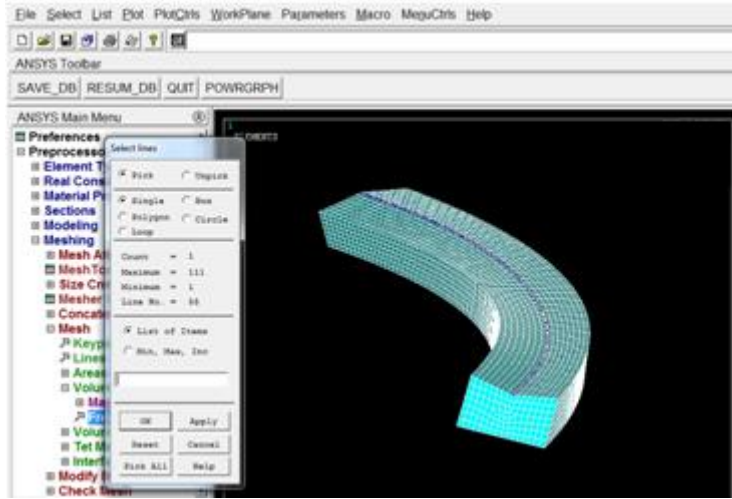


FRAC3D çatlak ucunun altında ve çatlak yüzeyinde bulunan elemanların listesini kullanmaktadır. Bununla ilgili detaylı açıklama "FCPAS_Tutorial_v1.0" eğitim dökümanının "Appendix A Definition of Crack in FRAC3D" başlıklı bölümünde yapılmış olup burada da kısaca bahsedilmiştir. Çatlağın ilerleme doğrultusu, x' eksenini olarak kabul edilerek, çatlak ucu boyunca sıralanan elemanların koordinatlarının, ANSYS global eksen takımına göre artış gösteren eksenini (bu örnek için çatlak ucu boyunca elemanların koordinatları ANSYS global eksen takımına göre arka yüzeyden ön yüzeye doğru artış göstermektedir) z' eksenini olarak kabul edilmektedir. Bu iki eksen takımına göre sağ el kuralı uygulanarak olması gereken y' eksenini belirlenmekte ve çatlak ucunun negatif y' eksenini doğrultusunda ve çatlak yüzeyinin sınırında bulunan elemanlar seçilerek listelenmektedir.

Bu problem için çatlak ucunun altında bulunan 'volume' "*vsel,,p*" komutu ile seçilir ve "*eslv*" "*eplo*t" komutları tıklanarak alt hacimde bulunan elemanlar görüntülenir.

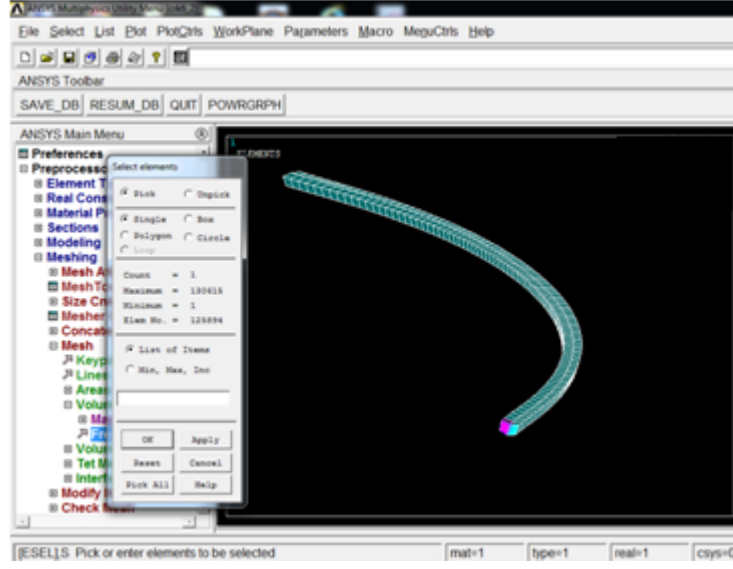


Çatlak ucu "*lsl,,p*" komutu ile seçilir

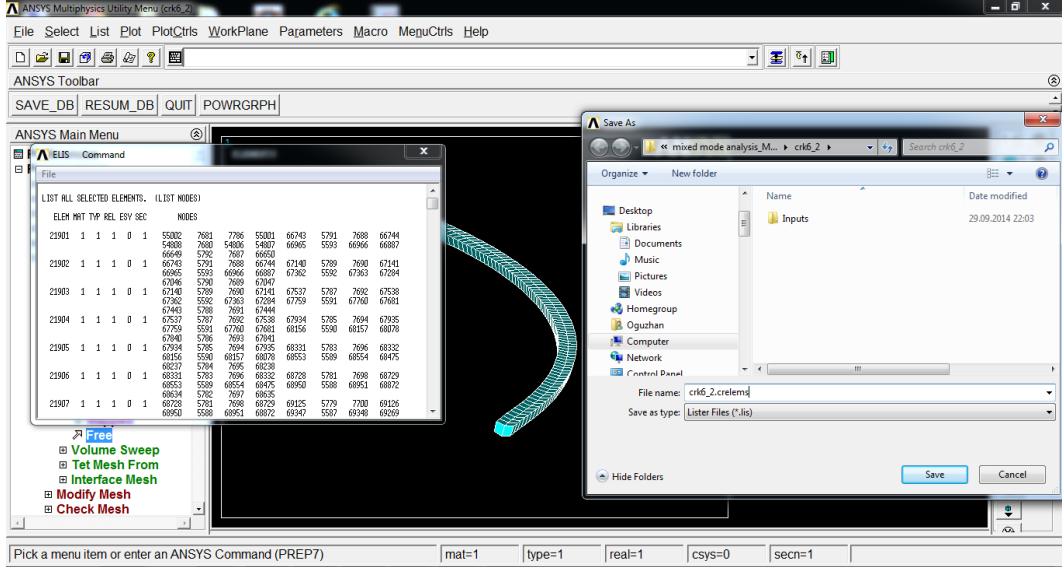


"*nsll*" , "*esln,r*" , "*eplo*t" komutları sırası ile girilerek çatlak ucunun altında yer alan elemanlar görüntülenmiş olur. FRAC3D çatlak ucunun altında ve çatlak yüzeyinde bulunan elemanları kullandığı için, çatlak yüzeyinin olduğu kısımda bulunan elemanların (yani sol kısımda sıralanan elemanlar) tek tek seçilerek listelenmesi gerekmektedir.

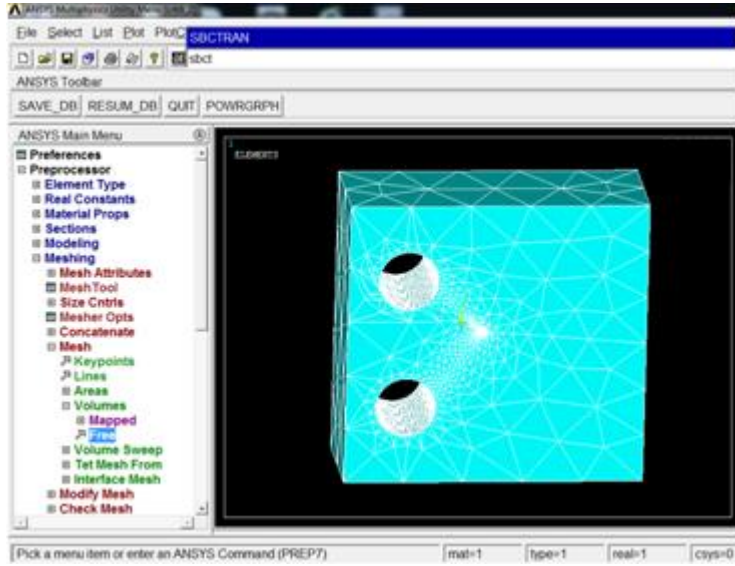
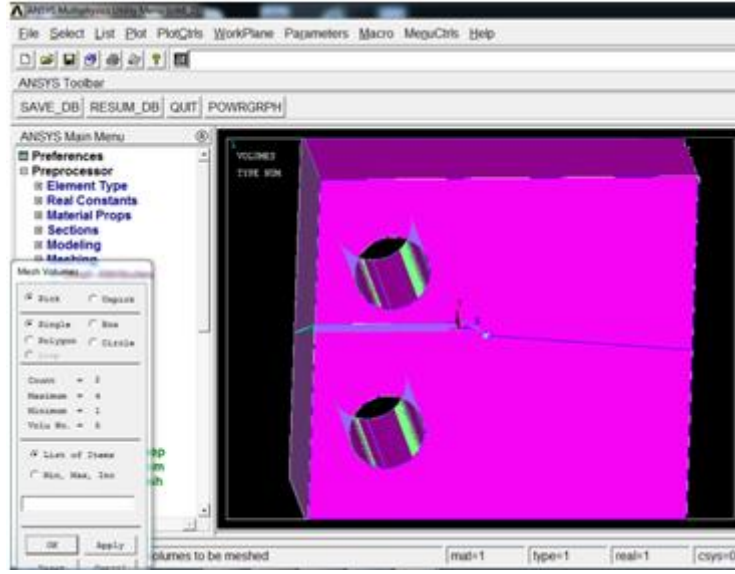
"Esel,,p" komutu ile 100 adet eleman tek tek seçilir.



Seçme işlemi tamamlandıktan sonra "eplot" komutu ile bu seçili elemanlar görüntülenerek doğru elemanların seçili olduğundan emin olduktan sonra "elis" komutu ile bu elemanlar listelenir ve bu liste "farklı kaydet" seçeneği ile "calismaismi.crelems" uzantısı ile çalışmanın bulunduğu klasöre kaydedilir.



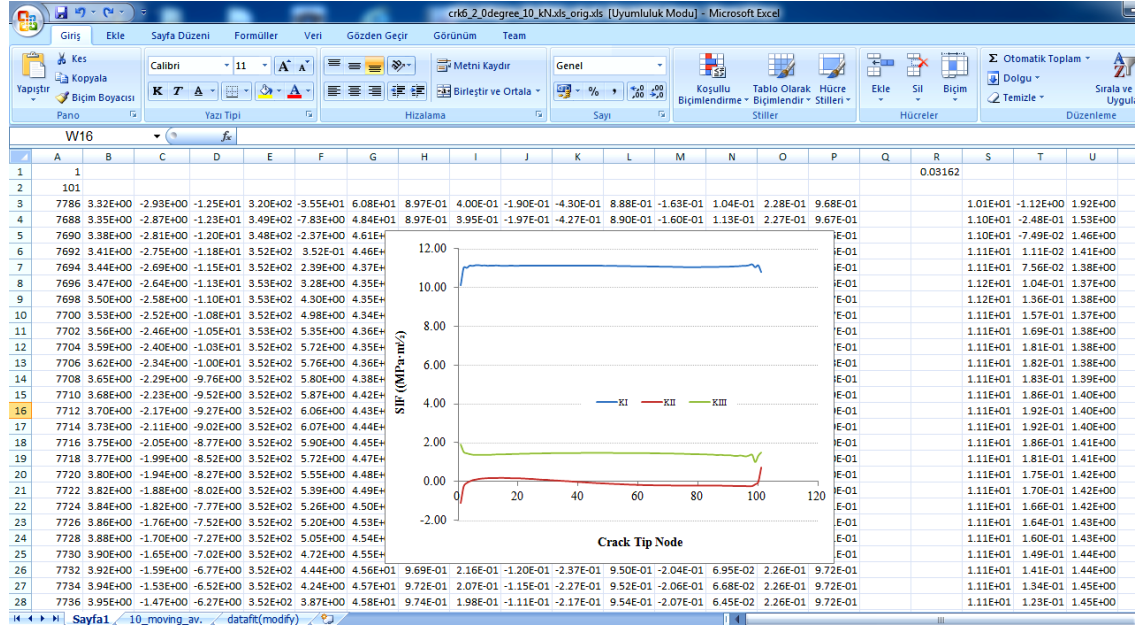
Çatlak ucu civarı 'mesh' işlemi tamamlandıktan ve FRAC3D için gerekli çatlak ucu bilgileri kaydedildikten sonra çatlak ucu civarı dışında kalan hacim 'mesh' lenir. "Mesh-Volumes-Free" menüsü ile çatlak ucu bölgesi dışında kalan 'volume' seçilerek üç boyutlu 'mesh' oluşturulur.



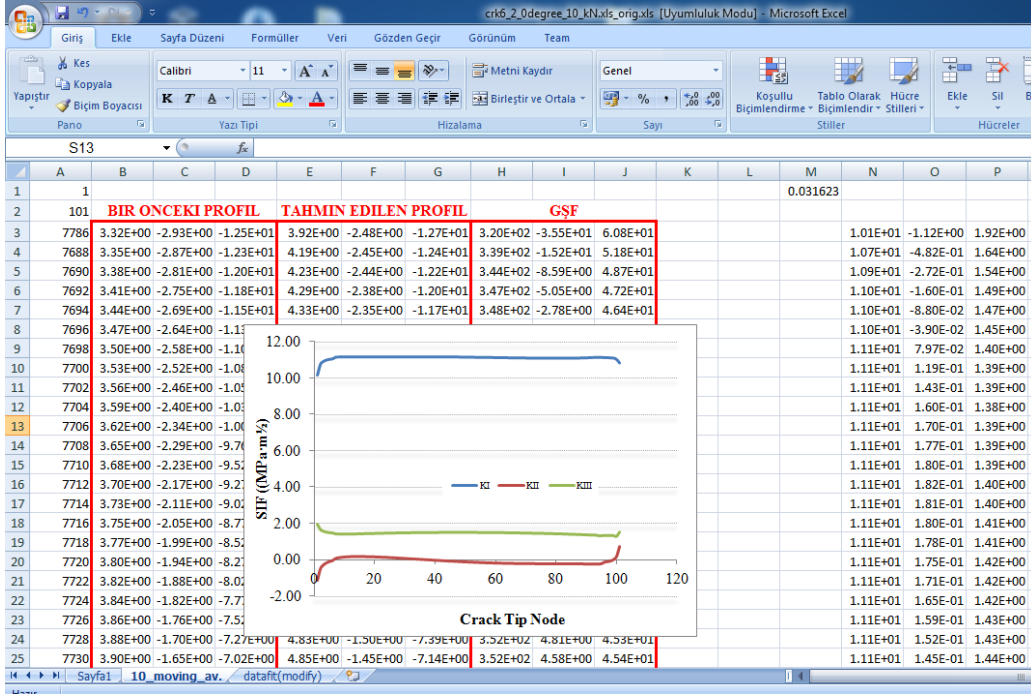
Gerekli yük ve sınır şartları girildikten sonra *"allsel"* *"eplot"* komutlarının ardından *"sbctran"* komutu girilerek katı modelin yük ve sınır şartları sonlu eleman modeline aktarılır ve *"Save"* komutu ile çalışma kaydedilir. Ardından *"modmsh,deta"* *"emid,add"* komutları tıklanır.

Son olarak sonlu eleman modelinin eleman, node listeleri, yük ve sınır şartları FRAC3D kodu için listelemek gerekmektedir. *"elis"* komutu girilerek modelin tüm elemanları listelerin ve 'farklı kaydet' seçeneği ile *"calismaismi.elis"* uzantısı ile çalışmanın bulunduğu klasöre kaydedilir. *"nwrite,calismaismi.node"* komutu girilerek modelin tüm 'node' ları çalışma klasörüne kaydedilmiş olur. *"flis"* komutu girilerek 'farklı kaydet' seçeneği ile *"calismaismi.flis"* uzantısı ile modele uygulanan yükler çalışmanın bulunduğu klasöre kaydedilir. Modele uygulanan sınır şartları ise *"dlis"* komutu girilerek 'farklı kaydet' seçeneği ile *"calismaismi.dlis"* uzantısı ile çalışmanın bulunduğu klasöre kaydedilir.

Böylece FRAC3D kodu için model ile ilgili gerekli olan dosyalar listelenmiş olmaktadır. Bu dosyalar FRAC3D çözücüsünde kullanılarak kırılma analizi gerçekleştirilmektedir. Kırılma analizi sonrası elde edilen '.prop1' uzantılı dosyada yer alan 'KI' , 'KII' ve 'KIII' gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerleri excel' de çizdirilerek çatlak ucu boyunca GŞF değişimleri aşağıdaki şekilde olduğu gibi kontrol edilmektedir.



Daha sonra bir sonraki çatlak profili tahmini için 'crk_propagation_smooth.exe' dosyası kullanılmaktadır ve bu 'exe' dosyasının çalıştırılabilmesi için, Paris-Erdoğan denklemine kullanılan malzeme sabitleri 'C' ve 'n' değerleri ile çatlak ilerleme oranı Δa değerlerini içeren '.matrop' uzantılı dosyayı oluşturmak gerekmektedir. Bu dosya oluşturulduktan sonra 'crk_propagation_smooth.exe' dosyası çalıştırılır ve elde edilen '.prop2' uzantılı dosya excel' de açılmaktadır. 'prop.2' uzantılı dosyanın içinde yer alan 10 sütun şu bilgileri içermektedir. İlk sütun 'node' numaralarını temsil etmektedir. Sonraki üç sütun bir önceki çatlak profilinin koordinatlarını içermektedir. Onu takip eden üç sütun bir sonraki yani tahmin edilen çatlak profilinin koordinatlarını içermektedir. Son üç sütun ise GŞF değerlerinin 'smooth' edilmiş halinin değerlerini vermektedir. Bu değerler çizdirilerek bir önceki GŞF grafiği ile kıyaslanarak hangi oranda 'smooth' edildiği gözlemlenebilmektedir.



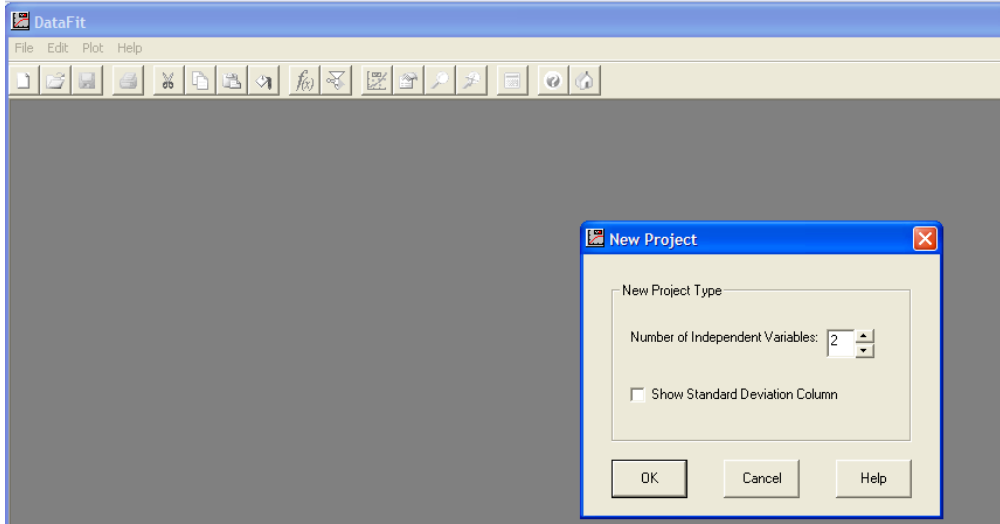
Çatlak ucunun yüzeye yakın kısımlarında GŞF değerleri sonsuza gittiği için, tahmin edilen çatlak ucu profilinin yüzey kısımlarındaki 'node' ların koordinatlarının düzenlenmesi gerekmektedir. Örneğin bu problem için ön ve arka yüzeydeki ikişer 'node' yani excel' de tahmin edilen çatlak profil kordinatlarının yer aldığı sütunların en üst ve en altındaki ikişer 'node' hareketli ortalama kuralına göre tekrar düzenlenmektedir.

	E	F	G
X	4.15E+00	-2.53E+00	-1.27E+01
Y	4.20E+00	-2.48E+00	-1.25E+01
Z	4.23E+00	-2.44E+00	-1.22E+01
	4.29E+00	-2.38E+00	-1.20E+01
	4.33E+00	-2.35E+00	-1.17E+01
	4.38E+00	-2.30E+00	-1.15E+01
	4.41E+00	-2.25E+00	-1.12E+01
	4.44E+00	-2.20E+00	-1.09E+01
	4.48E+00	-2.15E+00	-1.07E+01
	4.51E+00	-2.11E+00	-1.04E+01
	4.54E+00	-2.05E+00	-1.02E+01
	4.57E+00	-2.00E+00	-9.93E+00
	4.61E+00	-1.95E+00	-9.68E+00
	4.63E+00	-1.90E+00	-9.42E+00
	4.66E+00	-1.85E+00	-9.17E+00
	4.69E+00	-1.80E+00	-8.92E+00
	4.71E+00	-1.75E+00	-8.66E+00
	4.74E+00	-1.70E+00	-8.41E+00
	4.76E+00	-1.65E+00	-8.15E+00
	4.79E+00	-1.60E+00	-7.90E+00
	4.81E+00	-1.55E+00	-7.64E+00

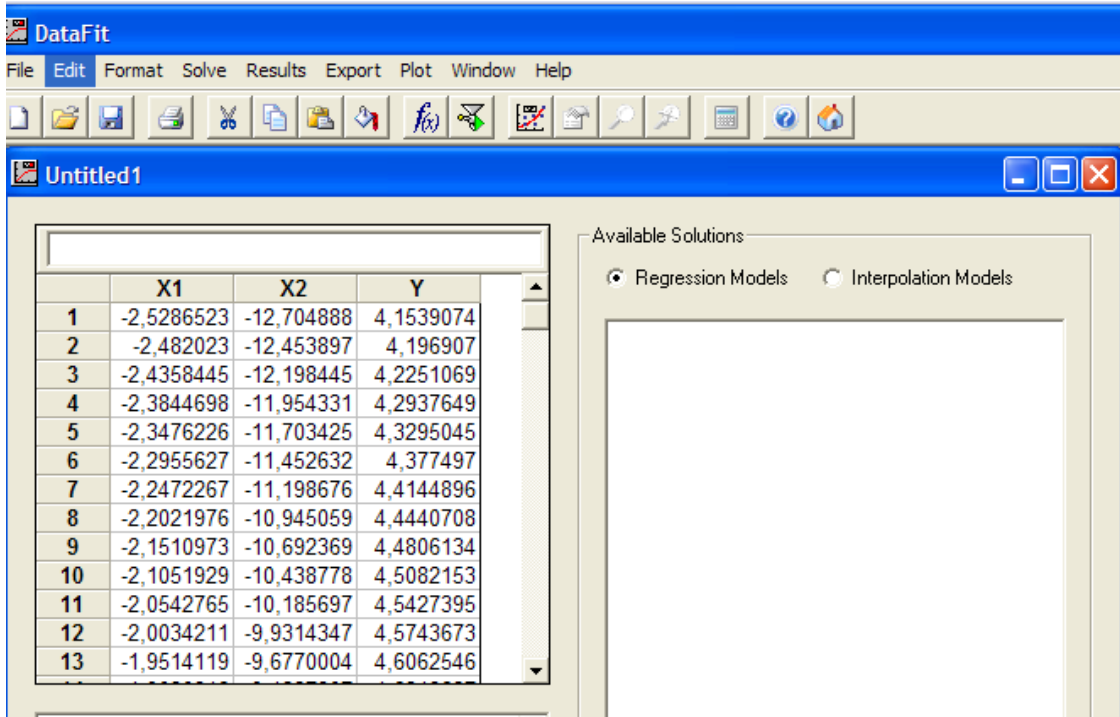
Daha sonra tahmin edilen bir sonraki çatlak ucu profili için DataFit programı kullanılarak üç eksen için de ayrı ayrı eğri uydurulması gerekmektedir.

İlk olarak çatlağın ilerleme eksenini için eğri uydurulurken gerçekleştirilen işlemlerden aşamalar haline bahsedilmiştir.

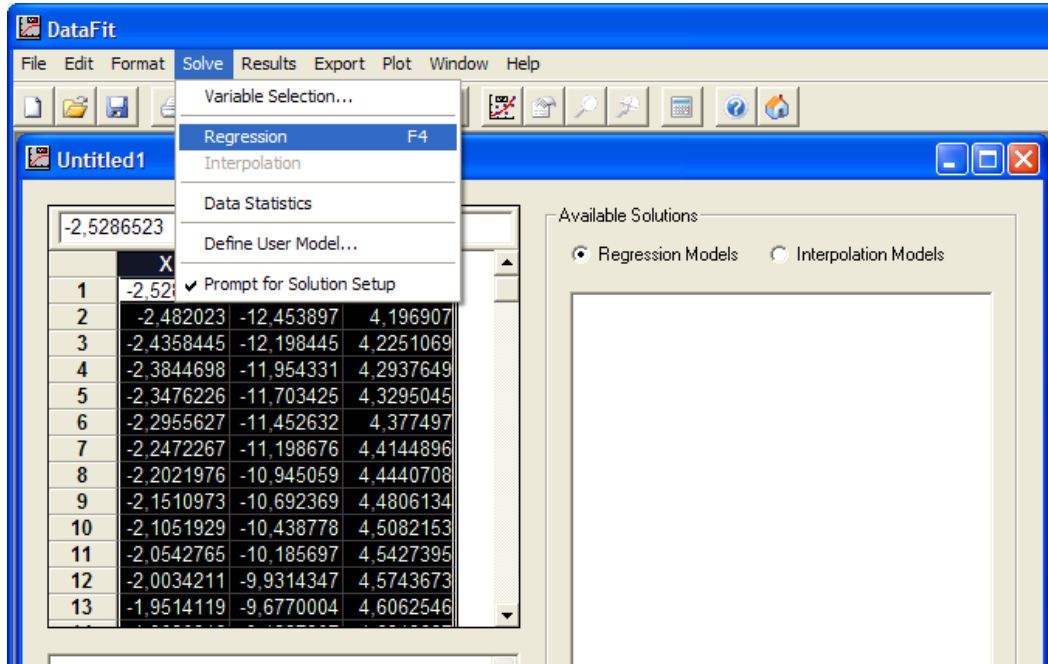
DataFit programı çalıştırılır, 'Number of Independent Variables' kısmına 2 değeri girilir ve "OK" tıklanır. Burada eğri uydurulacak olan eksenin dataları bağımlı değişken (dependent variable), diğer iki eksen ise bağımsız değişken (independent variable) olarak kabul edilmektedir.



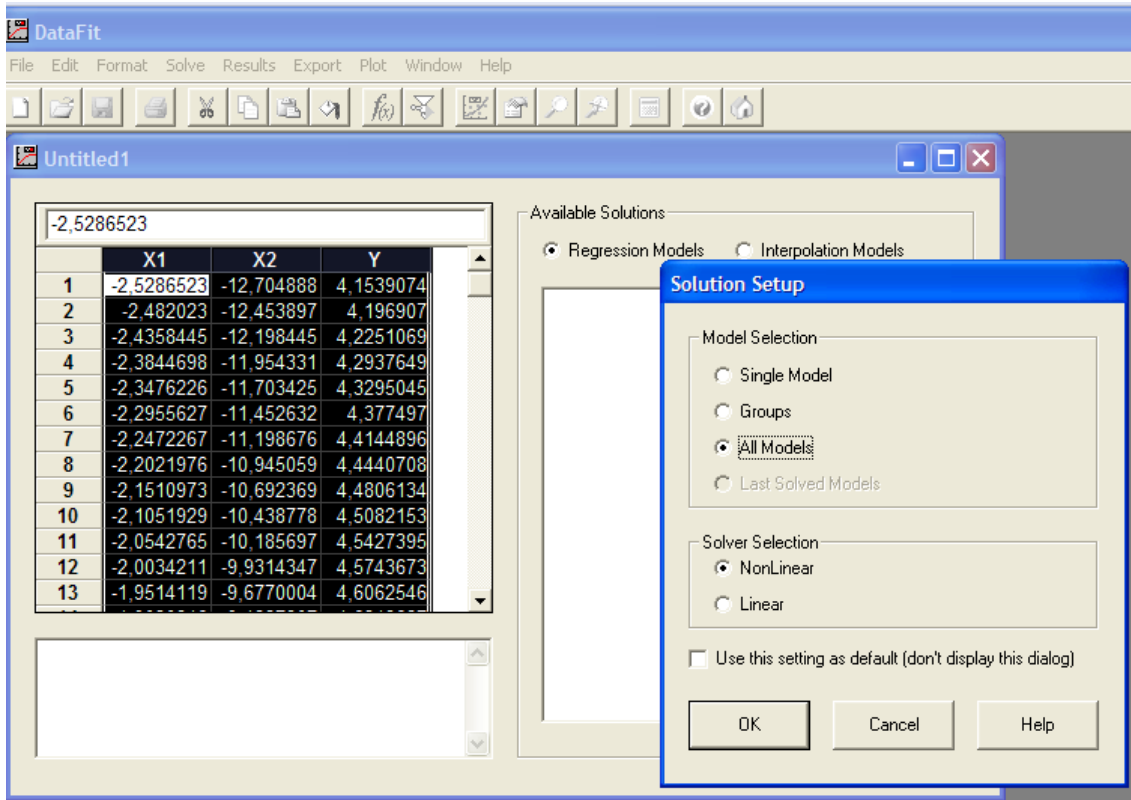
Çıkan ekranda X1 ve X2 sütunlarına bağımsız değişken dataları, Y sütununa ise bağımlı değişken yani eğri uydurulacak olan eksenin dataları girilmektedir.



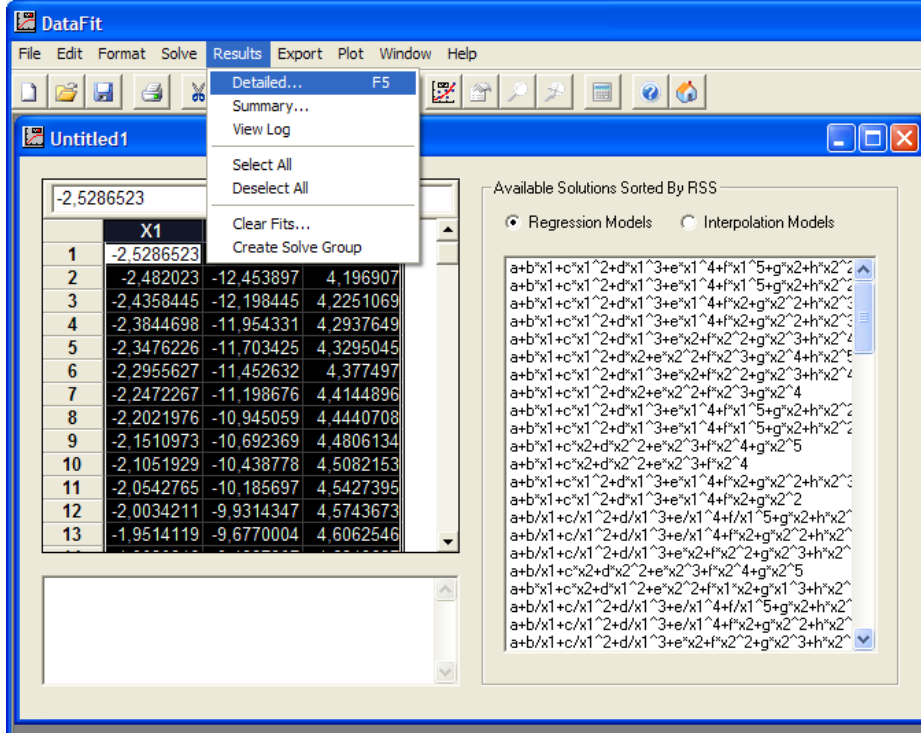
Bu sütunlar seçilir ve "Solve-Regression" menüsü seçilir.



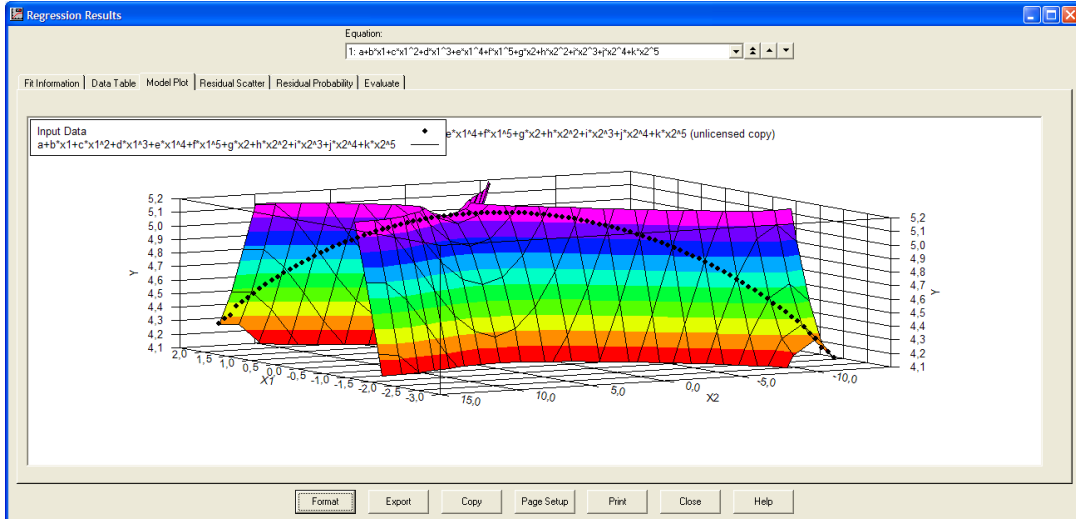
'Model Selection' kısmında 'All Models' seçeneği ve 'Solver Selection' kısmında 'Nonlinear' seçeneği seçilir ve "OK" tıklanır.



"Results-Detailed..." menüsü ile çözümlerle ilgili tüm detayların yer aldığı bölüme gidilir.



"Model Plot" menüsü ile uydurulan eğriyi görsel olarak görmek mümkün olmaktadır. Burada dataların yerleşimini net olarak görmek için üç boyutlu grafiğe bakış açısının değiştirilmesi gerekmektedir.

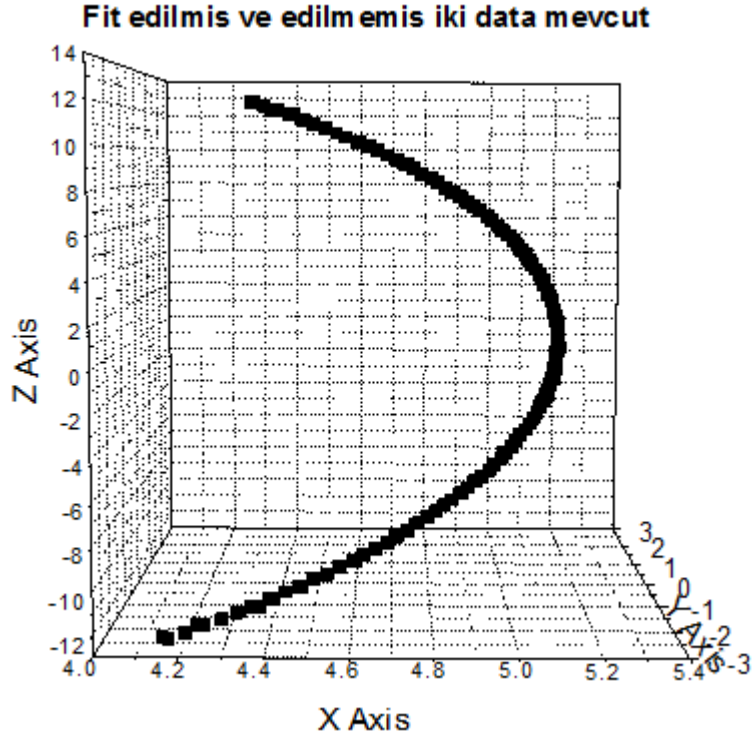


"Data Table" menüsü seçilerek ve "Export" seçeneği tıklanarak datalar ile ilgili bilgiler yine belirleyeceğimiz bir isimde çalışma klasörüne kaydedilir. Şekilde görülen "Calc Y" sütununda yer alan datalar uydurulan eğriyi temsil eden datalardır. Artık bizim için çatlak ilerleme eksenini bu datalar oluşturmaktadır.

	X1 Value	X2 Value	Y Value	Calc Y	Residual	% Error	Abs Residual	Min Residual	Max Residual
1	-2,5286523	-12,7048879	4,1539074	4,2060371	-0,05213	-1,254957	0,0521297322	-0,0521297322	0,02055698796
2	-2,482023	-12,4538968	4,196907	4,2401455	-0,043238	-1,1			
3	-2,4358445	-12,1984448	4,2251069	4,2733311	-0,048224	-1,1			
4	-2,3844698	-11,9543311	4,2937649	4,3095571	-0,015792	-0,3			
5	-2,3476226	-11,7034249	4,3295045	4,3350876	-0,005583	-0,1			
6	-2,2955627	-11,452632	4,377497	4,3705165	0,0069805	0,2			
7	-2,2472267	-11,1986756	4,4144896	4,4027359	0,0117537	0,2			
8	-2,2021976	-10,945059	4,4440708	4,4321651	0,0119057	0,2			
9	-2,1510973	-10,6923693	4,4806134	4,4648771	0,0157363	0,3			
10	-2,1051929	-10,4387781	4,5082153	4,4936404	0,0145749	0,3			
11	-2,0542765	-10,1856965	4,5427395	4,5248547	0,0178848	0,3			
12	-2,0034211	-9,9314347	4,5743673	4,5553062	0,0190611	0,4			
13	-1,9514119	-9,6770004	4,6062546	4,5856976	0,020557	0,4			
14	-1,9030846	-9,4227807	4,6318627	4,6132556	0,0186071	0,4			
15	-1,8546715	-9,1693389	4,6571021	4,6402031	0,016899	0,3			
16	-1,8035644	-8,9158237	4,685734	4,6679331	0,0178009	0,3			
17	-1,7527535	-8,6619244	4,7128776	4,6947709	0,0181067	0,3			
18	-1,701623	-8,4074861	4,7385681	4,7210404	0,0175277	0,3	0,0175277377		
19	-1,6515972	-8,1532812	4,7614728	4,7460252	0,0154476	0,3	0,0154476007		
20	-1,6014584	-7,8993084	4,7857248	4,7703539	0,0153709	0,3	0,0153709193		
21	-1,5510939	-7,6447996	4,8101423	4,7940727	0,0160696	0,3	0,0160695592		
22	-1,501093	-7,3903569	4,8310364	4,816906	0,0141304	0,2	0,0141303668		
23	-1,4499292	-7,1364183	4,8523225	4,8395327	0,0127898	0,2	0,012789843		

Data Fit kullanarak şu ana kadar gerçekleştirilen eğri uydurma işlemleri sadece bir eksendeki (çatlak ilerleme eksenini) dataları kapsamaktadır. Aynı işlemleri diğer iki eksen içinde aynı şekilde tekrar etmek gerekmektedir. Hangi eksendeki datalara eğri uydurulacak ise o eksendeki datalar bağımlı değişken olacak, diğer iki eksendeki datalar ise bağımsız değişken olacaklardır. Örneğin yukarıda X1 sütununda yer alan datalar için eğri uydurulacak ise, bu datalar Y sütununa, yukarıda çatlak ilerleme eksenini için elde edilen yeni datalar X1 sütununa ve X2 sütununda yer alan datalar aynen tutularak ikinci eğri uydurma işlemi gerçekleştirilebilir. Üçüncü eğri uydurma işleminde de, X2 sütununda yer alan datalar Y sütununa, X1 ve X2 sütununa ise elde edilen yeni datalar koyularak aynı işlemler tekrar edilebilir.

Son olarak 'OriginPro' gibi üç boyutlu eğri çizdirebilen bir program yardımıyla, ilk haldeki üç eksen datası ile son elde edilen eksen dataları aynı anda çizdirilerek eğrideki değişimin ne kadar olduğu görülebilir. Örneğin aşağıda yer alan eğride toplam 6 adet eksen datası yer almaktadır. FRAC3D kullanılarak tahmin edilen eğriden uzaklaşmadan o verilere çok yakın bir üç boyutlu eğri uydurulmuş olmaktadır.



TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ALİ OSMAN AYHAN
Proje No:	113M407
Proje Başlığı:	Kırılma Ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS): Aşama 2
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	SEDAT İRİÇ, HÜSEYİN LEKESİZ
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/09/2013 - 15/09/2016
Onaylanan Bütçe:	317755.0
Harcanan Bütçe:	185005.9
Öz:	<p>2008-2011 yılları arasında gerçekleştirilen 108M283 nolu ve Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi, Aşama 1 adlı projede, lisansüstü çalışmaları boyunca Dr. Ali O. Ayhan tarafından geliştirilmiş olan FRAC3D programı, mod-I yüklemesi altında levha ve silindir gibi basit geometrilerdeki yorulmalı çatlak ilerleme problemlerine uygulanmış ve analizlerin doğru bir şekilde yapılabilmesi için kullanıcı ara yüzü geliştirilerek tüm sistem FCPAS.(Fracture and Crack Propagation Analysis System) olarak adlandırılmıştır.</p> <p>Bu projede, FCPAS içerisinde mevcut olan yetenekler yeni endüstriyel problemlere uygulanmış ve karışık modlu yüklemeler altında üç boyutlu kırılma olgusunun deneysel olarak incelenmesi ve sayısal olarak modellenmesi için yeni çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, aşağıda verilen dört temel kategoride gruplandırılmaktadır;</p> <p>1.FCPAS mod-I analiz kabiliyetlerinin enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma alanlarında karşılaşılan kırılma ve çatlak ilerleme problemlerine uygulanması ve doğrulamalarının yapılması. Bu kapsamda, değişik uygulamalar yapılarak çatlak ilerleme profilleri ve ömürleri açısından FCPAS tarafından tahmin edilen çatlak ilerleme davranışları doğrulanmıştır.</p> <p>2.Üç boyutlu karışık modlu yükler altında kırılma ve çatlak ilerleme deneysel kabiliyetlerinin geliştirilmesi. Basit karışık modlu kırılma problemlerinden başlayarak, en genel hal olan mod-I, II ve III yüklerinin tamamının aktif olduğu durumlar için deneysel kabiliyetler ve yeni test sistemleri geliştirilmiştir.</p> <p>3.Üç boyutlu karışık modlu yükler altında kırılma ve çatlak ilerleme sayısal analiz kabiliyetlerinin ve iyileştirilmiş kırılma kriterlerinin geliştirilmesi. Karışık modlu yükler altında ve düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyen çatlağın sayısal olarak FRAC3D ve FCPAS ile analizleri gerçekleştirilmiş, iyileştirilmiş kırılma kriterleri oluşturulmuş ve deneylerle doğrulamaları yapılmıştır.</p> <p>4.FCPAS grafiksel kullanıcı ara yüzünün (GUI) güncellenmesi. Yukarıda tanımlanan gelişmeler çerçevesinde kullanıcı ara yüzünde güncellemeler yapılmıştır.</p> <p>Proje kapsamında yapılan çalışmalar ile FCPAS'in enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma alanlarındaki kırılma problemlerine uygulanabilir bir program olduğunun ispatı yapılmış ve projenin 3. aşaması olarak planlanan Prognostik/Yapısal Sağlık Kontrolü alanlarında yeni çalışmalar yapılabilmesinin zemini hazırlanmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Yorulma çatlak ilerlemesi, karışık mod, gerilme şiddet faktörü, sonlu elemanlar yöntemi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Evet

Proje Yapılan Yayınlar:	<ol style="list-style-type: none">1- Investigation of mixed mode-I/II fracture problems - Part 2: evaluation and development of mixed mode-I/II fracture criteria (Makale - Diğer Hakemli Makale),2- Multiple and non-planar crack propagation analyses in thin structures using FCPAS (Makale - Diğer Hakemli Makale),3- Finite element modeling and experimental studies on mixed mode-I/II fracture specimens (Makale - Diğer Hakemli Makale),4- Investigation of mixed mode - I/II fracture problems - Part 1: computational and experimental analyses (Makale - Diğer Hakemli Makale),5- Three-dimensional fracture and fatigue crack propagation analysis in structures with multiple cracks (Makale - Diğer Hakemli Makale),6- Fracture and Crack Propagation Analysis System (FCPAS) (Bildiri - Uluslararası Konferans - Davetli Konuşmacı),7- Three-Dimensional Fracture Analyses of Compact Tension Shear Specimen Under In-Plane Mixed Mode Loading (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),8- Finite Element Modeling of Growing Multiple Cracks Under Cyclic Loads (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),9- Numerical Simulation of Three-Dimensional Mode-I Crack Propagation Using FCPAS: First Set of Practical Case Studies (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),10- Case Studies on Mode-I Fatigue Crack Propagation Using Fully Unstructured Finite Elements (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),11- SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FCPAS PROJE EKİBİ 10. ULUSLARARASI KIRILMA KONGRESİ'NE KATILDI (Yayılım - Ulusal - Medyada Haber),12- FCPAS ile Üç Boyutlu Çoğul Çatlakların Kırılma Analizleri ve İlerleme Simülasyonları (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi),13- Non-planar crack growth analyses of multiple cracks in thin-walled structures (Makale - İndekli Makale),14- Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi - Aşama 2 (Bildiri - Ulusal Konferans - Davetli Konuşmacı),
-------------------------	---