

**Kırılma ve atlak İlerleme Analiz  
Sistemi (FCPAS) – Aşama 3**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 217M690**

Proje Yürütücüsü:

**Prof. Dr. Ali Osman AYHAN**

Araştırmacılar:

Dr. Öğr. Üyesi Sedat İRİÇ

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan DEMİR

Bursiyerler:

Mehmet Faruk YAREN

Emre KURT

Hakan ŞAHİN

KASIM 2020

SAKARYA

# ÖNSÖZ

Raporu sunulan bu projenin ve daha önceki iki projenin temelleri, proje yürütücüsü Prof. Dr. Ali Osman Ayhan'ın lisansüstü çalışmaları süresince geliştirmiş olduğu, kırılma analizleri için özel formülasyona sahip zenginleştirilmiş elemanlar içeren ve sonlu eleman temelli bağımsız bir analiz programı olan FRAC3D yazılımı üzerine bina edilmiştir. Bu projeden önce, 2008-2011 yılları arasında 108M283 nolu "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) – Aşama 1" adlı projede, mod-I yüklemesi altında levha ve silindir gibi basit geometrilerdeki yorulmalı çatlak ilerleme problemlerine uygulama ve doğrulamalar yapılmış, ayrıca kullanıcı ara yüzü geliştirilmiştir. Birinci aşama projesinin devamı niteliğinde olan 113M407 nolu "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 2" adlı projede ise, mod-I yorulma çatlak ilerleme analiz kabiliyetleri enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma gibi önemli alanlarda uygulanarak doğrulanmış, üç boyutlu ve karışık modlu yüklemeler altındaki kırılma ve çatlak ilerleme problemleri için deneysel ve sayısal analizler ile bütünlük şeklide iyileştirilmiş kırılma kriterleri geliştirilmiş ve kullanıcı ara yüzü güncellenmiştir. 217M690 nolu bu projede, Aşama 2 projesinde geliştirilmiş olan karışık mod kırılma analiz kabiliyetleri ve kriterleri yukarıda adı geçen alanlardaki bazı literatür ve saha problemlerine uygulanarak sağlamaları yapılmış, ayrıca problemi etkileyen faktörlerin değişimleri göz önüne alınarak, değişik yüklemeler şartlarında ve farklı numuneler kullanılarak olasılık temelli iki ve üç boyutlu çatlak ilerleme analizleri yapılmış, ilgili değişimleri içeren deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve model iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir. Adı geçen olasılık temelli çatlak ilerleme simülasyonlarının gerçekleştirilmesi amacıyla, bağımsız bir yazılım da geliştirilerek FCPAS yazılımına entegre edilmiş ve kullanıcı arayüzü güncellenmiştir. Yukarıda belirtilen, 108M283, 113M407 ve 217M690 numaralı projeler finansal olarak TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Aşama 2 ve Aşama 3 proje çalışmaları, Sakarya Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (SARGEM) ve Makine Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan Hesaplmalı ve Deneysel Kırılma Mekaniği Laboratuvarı'nda (<http://www.cefmlab.sakarya.edu.tr>) gerçekleştirilmiştir.

Özellikle Havacılık ve Uzay teknolojileri için önemli bir alt alan olan "Kırılma Mekaniği" alanında, ileri düzey deneysel ve analiz tekniklerinin kullanıldığı bu projenin sonuç raporu içeriğinde, gelecekte benzer çalışmaların da diğer araştırmacılar tarafından milli olarak yapılabilmesi ve ilerletilebilmesi için gerekli olan detaylardan sakınılmamıştır.

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

Proje çalışmalarımızın ve çıktılarının faydalar getirmesi dileklerimizle...

# İçindekiler

ÖNSÖZ .....	ii
İçindekiler .....	iii
Tablo Listesi .....	vii
Şekil Listesi .....	xi
Özet .....	xxxiii
Abstract .....	xxxiv
1. GİRİŞ .....	1
2. kırılma ve çatlak ilerleme analiz sistemi (fcpas) – AŞAMA 3 .....	4
2.1 Literatür Özeti .....	4
2.1.1 Karışık Mod Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi ....	4
2.1.2 Karışık Mod Kırılma Problemlerinin Üç-Boyutlu Analizi .....	7
2.1.3 J-İntegral ve VCCT Yöntemi ile Üç-Boyutlu Kırılma Analizleri .....	9
2.1.4 Olasılık Temelli Kırılma Mekanikliği Çalışmaları .....	9
2.2 FCPAS – AŞAMA 3: Amaçlar, Yöntem Özeti, Avantajlar ve Kazanımlar .....	12
2.2.1 Karışık Mod Kırılma ve Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi	14
2.2.2 Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Çalışmaları .....	15
2.2.3 Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Çalışmaları .....	17
2.2.4 FCPAS – Aşama 3 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Güncellenmesi ....	19
2.2.5 FCPAS – Aşama 3 Avantajlar ve Kazanımlar .....	19
3. FCPAS – AŞAMA 3: GEREÇ VE YÖNTEM .....	21
3.1 Karışık Mod Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi .....	21
3.1.1 Eğik Çatlak İçeren Birim Küp Modelinde Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi .....	23
3.1.2 Çoklu Kenar Çatlağı İçeren Çekme Numunesinde Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çoğul Çatlak İlerleme Analizi .....	30
3.1.3 Eğik Çatlak İçeren Silindirik Çekme Numunesinde Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi .....	34
3.1.4 Eğilme Yüğü Altındaki İçi Boş Milde Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi	37
3.1.5 Çeki Yüğü Altında Bulunan H-Kesitli Parçada Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi .....	43
3.1.6 Bir Motor Parçasında Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi	47
3.2 Karışık Mod Kırılma Problemlerinin Üç-Boyutlu Analizi .....	55

3.2.1 Ünişorm Çekme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Eğik Yüzey Çatlağı Analizleri	58
3.2.2 Ünişorm Çekme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Dönmüş Yüzey Çatlağı Analizleri	80
3.2.3 Eğilme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Eğik Yüzey Çatlağı Analizleri.....	100
3.2.4 Eğilme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Dönmüş Yüzey Çatlağı Analizleri....	120
3.2.5 Karışık Mod Gerilme Şiddet Faktörleri için Empirik Denklem Geliştirilmesi .....	138
3.2.5.1 Çatlak Ucu Serbest Yüzey Noktaları ( $\theta=0^\circ$ ).....	141
3.2.5.1.1 Eksenel gerilmeye maruz eğik yüzey çatlağı .....	142
3.2.5.1.2 Eksenel gerilmeye maruz dönmüş yüzey çatlağı .....	149
3.2.5.1.3 Eğilme gerilmesine maruz eğik yüzey çatlağı .....	149
3.2.5.1.4 Eğilme gerilmesine maruz dönmüş yüzey çatlağı .....	149
3.2.5.2 Çatlak Ucu Derinlik Noktaları ( $\theta=90^\circ$ ).....	168
3.2.5.2.1 Eksenel gerilmeye maruz eğik yüzey çatlağı .....	168
3.2.5.2.2 Eksenel gerilmeye maruz dönmüş yüzey çatlağı .....	173
3.2.5.2.3 Eğilme gerilmesine maruz eğik yüzey çatlağı .....	173
3.2.5.2.4 Eğilme gerilmesine maruz dönmüş yüzey çatlağı .....	173
3.2.6 Empirik Denklem Doğrulama Çalışması .....	186
3.3 J-İntegral ve Sanal Çatlak Kapatma Yöntemi ile Üç-Boyutlu Kırılma Analizleri.....	189
3.3.1 J-İntegral Yöntemi ile Enerji Salıverme Oranı (G) Hesaplanması.....	190
3.3.2 Sanal Çatlak Kapatma Yöntemi (VCCT) ile Enerji Salıverme Oranı (G) Hesaplanması	196
3.3.3 Elastik-Plastik malzemeler için VCCT metodunun uygulanması .....	206
3.4 Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanikiği Çalışmaları .....	210
3.4.1 Çatlak İlerleme Malzeme Özellikleri Değişkenliği Testleri .....	210
3.4.1.1 Çekme Testi.....	210
3.4.1.2 Kırılma Tokluğu Testleri .....	211
3.4.1.3 Sabit Genlikli Yük Altında Çatlak İlerleme Testleri.....	218
3.4.1.4 Sabit Genlikli Yük Altında Gerçekleştirilen Test Sonuçlarındaki Saçılımın İncelenmesi .....	225
3.4.2 Değişken Genlikli Yük Altında Çatlak İlerleme Testleri.....	230
3.4.2.1 Tekil Aşırı Yük Uygulanması Durumunda Yorulma Çatlak İlerlemesi.....	230
3.4.2.2 Tekil Düşük Yük Uygulanması Durumunda Yorulma Çatlak İlerlemesi.....	232
3.4.2.3 Bloklar Halinde Aşırı Yük Uygulanması Durumunda Yorulma Çatlak İlerlemesi .....	233

3.4.2.4 Bloklar Halinde Düşük Yük Uygulanması Durumunda Yorulma Çatlak İlerlemesi .....	234
3.4.2.5 Karışık Genlikli Spektrum Yükleme Altında Yorulma Çatlak İlerlemesi .....	235
3.4.3 Değişken Genlikli Yük Altında Çatlak İlerleme Modelleri .....	241
3.4.3.1 Sabit Genlikli Yorulma Yükleme Altında Çatlak İlerleme Modelleri .....	241
3.4.3.2. Değişken Genlikli Yorulma Yükleme Altında Çatlak İlerleme Modelleri .....	244
3.4.3.3 Değişken Genlikli Yorulma Yükleme Altında Çatlak İlerleme Modellerinin Deneylere Uygulanması .....	253
3.4.3.3.1 Tekil Aşırı Yük Uygulanan Deneylerin Modellenmesi .....	253
3.4.3.3.2 Bloklar Halinde Aşırı Yük Uygulanan Deneylerin Modellenmesi .....	256
3.4.3.3.3 Karışık Genlikli Yorulma Yüklü Uygulanan Deneylerin Modellenmesi .....	258
3.4.3.3.4 Karışık Genlikli Yorulma Yüklü Altında Çatlak İlerleme Analizi İçin İyileştirilmiş Model Geliştirilmesi .....	260
3.5. Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Çalışmaları .....	268
3.5.1. Numune ve Test Sistemi Tasarımı .....	268
3.5.2 Deney Tasarımı Analizleri .....	272
3.5.2.1 Gerinim Ölçer (Straingage) Doğrulama Testi .....	273
3.5.2.2 Geometrik Değişkenlerin Gerilme Şiddet Faktörlerine Etkisinin Belirlenmesi .....	274
3.5.3 Transfer Fonksiyonu Belirleme .....	276
3.5.4 Değişken Genlikli Yük Altında Üç-Boyutlu Çatlak İlerleme Testleri .....	279
3.5.4.1 Lee James Numunesi ile Kırılma Testleri .....	279
3.5.4.2. Sabit Genlik Altında Üç-Boyutlu Çatlak İlerleme Testleri .....	284
3.5.4.3 Karışık Genlikli Yorulma Yüklü Altında Üç Boyutlu Çatlak İlerleme Testleri .....	288
3.5.4.4 Çatlak İlerleme Profillerinde Karşılaşılan Simetri Bozukluğunun İncelenmesi .....	294
3.6 Monte Carlo Çatlak İlerleme Simülasyon Yöntemi .....	297
3.6.1 Olasılık Temelli Çatlak İlerleme Ömür Tahmini .....	301
3.6.2 Deneyler ile Karşılaştırma ve Model İyileştirme .....	303
3.6.3 Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Çatlak İlerlemesi Sağlama Deney ve Simülasyonları .....	359
3.7 FCPAS – Aşama 3 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Güncellenmesi .....	375
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER .....	379
4.1. Proje Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar ve Kazanımlar .....	380
4.1.1 Karışık Mod Kırılma ve Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi .....	380

4.1.2 Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanikçi Çalışmaları .....	381
4.1.3 Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanikçi Çalışmaları.....	381
4.1.4 FCPAS – Aşama 3 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Güncellenmesi ..	382
4.2 Projede Kullanılan Özgün Yöntem ve Yaklaşımlar .....	382
4.3 Proje Önergesinde Öngörülen Hedef ve Başarı Ölçütlerinin Değerlendirilmesi .....	384
4.3.1 Karışık Mod Kırılma ve Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi	384
4.3.2 Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanikçi Çalışmaları .....	385
4.3.3 Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanikçi Çalışmaları.....	385
4.3.4 FCPAS – Aşama 3 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Güncellenmesi ..	386
4.4. Gelecekte Yapılabilecek Bilimsel Çalışmalar .....	386
5. YAYINLAR, KONFERANSLAR VE SUNUMLAR .....	389
5.1 Uluslararası Dergi Yayınları – SCI Kapsamında.....	389
5.2 Uluslararası Konferans Bildirileri .....	389
5.3 Sunum ve Seminerler .....	390
5.4 Tezler.....	390
5.5 Geliştirilen Yazılımlar .....	391
6. OLASILIK TEMELLİ YORULMA ÇATLAK İLERME ANALİZ PROGRAMLARI KAYNAK KODLARI (EK) .....	392
6.1 CT Numunesi için Olasılık Temelli Çatlak İlerleme Analiz Programı Kaynak Kodu (Forman Modeli ile Wheeler Modeli) .....	392
6.2 LJ Numunesi için Olasılık Temelli Çatlak İlerleme Analiz Programı Kaynak Kodu (Forman Modeli ile Wheeler Modeli).....	414
KAYNAKLAR.....	438

## TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1.1. Karışık modlu yükleme altında çatlak ilerleme analizi yapılan uygulamalar .....	22
Tablo 3.1.2. FCPAS Aşama-2 projesi kapsamında geliştirilen çatlak sapma açısı kriterinin (Denklem 3.1.1) katsayıları.....	26
Tablo 3.1.3. FCPAS Aşama-2 projesi kapsamında geliştirilen üç-boyutlu eşdeğer gerilme şiddet faktörü kriterinin katsayıları. ....	26
Tablo 3.2.1. (a) Problemleri tanımlayan parametreler, (b) Analiz sayıları.....	57
Tablo 3.2.2. Analizlerde kullanılan yüzey çatlağı ve levha boyutları.....	59
Tablo 3.2.3. 0-45 derece ve 45-75 derece eğimli/dönmüş karışık mod yüzey çatlakları için geliştirilen empirik denklemlerde indirgenmiş katsayı adetleri .....	141
Tablo 3.2.4. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta= 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	143
Tablo 3.2.5. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta= 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	144
Tablo 3.2.6. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta= 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	145
Tablo 3.2.7. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta= 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	146
Tablo 3.2.8. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta= 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	147
Tablo 3.2.9. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta= 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	148
Tablo 3.2.10. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha= 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	150
Tablo 3.2.11. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	151
Tablo 3.2.12. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	152

Tablo 3.2.13. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	153
Tablo 3.2.14. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	154
Tablo 3.2.15.Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	155
Tablo 3.2.16. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta= 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	156
Tablo 3.2.17. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta= 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	157
Tablo 3.2.18. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta= 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	158
Tablo 3.2.19. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta= 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	159
Tablo 3.2.20. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta= 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	160
Tablo 3.2.21. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta=45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	161
Tablo 3.2.22. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	162
Tablo 3.2.23. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	163
Tablo 3.2.24. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	164
Tablo 3.2.25. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	165
Tablo 3.2.26. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 0-45^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	166
Tablo 3.2.27. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 45-75^\circ$ için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	167



Tablo 3.2.28. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta= 0-45^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi .....	169
Tablo 3.2.29. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta=45-75^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	170
Tablo 3.2.30. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta=0-45^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi .....	171
Tablo 3.2.31. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve $\beta=45-75^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	172
Tablo 3.2.32. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 0-45^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	174
Tablo 3.2.33. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 45-75^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	175
Tablo 3.2.34. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 0-45^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	176
Tablo 3.2.35. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 45-75^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	177
Tablo 3.2.36. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta= 0-45^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	178
Tablo 3.2.37. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta= 45-75^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	179
Tablo 3.2.38. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta= 0-45^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	180
Tablo 3.2.39. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve $\beta= 45-75^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi.....	181
Tablo 3.2.40. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 0-45^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	182
Tablo 3.2.41. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha =45-75^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi.....	183
Tablo 3.2.42. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 0-45^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	184
Tablo 3.2.43: Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve $\alpha = 45-75^\circ$ için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi.....	185

Tablo 3.4.1. Gerçekleştirilen tüm kırılma tokluğu deneylerine ait özet tablo .....	216
Tablo 3.4.2. Sabit genlikli yorulma çatlak ilerleme test matrisi .....	219
Tablo 3.4.3. R = 0.1 gerilme oranında gerçekleştirilen sabit genlikli çatlak ilerleme test detayları .....	221
Tablo 3.4.4. R = 0.5 gerilme oranında gerçekleştirilen sabit genlikli çatlak ilerleme test detayları .....	223
Tablo 3.4.5. R = 0.7 gerilme oranında gerçekleştirilen sabit genlikli çatlak ilerleme test detayları .....	224
Tablo 3.4.6. R = 0.8 gerilme oranında gerçekleştirilen sabit genlikli çatlak ilerleme test detayları .....	225
Tablo 3.4.7. Çatlak ilerleme oranları için en uygun dağılım modelinin seçilmesi .....	227
Tablo 3.4.8. Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi test matrisi .....	230
Tablo 3.4.9. Tekil aşırı yük uygulanan deneyler .....	231
Tablo 3.4.10. Blok halinde aşırı yük uygulanan deneyler .....	233
Tablo 3.4.11. Değişken genlikli (SP1) yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları .....	236
Tablo 3.4.12. Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları (Falstaff) .....	239
Tablo 3.4.13. Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi model sonuçları karşılaştırması .....	259
Tablo 3.4.14. Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi problemleri için Spektrum Aşırı Yük İndeksi uygulanmasının değişik modeller üzerinde etkisi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması .....	262
Tablo 3.5.2. Lee James numunesi ile gerçekleştirilen kırılma testleri .....	280
Tablo 3.5.3. Üç-boyutlu çatlak ilerleme test sayıları .....	284
Tablo 3.5.4. Sabit genlik altında üç-boyutlu yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları .....	285
Tablo 3.5.5. Karışık genlikli üç boyutlu yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları (Spektrum 1) .....	289
Tablo 3.5.6. Karışık genlikli üç-boyutlu yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları (Spektrum 2) .....	292
Tablo 3.6.1. LJ numunesi test ve simülasyon sonuçları karşılaştırması .....	332
Tablo 3.6.2. SP3 yük profili ile gerçekleştirilen deneyler .....	360

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.2.1. Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) – Aşama 2 (2013-2016) projesinde geliştirmiş olan analiz ve deneysel kabiliyetler .....	13
Şekil 2.2.2. Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) – Aşama 3 (2018-2020) projesinde geliştirilen olasılık temelli analiz ve deneysel kabiliyetleri .....	14
Şekil 2.2.3. Karışık mod yük altında yorulma çatlak ilerleme analizi iş akış diyagramı .....	15
Şekil 2.2.4. Standart numune ile yapılan temel çatlak ilerleme testleri iş akış diyagramı.....	16
Şekil 2.2.5. Olasılık temelli üç-boyutlu kırılma mekaniği çalışmaları genel iş akış diyagramı	18
Şekil 2.2.6. Monte carlo yöntemi kullanılarak çatlak ilerleme simülasyonu iş akış diyagramı	18
Şekil 3.1.1. Birim Küp geometrisi ve çatlak parametreleri. ....	23
Şekil 3.1.2. FCPAS analiz akış şeması (Ayhan, 2016).....	24
Şekil 3.1.3. Birim küp (solda) ve çatlağın (sağda) sonlu elemanlar yarı-simetrik modeli.....	24
Şekil 3.1.4. Birim küp sonlu elemanlar modelinin çatlak bölgesinin yakın görünüşü.....	25
Şekil 3.1.5. Yarı simetrik birim küp modele uygulanan sınır şartları ve yükler. ....	25
Şekil 3.1.6. Çatlak ilerleme simülasyonları sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen, <b>(a)</b> $K_I$ , <b>(b)</b> $K_{II}$ , <b>(c)</b> $K_{III}$ GŞF değerleri. ....	28
Şekil 3.1.7. Birim küp modeli ömür mukayesesi.....	29
Şekil 3.1.8. Birim küp simetrik modelde çatlak ilerleme yüzeylerinin görünümü. ....	29
Şekil 3.1.9. Birim küp çatlak ilerleme yüzeyleri, (a) ön görünüş, (b) üst görünüş, (c) izometrik görünüş. ....	30
Şekil 3.1.10. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin geometri ve çatlak boyut bilgileri. ....	31
Şekil 3.1.11. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin sonlu eleman görüntüsü. ....	31
Şekil 3.1.12. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin her bir ilerleme adımı için hesaplanan $K_I$ GŞF değerleri, (a) üst çatlak, (b) alt çatlak.....	32
Şekil 3.1.13. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin her bir ilerleme adımı için hesaplanan $K_{II}$ GŞF değerleri, (a) üst çatlak, (b) alt çatlak.....	32
Şekil 3.1.14. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin her bir ilerleme adımı için hesaplanan $K_{III}$ GŞF değerleri, , (a) üst çatlak, (b) alt çatlak. ....	33
Şekil 3.1.15. Çoğul çatlak içeren çekme numunesi ömür mukayesesi. ....	33
Şekil 3.1.16. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin çatlak ilerleme yüzeyleri, (Ön ve üst görünüşler sağda verilmiştir).....	34
Şekil 3.1.17. Eğik çatlak içeren silindirik numune.....	34

Şekil 3.1.18. Eğik çatlak içeren silindirik numunenin sonlu elemanlar modeli (solda), birinci ilerleme adımından sonra yüzey çatlağı (sağda).....	35
Şekil 3.1.19. Çatlak ilerleme simülasyonları sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen, (a) $K_I$ , (b) $K_{II}$ , (c) $K_{III}$ GŞF değerleri. ....	36
Şekil 3.1.20. Eğik çatlak içeren silindirik numune için ömür mukayesesi.....	37
Şekil 3.1.21. Çatlak ilerleme simülasyonları sonrası elde edilen çatlak yüzey profillerinin farklı perspektiflerden görünümü.....	37
Şekil 3.1.22. Probleme ait detay ve ölçüler (Citarella ve ark (2018))......	38
Şekil 3.1.23. Mile uygulanan sınır şartı ve yükler. ....	38
Şekil 3.1.24. İçi boş milin sonlu elemanlar modeli ve başlangıç çatlağının yakın görünümü. ....	39
Şekil 3.1.25. Başlangıç çatlağı için elde edilen GŞF değerlerinin karşılaştırması.....	39
Şekil 3.1.26. Her bir çatlak ilerleme profili için çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF dağılımları, (a) $K_I$ , (b) $K_{II}$ ve (c) $K_{III}$ grafikleri.....	40
Şekil 3.1.27. Çevrim sayısı ve çatlak derinliği (a) değişiminin referans makale verileri ile karşılaştırılması. ....	41
Şekil 3.1.28. Çevrim sayısı ve çatlak yüzey uzunluğu (c) değişiminin referans makale verileri ile karşılaştırılması.....	42
Şekil 3.1.29. Eğilmeye maruz içi boş silindir için ilerlemiş çatlak yüzeylerinin görünümü. ....	43
Şekil 3.1.30. H kesitli parçaya ait ölçü ve detaylar. ....	44
Şekil 3.1.31. H-kesitli parça sonlu elemanlar modeli (solda), çatlak bölgesi yakın görünümü (sağda).....	44
Şekil 3.1.32. Her bir çatlak ilerleme profili için çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF dağılımları, (a) $K_I$ , (b) $K_{II}$ ve (c) $K_{III}$ grafikleri.....	46
Şekil 3.1.33. H-kesitli parça için ömür değerleri karşılaştırılması. ....	47
Şekil 3.1.34. H-kesitli parça için yorulma çatlak ilerleme yüzeylerinin farklı açılardan görünümü. ....	47
Şekil 3.1.35. Problem katı modeli perspektif görüntüsü. ....	48
Şekil 3.1.36. Probleme ait gerilme dağılımı ve başlangıç çatlakları.....	49
Şekil 3.1.37. Motor parçası sonlu elemanlar modeli (solda), çatlak bölgesi görüntüleri (sağda). ....	50
Şekil 3.1.38. Çoğul çatlak ilerleme için çatlak ucu boyunca bazı adımların boyutsuz GŞF dağılımları sol çatlak (solda), sağ çatlak (sağda), (a) $K_I$ , (b) $K_{II}$ ve (c) $K_{III}$ . ....	51
Şekil 3.1.39. Birleşmiş çatlak ilerleme profili için çatlak ucu boyunca elde edilen boyutsuz GŞF (a) $K_I$ , (b) $K_{II}$ ve (c) $K_{III}$ dağılımları.....	52
Şekil 3.1.40. Her bir çatlak adımı için GŞF'ler kullanılarak oluşturulan boyutsuz K-a eğrisi..	53
Şekil 3.1.41. Boyutsuz çatlak ilerleme ömür eğrisi. ....	53

Şekil 3.1.42. Çatlak ilerleme yüzeylerinin farklı açılardan görünümü, (a) perspektif görünüşü, (b) çatlağın yakın görünüşü, (c) tahmin edilen çatlak ilerleme profillerinin alt çatlak yüzeyi üzerinde yakın görünüşü.....	55
Şekil 3.2.1. Levhaya yerleştirilen eliptik eğik yüzey çatlağı (solda) ve eliptik dönmüş yüzey çatlağı (sağda) ile problemi tanımlayıcı parametreler (Ayhan, 2004) .....	57
Şekil 3.2.2. Üniform çekme gerilmesi altındaki levhada eğik yüzey çatlağı (Ayhan,2004) .....	58
Şekil 3.2.3. Eğik yüzey çatlağı içeren levha sonlu elemanlar modeli genel görüntüsü (solda), çatlak bölgesi yakın görüntüsü (sağda) .....	60
Şekil 3.2.4: Eğik eliptik yüzey çatlağı için çatlak ucundaki eleman boyutunun farklı değerlerinde normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımı ( $a/c=1$ , $a/t=0.2$ , $\beta=75^\circ$ ) .....	61
Şekil 3.2.5. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	62
Şekil 3.2.6. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	63
Şekil 3.2.7. Normalize edilen $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	64
Şekil 3.2.8. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	65
Şekil 3.2.9. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	66
Şekil 3.2.10. Normalize edilen $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	66
Şekil 3.2.11. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	67
Şekil 3.2.12. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	68
Şekil 3.2.13. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	68
Şekil 3.2.14: Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	69
Şekil 3.2.15. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	70
Şekil 3.2.16. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	70

Şekil 3.2.17. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	71
Şekil 3.2.18. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	72
Şekil 3.2.19. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	73
Şekil 3.2.20. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	74
Şekil 3.2.21. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	75
Şekil 3.2.22. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	76
Şekil 3.2.23. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	77
Şekil 3.2.24. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	78
Şekil 3.2.25. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	80
Şekil 3.2.26. Üniform çekme gerilmesi altındaki levhada dönmüş yüzey çatlak (Ayhan,2004) .....	80
Şekil 3.2.27. Dönmüş yüzey çatlak içeren levha sonlu elemanlar modeli genel görüntüsü (solda), çatlak bölgesi yakın görüntüsü (sağda).....	81
Şekil 3.2.28. Dönmüş eliptik yüzey çatlak için normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımı ( $a/c=1$ , $a/t=0.8$ ) .....	82
Şekil 3.2.29. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	83
Şekil 3.2.30. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	84
Şekil 3.2.31. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	85
Şekil 3.2.32. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	86
Şekil 3.2.33. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	86
Şekil 3.2.34. Normalize edilen $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	87

Şekil 3.2.35. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	88
Şekil 3.2.36. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	88
Şekil 3.2.37. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	89
Şekil 3.2.38. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	90
Şekil 3.2.39. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	90
Şekil 3.2.40. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	91
Şekil 3.2.41. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	92
Şekil 3.2.42. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	92
Şekil 3.2.43. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	93
Şekil 3.2.44. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	94
Şekil 3.2.45. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	95
Şekil 3.2.46. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	96
Şekil 3.2.47. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	97
Şekil 3.2.48. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	98
Şekil 3.2.49. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	99
Şekil 3.2.50. Eğilme gerilmesi altındaki levhada eğik yüzey çatlakları .....	100
Şekil 3.2.51. Eğilme gerilmesi altında eğik yüzey çatlakları içeren levhanın sonlu elemanlar modeli: genel görüntü (solda), çatlak bölgesi yakın görüntüsü (sağda).....	101
Şekil 3.2.52. Eliptik yüzey çatlakları için normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımı $\beta=0$ , a) $a/c=1$ , b) $a/c=2$ .....	102

Şekil 3.2.53. Eliptik yüzey çatlağı için çatlak ucunda farklı eleman boyutları kullanılarak elde edilen normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörlerinin çatlak önü boyunca dağılımları ( $a/c=1$ , $a/t=0.2$ , $\beta=0^\circ$ ).....	102
Şekil 3.2.54. Normalize edilmiş $K_{I}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	103
Şekil 3.2.55. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	104
Şekil 3.2.56. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	105
Şekil 3.2.57. Normalize edilmiş $K_{I}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	106
Şekil 3.2.58. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	107
Şekil 3.2.59. Normalize edilen $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	107
Şekil 3.2.60. Normalize edilmiş $K_{I}$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	108
Şekil 3.2.61. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	109
Şekil 3.2.62. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	109
Şekil 3.2.63. Normalize edilmiş $K_{I}$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	110
Şekil 3.2.64. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	111
Şekil 3.2.65. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	111
Şekil 3.2.66. Normalize edilmiş $K_{I}$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	112
Şekil 3.2.67. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	113
Şekil 3.2.68. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	113
Şekil 3.2.69. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_{I}$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	114



Şekil 3.2.70. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	115
Şekil 3.2.71. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	116
Şekil 3.2.72. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	117
Şekil 3.2.73. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	118
Şekil 3.2.74. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $\beta=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	119
Şekil 3.2.75. Eğilme gerilmesi altında bulunan levhada dönmüş yüzey çatlakları .....	120
Şekil 3.2.76. Eğilme gerilmesi altında dönmüş yüzey çatlakları içeren levhanın sonlu elemanlar modeli: genel görüntü (solda), çatlak bölgesi yakın görüntüsü (sağda).....	121
Şekil 3.2.77. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	122
Şekil 3.2.78. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	123
Şekil 3.2.79. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.25$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	124
Şekil 3.2.80. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	125
Şekil 3.2.81. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	126
Şekil 3.2.82. Normalize edilen $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=0.5$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	126
Şekil 3.2.83. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	127
Şekil 3.2.84. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	128
Şekil 3.2.85. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=1$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	128
Şekil 3.2.86. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	129
Şekil 3.2.87. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	130

Şekil 3.2.88. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=2$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	130
Şekil 3.2.89. Normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	131
Şekil 3.2.90. Normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	132
Şekil 3.2.91. Normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $a/c=4$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	132
Şekil 3.2.92. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	133
Şekil 3.2.93. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	134
Şekil 3.2.94. Sabit $a/t$ için normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/t=0.2$ , b) $a/t=0.4$ , c) $a/t=0.6$ , d) $a/t=0.8$ .....	135
Şekil 3.2.95. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_I$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	136
Şekil 3.2.96. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_{II}$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	137
Şekil 3.2.97. Sabit $a/c$ için normalize edilmiş $K_{III}$ GŞF dağılımı, $\alpha=45^\circ$ , a) $a/c=0.25$ , b) $a/c=0.5$ , c) $a/c=1$ , d) $a/c=2$ , e) $a/c=4$ .....	138
Şekil 3.2.98. Denklem parametrelerinin belirlenmesinde analiz sonuçlarındaki verilerin seçimi .....	139
Şekil 3.2.99. Minitab programında regresyon analizi kısmının açılması (Minitab, 2014).....	139
Şekil 3.2.100. Minitab programında regresyon denklemi oluşturma işlemleri (Minitab, 2014) .....	140
Şekil 3.2.101. Çatlak ucu serbest yüzey bölgesinin sonlu eleman modelinde gösterilmesi .	142
Şekil 3.2.102. Çatlak ucu derinlik noktasını sonlu elemanlar modeli üzerinde gösterimi .....	168
Şekil 3.2.103. Normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörlerinin çatlak ucu boyunca dağılımları ve serbest yüzey ve derinlik noktalarında empirik denklem sonuçları ile karşılaştırmaları; $a/c=1.5$ , $a/t=0.5$ , $\beta$ ve $\alpha =54^\circ$ .....	186
Şekil 3.2.104: Normalize edilmiş mod-II gerilme şiddet faktörlerinin çatlak ucu boyunca dağılımları ve serbest yüzey ve derinlik noktalarında empirik denklem sonuçları ile karşılaştırmaları; $a/c=1.5$ , $a/t=0.5$ , $\beta$ ve $\alpha =54^\circ$ .....	187

Şekil 3.2.105. Normalize edilmiş mod-III gerilme şiddet faktörlerinin çatlak ucu boyunca dağılımları ve serbest yüzey ve derinlik noktalarında empirik denklem sonuçları ile karşılaştırmaları; $a/c=1.5$ , $a/t=0.5$ , $\beta$ ve $\alpha=54^\circ$ .....	187
Şekil 3.3.1. J-integral sınır eğrisi.....	189
Şekil 3.3.2. CT numunesinde kullanılan sonlu eleman ağının genel ve çatlak bölgesi görünüşleri .....	190
Şekil 3.3.3. CT numunesi analiz sonrası elde edilen gerilme dağılımı ve işlem aşamaları ..	191
Şekil 3.3.4. CT numunesi için CINT komutu ile hesaplanan J-integral değerlerinin FCPAS ile hesaplanan G değerleri ile karşılaştırılması. ....	192
Şekil 3.3.5. Çatlak ucu düğüm noktalarına lokal koordinat sistemi tanımlanması.....	193
Şekil 3.3.6. Levha sonlu elemanlar modeli (solda) ve çatlak bölgesinin yakın görünümü (sağda) .....	193
Şekil 3.3.7. Eliptik çatlak içeren levha modeli için CINT komutu ile hesaplanan J-integral değerlerinin FCPAS ile hesaplanan G değerleri ile karşılaştırılması .....	194
Şekil 3.3.8. CTST numunesi sonlu elemanlar modeli (solda) ve çatlak bölgesinin yakın görünümü (sağda).....	195
Şekil 3.3.9. Karışık mod yük altında CTST numunesi için toplam G değerlerinin J-integral ve FCPAS (G) çözümleri ile karşılaştırılması.....	195
Şekil 3.3.10. ANSYS VCCT ile hesaplanan toplam G değerlerinin J-integral ve FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması .....	196
Şekil 3.3.11. VCCT yöntemi ile elde edilen G1, G2, G3 değerlerinin FCPAS ile karşılaştırılması .....	198
Şekil 3.3.12. 20-düğüm noktalı elemanlar için VCCT yöntemi (Krueger 2004).....	199
Şekil 3.3.13. 5.74 kN yüke maruz CTST numunesi sonlu elemanlar modeli .....	200
Şekil 3.3.14. VCCT yöntemi ile hesaplanan G1 değerlerinin FCPAS ile karşılaştırılması....	201
Şekil 3.3.15. 10 kN karışık mod yüke maruz CTST numunesi sonlu eleman modeli .....	201
Şekil 3.3.16. VCCT yöntemi ile hesaplanan G1, G2 ve G3 değerlerinin FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması .....	202
Şekil 3.3.17. 10 kN karışık mod yüke maruz CTST numunesi modeli (çatlak bölgesinde düzgün yayılı dörtgen bölüntü).....	202
Şekil 3.3.18: VCCT yöntemi ile hesaplanan G1, G2 ve G3 değerlerinin FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması (çatlak bölgesinde düzgün yayılı dörtgen bölüntü) .....	203
Şekil 3.3.19. Dairesel yüzey çatlağı içeren levha sonlu elemanlar modeli.....	204
Şekil 3.3.20. Dairesel yüzey çatlağı içeren levha için VCCT metodu ile hesaplanan enerji salıverme oranı ile FCPAS sonuçlarının karşılaştırılması ( $a = 1 \text{ mm}$ ) .....	204
Şekil 3.3.21. Eliptik yüzey çatlağı ( $a/c=0.5$ ) içeren levha sonlu elemanlar modeli .....	205

Şekil 3.3.22. Eliptik yüzey çatlak (a/c=0.5) içeren levha için VCCT yöntemi ile hesaplanan enerji salıverme oranı dağılımının FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması .....	205
Şekil 3.3.23. Dairesel eğik yüzey çatlak içeren levha sonlu elemanlar modeli .....	206
Şekil 3.3.24. Dairesel eğik yüzey çatlak içeren levha için VCCT yöntemi ile hesaplanan enerji salıverme oranı dağılımının FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması .....	206
Şekil 3.3.25. Elastik-plastik analiz çözümünde kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı .....	207
Şekil 3.3.26. Elastik-plastik analiz için kullanılan 5 kN çekme yüküne maruz CTST numunesi .....	209
Şekil 3.3.27. Elastik-plastik analiz sonucu VCCT yöntemi ile hesaplanan enerji salıverme oranı (G) değerlerinin 'CINT' komutu ile karşılaştırılması .....	209
Şekil 3.4.1. Alüminyum 7075-T651 için elde edilen Gerilme – Birim Şekil Değiştirme eğrileri .....	211
Şekil 3.4.2. Çekme testi sonrasında Alüminyum 7075-T651 malzemenin görüntüsü .....	211
Şekil 3.4.3. Kullanılan CT numunesinin boyutları .....	212
Şekil 3.4.4: Kırılma deneylerinde elde edilen tipik kuvvet uzama eğrileri (ASTM E399-12) .....	213
Şekil 3.4.5. Kırılma tokluğu deney düzeneği .....	214
Şekil 3.4.6. Kırılma yüzeyinden yorulma ön çatlaklarının ölçümü .....	215
Şekil 3.4.7. Kırılma tokluğu testlerinden bazılarının grafiği ve kırılma kuvvetinin belirlenmesi .....	216
Şekil 3.4.8. Kırılma tokluğu değerleri dağılımları (histogram), a) Normal dağılım, b) Lognormal dağılım, c) Weibull dağılımı, d) Gamma dağılımı .....	217
Şekil 3.4.9. Kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan numunelerin üstten görünüşleri .....	218
Şekil 3.4.10. Ön ve arka yüzeylerden alınan çatlak kamera görüntüleri ve çevrim sayısını gösteren ekran görüntüsü .....	220
Şekil 3.4.11. Çatlak ilerleme grafikleri, R=0.1 .....	221
Şekil 3.4.12. Deneysel C-n katsayılarının literatür verileri ile karşılaştırması, R=0.1 .....	222
Şekil 3.4.13. Çatlak İlerleme grafikleri, R=0.5 .....	223
Şekil 3.4.14. Çatlak İlerleme grafikleri, R=0.7 .....	224
Şekil 3.4.15. Çatlak İlerleme grafikleri, R=0.8 .....	225
Şekil 3.4.16. Sabit genlikli yükleme durumunda da/dN dağılımı (R = 0.1) .....	228
Şekil 3.4.17. Sabit genlikli yükleme durumunda da/dN dağılımı (R = 0.5) .....	228
Şekil 3.4.18. Sabit genlikli yükleme durumunda da/dN dağılımı (R = 0.7) .....	229
Şekil 3.4.19. Sabit genlikli yükleme durumunda da/dN dağılımı (R = 0.8) .....	229
Şekil 3.4.20. Tekil aşırı yük oranının yorulma çatlak ilerleme ömrüne etkisi .....	231

Şekil 3.4.21. Tekil düşük yükleme durumunun çatlak ilerleme ömrüne etkisinin araştırılması .....	232
Şekil 3.4.22. Aşırı yüklemde blok genişliğinin yorulma çatlak ilerleme ömrüne etkisi .....	234
Şekil 3.4.23. Blok halinde düşük yükleme durumunun çatlak ilerleme ömrüne etkisi .....	235
Şekil 3.4.24. Karışık genlikli spektrum 1 (SP1) yük spektrumu .....	236
Şekil 3.4.25. Karışık genlikli SP1 spektrum yüklemesi çatlak ilerleme eğrileri .....	237
Şekil 3.4.26. Spektum 1/c yükleme profilleri ile gerçekleştirilen deney sonrası kırılma yüzeyleri .....	238
Şekil 3.4.27. FALSTAFF ve kısmi FALSTAFF (Spektrum 2 – SP2) yükleme profilleri .....	239
Şekil 3.4.28. Spektrum 2 (SP2) yüklemesi için çatlak ilerleme eğrileri .....	240
Şekil 3.4.29. Spektrum 2 (SP2) kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonrası kırılma yüzeyleri .....	240
Şekil 3.4.30. Walker $\gamma_w$ katsayısının bulunması .....	242
Şekil 3.4.31. Forman modelinin uygunluğunun araştırılması ve katsayılarının elde edilmesi .....	243
Şekil 3.4.32. Forman denklemi ile hesaplanan değerlerin deneylerle karşılaştırılması .....	244
Şekil 3.4.33. Wheeler modeli plastik bölge tanımlaması, (Wheeler O.E, 1972) .....	245
Şekil 3.4.34. Çatlak ilerleme gecikmesi bölgesinin sonunda çatlak ucu plastik bölge tanımları: a) Wheeler modeli, b) Sheu modeli (Song, P.vd. 2001) .....	246
Şekil 3.4.35. Farklı gerilme oranlarındaki deney sonuçları ile $\beta$ değeri bulunması .....	247
Şekil 3.4.36. Xiaoping Modeli için çatlak ucu plastik bölge tanımları (Huang, X. vd., 2008) .....	248
Şekil 3.4.37. Çatlak ilerleme hızını etkileyen parametrelerin gösterimi (Yuen B.K. & Taheri F. 2006) .....	249
Şekil 3.4.38. Aşırı yük uygulanması ve çatlak ilerleme hızı (Yuen B.K. ve Taheri F. 2006) .....	249
Şekil 3.4.39. $F_{OL}/F_{da/dN} = 1.29$ aşırı yükleme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması .....	253
Şekil 3.4.40. $F_{OL}/F_{da/dN} = 1.57$ aşırı yükleme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması .....	254
Şekil 3.4.41. $F_{OL}/F_{da/dN} = 1.71$ aşırı yükleme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması .....	254
Şekil 3.4.42. $F_{OL}/F_{da/dN} = 1.85$ aşırı yükleme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması .....	255
Şekil 3.4.43. $F_{OL}/F_{da/dN} = 2.0$ aşırı yükleme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması .....	255
Şekil 3.4.44. Değişken genlikli yükleme çatlak ilerleme modellerinin blok halinde aşırı yük uygulanan deneylere uygulanması, n=10 .....	256

Şekil 3.4.45. Değişken genlikli yükleme çatlak ilerleme modellerinin blok halinde aşırı yük uygulanan deneylere uygulanması, n=50 .....	256
Şekil 3.4.46. Değişken genlikli yükleme çatlak ilerleme modellerinin blok halinde aşırı yük uygulanan deneylere uygulanması, n=200 .....	257
Şekil 3.4.47. Değişken genlikli yükleme çatlak ilerleme modellerinin blok halinde aşırı yük uygulanan deneylere uygulanması, n=500 .....	257
Şekil 3.4.48. Spektrum profil konum tanımlaması .....	258
Şekil 3.4.49. Numunenin ortasında çatlak ilerlemesinin yavaşlaması/yavaşlamaması durumu .....	260
Şekil 3.4.50. Spektrum Aşırı Yük (SOL) İndeksinin tanımlanması.....	261
Şekil 3.4.51. Forman katsayıları ile Wheeler modelinin çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1) 262	262
Şekil 3.4.52. Walker katsayıları ile Wheeler modelinin çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1)..	263
Şekil 3.4.53. Forman modelinin Wheeler modelinde kullanımında çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1).....	263
Şekil 3.4.54. Walker modelinin Wheeler modelinde kullanımında çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1).....	263
Şekil 3.4.55. Xiaoping çatlak ilerleme denklemi ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1) .....	264
Şekil 3.4.56. Genelleştirilmiş Willenborg çatlak ilerleme denklemi ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1) .....	264
Şekil 3.4.57. Karekök ortalama (RMS) yaklaşımı ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1) .....	264
Şekil 3.4.58. Forman katsayıları ile Wheeler modelinin çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2) 265	265
Şekil 3.4.59. Walker katsayıları ile Wheeler modelinin çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2)..	265
Şekil 3.4.60. . Forman modelinin Wheeler modelinde kullanımında çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2).....	265
Şekil 3.4.61. Walker modelinin Wheeler modelinde kullanımında çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2).....	266
Şekil 3.4.62. Xiaoping çatlak ilerleme denklemi ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2) .....	266
Şekil 3.4.63. Genelleştirilmiş Willenborg çatlak ilerleme denklemi ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1) .....	266
Şekil 3.4.63. Karekök ortalama (RMS) yaklaşımı ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2) .....	267
Şekil 3.4.64. Literatürden bir çalışma ile sonuçların karşılaştırılması .....	268
Şekil 3.5.1. Havşa delikli plakada yorulma çatlak ilerleme test düzeneği .....	269
Şekil 3.5.2. Havşa delikli plakada kalınlık boyunca ilerlemiş çatlak için gerilme şiddet faktörü dağılımları .....	269
Şekil 3.5.3. Lee James numunesi ilk boyutları için çatlak ilerleme analizleri .....	270
Şekil 3.5.4. Güncellenmiş boyutlarıyla Lee James numunesinin nihai boyutları .....	271

Şekil 3.5.5. Lee James numunesi, yükleme aparatları ve analiz sınır şartları .....	271
Şekil 3.5.6. Elasto-plastik analizde çatlak ucundaki açılma miktarı ile boyutsuz yük şiddeti ilişkisi, ( $P_{maks}= 50$ kN) .....	272
Şekil 3.5.7. Farklı oyuk geometrilerinin gerilme şiddet faktörüne etkisinin incelenmesi .....	272
Şekil 3.5.8. Sonlu elemanlar yöntemiyle straingage konum ve yönlerinin belirlenmesi .....	273
Şekil 3.5.9. Straingagelerden alınan direnç değerleri.....	273
Tablo 3.5.1. Straingage ölçüm sonuçları .....	274
Şekil 3.5.10. Lee James numunesinde geometrik değişkenler ve değerleri .....	275
Şekil 3.5.11. LJ numunesinde çatlak ucu eleman boyutunun gerilme şiddet faktörüne etkisi .....	275
Şekil 3.5.12. LJ numunesi geometrik değişkenlerin gerilme şiddet faktörüne etkisi (sağ uç) .....	276
Şekil 3.5.13. LJ numunesi geometrik değişkenlerin gerilme şiddet faktörüne etkisi (orta-derinlik noktası) .....	277
Şekil 3.5.14. LJ numunesi geometrik değişkenlerin gerilme şiddet faktörüne etkisi (sol uç) .....	277
Şekil 3.5.15. Lee James numunesi geometrik değişkenlerin gerilme şiddet faktörü üzerinde etkileşim ilişkileri (orta derinlik noktası).....	278
Şekil 3.5.16. Deney tasarımı analizleri için çatlak boyutları kombinasyonu .....	278
Şekil 3.5.17. Transfer fonksiyonları için kalıntı (residual) grafikleri.....	279
Şekil 3.5.18. Lee James Numunesine EDM ile elipsoit çentik açılması.....	280
Şekil 3.5.19. Çatlak yüzey uzunluğu ve derinliği arasındaki ilişkinin belirlenmesi.....	281
Şekil 3.5.20 Değişik boyutlardaki yüzey çatlakları için mod-I gerilme şiddet faktörü dağılımları .....	282
Şekil 3.5.21. Farklı çatlak boyutlarında kırılma testi yapılmış Lee James numuneleri .....	282
Şekil 3.5.22. (a) Hadde yönüne göre çatlak yönleri (İriç, S. ve Ayhan, A.O., 2018), (b) Asal gerilme dağılımları.....	283
Şekil 3.5.23. Çatlak uzunluğuna bağlı olarak birincil asal gerilmelerin ( $S1/S2$ ) oranındaki değişim.....	284
Şekil 3.5.24. Üç-boyutlu çatlak ilerleme test düzeneği .....	285
Şekil 3.5.25. Sabit genlik altında üç-boyutlu çatlak ilerleme test grafikleri .....	286
Şekil 3.5.26. Sabit genlik altında üç boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri ( $R= 0.1$ ).....	286
Şekil 3.5.27. Sabit genlik altında üç-boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri ( $R= 0.5$ ).....	287
Şekil 3.5.28. Sabit genlik altında üç-boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri ( $R= 0.8$ ).....	287

Şekil 3.5.29. LJ numunesi R=0.1 deneylerindeki saçılımın literatür ile karşılaştırılması .....	288
Şekil 3.5.30. Üç-boyutlu çatlak ilerleme testlerinde kullanılan karışık genlikli Spektrum 1 ...	289
Şekil 3.5.31. Üç-boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri (Spektrum 1) ..	290
Şekil 3.5.32. Spektrum 1 profili ile yapılan deneyler için çatlak ilerleme ömür grafikleri.....	291
Şekil 3.5.33. Üç-boyutlu çatlak ilerleme testlerinde kullanılan Spektrum 2 yük profili .....	291
Şekil 3.5.34. Üç-boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri (Spektrum 2) ..	293
Şekil 3.5.35. Spektrum 2 deneyleri için çatlak ilerleme ömür grafikleri .....	293
Şekil 3.5.36. Spektrum 1 yüklemesi altında üç boyutlu çatlak ilerlemesi sırasında oluşan simetri bozukluğu.....	294
Şekil 3.5.37. CT ve LJ numunelerinde ani kırılma yüzeylerinde oluşan renk tonu farkı .....	295
Şekil 3.5.38. CT numunesi üzerinden alınan yüzey pürüzlülük ölçümü .....	295
Şekil 3.5.39. CT numunesi üzerinden alınan optik mikroskop görüntüsü (Şekil 3.5.35 soldan 1. CT numunesi).....	296
Şekil 3.5.40. CT numunesi üzerinden alınan optik mikroskop görüntüsü (Şekil 3.5.35 soldan 3. CT numunesi).....	296
Şekil 3.5.40. CT numunesi üzerinden alınan elektron mikroskobu görüntüsü .....	297
Şekil 3.6.1. Monte Carlo temelli çatlak ilerleme simülasyonu yazılımı için tasarlanan işlem adımları .....	300
Şekil 3.6.2. MINITAB ve projede geliştirilen program ile üretilen rastgele verilerin histogram dağılımları .....	301
Şekil 3.6.3. Monte Carlo simülasyonu döngü sayısının değişken dağılımlarına etkisi .....	302
Şekil 3.6.4. *.plot.txt dosyasının örnek ekran görüntüsü.....	302
Şekil 3.6.5. Çatlak uzunluk değerlerini *.txt dosyasından Excel'e kopyalayan VBA makro ..	303
Şekil 3.6.6. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	304
Şekil 3.6.7. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	305
Şekil 3.6.8. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	305
Şekil 3.6.9. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	306
Şekil 3.6.10. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, , Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	306
Şekil 3.6.11. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	307



Şekil 3.6.12. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	307
Şekil 3.6.13. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	308
Şekil 3.6.14. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)..	308
Şekil 3.6.15. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	309
Şekil 3.6.16. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	309
Şekil 3.6.17. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	310
Şekil 3.6.18. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) ...	310
Şekil 3.6.19. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	311
Şekil 3.6.20. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	311
Şekil 3.6.21. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	312
Şekil 3.6.22. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli) .....	312
Şekil 3.6.23. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	313
Şekil 3.6.24. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli) .....	313
Şekil 3.6.25. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli) .....	314
Şekil 3.6.26. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) ..	314
Şekil 3.6.27. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	315
Şekil 3.6.28. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	315
Şekil 3.6.29. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	316

Şekil 3.6.30. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli).....	316
Şekil 3.6.31. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	317
Şekil 3.6.32. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	318
Şekil 3.6.33. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	318
Şekil 3.6.34. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	318
Şekil 3.6.35. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	319
Şekil 3.6.36. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	319
Şekil 3.6.37. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	320
Şekil 3.6.38. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, , Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	320
Şekil 3.6.39. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	321
Şekil 3.6.40. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	321
Şekil 3.6.41. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	322
Şekil 3.6.42. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)..	322
Şekil 3.6.43. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	323
Şekil 3.6.44. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	323
Şekil 3.6.45. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	324
Şekil 3.6.46. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)...	324

Şekil 3.6.47. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	325
Şekil 3.6.48. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	325
Şekil 3.6.49. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	326
Şekil 3.6.50. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli) .....	326
Şekil 3.6.51. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	327
Şekil 3.6.52. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli) .....	327
Şekil 3.6.53. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli) .....	328
Şekil 3.6.54. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) ..	328
Şekil 3.6.55. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	329
Şekil 3.6.56. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	329
Şekil 3.6.57. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	330
Şekil 3.6.58. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli).....	330
Şekil 3.6.59. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	331
Şekil 3.6.60. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	332
Şekil 3.6.61. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	332
Şekil 3.6.62. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	333
Şekil 3.6.63. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	334

Şekil 3.6.64. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	334
Şekil 3.6.65. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	335
Şekil 3.6.66. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, , Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	335
Şekil 3.6.67. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	336
Şekil 3.6.68. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	336
Şekil 3.6.69. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	337
Şekil 3.6.70. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)...	337
Şekil 3.6.71. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	338
Şekil 3.6.72. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	338
Şekil 3.6.73. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	339
Şekil 3.6.74. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)....	339
Şekil 3.6.75. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	340
Şekil 3.6.76. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	340
Şekil 3.6.77. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	340
Şekil 3.6.78. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli) .....	341
Şekil 3.6.79. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	341
Şekil 3.6.80. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	342

Şekil 3.6.81. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	342
Şekil 3.6.82. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) ...	343
Şekil 3.6.83. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli).....	343
Şekil 3.6.84. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	344
Şekil 3.6.85. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	344
Şekil 3.6.86. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli).....	345
Şekil 3.6.87. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	345
Şekil 3.6.88. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	346
Şekil 3.6.89. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	346
Şekil 3.6.90. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	346
Şekil 3.6.91. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	347
Şekil 3.6.92. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	347
Şekil 3.6.93. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	348
Şekil 3.6.94. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	348
Şekil 3.6.95. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	349
Şekil 3.6.96. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	349
Şekil 3.6.97. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	349

Şekil 3.6.98. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)...	350
Şekil 3.6.99. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	350
Şekil 3.6.100. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	351
Şekil 3.6.101. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	351
Şekil 3.6.102. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)....	352
Şekil 3.6.103. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	352
Şekil 3.6.104. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	353
Şekil 3.6.105. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	353
Şekil 3.6.106. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli) .....	354
Şekil 3.6.107. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	354
Şekil 3.6.108. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	355
Şekil 3.6.109. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	355
Şekil 3.6.110. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) ...	355
Şekil 3.6.111. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli).....	356
Şekil 3.6.112. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	356
Şekil 3.6.113. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	357
Şekil 3.6.114. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli).....	357
Şekil 3.6.115. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	358

Şekil 3.6.116. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	358
Şekil 3.6.117. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	359
Şekil 3.6.117. Üç boyutlu çatlak ilerlemesi için kullanılan SP3 yükleme spektrumu .....	360
Şekil 3.6.118. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	361
Şekil 3.6.119. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	361
Şekil 3.6.120. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	362
Şekil 3.6.121. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	362
Şekil 3.6.122. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, , Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli) .....	363
Şekil 3.6.123. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	363
Şekil 3.6.124. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	364
Şekil 3.6.125. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli).....	364
Şekil 3.6.126. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)....	365
Şekil 3.6.127. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	365
Şekil 3.6.128. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	366
Şekil 3.6.129. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli) .....	366
Şekil 3.6.130. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)....	367
Şekil 3.6.131. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	367

Şekil 3.6.132. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	368
Şekil 3.6.133. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli) .....	368
Şekil 3.6.134. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Xiaoping modeli) .....	369
Şekil 3.6.135. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	369
Şekil 3.6.136. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	370
Şekil 3.6.137. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Xiaoping modeli).....	370
Şekil 3.6.138. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) ...	371
Şekil 3.6.139. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli).....	371
Şekil 3.6.140. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	372
Şekil 3.6.141 Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli) .....	372
Şekil 3.6.142. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli).....	373
Şekil 3.6.143. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	373
Şekil 3.6.144. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	374
Şekil 3.6.145. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli) .....	374
Şekil 3.7.1. FCPAS arayüzü “Probabilistic FCG” modülü işlem adımları.....	375
Şekil 3.7.2. “Probabilistic FCG” modülü ara yüzü .....	376
Şekil 3.7.3. “sim_properties.txt” dosyası .....	377
Şekil 3.7.4. “MCrun.bat” toplu iş paketi dosyası .....	378



## ÖZET

Bu projenin ilk aşamasında (Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) – Aşama 1, 2008-2011), temel geometrilere sahip parçalarda mod-I çatlak ilerleme analiz kabiliyetleri geliştirilmiş ve kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. Aşama 2 projesinde (2013-2016), mod-I çatlak ilerleme analiz kabiliyetleri pratik saha problemlerine uygulanarak ilave sağlamalar yapılmış, karışık mod yük altında iki ve üç boyutlu çatlak ilerleme problemleri için deneysel ve analiz yöntemleri ile iyileştirilmiş kırılma kriterleri oluşturulmuştur. Yukarıda tanımlanan çalışmalar ile karmaşık geometri ve yük altında kırılma ve çatlak ilerleme analizlerinin yapılabilmesi için gerekli yöntem ve yazılım altyapısı oluşturulmuştur.

Bu projede, geliştirilmiş olan karışık mod analiz yetenekleri, yeni endüstriyel ve literatür problemlerine uygulanmış ve olasılık temelli iki ve üç boyutlu çatlak ilerleme deney ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, aşağıda dört temel kategoride tanımlanmaktadır;

1) FCPAS karışık mod yük altında analiz kabiliyetlerinin enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma alanlarında karşılaşılan kırılma ve çatlak ilerleme problemlerine uygulanması ve doğrulamalarının yapılması. Bu kapsamda, değişik uygulamalar yapılmış, tahmin edilen düzlemsel olmayan üç boyutlu çatlak ilerleme yüzeyleri referans veriler ile doğrulanmıştır.

2) Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekaniği Analiz ve Deneysel Çalışmaları: Alüminyum 7075 ve standart Compact Tension (CT) numunesi kullanılarak malzeme özelliklerindeki değişkenlikler belirlenmiş, analizler yapılarak sabit ve değişken genlikli yükleme şartları için mevcut yorulma çatlak ilerleme modelleri değerlendirilmiş ve iyileştirilmiş bir model önerilmiştir. Elde edilen veriler aşağıdaki üç boyutlu çatlak ilerleme analizlerinde kullanılmıştır.

3) Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekaniği Analiz ve Deneysel Çalışmaları: Alüminyum 7075 malzemesinden yapılmış standart olmayan ve üç boyutlu mod-I yüzey çatlağı içeren numuneler kullanılarak yukarıdaki iş paketinden elde edilen veriler ile sabit ve değişken genlikli yükleme şartları altında yorulma çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile sağlamaları yapılmıştır. Bağımsız bir çatlak ilerleme analiz yazılımı geliştirilmiştir.

4) FCPAS grafiksel kullanıcı ara yüzünün (GUI) güncellenmesi. Yukarıda tanımlanan gelişmeler çerçevesinde kullanıcı ara yüzünde güncellemeler yapılmıştır.

Proje kapsamında yapılan çalışmalar ile FCPAS'ın mod-I ve karışık mod yük şartları altındaki kırılma ve çatlak ilerleme problemlerine uygulanabilir bir program olduğunun ispatı yapılmış, olasılık temelli çatlak ilerleme analiz kabiliyetleri geliştirilerek sağlamaları yapılmıştır. Böylece, projenin 4. aşaması olarak planlanan, yüksek sıcaklık ve değişken şartlar altında gerçekleşen kırılma problemleri çalışmalarının zemini hazırlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Olasılık temelli yorulma çatlak ilerlemesi, kırılma mekaniği, sonlu elemanlar yöntemi.

## ABSTRACT

In the first phase of this project (Fracture and Crack Propagation Analysis System (FCPAS) – Phase 1, 2008-2011), capabilities were developed for crack propagation analysis of parts with basic geometries and a graphical user interface was developed. In the Phase 2 project (2013-2016), the mode-I crack propagation analysis capabilities were applied to other practical problems and improved fracture criteria were developed for mixed mode problems using experimental and analysis techniques. By the works described above the capabilities had been developed for analyses of fracture and crack propagation problems involving complex geometry and loading.

In this project, the aforementioned analysis techniques are applied to new problems from literature and industry and probabilistics-based experiments and analyses are performed. These studies are defined in four basic categories as given below;

1) Applications and verifications of FCPAS's capabilities for mixed mode fracture and crack propagation analyses in the areas of energy, transportation, aviation and/or defense. In this context, different applications are performed, the predicted three-dimensional non-planar crack propagation surfaces and lives are verified by their corresponding reference data.

2) Two-Dimensional Probabilistic Fracture Analyses and Experiments: Variations in material properties are determined using Aluminum 7075 and standard Compact Tension (CT) specimen, the existing models are evaluated by performing fatigue crack propagation analyses under constant and variable amplitude loads and an improved mode is proposed. The obtained results are used in the analyses of three-dimensional crack propagation analyses defined below.

3) Three-Dimensional Probabilistic Fracture Analyses and Experiments: Using nonstandard specimens made of Aluminum 7075 and possessing three-dimensional mode-I surface crack, the data obtained above is employed, fatigue crack propagation analyses are carried out and the results are verified using experimental measurements. An independent crack propagation analysis program is developed.

4) Update of FCPAS's graphical user interface (GUI). Based on the developments described above, updates are made on the graphical user interface.

In the context of this project, it was verified that FCPAS could be applied to mode-I and mixed mode fracture and crack propagation problems. Capabilities were developed and verified for probabilistic crack propagation analyses. Thus, the bases were prepared for a 4th-phase project, in which three-dimensional fracture problems involving high temperatures and other variable conditions could be studied.

**Keywords:** Probabilistic fatigue crack propagation, fracture mechanics, finite element method.

# 1. GİRİŞ

Yaklaşık yarım yüzyıl öncesine kadar temel teorik el hesaplamaları ile yapılan mühendislik tasarım ve analizleri, 1960'lardan sonra, kullanım ve detay düzeyi oldukça hızlı artan bir şekilde bilgisayarlarda sayısal modelleme ve analizler ile gerçekleştirilmeye başlanmıştır. "Sonlu Elemanlar Yöntemi" ismi de, ilk defa 1960'lı yıllarda R. Clough tarafından kullanılmış ve bu yöntem, günümüzde gerilme ve titreşim analizlerinden, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve elektromanyetizma gibi değişik birçok mühendislik alanında oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Hatta, "günümüzde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmadan mekanik ve ısı transferi alanlarında gerçekleştirilen yeni ileri düzey ve özgün tasarımlar bulunmamaktadır" ifadesi, abartı bir söylem olmaz.

Sonlu elemanlar yönteminin son yarım yüzyıldaki hızlı gelişimi ve yoğun kullanımı ile, özellikle 1980'lerden başlayarak Kırılma Mekaniği alanında da sonlu elemanlar yöntemi yoğun şekilde kullanılmaya başlanmış ve günümüzde karmaşık üç-boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme problemleri de bilgisayarlar ile çözülebilir hale gelmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin Kırılma Mekaniği alanında kullanılmasına, tekil elemanlar kullanılarak yer değiştirme bağıntı yöntemi, sanal çatlak kapanması yöntemi, gerilme bağıntı yöntemi ve zenginleştirilmiş elemanlar yöntemi örnek olarak verilebilir. Sonlu elemanlar yöntemi, malzeme ve/veya deformasyon geometrisi açısından doğrusal olmayan problemlerin çözümlerinde de kullanılmaktadır.

Yukarıda tarihçeleri özetlenen sonlu eleman yöntemi ve yöntemin kırılma mekaniği alanındaki uygulamaları, verilen yük, geometri ve malzeme özellikleri değerlerine bağlı olarak, hasar içermeyen bir problem için deformasyon ve gerilmeleri, çatlak içeren bir yapı için ise ilave olarak gerilme şiddet faktörü gibi kırılma parametrelerinin genellikle doğru bir şekilde hesaplanabilmesine imkân vermektedir. Ancak, verilen bir mühendislik probleminde geometrik boyutlar, problem girdileri (yük, ısı girdi, sınır şartları vb.) ve problemi etkileyen malzeme özelliklerinde (elastiklik modülü, ısı iletim, çatlak ilerleme özellikleri vb.) değişkenlikler veya belirsizlikler de bulunduğundan, problemin çözümünden elde edilen çıktı parametrelerindeki değişim aralıkları da bilinmelidir. Bir başka deyişle, problem çözümünden elde edilen değişken değer aralığının olasılık temelli olarak da hesaplanabilmesi oldukça istenen bir durumdur. Nitekim, gerek tasarım aşamasında, gerekse tasarlanarak imal edilen ve sahada çalışan

makine ve/veya parçaların mekanik sağlık/güvenlik yönetimi için mekanik ömrünün ve belirli bir boyuta ulaşabilecek olan hasar ihtimalinin (örn. çatlak uzunluğu) bilinmesi bazı mühendislik kararları için gerekli olmaktadır.

Yukarıda açıklanan amaç ve gereksinimler doğrultusunda, “Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 3 (Fracture and Crack Propagation Analysis System (FCPAS) – Phase 3)” adlı bu proje çalışmasının büyük bir kısmı yük, geometri ve malzeme özelliklerindeki değişkenlikleri hesaba katarak, kırılma parametreleri ve çatlak ilerleme oranlarındaki değişkenliği belirleyebilmek için hesaplamalı bir yöntem geliştirilmesine ve deneyler ile gerekli sağlamaların yapılmasına odaklanmıştır. Diğer yandan, projenin ilk iş paketinde Aşama 2 projesinde karışık mod kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin analizleri için geliştirilmiş olan yöntem ve kriterler kullanılarak literatürde bulunan veya sahadan elde edilen bazı karışık mod yorulma çatlak ilerleme problemleri çözülmüş ve ilgili veriler ile sağlamaları yapılmıştır. Böylece, FCPAS analiz sisteminin karışık mod yük altında bulunan çatlak ilerleme problemleri için ilave sağlaması yapılmış ve olasılık temelli çatlak ilerleme ömür tahminleri için temel bir altyapı oluşturulmuştur. Bu altyapının, malzeme özelliklerindeki değişkenliğin oldukça fazla olduğu özellikle yüksek sıcaklık altında kırılma ve çatlak ilerleme problemleri için faydalı olacağı aşikârdır.

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. Enerji, Ulaştırma ve/veya Savunma Uygulamalarında Karışık Modlu Çatlak İlerleme Simülasyonları ve Ömür Analizleri: Bu çalışma kapsamında, Aşama 2 projesinde üç-boyutlu karışık mod kırılma ve çatlak ilerleme analizleri için geliştirilmiş olan yöntem ve kriterler, adı geçen önemli teknik alanlarda karşılaşılan düzlem-içi ve üç-boyutlu karışık modlu çatlak ilerleme problemlerine uygulanmıştır. Yapılan analizler ile düzlemsel olmayan çatlak ilerleme yüzeyleri belirlenmiş ve çatlak ilerleme ömürleri hesaplanmış olup, literatürdeki ilgili veriler ile karşılaştırmaları yapılarak yöntemin sağlaması yapılmıştır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında üniform çekme ve eğilme gerilmesi yükleri altındaki levhalarda bulunan eğik ve dönmüş yarı-eliptik yüzey çatlaklarının parametrik analizleri yapılarak, pratikte karşılaşılabilecek yüzlerce farklı problemi içeren geniş kapsamlı bir çözüm kütüphanesi ile problemi tanımlayan parametrelerin fonksiyonu olarak empirik denklemler elde edilmiştir. Son olarak, bu iş paketi kapsamında projenin 4. aşamasında ele alınabilecek olan doğrusal olmayan kırılma problemleri için temel oluşturmak amacıyla, sanal çatlak kapatma yöntemi kullanılarak birim şekil değiştirme enerjisi salıverme

oranlarının hesaplanması (G) için yöntem geliştirilmiş ve değişik çözümler ile karşılaştırmalar yapılarak yöntemin sağlanması gerçekleştirilmiştir.

2. Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Analiz ve Deneysel Çalışmaları: Bu çalışmanın temel amacı, bir sonraki iş paketinde analiz ve olasılık temelli simülasyonlar için gerekli olan çatlak ilerleme ile ilgili malzeme özelliklerindeki değişkenlikleri belirlemek, sabit ve değişken yük altında yapılan deneylerden elde edilen veriler ile iki-boyutlu çatlak ilerleme modellerini değerlendirmektir. Ayrıca, gerçekleştirilen deneylerin modellemeleri de yapılmış ve deneylerden yüksek çözünürlüklü kamera ölçümleri ile elde edilen çatlak uzunluk verileri kullanılarak modelleme sonuçları ile karşılaştırma yapılmış ve sonuç olarak iyileştirilmiş bir model önerilmiştir.
3. Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Analiz ve Deneysel Çalışmaları ve Sağlama: Bu çalışmanın temel amacı, olasılık temelli üç-boyutlu mod-I çatlak ilerleme simülasyonları yapabilen yöntem ve yazılım geliştirilmesidir. Bu kapsamda, üç-boyutlu çatlak içeren ve standart olmayan numuneler kullanılarak değişken genlikli yükler içeren farklı yük spektrumları ile farklı çatlak ilerleme deney grupları halinde testler yapılmıştır. Yüksek çözünürlüklü kameralardan elde edilen çatlak ilerleme eğri grupları ile analizlerden elde edilen çatlak ilerleme eğri grupları karşılaştırılarak, geliştirilmiş olan yöntem ve simülasyon yazılımının sağlanması yapılmıştır.
4. FCPAS Grafikselle Kullanıcı Arayüzünün (GUI) Güncellenmesi: Olasılık temelli çatlak ilerleme simülasyonlarının GUI rehberliğinde sistematik bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, yukarıdaki iş paketinde geliştirilen bağımsız çatlak ilerleme analiz programının da mevcut FCPAS kullanıcı arayüzünden (GUI) direkt olarak çalıştırılabilmesi ve bu programın FCPAS alt programlar grubuna dâhil edilebilmesi için GUI'de gerekli güncelleştirmeler yapılmıştır. Yapılan güncelleme ve nasıl kullanılacağına dair detaylar, ilgili bölümde görsel örnekleri ile açıklanmaktadır.

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 ilgili detayları 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. KIRILMA VE ÇATLAK İLERLEME ANALİZ SİSTEMİ (FCPAS) – AŞAMA 3**

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 çıktıların sağlamış olduğu avantajlar ile literatüre yapılan ve gelecekte yapılması planlanan katkılar belirtilmektedir.

### **2.1 Literatür Özeti**

Proje çalışmaları ile ilgili literatür özeti, projenin ana başlıkları olan karışık mod kırılma ve yorulma çatlak ilerleme problemlerinin üç-boyutlu modellenmesi, olasılık temelli iki-boyutlu kırılma mekaniği çalışmaları ve olasılık temelli üç-boyutlu kırılma mekaniği çalışmaları ana grupları halinde aşağıda verilmektedir.

#### **2.1.1 Karışık Mod Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi**

Karışık modlu yükleme durumu, üç boyutlu bir çatlak, tek eksenli yükleme ve yönüne dik olmayan bir şekilde yönlendiğinde çatlak bölgesinin kayma gerilmelerine de maruz kalması veya etki eden dış yüklerin çatlak yüzeyleri ile dik olmayan bir açı yapması durumunda ortaya çıkabilmektedir. Makine parçaları sıklıkla karmaşık yükler altında yorulma yüklemesine maruz kalabilmektedir. Karmaşık yükler altında, çatlak sadece açılma modunun (mod-I) dışında, kayma (mod-II) ve yırtılma (mod-III) modları etkisi altında da olduğundan karışık modlu kırılma analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yaklaşık olarak son 20 yıla kadar yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak basit mod-I yüklemesi altında malzemelerin çatlak ilerleme davranışının incelenmesi üzerine olmuştur. Ancak pratikte kullanılan birçok parça, çalışma koşulları bakımından çatlak bölgesinde mod-II ve mod-III yüklemelerine de maruz kalabilmektedir. Dolayısıyla, bu alanda özellikle son 20 yıl içerisinde modelleme, analiz ve deneysel araştırmalar artarak ağırlık kazanmıştır.

İki boyutlu kırılma problemlerinde çatlak, bulunduğu düzlem içerisinde düz (mod-I) veya eğri (karışık mod) şeklinde ilerleme göstermektedir. Üç boyutlu çatlak problemlerinde ise, geometri, yükleme ve sınır şartlarına bağlı olarak düzlemsel veya düzlemsel olmayan bir şekilde ilerleyebilmektedir. Dolayısıyla, kırılma davranışı çatlak yüzeyinin ve çatlak önünün eğriliğine bağlı olarak üç boyutlu çatlak ilerlemesiyle ilişkilendirilmelidir. Literatürde, çevresel, düz kenarlı veya yönlendirilmiş çatlak içeren çubuk, dikdörtgen kesitli kiriş, levha veya disk şeklinde numuneler ile değiştirilmiş CT (compact tension) numuneleri gibi farklı numune tipleri kullanılarak çeşitli deneysel çalışmalar yapılmış ve karışık modlu yük altında kırılma ve çatlak ilerleme davranışları incelenmiştir (Shah, 1974; Suresh ve Tschegg, 1987; Kamat vd. 1989; Manoharan vd. 1989; Suresh vd. 1990; Kamat ve Hirth 1996; Liu vd. 2004; Avcı vd. 2005; Chang vd. 2006; Srinivas vd. 2006; Rao vd. 2008; Lin vd. 2010; Citarella vd. 2014; Ayatollahi ve Saboori, 2015; Saboori ve Ayatollahi, 2017; Safaei vd. 2017).

Her üç kırılma modunun da oluşmasına neden olan üç boyutlu karışık mod-I/II/III yüklemesi altında kırılma mekanizmasının doğru bir şekilde modellenmesi ve analiz edilmesi, sadece mod-I ve mod-II kırılma modlarının olduğu mod-I/II düzlemsel karışık modlu kırılma problemlerine kıyasla daha zordur. Bunun temel nedenlerinden biri, üç boyutlu tam karışık mod yüklemesi içeren mod-I/II/III ve buna yakın düzeyde karmaşıklık içeren mod-I/III problemlerinde, mod-II ve mod-III kırılma modları birbirleri ile eşleniktir ve birbirlerinden bağımsız olarak değerlendirilemezler. Karışık mod-I/II/III kırılma mekanizmasının hem sayısal hem de deneysel yöntemlerin bir arada kullanılarak kapsamlı bir şekilde anlaşılması ve açıklığa kavuşturulması için yapılan literatürdeki çalışmalar nispeten yeni ve sınırlıdır. Davidson ve Sediles (2011), yaptıkları çalışmada levha tipi numuneler için uygun olan kayma-burulma-eğme (Shear-Torsion-Bending) testi adında yeni bir test yöntemini tanıtmışlardır. Hannemann vd. (2017), silindirik tip numuneler için dönen bir eğme test teçhizatı geliştirmişlerdir. Hyde ve Aksogan (1994) ve Citarella vd. (2014; 2015), silindirik numuneler kullanılarak bileşik çekme ve burulma yükü altında sayısal ve deneysel analizler gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte bu test yöntemlerinin, özel bir test makinesine ve ilgili ekipmana ihtiyaç duymalarından dolayı eksik yönleri bulunmaktadır.

Tek eksenli yükleme yapan konvansiyonel bir test cihazı ile çatlak gelişimini ve kırılmayı incelemek amacıyla karışık mod-I/II/III deneylerini gerçekleştirmek için, mod-I, II ve III kırılma modlarının herhangi bir kombinasyonunu sağlayan özel bir tutucuya ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde, istenen bu özelliğe sahip sadece birkaç farklı yükleme aparatı tanıtılmıştır. Richard ve Kuna (1990) tarafından geliştirilen ve üç temel kırılma modunun tüm olası kombinasyonlarında yükleme yapabilen AFM (All Fracture Mode-Tüm Kırılma Modu) isimli yükleme tutucusu, karışık mod-I/II/III kırılma ve yorulma çatlak ilerleme deneylerinin

gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır. Yazarlar, tutucunun sahip olduğu yüksek ağırlık ve atalet nedeniyle, yorulma çatlak ilerleme testlerinde kullanımının sadece düşük test frekanslarıyla mümkün olabildiğini belirtmişlerdir. Kapoor ve Zarrabi (2010) yapmış olduğu çalışmada, karışık mod-I/II/III yüklemesi altındaki yapıların tek eksenli yükleme cihazı ile kırılmasını deneysel olarak araştırmak için bir yükleme fikstürü önermiştir. Ancak fikstür sadece mod-I, II ve III kırılma modlarının sınırlı kombinasyonlarını sağlayabilmekte, orta ve yüksek mod-III koşulları için kullanılamamaktadır. Schirmeisen ve Richard (2009) çalışmalarında, CTSR (Compact tension shear rotation) isimli bir numune ve numuneye uygun, karışık mod-I/II/III yüklemesinin herhangi bir kombinasyonuna izin veren bir yükleme tutucusu geliştirmişlerdir. Bu tutucuyu kullanarak Richard vd. (2014; 2016; 2017) tarafından çeşitli deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmalarda, Polimetil metakrilatin (PMMA) kırılma tokluğu değerini belirlemeye yönelik ve Al 7075-T651 alaşımlı malzemenin yorulma çatlak ilerlemesinin başlangıcı için eşik değerleri belirlemeye yönelik testler gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, geliştirilen tutucu kullanılarak gerçekleştirilecek çatlak ilerleme testlerinde, tutucunun tasarımının karmaşıklığı nedeniyle optik ölçümlerin imkânsız olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, karışık modlu yükleme altında numuneleri kırmak için gereken yük kapasitesinin yüksek olması nedeniyle, geliştirilen tutucunun Al 7075-T651 malzemesinin karışık mod kırılma tokluğunu belirleme konusunda yeterli olmadığını da ifade etmişlerdir. Son yıllarda Zeinedini (2018) ve Razavi ve Berto (2019) benzer geometriye sahip karışık mod-I/II/III yükleme tutucusu geliştirerek farklı yükleme açılarında kırılma testleri gerçekleştirmişlerdir. Ancak her iki tutucu için de çatlak ilerleme testleri sırasında çatlağın ilerleme karakteristiğinin kameralar yardımıyla kontrol ve takibinin gerçekleştirilmesi tutucuların tasarımı nedeniyle mümkün olmadığı için, bu tutucular çatlak ilerleme testleri için elverişli değildir. FCPAS - Aşama 2 projesi kapsamında yukarıda belirtilen eksiklikleri gidermeye yönelik karışık mod-I/II/III yüklemesinin tüm kombinasyonlarına imkân veren ve çatlak ilerleme testleri esnasında çatlağın ilerlemesinin kameralar yardımıyla kontrol ve takibine imkân tanıyan bir yükleme tutucusu geliştirilmiş ve bu tutucu kullanarak birçok farklı yükleme açısı altında kırılma ve çatlak ilerleme analiz ve testleri gerçekleştirilmiştir (Ayhan ve Demir, 2019; Demir vd. 2019). Gerçekleştirilen testler ışığında literatüre yeni iyileştirilmiş kırılma ve çatlak ilerleme kriterleri önerilmiştir. Projenin bu iş paketinde, FCPAS - Aşama 2 projesinde elde edilen karışık mod yükleme altında üç-boyutlu çatlak ilerleme simülasyon kabiliyetleri, literatürden referans alınan problemlere uygulanmış ve bu kapsamda çatlak ilerleme simülasyonları yapılmıştır. Çatlak ilerleme profil/yüzeyleri ve ömür tahminleri açısından mukayeseleri gerçekleştirilmiştir.



## 2.1.2 Karışık Mod Kırılma Problemlerinin Üç-Boyutlu Analizi

Mühendislik yapılarında karşılaşılan sorunlardan biri de malzemelerin imalat sırasında veya üretildikten sonra hasara uğraması veya kırılmasıdır. Pratikte sıkça karşılaşılan kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin önemli bir kısmı bir levhada bulunan yüzey çatlakları problemine indirgenerek çözülebilir. Dolayısıyla, değişik boyutlar ve yükler altında olan levhalarda bulunabilecek değişik geometrik boyut ve yönlenme açılarındaki çatlakların analiz edilerek gerilme şiddet faktörlerinin elde edilmesi oldukça gereklidir ve problemi etkileyen parametrelerin geniş bir aralıktaki değerlerini kapsayan bu çözümler literatürde bulunmamaktadır.

Kırılma Mekaniği alanındaki bilimsel literatüre bakıldığında, üç boyutlu karışık mod eliptik yüzey çatlakları için gerilme şiddet faktörü hesaplamaları oldukça az bulunmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemiyle (Ayhan ve Nied, 2002; Ayhan, 2004; 2007; Uslu vd. 2014) çözülen analizlerde, genellikle mod-I (Raju ve Newman, 1979; Liao ve Atluri, 1989; Wang ve Lambert, 1995; Guozhong vd. 1996; Coules, 2016; Okada vd. 2016) yüklemesi altındaki problemler ele alınmıştır. Alternatif metotlar kullanılarak (Shah ve Kobayashi, 1973; Frangi vd. 2002; Livieri ve Segala, 2016) gerilme şiddet faktörü hesapları da yapılmıştır. Shah ve Kobayashi (1973), farklı nümerik teknikler yardımıyla gerilme şiddet faktörü hesabı yapmışlardır. Bunlardan ilki normal gerilmeye maruz yarı sonsuz levhada eliptik çatlak için gerilme şiddet faktörünün polinom yardımıyla hesaplanmasıdır. İkinci olarak yarı modelde yüzeye tanımlanan normal ve kayma gerilmelerinden dolayı oluşan gerilme şiddet faktörü incelemesi yapılmıştır. Liao ve Atluri (1989), et kalınlığı sabit olan bir levhada yarı dairesel yüzey çatlak için farklı derinlik değerleri için iç içe geçmiş değişim (nested alternating) yöntemi yardımıyla mod-I gerilme şiddet faktörü hesabı yapmışlardır. Guozhong vd. (1996), üniform aksenal gerilmeye maruz bir levhada eliptik çatlak için mod-I gerilme şiddet faktörü hesabı yapmışlardır. Yöntem olarak da yazar tarafından geliştirilen hibrit sınır eleman metodu (HBEM) yardımıyla gerilme şiddet faktörünü çözmüşlerdir. Frangi vd. (2002), sınır eleman metodu ve Galerkin yaklaşımıyla üç boyutlu levhalarda kırılma analizini yapmışlardır. Yöntemin doğruluğunu test etmek için, ikinci dereceden izoparametrik dörtgen ve üçgen elemanlar ile bazı örnek çatlak problemleri çözülmüştür. Açılma ve kayma modu altında gerilme şiddet faktörü değerleri hesaplanarak literatürdeki verilerle karşılaştırma yapılmıştır. Liveri ve Segala (2016), silindirik ve küresel kaplarda gömülü eliptik çatlaklar için gerilme şiddet faktörlerini hesaplamışlardır. Çalışmalarında ikinci dereceden bir yaklaşıma dayanan ağırlık fonksiyonu kullanmışlardır. 1979 yılında Raju ve Newman, normal gerilmeye maruz bir levhadaki eliptik yüzey çatlakları için mod-I gerilme şiddet faktörünü hesaplamışlardır. Yöntem olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı için 0.2 ile 2 arasında

beş farklı değer kullanılmıştır. Çatlak derinliği/levha et kalınlığı için 0.2 ile 0.8 arasında dört farklı değer kullanılarak geniş bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma literatürdeki verilerle karşılaştırılarak doğruluğu ispatlanmıştır. 1995'te Wang ve Lambert, üniform olmayan gerilmeye maruz ve yüzey çatlağına sahip bir levhada mod-I gerilme şiddet faktörlerini hesaplamışlardır. Düşük derinlik-yüzey uzunluğuna sahip ( $a/c < 1$ ) yüzey çatlaklarında ve çatlak derinliği/levha et kalınlığı oranı 0.2 ile 0.8 arasında seçilerek geometrik parametreler belirlenmiştir. Çatlak yüzeyine doğrusal, parabolik ve kübik biçimde gerilme dağılımı uygulanmıştır. Türeterek oluşturulan ağırlık fonksiyonu ile zenginleştirilmiş elemanlarla oluşturulan sonlu elemanlar analiz sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmış ve gerilme şiddet faktörlerinin %5 den daha az bir farklılık içerisinde olduğu görülmüştür. Ayhan ve Nied'in 2002 yılı makalesinde, zenginleştirilmiş eleman yardımıyla sonlu elemanlar metodu kullanılarak yüzey çatlaklarında gerilme şiddet faktörü hesaplamaları yapılmıştır. Ayhan daha sonra 2004 ve 2007 yıllarında eksenel normal gerilmeye maruz üç boyutlu bir levhada eğik ve dönmüş yüzey çatlağı ve köşe çatlağı için geniş bir gerilme şiddet faktörü çalışması yapmıştır. Uslu vd. 2014 yılında mekanik ve yer değiştirme yüklerine maruz levhada yüzey çatlakları için gerilme şiddet faktörlerini hesaplamışlardır. Bu çalışmalarda zenginleştirilmiş sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Son beş yılda yapılan çalışmalara bakıldığında Okada vd. (2016), tetrahedron elemanlar ile oluşturulan modeller ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak parametrik analizler gerçekleştirmiş, levha ve kalın cidarlı silindirlerde mod-I gerilme şiddet faktörü dağılımlarını hesaplamışlardır. Yüksek derinlik-yüzey uzunluğu oranına ( $a/c > 1$ ) sahip yüzey çatlaklarında  $a/c$  değeri 1 ile 8 arasında geniş bir yelpazede değişim göstermiştir. Yazarlar yükleme koşulları ve çatlak şekilleriyle ilgili parametrik çalışma yapmak için otomatik bir analiz prosedürü geliştirmişlerdir. Bu prosedür otomatik ağ oluşturma işlemi, sınır şartlarını tanımlama ve VCCM (sanal çatlak kapatma-integral yöntemi) ile gerilme şiddet faktörü hesaplama olarak özetlenebilir. Ayrıca bu analiz prosedürü ile kalın cidarlı silindirde ve levhadaki çatlak için gerilme şiddet faktörünün tahmin edilebildiği görülmüştür. Coules (2016), farklı boyutlarda derinlik-yüzey uzunluğu oranına sahip birbirine benzemeyen yüzey çatlak çiftinin gerilme şiddet faktörü etkileşimlerini hesaplamıştır. Etkileşim faktörü, etkileşimdeki çatlağın mod-I gerilme şiddet faktörünün herhangi bir kusurdan uzak aynı yükleme koşullarına sahip geometrideki çatlağın gerilme şiddet faktörüne oranı olarak tanımlanmıştır. Mod-I yüklemesine maruz levhada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve literatürdeki diğer verilerle sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yukarıdaki literatür özetinden anlaşılacağı üzere, yapılan çalışmaların çoğu mod-I gerilme şiddet faktörü üzerinde yoğunlaşmıştır. Karışık mod altında yapılan birkaç çalışmada da geniş bir aralık dikkate alınarak gerilme şiddet faktörü hesapları yapılmamıştır. Dolayısıyla bu

çalışmada, levha kalınlığına göre farklı boyut ve şekil oranlarına sahip, değişik açılarda eğik ve dönmüş yüzey çatlakları için çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü değerleri FRAC3D yardımıyla hesaplanarak geniş bir çözüm kütüphanesi oluşturulması hedeflenmiştir.

Karışık Mod Kırılma Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi başlığı altında gerçekleştirilen çalışmalar, lisansüstü tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiş ve yukarıda verilen literatür bilgisi ilgili tezden alınmıştır (Şahin, 2020).

### **2.1.3 J-İntegral ve VCCT Yöntemi ile Üç-Boyutlu Kırılma Analizleri**

Elastik plastik deformasyon davranışı gösteren malzemelerde çatlak kararsızlığını ya da çatlak ilerlemesini karakterize etmek için Rice tarafından ortaya konulmuş olan J-integral metodu kullanılmaktadır (Rice, 1968). J-integral, çatlağın ilerlemesi durumunda birim çatlak yüzeyi alanı başına düşen toplam enerji salıverme oranını (strain energy release rate) temsil etmektedir. Her ne kadar basit mod-I problemleri için oldukça iyi bir yöntem olsa da, karışık mod problemlerde, J-integral ile elde edilen toplam enerji boşalım oranı değerinin kırılma modlarına ayrıştırılması gerekmektedir. Karışık mod kırılma problemleri için sanal çatlak kapatma yöntemi (VCCT) metodu yaygın kullanılan bir metottur. İlk uygulama örneği Rybicki vd. (1977) tarafından kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilen çalışmada görülmektedir (Rybicki vd., 1977). VCCT metodu, çatlak ucundaki reaksiyon kuvvetleri ve yer değiştirmelere bağlı olarak geliştirilmiş bir tekniktir (Krueger, 2004). Literatürde görülen ilk çalışmalar 2 boyutlu problemler için, dört düğüm noktalı elemanlar kullanılarak yapılmıştır (Rybicki ve Kanninen, 1977). Daha sonra 3-boyutlu problemler, sekiz düğüm noktalı elemanlar ile ele alınmıştır (Shivakumar et al., 1988). Diğer yandan, iki boyutlu problemler için dokuz düğüm noktalı elemanlar da kullanılmıştır (Wang ve Raju, 1996). Son olarak, çatlak ucu bölgesinde bulunan 20 düğüm noktalı elemanlar için bir formülasyon Krueger tarafından çıkarılmıştır (Krueger, 2004). Bu çalışmada, Krueger tarafından oluşturulan formülasyonlar kullanılmıştır.

### **2.1.4 Olasılık Temelli Kırılma Mekaniği Çalışmaları**

Çatlak içeren bir yapının yorulma yüklemesine maruz kalması durumunda çatlağın ilerleme davranışının doğru modellenmesi güvenli kullanım için oldukça önemlidir. Problemde etki eden gerilme şiddet faktörünün malzemenin kırılma tokluğu değerini aşması sonucu çatlağın kararsız olarak ilerlemesi beklenir. Diğer yandan, çatlak içeren parça veya yapılarda görülebilecek yorulma çatlak ilerleme hızı veya kritik yük değerleri de problemde etki eden

parametrelerin değerlerindeki değişkenliklere de bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Bu değişkenlere örnek olarak, yükleme durumundaki değişimler, malzeme özelliklerindeki değişimler ve geometrik değişim veya dağılımlar verilebilir. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömürlerindeki değişimler açısından, kullanılan farklı modellere göre farklı sonuçların elde edileceği en önemli parametre, aşırı yükleme ve düşük yükleme durumları gibi, yük değerlerindeki değişimlerdir. Bu nedenle, aşağıda verilen literatür özeti bu konu üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Sabit genlik altındaki yüklerde çatlak ilerleme ömrünün hesaplanması için Paris-Erdoğan (1963) denklemi kullanılabilir. Çatlak ilerleme eğrisinin ikinci bölgesinde geçerli olan bu denklemde gerilme oranı doğrudan dikkate alınmamaktadır. Gerilme oranının da dikkate alındığı hesaplama yöntemleri Forman (1972), Walker (1970) ve Newman (1981) tarafından ortaya konulmuştur. Paris-Erdoğan (1963), Forman (1972), Walker (1970) gibi yöntemler sabit genlik altında çatlak ilerlemesi için uygundur.

Değişken genlikli yorulma yüklemesi altında çatlak ucunda plastik deformasyon etkileri meydana geldiğinden daha farklı yaklaşımlara ihtiyaç duyulmuştur. Literatürde çevrim bazlı çalışan (cycle by cycle) Elber (1970) gibi çatlak ucu kapanmayı dikkate alan yöntemler, Wheeler (1972) ve Willenborg (1971) gibi çatlak ucundaki plastik bölge boyutu üzerinden çatlak davranışını belirleyen yaklaşımlar kabul görmüştür. Yük profillerinin karekök ortalamaları (root-mean square) gibi çevrim bazlı çalışmayan yaklaşımlar da vardır; Hudson (1981), Barsom (1976), Manuhantjan (2006). Literatürde birçok model önerilmiş olmasına rağmen değişken genlikli yüklemeden ve plastisiteden kaynaklanan zorluklar nedeniyle henüz tüm testlere uygulanabilen genelleştirilmiş ve tam kabul görmüş bir model bulunmamaktadır.

Wheeler (1972) modeli, yük çevrimlerinin oluşturduğu çatlak ucundaki plastik bölgenin boyutunu karşılaştırarak çatlak ilerleme davranışını belirlemektedir. Mevcut çevrim altında çatlak ucunda oluşan plastik bölge daha önceden oluşmuş ve etkisi devam eden daha büyük bir plastik bölgenin içinde ise Paris-Erdoğan (1963) denklemine bir çarpan olarak eklenen Wheeler çatlak ilerleme parametresi ile çatlak yavaşlatılmaktadır. Wheeler parametresinin hesaplanması için deneysel olarak hesaplanan Wheeler üsseline ihtiyaç vardır. Wheeler (1972), model önerisinde bu üsselin malzeme ve yük spektrumuna bağlı olduğunu, hesaplanan ömür değerinin deney verileri ile karşılaştırılarak üsselin deneme yanılma yöntemiyle bulunabileceğini ifade etmektedir. Sheu B.C. (1995), Wheeler modelindeki bu üsselin başlangıç çatlak uzunluğuna ve aşırı yük oranına da bağlı olduğunu deneysel olarak göstermiştir. Willenborg (1971) modelinde Wheeler modelindeki gibi bir üssele ihtiyaç yoktur. Willenborg modelinde yine çatlak ucundaki plastik bölge boyutundan yola çıkılarak efektif

gerilme şiddet faktörü tanımı yapılmış ve Forman çatlak ilerleme denkleminin efektif gerilme şiddet faktörü ile kullanılması önerilmiştir. Yük seviyeleri arasında 2 kat veya daha fazla fark olması durumunda Willenborg modelinin kullanımı matematiksel olarak mümkün olmamaktadır. Gallagher (1974) tarafından önerilen bir çarpan ile bu sorun çözülmüş ve model Modifiye Willenborg Modeli adını almıştır. Bu model için daha sonradan tanımlanan bir parçalı fonksiyon yardımıyla ani aşırı düşük yük kabiliyeti de kazandırılmış ve Genelleştirilmiş Modifiye Willenborg Modeli halini almıştır. Modellere ait denklemler ve detaylı açıklamalar bu raporun ilgili kısmında verilmiştir.

Literatürde Wheeler ve/veya Willenborg modellerini kullanarak deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapan pek çok çalışma mevcuttur. Meggiolaro M.A ve Castro J.T.P (2001) iki boyutlu çatlak ilerlemesi için literatürde Zhang S. vd. (1987) tarafından sunulmuş olan tekil ve blok yükleme test spektrumlarını kullanarak farklı modellerle çatlak ilerleme ömrünü hesaplamış ve sonuçları karşılaştırmalı olarak vermiştir. Wheeler modeli, ömür hesaplamaları ile deney sonuçlarının en uyumlu olduğu model olarak tespit edilirken Wheeler modelinin sonuçları, farklı yükleme türlerine göre %2 ile %22 arasında değişmektedir.

Xiaoping H. vd. (2007), Wheeler çatlak ilerleme hızı yavaşlatma parametresini gerilme oranına bağlı parçalı fonksiyon olarak önermişlerdir. Bu parametrenin elde edilmesinde, kullanılan gerilme oranı ve üsler ile farklı gerilme oranlarındaki test sonuçları bir araya getirilmiştir. Böylece Wheeler modeli, gerilme oranı ile ilişkilendirilmiş olmaktadır. Aynı çalışmada, yük profilleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan farklı bir parametre daha eklenmiştir. 350WT çelik malzemeden üretilmiş merkezi çatlak içeren bir numune blok yüklemeye maruz bırakılmış ve test sonuçları ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

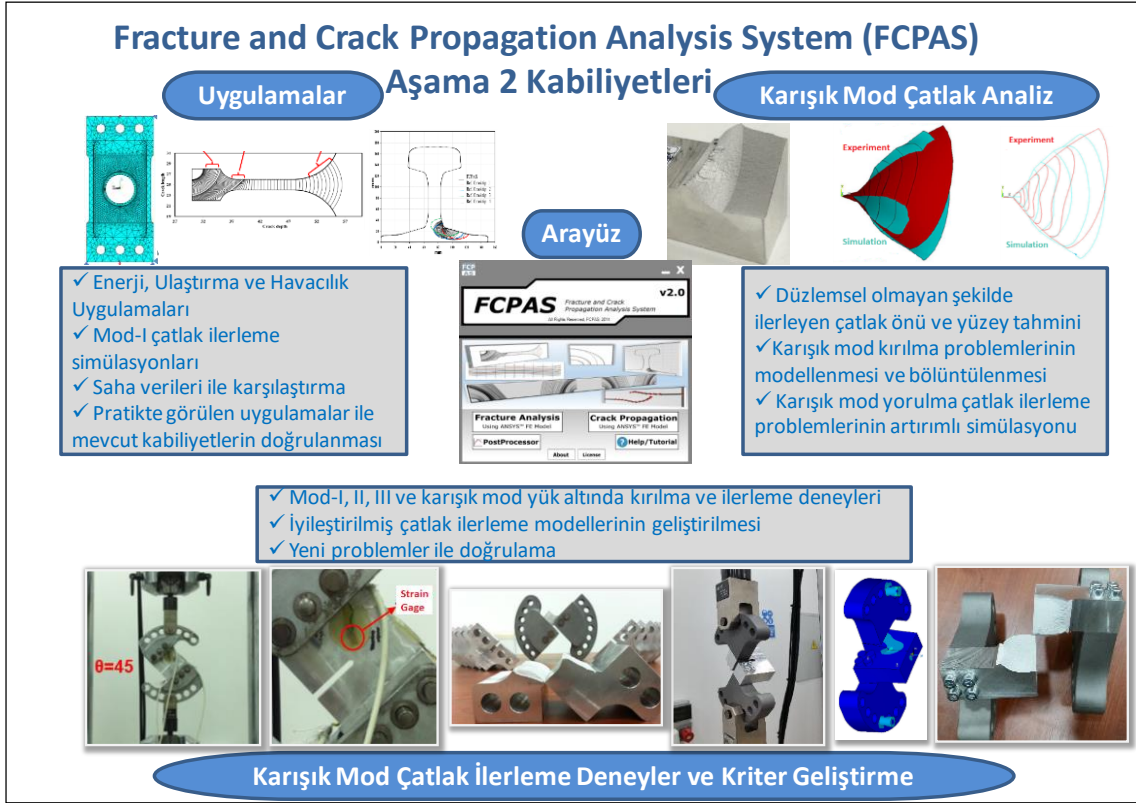
2219-T851 malzemesinden üretilmiş merkezi çatlaklı numune (Center Crack Tension) üzerinde bazı uçuş spektrumları ile çatlak ilerleme testleri gerçekleştirilmiştir (Chang J.B. vd 1981). Daha sonra farklı çatlak ilerleme modelleri kullanılarak ömür tahmini yapılmış ve deneylerle karşılaştırılmıştır. Yük spektrumundaki negatif yükleri sıfır kabul edilerek Walker çatlak ilerleme denklemi, doğrudan veya Genelleştirilmiş Willenborg (1971), Willenborg/Chang (Chang J.B, 1980) ile birlikte kullanılmıştır. Ayrıca bu modellerin dışında çok parametrelili akma bölgesi (Multi Parameter Yield Zone), Modifiye Elber (Newman J.C. 1981) ve karekök ortalama (Hudson C.M. 1981) modelleri de kullanılmıştır. Toplam altı farklı modelden elde edilen sonuçlar test sonuçları ile karşılaştırıldığında, test verilerine en yakın modelin yük spektrumuna göre değişiklik gösterdiği ifade edilmiştir. Modellere göre hesaplanan ömür değerlerinin test sonuçlarına oranı 0.45 ile 1.28 arasında değişmektedir.

Mcdonald ve Daniewicz (2002) sabit genlik altında 7075-T651 malzemesi ile üç boyutlu çatlak ilerlemesi için tekrarlı deneyler gerçekleştirmiş ve çatlak ilerleme ömründeki saçılımı grafik olarak göstermiştir. Wu ve Ni (2004) ise 2024-T351 malzemesinde iki boyutlu çatlak ilerlemesi için yine sabit genlik altında tekrarlı deneyler yapmıştır. Çevrim sayısına karşılık çatlak uzunluğundaki dağılımın ortalama ve standart sapma değerleri 30 farklı testten alınan verilerle hesaplanmış ve çevrim sayısının artmasıyla birlikte standart sapmanın arttığı gözlemlenmiştir. Yang ve Manning (1996) olasılık modelini kullanarak deneylerle uyumlu kümülatif olasılık dağılımını grafik etmişlerdir.

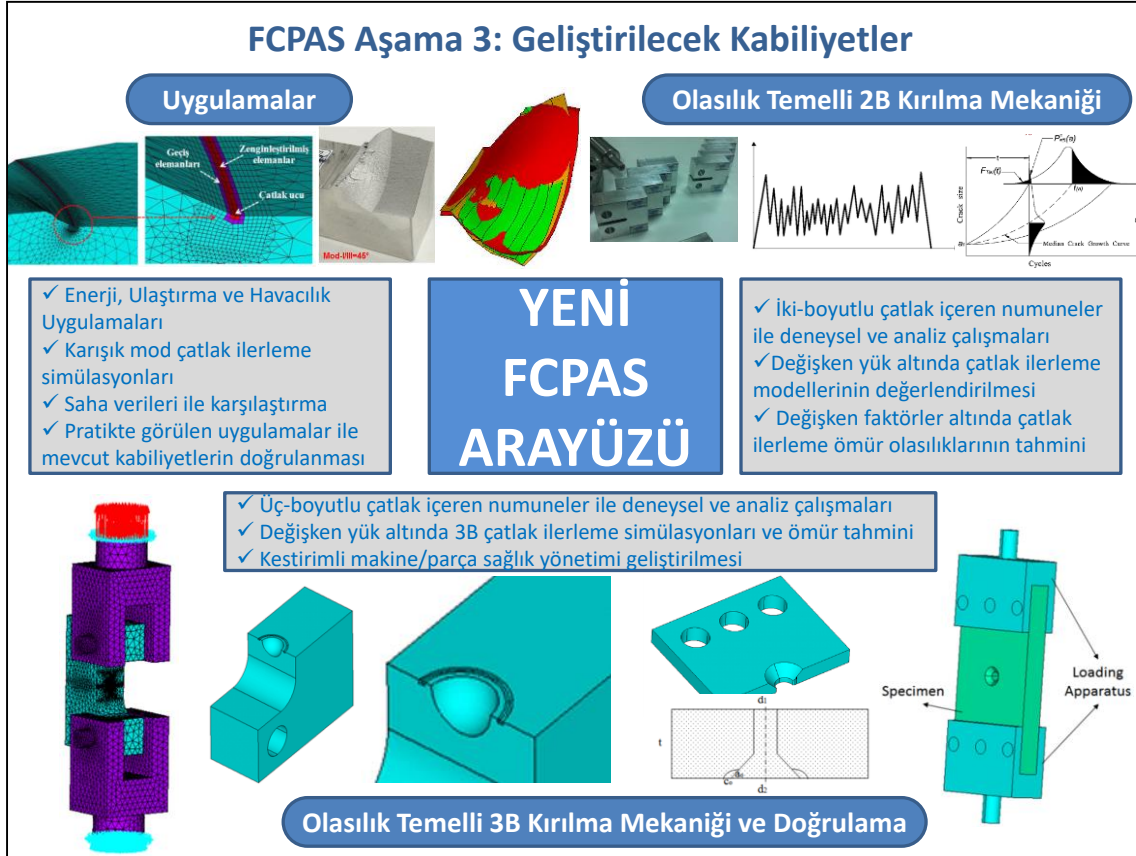
Monte Carlo olasılığa dayalı hesaplama yöntemi, değişkenlerin rastgele seçimi üzerine kurulu olan bir yöntemdir. Değişkenlerden alınan örnek sayısının yeterli olması durumunda oldukça doğru sonuçlar vermektedir. Monte Carlo yönteminin doğru sonuç vermesi için tanımlanan değişkenlerin birbirinden bağımsız olması gerekmektedir. Çatlak ilerleme ömür hesabı için eşitliklerde kullanılan malzeme sabiti C ve n birbiri ile ilişkilidir. Dolayısıyla bu iki değişkenin birbirinden bağımsız olarak seçilmesi veya birinin sabitlenmesi sonuçlarda hataya sebep olacaktır. Annis C. (2004) bu duruma ait detaylı örnekleme ve hesaplamaları çalışmasında vermiştir. Bu proje çalışmasında, ilgili konu dikkate alınmış ve C-n malzeme katsayılarındaki değişimler üzerinden hesaplama yapmak yerine, doğrudan doğruya da/dN çatlak ilerleme hızlarındaki saçılımlar girdi olarak tanımlanmıştır.

## **2.2 FCPAS – AŞAMA 3: Amaçlar, Yöntem Özeti, Avantajlar ve Kazanımlar**

Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 3 projesi, 2008-2011 ve 2013-2016 yılları arasında yapılmış olan Aşama 1 ve Aşama 2 projelerinin devamı niteliğinde olup, aşağıda belirtilen ana çalışmaları kapsamaktadır. İlk ana iş paketinde, Aşama 2 projesinde geliştirilen karışık mod yük altında bulunan yorulma çatlak ilerleme simülasyon analiz kabiliyetlerinin (Şekil 2.2.1), literatür ve sahadan elde edilen ve daha fazla geometrik detay içerebilen problemlere uygulanarak doğrulanması hedeflenmiştir. Kapsamlı deneyler ile bütünlük bir şekilde ve sağlamaları yapılarak, ikinci ve üçüncü ana iş paketlerinde ise, bu projenin ana amacı olan olasılık temelli kırılma ve yorulma çatlak ilerleme analiz yöntemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Son ana iş paketinin amacı ise, kullanıcı arayüzünün olasılık temelli analizler için güncellenmesidir. Yukarıda özetlenen ve bu proje kapsamındaki yukarıdaki temel amaçlar Şekil 2.2.2’de görsel olarak verilmektedir.



Şekil 2.2.1. Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) – Aşama 2 (2013-2016) projesinde geliştirilmiş olan analiz ve deneysel kabiliyetler



Şekil 2.2.2. Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) – Aşama 3 (2018-2020) projesinde geliştirilen olasılık temelli analiz ve deneysel kabiliyetleri

Aşağıdaki alt bölümlerde, bu alanlarda geliştirilen ve uygulanan yöntemlerin ve proje sonucunda elde edilen kazanım ve avantajların özeti verilmektedir.

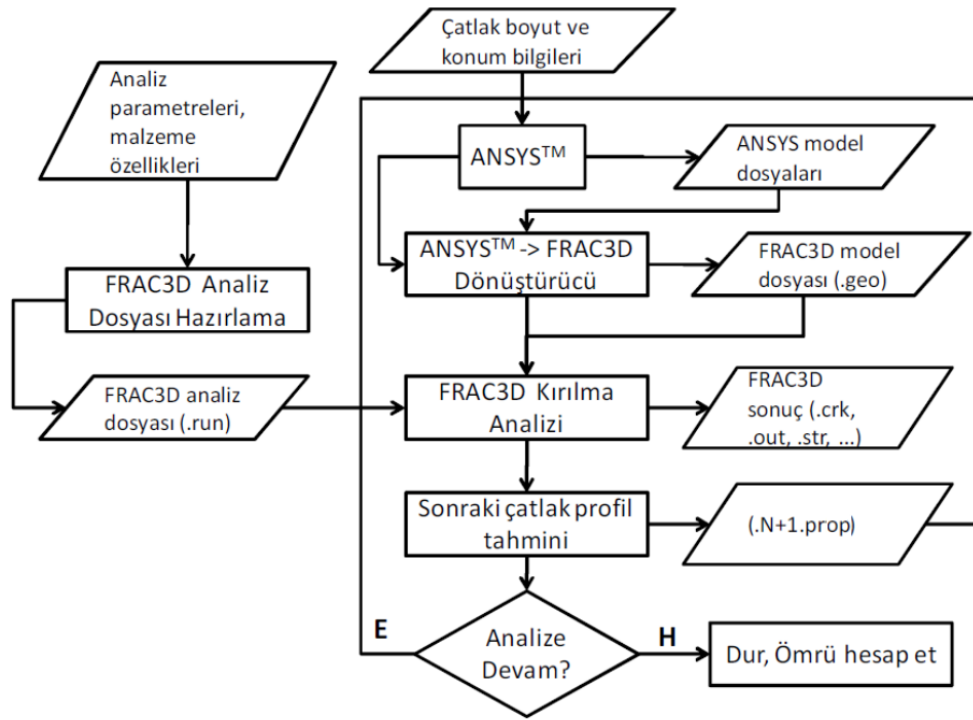
### 2.2.1 Karışık Mod Kırılma ve Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi

FCPAS- Aşama 2 projesinde, karışık modlu tekil ve çoğul çatlaklar için üç boyutlu düzlemsel olmayan ilerleme analizleri için yöntem geliştirilmiş ve temel geometrilere sahip çatlak içeren problemlere uygulanarak sağlamaları yapılmıştır. Bu iş paketi kapsamında ise, geliştirilmiş olan bu kabiliyetler kullanılarak, karışık mod yükler altında tekil ve/veya çoğul çatlak içeren literatür ve/veya saha problemleri için genel üç-boyutlu ve düzlemsel olmayan çatlak ilerleme analizleri yapılmış ve saha/test/literatür verileri ile doğrulamaları yapılmıştır. Bu iş paketi kapsamında uygulanacak yöntem aşağıda özetlenmekte ve Şekil 2.2.3'te iş akış diyagramı şeklinde verilmektedir.

- Literatürden ve/veya saha uygulamalarından seçilen yorulmalı çatlak ilerleme modelinin ANSYS'te tanımlanması,



- Geliştirilen model ile FCPAS karışık modlu çatlak ilerleme simülasyonlarının yapılması ve çatlak ilerleme modellerinin artırımı olarak güncellenmesi,
- Simülasyon sonunda çatlak ilerleme yüzeyi ve ömrünün hesaplanması ve saha/literatür verileri ile karşılaştırılması.



Şekil 2.2.3. Karışık mod yük altında yorulma çatlak ilerleme analizi iş akış diyagramı

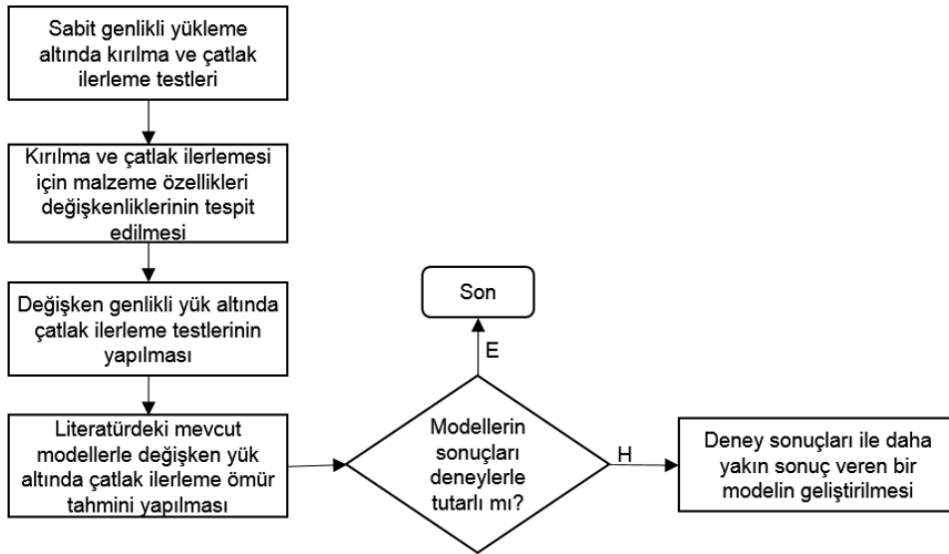
## 2.2.2 Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Çalışmaları

Üç-boyutlu mod-I yüzey çatlakları üzerinde deneysel çalışmalar yapılmadan önce, kalınlığı boyunca düz çatlak içeren standart numuneler üzerinde kırılma ve çatlak ilerleme deneyleri yapılarak, kırılma ile ilgili temel malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve ilgili olasılık temelli çatlak ilerleme simülasyonların yapılması gereklidir. Bu amaçla, Alüminyum 7075-T651 malzemesinden yapılmış standart Compact Tension (CT) numuneleri kullanılarak çok sayıda kırılma ve değişik yükleme şartlarında yorulma çatlak ilerleme testleri yapılmış ve ilgili malzeme özelliklerindeki gerekli değişimler belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kırılma tokluğu testleri ve sabit ve değişen genlikli yükler altında çatlak ilerleme deneyleri yapılmıştır. Sabit genlikli testler kendi içinde farklı gerilme oranlarına (R-ratio) ayrılmışlardır. Değişken genlikli yük altında yapılan testler de, tekil aşırı ve düşük yükleme, blok aşırı yükleme ve tam değişken

genlikli yükleme (spektrum loading) içeren deneyler olarak ayrıca alt gruplara ayrılmış olup, her bir ayrı yükleme durumu için en az on adet test yapılmasına zen gösterilmiştir. Deneyler Sakarya Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (SARGEM) ve Hesaplamalı ve Deneysel Kırılma Mekaniği (HDKM) Laboratuvarı imkânları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler boyunca yüksek çözünürlüklü mikroskop kameralarla yüzeylerdeki çatlak ilerlemesi anlık olarak takip edilerek, belli aralıklarla kaydedilmiş ve daha sonra kayıtlar kullanılarak çatlak ilerleme eğrileri elde edilmiştir.

Yukarıda tarif edilen çatlak ilerleme deneylerinden elde edilen ve malzeme özelliklerindeki değişkenlikleri de içeren bilgiler kullanılarak, literatürde var olan değişken genlikli yük altında çatlak ilerleme modelleri ile olasılık temelli ömür tahminleri yapılmıştır. Analiz sonuçları ile deney sonuçları arasında yapılan karşılaştırmalar neticesinde, tam değişken yük altında çatlak ilerleme problemleri için iyileştirilmiş bir ilerleme modeli de önerilmiştir. Bu iş paketi kapsamında uygulanan yöntem aşağıda özetlenmiş olup, Şekil 2.2.4'te iş akış diyagramı olarak verilmektedir.

- Kırılma tokluğu ve sabit genlik altında yorulma çatlak ilerlemesi testleri ile malzeme özelliklerindeki değişkenliğin belirlenmesi,
- Değişken genlikli yük altında yorulma çatlak ilerleme deneyleri yapılması,
- Literatürdeki değişken genlikli yük altında çatlak ilerlemesi için kullanılan modeller yardımıyla çatlak ilerleme ömründeki dağılımın belirlenmesi,
- İyileştirilmiş atlak ilerleme modeli önerilmesi.

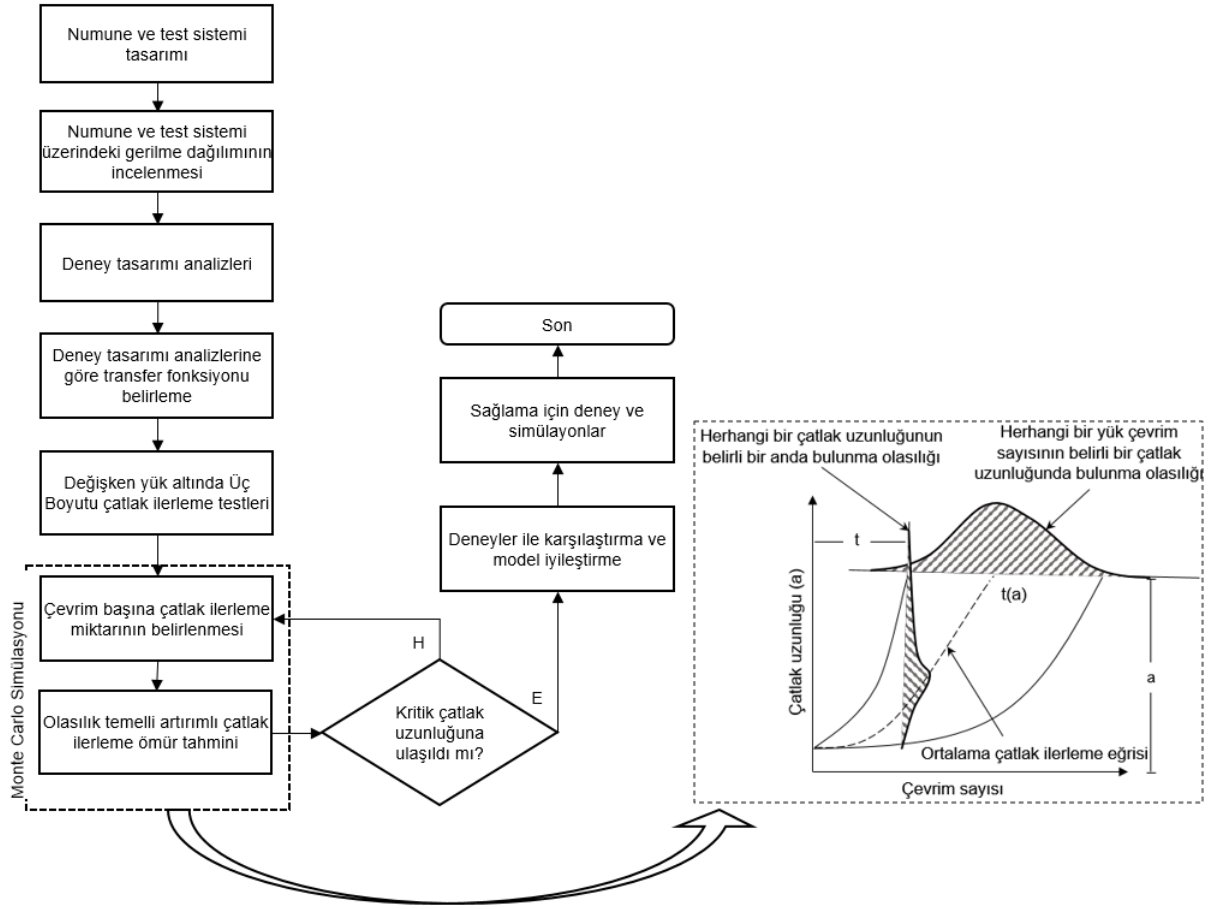


Şekil 2.2.4. Standart numune ile yapılan temel çatlak ilerleme testleri iş akış diyagramı

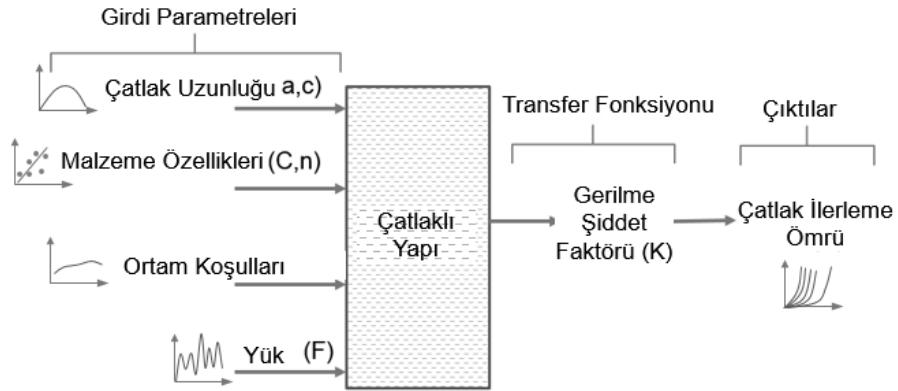
### 2.2.3 Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanîği Çalışmaları

Bu iş paketinin temel hedefi, üç boyutlu (eğrisel) çatlak ucu içeren bir numune tasarlayıp, gerekli kırılma ve çatlak ilerleme analizleri ile değişik yükleme şartları altında olasılık temelli olarak çatlak ilerleme ömürlerindeki değişimleri hesaplamak ve aynı şartlardaki deneyler ile sağlamalarını yapmaktır. Bu amaçla, havşa delikli levha ve elipsoit bir çentik ile yüzey çatlağı içeren tasarımı değiştirilmiş bir CT numunesi üzerinde bazı ön fizibilite kırılma analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre tasarımı değiştirilmiş CT numunesinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Belirlenen numune üzerinde geometri ve yük parametreleri değiştirilerek deney tasarımı analizleri (DOE - design of experiment) yapılmıştır. Deney tasarımı analizleri sonuçları kullanılarak, çatlak ucunun serbest yüzey ve derinlik noktalarındaki gerilme şiddet faktörlerinin değerleri, regresyon analizleri yapılarak problemi etkileyen ve DOE analizlerinde değişkenlikleri göz önüne alınan parametrelerin fonksiyonu olarak (transfer fonksiyonu) ifade edilmiştir. Daha sonra, bir önceki iş paketi olan iki-boyutlu kırılma mekanîği çalışmalarından elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak ve belirtilen değişken parametrelerdeki değişkenlik dağılımları da göz önüne alınarak, Monte Carlo yöntemini içeren bağımsız bir yazılım geliştirilmiş ve olasılık temelli çatlak ilerleme simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen çatlak ilerleme eğrileri deney sonuçları ile karşılaştırılarak ilave testler ile sağlamaları yapılmış ve iki-boyutlu ve üç-boyutlu mod-I çatlak ilerleme analizleri için deney sonuçları ile doğrulanmış olasılık temelli bağımsız bir çatlak ilerleme simülasyon programı elde edilmiştir. Şekil 2.2.5 ve 2.2.6'da, sırasıyla, bu iş paketi kapsamında yapılan çalışmaların genel iş akış diyagramı ve monte carlo yöntemi kullanılarak yapılan olasılık temelli çatlak ilerleme analizlerinin iş akış diyagramları verilmektedir.



Şekil 2.2.5. Olasılık temelli üç-boyutlu kırılma mekaniği çalışmaları genel iş akış diyagramı



Şekil 2.2.6. Monte carlo yöntemi kullanılarak çatlak ilerleme simülasyonu iş akış diyagramı

## 2.2.4 FCPAS – Aşama 3 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Güncellenmesi

Proje kapsamında yapılan olasılık temelli çatlak ilerleme analizleri için geliştirilen yazılımın da dâhil edilebilmesi için, 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 kapsamında geliştirilmiş olan olasılık temelli çatlak ilerleme analiz programını içerecek şekilde güncellenmiştir. Ara yüz ile ilgili detaylar Bölüm 3.7'de verilmektedir.

## 2.2.5 FCPAS – Aşama 3 Avantajlar ve Kazanımlar

2008-2011 ve 2013-2016 yıllarında yapılan Aşama 1 ve Aşama 2 projelerinde, temel geometrilerde mod-I ve karışık mod yük altındaki üç boyutlu çatlak ilerleme problemlerinin analiz edilebilmesi için yöntem ve yazılımlar geliştirilmiş, deneyler ile doğrulamaları yapılmış ve ilgili alt programlar FCPAS ara yüz yazılımı altında toplanmıştır. Üç-boyutlu modelleme ve deneysel analiz konularında, Mekaniğin diğer alanlarına göre nispeten daha az kabiliyet ve tecrübe birikiminin olduğu Ülkemizde, hem karışık mod yük altında çatlak ilerleme kabiliyetlerinin ilave uygulamaları, hem de daha önemli olarak, olasılık temelli çatlak ilerleme analizleri yapılabilmesi için deneyler ile doğrulanmış yöntem geliştirerek bilimsel tecrübe birikimine katkıda bulunmayı hedeflediğimiz bu projede, yukarıda kısaca özetlenen çalışmalar sonucunda elde edilen temel kazanımlar maddeler halinde aşağıda verilmektedir:

- Karışık Mod Yükler Altında Çatlak İlerleme Analiz Kabiliyeti: Literatürden veya saha ziyaretlerinden elde edilen ve karışık mod yük altında tekil veya çoğul çatlak ilerlemesi içeren problemler üzerinde yapılan uygulamalar vasıtasıyla Aşama 2 projesinde geliştirilen yöntemlerin karmaşık problemlere uygulanabilirliği ispat edilmiştir. Ayrıca, pratikte sıklıkla karşılaşılan birçok problemin belirli bir doğruluk seviyesi ile indirgenebildiği levhalardaki yüzey çatlağı problemleri için, eğik yüzey çatlağı ve dönmüş yüzey çatlağı kategorilerinde sistematik bir şekilde yüzlerce farklı analiz gerçekleştirilerek geniş bir çözüm kütüphanesi ile ilgili empirik denklemler oluşturulmuştur. Bu çalışmalar ile bir adet Yüksek Lisans tezi tamamlanmıştır.
- Karışık Mod Yükler Altında Doğrusal Olmayan Kırılma Analiz Kabiliyeti: Proje önergesinde vaat edilen bir iş paketi olmamasına rağmen, yukarıda belirtilen iş paketlerinin zamanlı bir şekilde tamamlanmasını takiben, yukarıdaki çalışmanın tabii bir devamı niteliğinde bir doktora tezi temeli olan ve lineer elastik kırılma mekaniği kapsamında ele alınamayan, çatlak ucunda nispeten daha büyük bir plastik bölge içeren problemlerin karışık mod üç-boyutlu kırılma analizleri için yöntem geliştirilmeye

başlanmış ve bazı doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Böylece, literatürde daha az yer almış olan üç-boyutlu ve doğrusal olmayan kırılma mekaniği çalışmalarının tarafımızdan yapılabilmesinin temeli atılmıştır.

- İki ve Üç-Boyutlu Olasılık Temelli Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz ve Deneysel Kabiliyetleri: Proje kapsamında yapılan çalışmalar vasıtasıyla, Ülkemizde sınırlı sayıda yerde yapılan mod-I kırılma ve çatlak ilerleme deneylerine ek olarak, standart olmayan bir numune türü kullanılarak üç-boyutlu mod-I çatlak ilerleme deneyleri gerçekleştirilmiş olup, FCPAS kullanılarak yorulma çatlak ilerleme profili ve ömrü doğru bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Ayrıca, farklı yük şartları altında onlarca farklı deney yapılarak çatlak ilerleme eğrilerindeki değişiklikler belirlenmiştir. Bu kapsamda, ayrıca, problem geometrisi, yük ve malzeme özelliklerindeki değişkenlikleri de içerecek şekilde, olasılık temelli çatlak ilerleme simülasyonu yapabilen bağımsız bir program geliştirilmiş ve deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Böylece, bu alanda hem hesaplamalı analiz ve simülasyon kabiliyetleri, hem de deneysel analiz kabiliyetlerini içeren bir altyapı hazırlanmıştır. Bu alanda yapılan tüm çalışmalara odaklanmış olan bir adet doktora tezi büyük oranda tamamlanmış bulunmaktadır.
- 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, çeşitli çatlak ilerleme problemlerine uygulanarak doğrulamalarının yapılmış olması ve olasılık temelli yorulma çatlak ilerleme simülasyon programının ilave edilmesi, FCPAS yazılımının sürekli gelişmesine yardımcı olmakta ve bu konularda analiz kabiliyeti ihtiyacı oluşan araştırmacı ve kurumlara bu tür analiz kabiliyetlerinin düzenli bir yazılım ortamı içerisinde verilebilmesine imkân sağlamaktadır.

### 3. FCPAS – AŞAMA 3: GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde, proje kapsamında yapılan tüm çalışmalarda kullanılan yöntemler kapsamlı bir şekilde açıklanmakta ve her bir iş paketi için elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Bölüm içeriği ve alt bölümlerin numaralandırılması, mümkün olduğunca proje iş paketi-zaman çizelgesindeki sıra ve numaralarına uygun bir şekilde yapılmış olup, ilgili detaylar aşağıdaki alt bölümlerde verilmektedir.

#### 3.1 Karışık Mod Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi

Bu çalışma ile, Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (Fracture and Crack Propagation Analysis System, FCPAS) -Aşama 2 projesinde (Ayhan, 2016) elde edilen karışık mod yükleme altında üç-boyutlu çatlak ilerleme simülasyon kabiliyetlerini kullanarak, literatürden ve endüstriden seçilen problem ve uygulamalar üzerinde çatlak ilerleme simülasyonları yapılmış ve çatlak ilerleme profil/yüzeyleri ve ömür tahminleri açısından geliştirilen kabiliyetlerin mukayese ve doğrulamaları 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 TUSAŞ-TAI (Ankara), TUSAŞ-TEI (Eskişehir) ve ASELSAN (Ankara) kurumları ziyaret edilmiştir. Yapılan ziyaretlerde, proje kapsamında yapılan çalışmaların tanıtımı yapılmış, bu kurumlarda bulunan ürünler arasında geometrisi ve yüklerin tanımlı olduğu yorulma çatlak oluşmuş karışık modlu yüke maruz problemlerin olup olmadığı ve projemizde uygulama olarak değerlendirilip değerlendirilemeyeceği görüşülmüştür. Yapılan görüşmeler sonucunda, TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. (TEI) tarafından sağlanan bir motor parçasına ait veriler kullanılarak bir uygulama gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen uygulamaya ait detaylar Bölüm 3.1.6'da verilmiştir. Bölüm 3.1.6 içerisinde verilen kısıtlı bilgilerin, geometrik boyut ve diğer sayısal bilgiler verilmeden proje raporuna dâhil edilebileceğine dair TEI tarafından onay verilmiştir. Bu kapsamda, geometrik boyutlar, parça kullanım yeri, kırılma analiz sonuçlarının sayısal değerleri vb. detaylar verilmeden, FCPAS/FRAC3D kullanılarak yapılan analizlerin bazı sonuç ve görüntüleri sayısal değer ve birim içermeksizin ilgili bölüm içerisinde verilmiştir.

Yukarıda belirtilen endüstriyel ziyaretler ve literatür araştırmaları sonucu, bu çalışma kapsamında toplam 6 adet uygulama (Tablo 3.1.1) yapılmıştır. Proje önerisinde üç adet uygulama ve mukayeselerinin yapılması hedeflenmiş olmakla beraber, literatür taramasının

ardından bu sayı altıya çıkarılmış olup proje kapsamına alınmıştır. Bu çalışmalar kapsamında, ülkemizde çok az sayıda kişinin yapabildiği, Havacılık ve Uzay alanında oldukça önemli bir alt alan olan üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme simülasyonu analizlerinde bursiyer lisansüstü öğrencilerimiz tecrübeler kazanmıştır.

Tablo 3.1.1. Karışık modlu yükleme altında çatlak ilerleme analizi yapılan uygulamalar

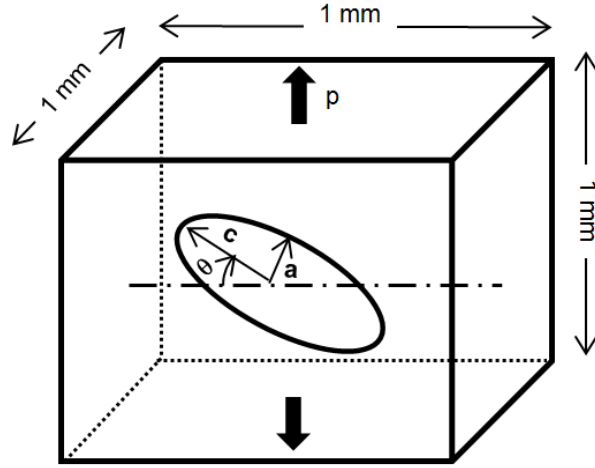
Uygulamalar–Literatür	Uygulamalar–Endüstri
3.1.1 Eğik çatlak içeren birim küp modeli	3.1.6 Bir motor parçası üzerinde çoğul çatlak analizi
3.1.2 Çoklu kenar çatlağı içeren çekme numunesi	
3.1.3 Eğik çatlak içeren silindirik çekme numunesi	
3.1.4 Eğilmeye maruz yarı eliptik çatlaklı içi boş mil	
3.1.5 Çekme gerilmesine maruz eğik çatlaklı H-Kesitli numune	

3.1.1 eğik çatlak içeren birim küp modeli probleminde, birim küp merkezine üç-boyutlu eliptik bir eğik çatlak yerleştirilerek, çekme yükü altında çatlağın ilerleme yüzeyi/profil ve yorulma çatlak ilerleme ömrü tahmin edilmiş ve elde edilen sonuçlar literatür verileri ile karşılaştırılmıştır. 3.1.2 çoklu kenar çatlağı içeren çekme numunesi probleminde, çoğul çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve ömür hesaplamaları yapılmıştır. 3.1.3 eğik çatlak içeren silindirik çekme numunesi probleminde, eğik yüzey çatlağı içeren bir silindirik çekme numunesindeki üç-boyutlu çatlak ilerletilerek ömür tahmini yapılmıştır. 3.1.4 eğilmeye maruz yarı eliptik çatlaklı içi boş mil probleminde, dış yüzeyinde yarı eliptik düzlemsel bir çatlağa sahip olan ve eğilme yükü altındaki içi boş bir milde çatlak ilerleme davranışı analiz edilmiştir. 3.1.5 çekme gerilmesine maruz eğik çatlaklı H-Kesitli numune probleminde, çeki yükü altında bulunan H-kesite sahip bir parçanın yüzeyinde bulunan, yükleme yönüne göre farklı açılara sahip başlangıç çatlağının ilerleme analizleri gerçekleştirilerek yorulma çatlak ilerleme davranışı incelenmiştir. 3.1.6 bir motor parçası üzerinde oluşan çoğul çatlakların analizi probleminde ise, TUSAŞ-TEI tarafından sağlanan parça geometrisi üzerinde çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ve sonuçları ile ilgili detaylar sırasıyla aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.



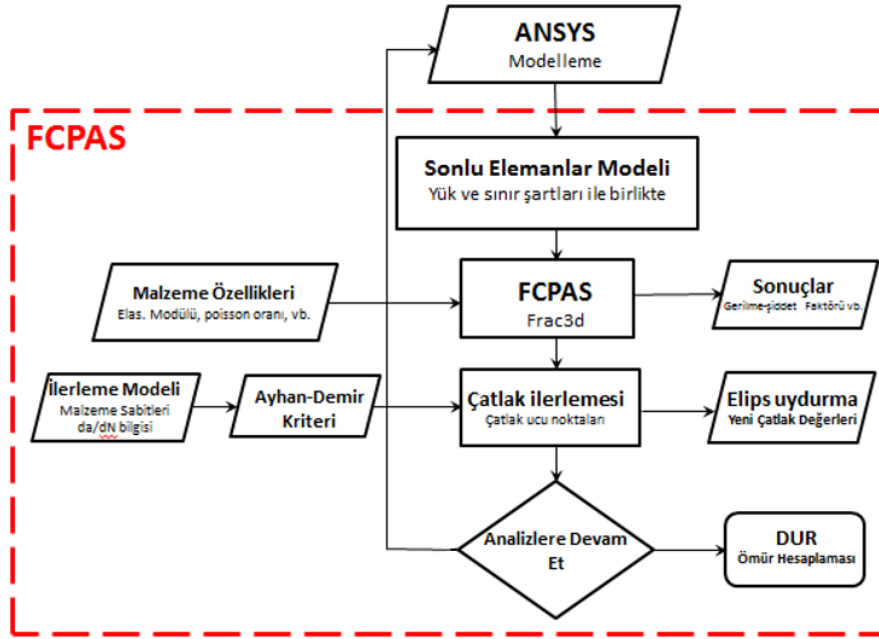
### 3.1.1 Eğik Çatlak İçeren Birim Küp Modelinde Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi

Ren ve Guan'ın (2017) yapmış olduğu çalışma referans alınarak birim küp merkezine üç-boyutlu eliptik bir eğik çatlak yerleştirilerek çekme yükü altında çatlakın ilerleme yüzeyi/profilini ve yorulma çatlak ilerleme ömrü tahmin edilmiş ve elde edilen sonuçlar literatür verileri ile karşılaştırılmıştır. Ren ve Guan (2017), gerilme şiddet faktörlerinin hesaplamasında XFEM (extended finite element method) sonlu elemanlar yöntemini temel alarak geliştirdikleri bir modelleme aracını kullanmışlardır. Eşdeğer gerilme şiddet faktörlerinin hesaplanmasında Tanaka'nın 3-boyutlu karışık mod yükleme durumları için geliştirdiği kırılma kriterini (Tanaka, 1974) kullanmışlardır. Ele alınan problemin detayı Şekil 3.1.1'de verilmektedir.



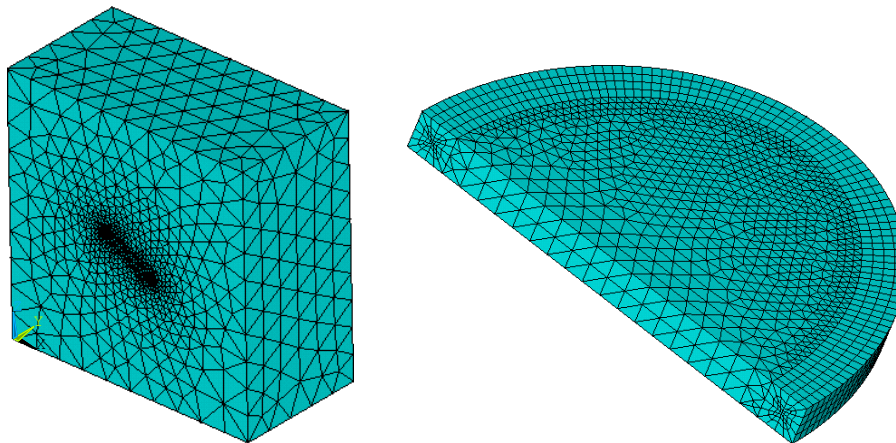
Şekil 3.1.1. Birim Küp geometrisi ve çatlak parametreleri.

Projemiz kapsamında gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizlerinde takip edilen işlem basamakları detaylı olarak Şekil 3.1.2' de verilmiştir.



Şekil 3.1.2. FCPAS analiz akış şeması (Ayhan, 2016).

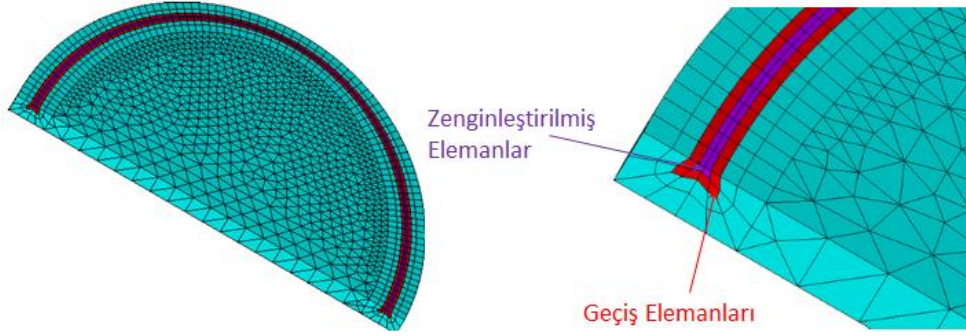
50 MPa Çekme gerilmesine maruz bir birim küp merkezine, çatlak derinliği  $a=0.1$  mm, çatlak uzunluğu  $c=0.15$  mm olan ve yatay eksen ile arasında  $30^\circ$  açı bulunan bir gömülü başlangıç çatlağı yerleştirilerek çatlak ilerleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme malzeme özellikleri referans makaleden alınmış olup,  $C=1.10^{-22}$  mm/cycle\*(Pa\*mm<sup>0.5</sup>) ve  $n=2.0$  alınmıştır. Modeli sadeleştirmek ve işlem süresini kısaltmak amacıyla, birim küp modeli  $\frac{1}{2}$  simetrik olarak modellenmiştir. Başlangıç çatlağı içeren bu geometri için hazırlanan  $\frac{1}{2}$  simetrik sonlu eleman modeli Şekil 3.1.3 te verilmektedir.



Şekil 3.1.3. Birim küp (solda) ve çatlağın (sağda) sonlu elemanlar yarı-simetrik modeli.

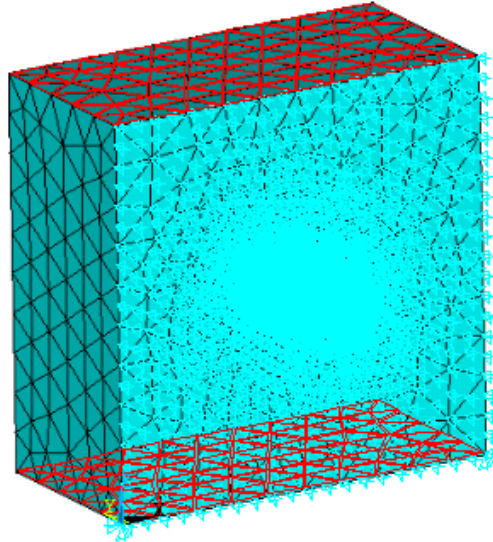
Çatlak ucu civarı izole edilerek bu bölgede hexahedral (altı yüzeyle) elemanlar, bunun dışında kalan tüm bölgelerde tetrahedral (dört yüzeyle) elemanlar kullanılmıştır. Şekil 3.1.4'te, FRAC3D

çözücüsünün kırılma analizi için kullandığı zenginleştirilmiş ve geçiş elemanlarının olduğu çatlak ucu civarının yakın görünümü verilmektedir. Şekilde çatlak ucuna değen zenginleştirilmiş elemanlar mor renkte ve zenginleştirilmiş elemanlarla yüzey, kenar ya da nokta paylaşımında bulunan geçiş elemanları ise kırmızı renkte gösterilmektedir.



Şekil 3.1.4. Birim küp sonlu elemanlar modelinin çatlak bölgesinin yakın görünüşü.

Çatlak ucu civarındaki elemanların boyutu, çatlak uzunluğu,  $a$ 'nın %1'i mertebesinde dir. Sonlu eleman modeli, Aşama 1 projemiz (2008-2011) kapsamında alınmış olan ANSYS™ (2009) yazılımı 12. sürüm kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 3.1.5' te modele uygulanan sınır şartı ve yüklerin gösterimi verilmektedir. Üst ve alt yüzeye üniform çeki gerilmesi uygulanırken, ön yüzeydeki tüm düğüm noktalarının yer değiştirmeleri simetri şartının bir gereği olarak yüzeye dik yönde kısıtlanmıştır.



Şekil 3.1.5. Yarı simetrik birim küp modele uygulanan sınır şartları ve yükler.

FCPAS kullanılarak kırılma analizini gerçekleştirmek için gerekli olan sonlu eleman modeline ait bilgiler ANSYS programından dosyalar halinde listelenerek FCPAS programına aktarılmıştır. Bu kapsamda, çatlak ucu düğüm noktası listesi, çatlak ucu eleman listesi, simetrik modelin düğüm noktası listesi ve eleman listesi, sınır şartları ve yük bilgilerinin olduğu listeler

FCPAS yazılımına aktarılarak kırılma analizi gerçekleştirilmiş ve çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörleri (GŞF) hesaplanmıştır. Hesaplanan GŞF'ler kullanılarak çatlakın bir sonraki profili tahmin edilmiştir. Bu aşamada FCPAS Aşama-2 projesinde geliştirilen çatlak ilerleme kriterleri kullanılmıştır (Ayhan, 2016). Çatlak sapma açısının tahmini için geliştirilen Denklem 3.1.1' de verilen eşitlik kullanılarak, her bir çatlak ucu düğüm noktasının bir sonraki yer değiştirme açısı belirlenmektedir. Denkleme ait katsayılar Tablo 3.1.2' de verilmiştir.

$$\theta_0 = -\arccos \left( \frac{a \cdot K_{II}^2 + K_I \cdot \sqrt{K_I^2 + b \cdot K_{II} \cdot K_I + c \cdot K_{II} \cdot K_I}}{K_I^2 + d \cdot K_{II}^2} \right) \quad (3.1.1)$$

Tablo 3.1.2. FCPAS Aşama-2 projesi kapsamında geliştirilen çatlak sapma açısı kriterinin (Denklem 3.1.1) katsayıları.

<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
0.2723	5.1062	-2.7483	-1.1636

Eşdeğer GŞF değerinin tahmini için öncelikle Denklem 3.1.2'de verilen eşitlik kullanılarak  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF' lerinin bir eşdeğeri elde edilmekte ve bu değer  $K_I$  GŞF değeri ile birlikte Denklem 3.1.3'te yerine koyularak üç-boyutlu eşdeğer GŞF değeri elde edilmektedir. Denklem 3.1.2 ve 3.1.3'e ait katsayılar Tablo 3.1.3'te verilmiştir.

$$K_{eş(II/III)} = \sqrt{a \cdot K_{II}^2 + b \cdot K_{III}^2} \quad (3.1.2)$$

$$K_{eş(I/II/III)} = \sqrt{c \cdot K_I^2 + d \cdot K_{eş(II/III)}^2 + e \cdot K_I \cdot K_{eş(II/III)}} + \left( f \cdot K_I^4 + g \cdot K_I \cdot K_{eş(II/III)}^3 \right)^{0,25} \quad (3.1.3)$$

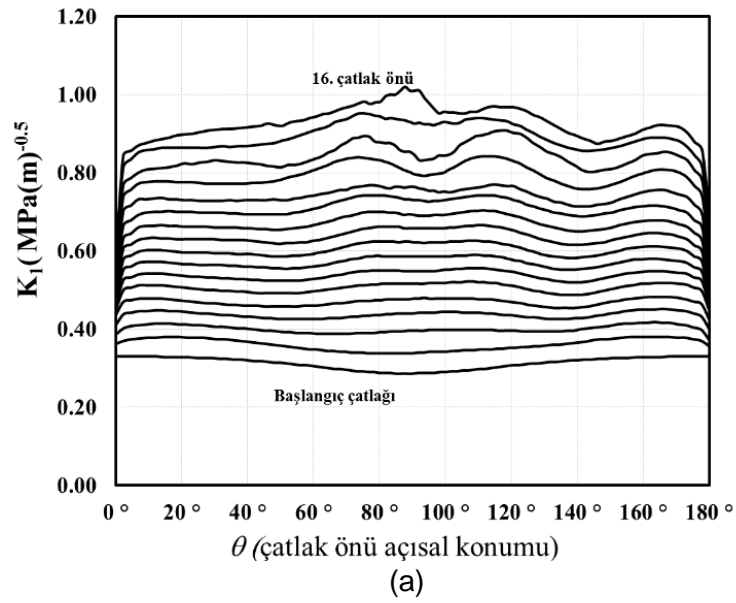
Tablo 3.1.3. FCPAS Aşama-2 projesi kapsamında geliştirilen üç-boyutlu eşdeğer gerilme şiddet faktörü kriterinin katsayıları.

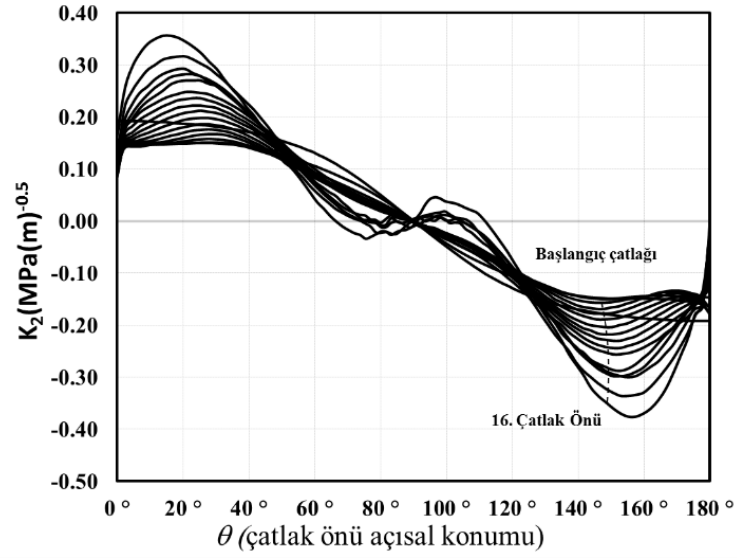
<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>g</b>
0.5263	0.3322	0.5263	0.3322	-0.1112	0.0257	-0.0004

Yorulma çatlak ilerleme ömrü için kullanılan Paris-Erdoğan denkleminde (Denklem 3.1.4) çatlak ilerleme malzeme özellikleri ( $C$  ve  $n$ ) ve üç-boyutlu eşdeğer GŞF değeri ile ilgili bilgiler yerine koyularak bir sonraki çatlak ilerleme profili tahmin edilmektedir.

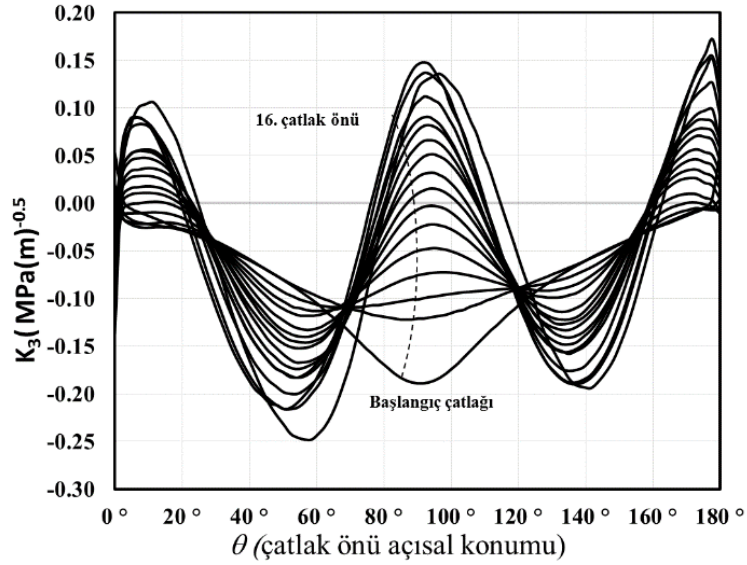
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (3.1.4)$$

Yapılan analizlerde, eşdeğer GŞF değeri referans kaynakta verilen malzemenin kırılma tokluğu değerine ulaşana kadar ilerleme analizleri devam ettirilmiştir. Toplam 17 adım ilerleme analizi yapılmış olup, her bir ilerleme adımı için FCPAS ile hesaplanan  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca değerleri Şekil 3.1.6'da verilmiştir. Verilen GŞF dağılımı grafikleri, 1 MPa üniform yük altında elde edilen değerleri temsil etmektedir.





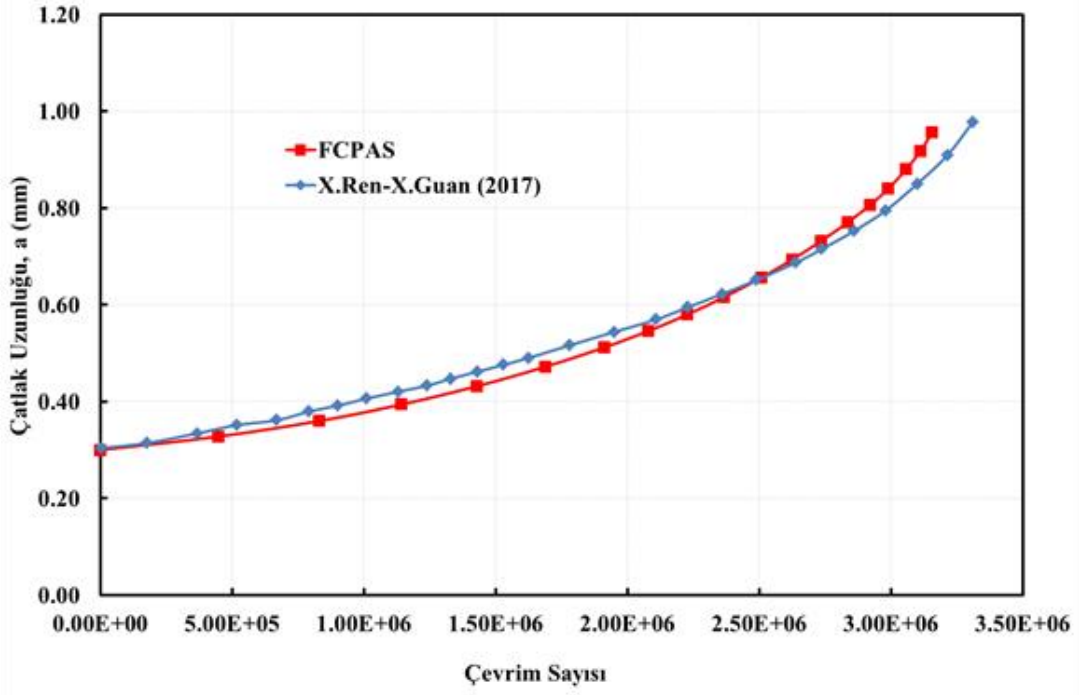
(b)



(c)

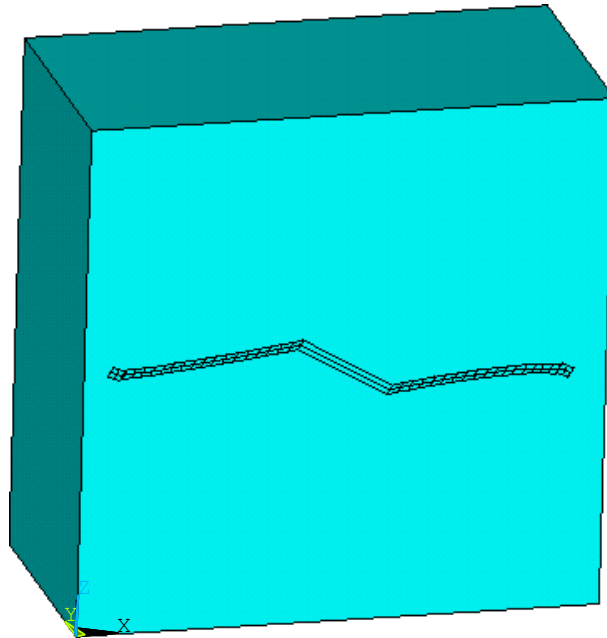
Şekil 3.1.6. Çatlak ilerleme simülasyonları sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.

Daha sonra her bir ilerleme adımı için elde edilen eşdeğer GŞF değerleri kullanılarak çatlak ilerleme ömrü tahmin edilmiştir. Şekil 3.1.7'de tahmin edilen çatlak ilerleme ömrünün referans makalenin verileri ile karşılaştırılması verilmektedir. Referans makale ile hesaplanan ömür değerleri arasındaki farkın yüzde 1'in altında olduğu görülmektedir.

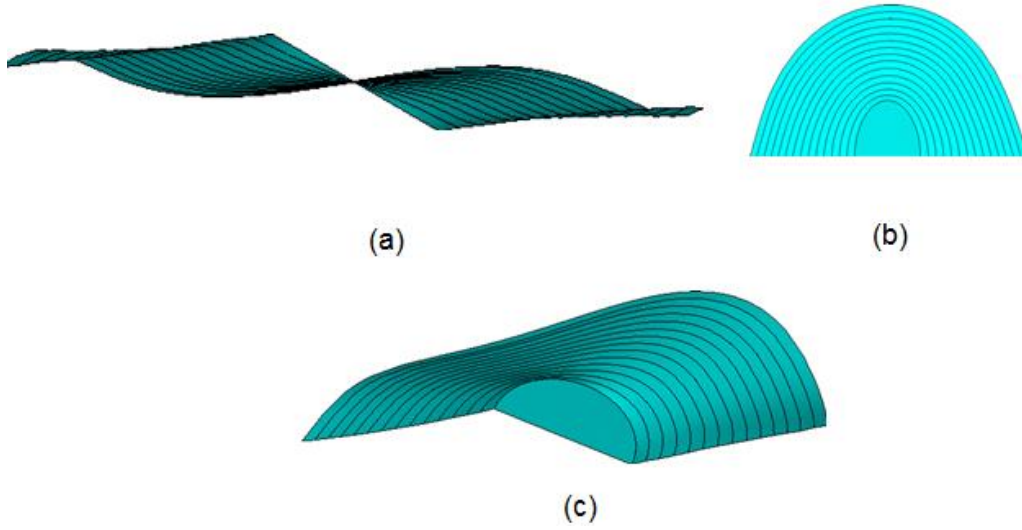


Şekil 3.1.7. Birim küp modeli ömür mukayesesi.

Şekil 3.1.8 ve Şekil 3.1.9'da ise farklı perspektiflerden çatlak ilerleme yüzeylerinin görünümleri verilmiştir.



Şekil 3.1.8. Birim küp simetrik modelde çatlak ilerleme yüzeylerinin görünümü.



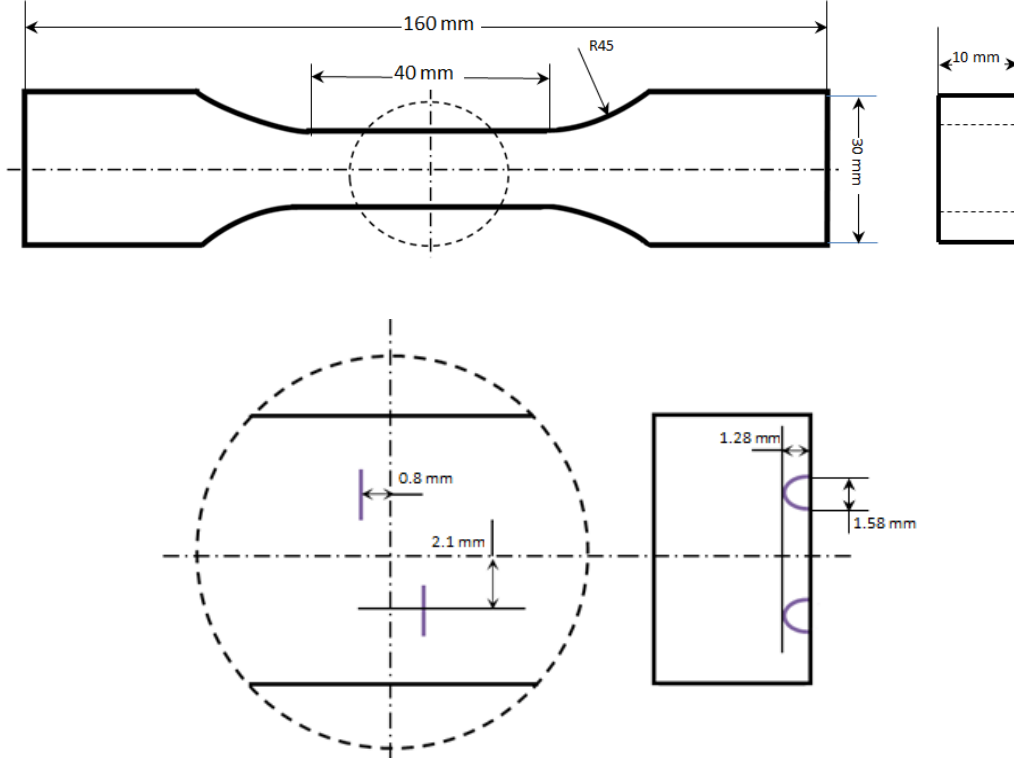
Şekil 3.1.9. Birim küp çatlak ilerleme yüzeyleri, (a) ön görünüş, (b) üst görünüş, (c) izometrik görünüş.

Şekil 3.1.7-3.1.9, Ren ve Guan (2017) çalışması ile karşılaştırıldığında, hem yorulma çatlak ilerleme ömrü hem de çatlak yüzey gelişimi açısından oldukça yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir.

### 3.1.2 Çoklu Kenar Çatlağı İçeren Çekme Numunesinde Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çoğul Çatlak İlerleme Analizi

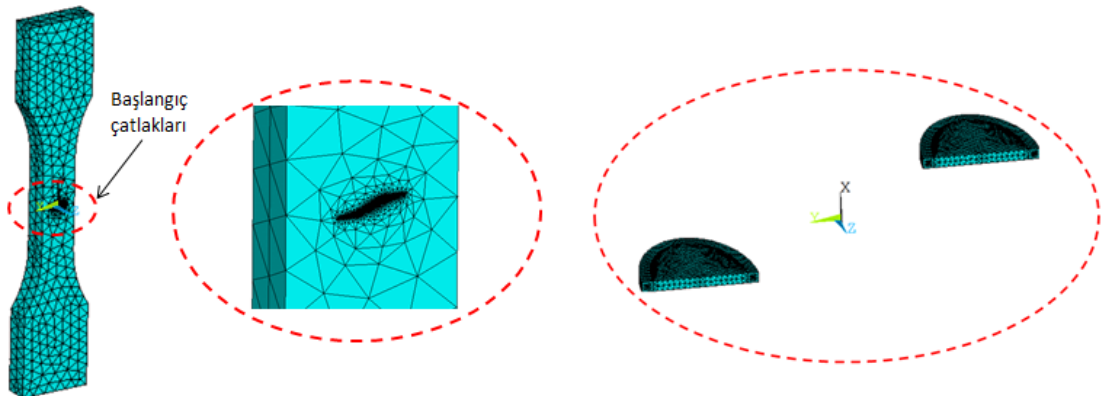
Y. Shu ve ark. 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada, çeşitli çoğul çatlak problemleri içeren farklı geometriler üzerinde çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu uygulamalardan biri olan, iki adet kenar çatlağı içeren çekme numunesi problemi referans alınarak doğrulama çalışmasında kullanılmıştır. Y. Shu ve ark. (2017) çatlak ilerleme analizlerini X-FEM (extended finite element method) yaklaşımıyla ABAQUS programını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Nümerik analizlerin yanı sıra numune üretilerek EDM (electric discharge machining) tekniğiyle çentikler oluşturularak çatlak ilerleme deneyleri de yapmışlardır. Malzeme olarak Çin havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan 30CrMnSiA çeliği kullanmışlardır. Problemin tanımlanması ile ilgili detaylar Şekil 3.1.10'da verilmektedir.





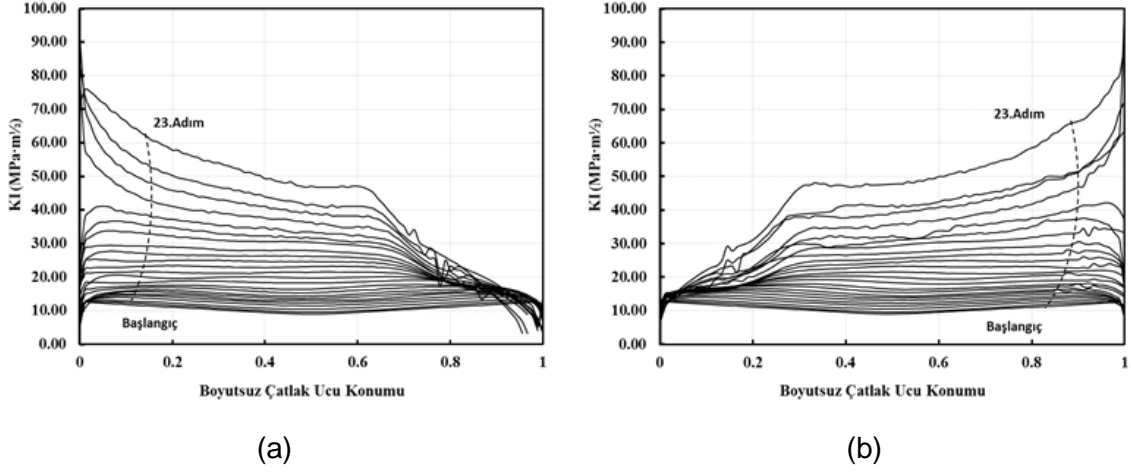
Şekil 3.1.10. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin geometri ve çatlak boyut bilgileri.

42 kN yüke maruz bir çekme numunesinin yüzeyine, biri numunenin dikey yöndeki merkezinden 0.8 mm yukarıda, diğeri 0.8 mm aşağıda olmak üzere iki adet başlangıç yüzey çatlağı yerleştirilmiştir. Çatlağın başlangıç derinliği,  $a=1.28$  mm ve başlangıç uzunluğu,  $2c=1.58$  mm'dir. Başlangıç çatlakları düzlemseldir. Ancak ilerleyen adımlarda birbirlerine yaklaşırken oluşacak olan ilave kayma gerilmeleri nedeniyle düzlemlerinin dışına çıkmaları beklenmektedir. Çekme numunesine ait malzeme özellikleri  $C=9.9194 \cdot 10^{-9}$  mm/cycle\* $(Pa \cdot mm^{0.5})$  ve  $n=2.82$  olarak referans makalede verilmektedir. Başlangıç çatlağı içeren geometriye ait sonlu elemanlar modeli Şekil 3.1.11'de verilmektedir.

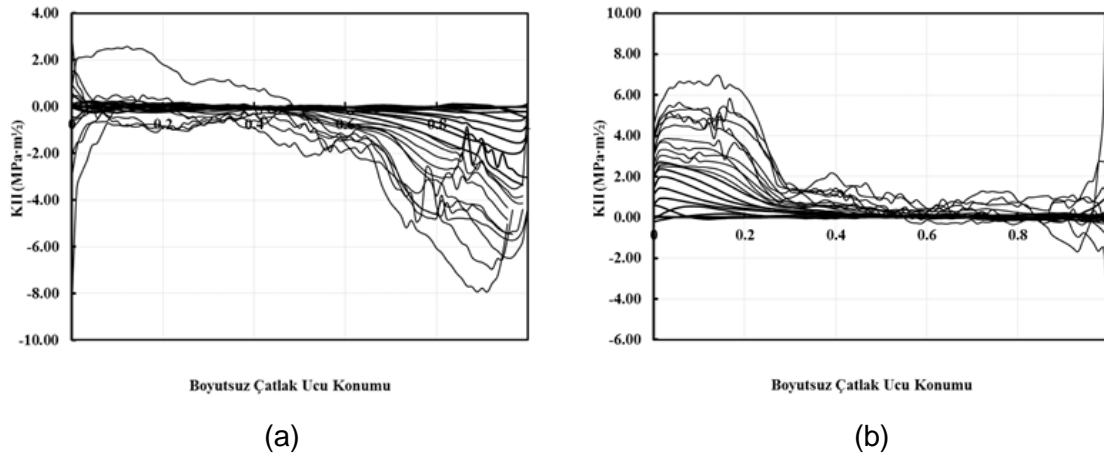


Şekil 3.1.11. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin sonlu eleman görüntüsü.

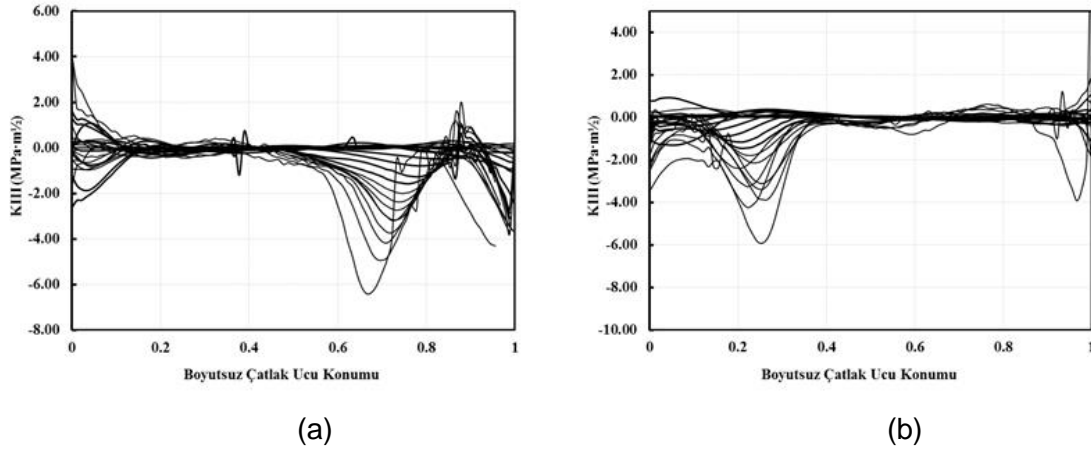
Başlangıç çatlak ANSYS'te modellenmiş, çatlak ve geometri ile ilgili bilgiler FCPAS programına aktarılmıştır. Böylece her bir adım için GŞF sonuçları alt ve üst çatlak için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çatlak ilerleme analizleri, eşdeğer GŞF değeri kırılma tokluğu değerine ulaşıncaya kadar devam ettirilmiş ve 23. ilerleme adımında kırılma tokluğuna ulaşıldığı tahmin edilmiştir. Şekil 3.1.12, 3.1.13 ve 3.1.14'te üst ve alt çatlaklar için çatlak ucu boyunca hesaplanan  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF dağılımları sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.1.12. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin her bir ilerleme adımı için hesaplanan  $K_I$  GŞF değerleri, (a) üst çatlak, (b) alt çatlak.

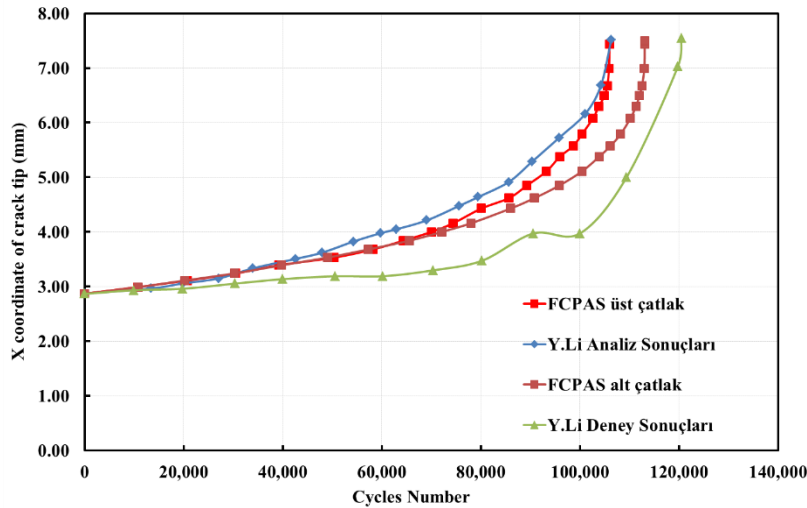


Şekil 3.1.13. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin her bir ilerleme adımı için hesaplanan  $K_{II}$  GŞF değerleri, (a) üst çatlak, (b) alt çatlak.



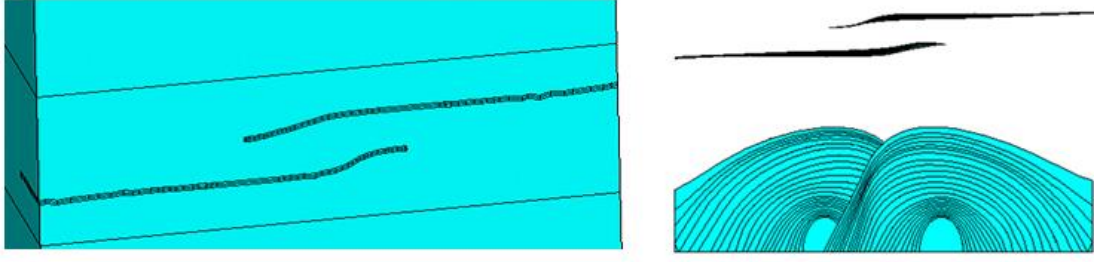
Şekil 3.1.14. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin her bir ilerleme adımı için hesaplanan  $K_{III}$  GŞF değerleri, (a) üst çatlak, (b) alt çatlak.

Her bir ilerleme adımı için hesaplanan  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerlerine karşılık gelen eşdeğer GŞF değerleri Denklem 3.1.2 ve 3.1.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra her bir ilerleme adımı için elde edilen eşdeğer GŞF değerleri kullanılarak çatlak ilerleme ömrü tahmin edilmiş ve referans makale verileri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.1.15'te, referans makaleden alınan analiz ve deney sonuçları ile bu çalışmada alt ve üst çatlak için yapılan ömür tahminlerinin karşılaştırması verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bu çalışmada FCPAS analizleri ile yapılan ömür tahminleri, referans makale verilerine göre deneysel çatlak ilerleme ömür değerlerine daha yakındır.



Şekil 3.1.15. Çoğul çatlak içeren çekme numunesi ömür mukayesesi.

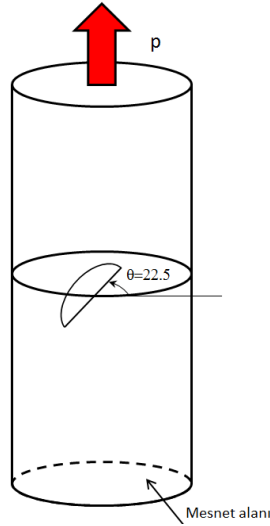
Şekil 3.1.16'da ise, çatlak ilerleme analizleri sonrası çekme numunesinin çatlak ilerleme yüzey profillerinin farklı perspektiflerdeki görünümü verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, çatlak yüzeyleri düzlemsel olmayan şekilde ilerlemişlerdir.



Şekil 3.1.16. Çoğul çatlak içeren çekme numunesinin çatlak ilerleme yüzeyleri, (Ön ve üst görünüşler sağda verilmiştir).

### 3.1.3 Eğik Çatlak İçeren Silindirik Çekme Numunesinde Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi

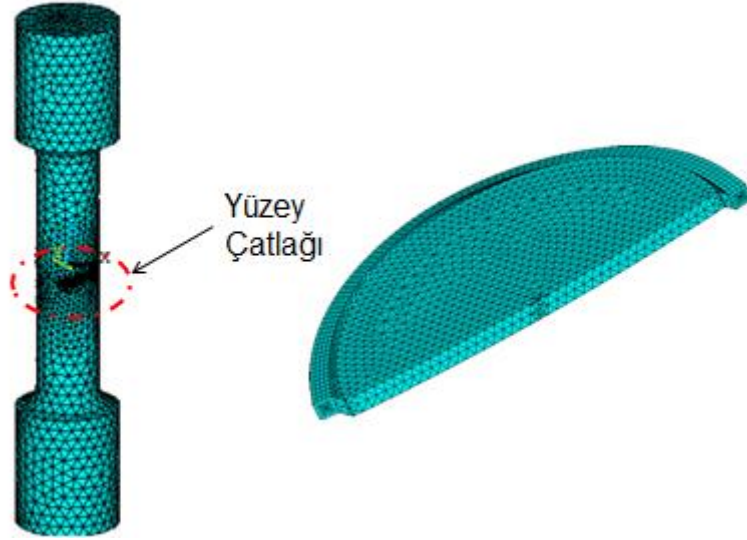
H. Okada ve ark. (2013) eğik yüzey çatlağı içeren bir silindirik çekme numunesinin üç-boyutlu çatlak ilerleme analizi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Adventure Solid adlı bir programı kullanarak sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF'lerin değerlendirilmesinde VCCM (virtual crack closure-integral method) metodunu kullanmışlardır. Eşdeğer GŞF değeri Richard kriteri (2003) kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan modelin detaylı resmi Şekil 3.1.17'de verilmektedir.



Şekil 3.1.17. Eğik çatlak içeren silindirik numune.

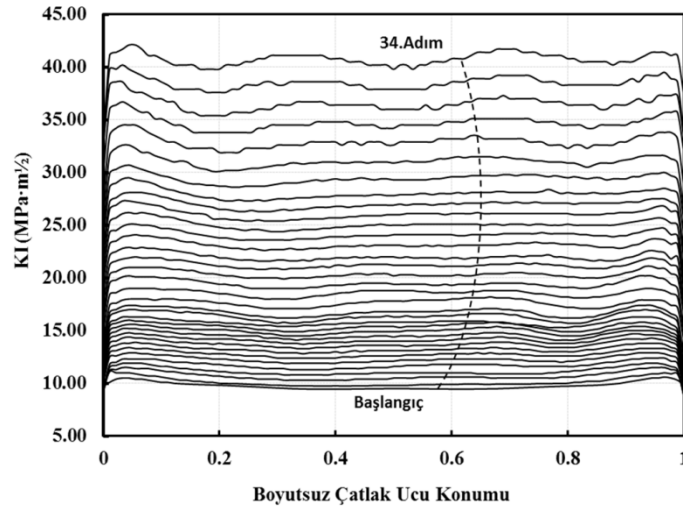
Literatür verilerine göre silindirik numune modellenerek, dış yüzeye silindir eksenine dik kesite göre  $\theta=22.5^\circ$  eğik bir başlangıç çatlağı yerleştirilmiş ve 140 MPa çekme gerilmesi uygulanmıştır. Silindirik numunenin uzunluğu 240 mm, numune çapı ise 60 mm'dir. Çatlak derinliği,  $a=4$  mm, çatlak uzunluğu,  $2c=8$  mm'dir. Daha sonra eğik çatlak içeren silindirik

numune için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.1.18'de, 1. çatlak ilerleme adımı sonrası 2. çatlak profilini içeren silindirik numunenin sonlu eleman modeli gösterilmektedir.

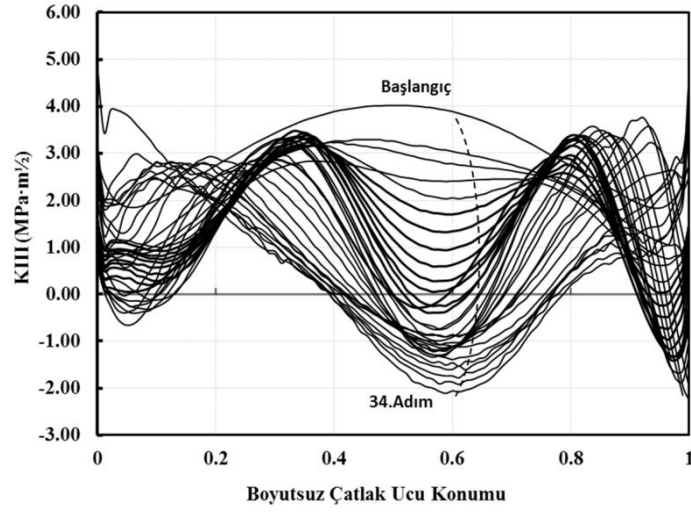


Şekil 3.1.18. Eğik çatlak içeren silindirik numunenin sonlu elemanlar modeli (solda), birinci ilerleme adımından sonra yüzey çatlağı (sağda).

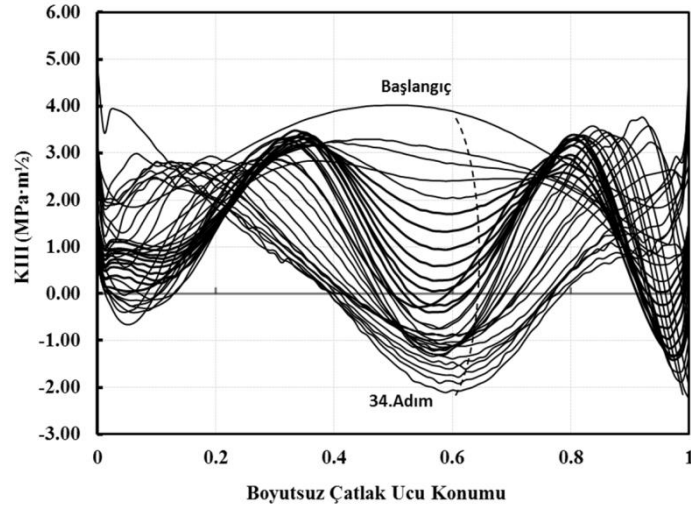
Bu simülasyon kapsamında, toplam 34 adım çatlak ilerleme analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1.19'da tüm ilerleme adımları için FCPAS ile hesaplanan GŞF değerleri verilmiştir.



(a)



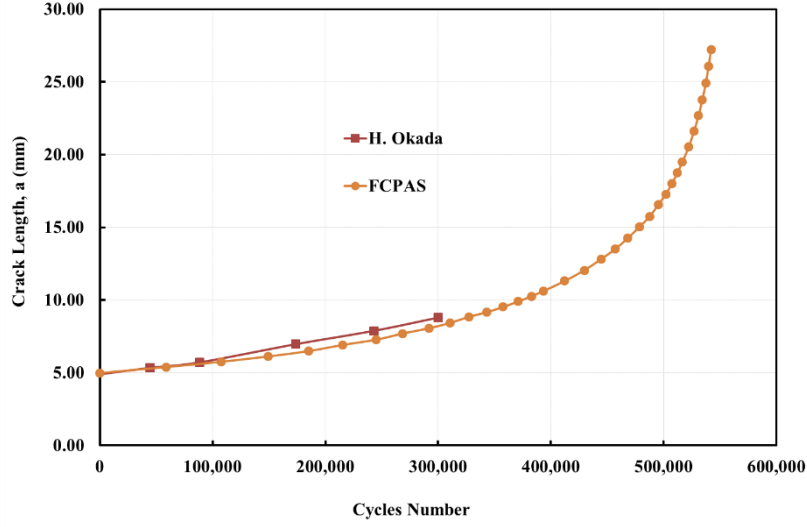
(b)



(c)

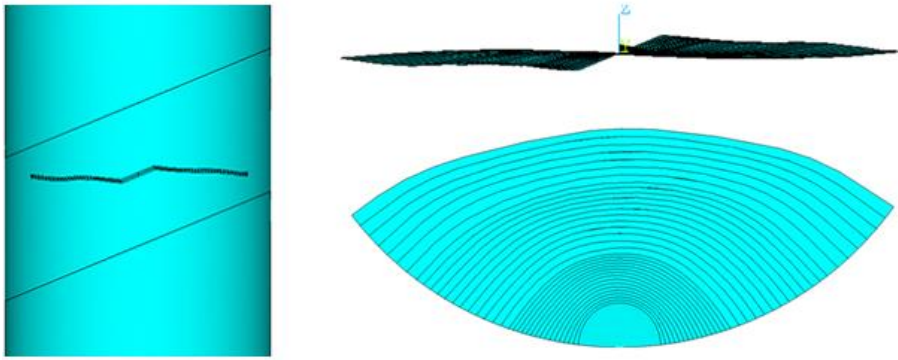
Şekil 3.1.19. Çatlak ilerleme simülasyonları sonrası çatlak ucu boyunca elde edilen, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$ , (c)  $K_{III}$  GŞF değerleri.

Her bir ilerleme adımı için elde edilen eşdeğer GŞF değerleri kullanılarak yapılan çatlak ilerleme ömür tahmininin referans makale verileri ile karşılaştırılması Şekil 3.1.20'de verilmiştir. Referans makalede, farklı R-oranları için verilen ömür grafiğinden R-oranı sıfır için verilen sonuçlar kullanılmıştır. Ayrıca makalede deneysel çalışma da yapılmış ve ömür değerleri verilmiştir. Ancak deneyin hangi R-oranında gerçekleştirildiği gibi detay bilgiler makalede verilmediği için deneysel veriler ile karşılaştırma imkânı olmamıştır. Şekilde görüldüğü gibi proje kapsamında yapılan analizlerden elde edilen ömür tahminlerinin referans makale verileri ile yakın uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.1.20. Eğik çatlak içeren silindirik numune için ömür mukayesesi.

Şekil 3.1.21'de, çatlak ilerleme analizleri sonrası numunenin çatlak ilerleme yüzey profillerinin farklı açılardaki görünüşleri verilmektedir.



Şekil 3.1.21. Çatlak ilerleme simülasyonları sonrası elde edilen çatlak yüzey profillerinin farklı perspektiflerden görünümü.

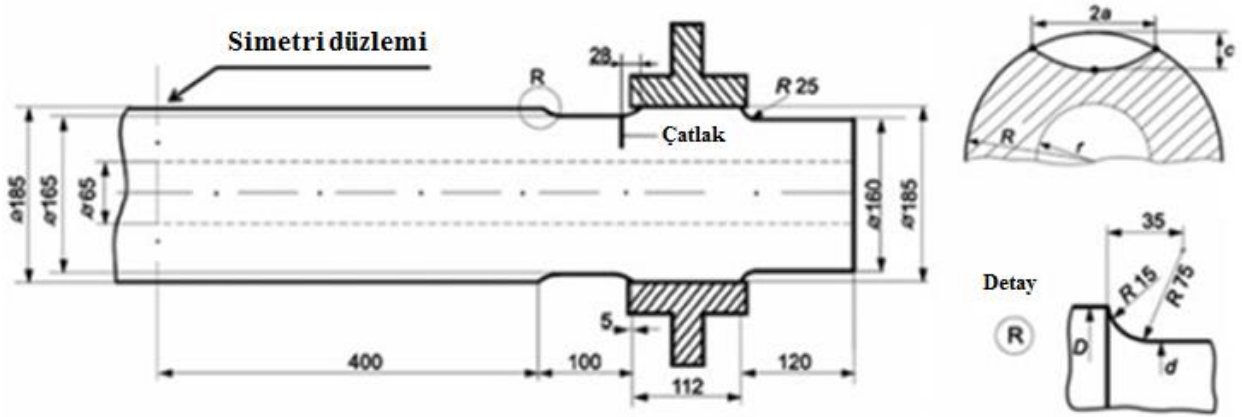
Yukarıda detayları verilen ve artırımlı adımlar ile her bir ilerleme adımının ayrı ayrı analizleri yapılan yorulma çatlak ilerleme simülasyonlarından anlaşılacağı üzere, FCPAS ile elde edilen sonuçlar, bu uygulamada da ilgili literatür verileri ile oldukça yakın uyum içerisindedir.

### 3.1.4 Eğilme Yükü Altındaki İçi Boş Milde Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi

R. Citarella ve ark. 2018 yılında yapmış oldukları çalışmada, dış yüzeyinde yarı eliptik düzlemsel bir çatlığa sahip içi boş bir mile dört farklı yükleme tipi (eğilme, sıkı geçme, kayma ve burulma) uygulayarak üç boyutlu karışık mod-I/II/III çatlak ilerleme davranışını incelemiştir. Çatlak ilerleme analizlerini üç farklı çatlak ilerleme analiz programı (BEASY,

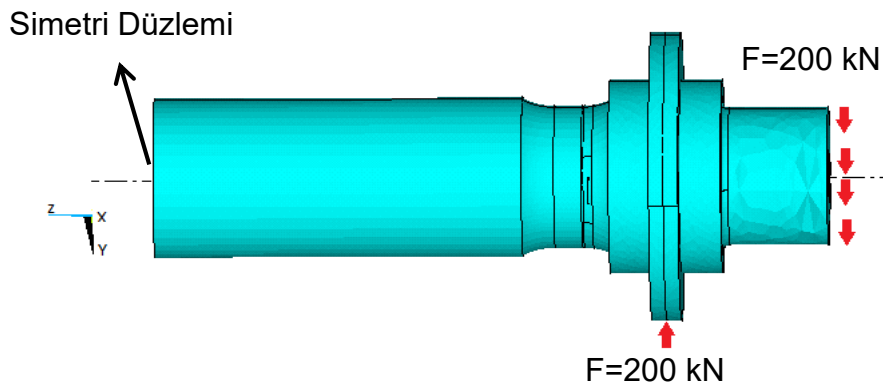
ZENCRACK ve CRACKTRACER3D) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çatlak ilerleme ömrünün tahmini için Paris-Erdoğan denklemini (Denklemler 3.1.4) kullanmışlardır. Çatlak sapma açısı ve eşdeğer gerilme şiddet faktörünün (GŞF) tahmini için ise her bir analiz programında farklı denklem ve kriter kullanmışlardır. Çalışma sonucunda üç farklı program kullanarak çatlak profilleri için hesaplanan GŞF'lerin, çatlak ilerleme ömrü tahminlerinin ve yorulma yüzeylerinin uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında referans makalede ele alınan 4 farklı yükleme durumundan, çatlağın eğilme yüküne maruz kaldığı problem seçilerek FCPAS programı ile üç boyutlu karışık mod-I/II/III çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. GŞF'lerin hesaplanmasında FCPAS ve FRAC3D programı kullanılmıştır. Şekil 3.1.22'de, ele alınan probleme ait detay ve boyutlandırmalar verilmiştir.



Şekil 3.1.22. Probleme ait detay ve ölçüler (Citarella ve ark (2018)).

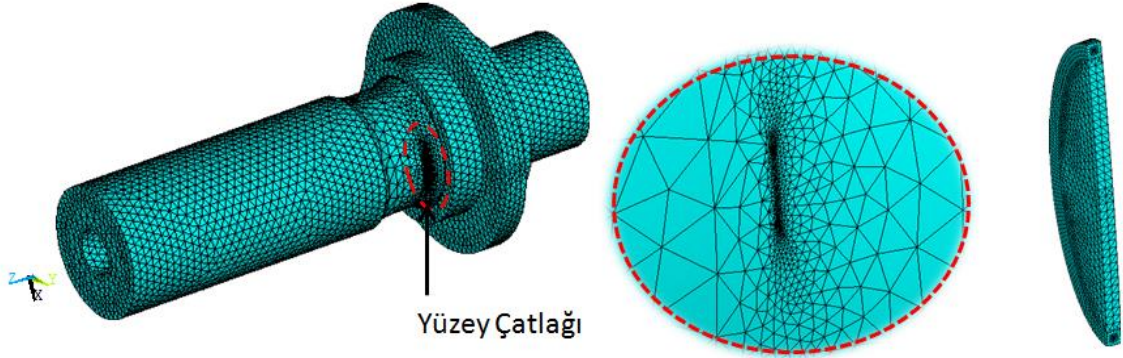
200 kN'luk kuvvet etkisi ile eğilme momentine maruz içi boş silindir, dış yüzeyinde çatlak derinliği  $a=1.9$  mm ve çatlak uzunluğu  $c=3.8$  mm olan eliptik bir çatlak barındırmaktadır (Şekil 3.1.23).



Şekil 3.1.23. Mile uygulanan sınır şartı ve yükler.

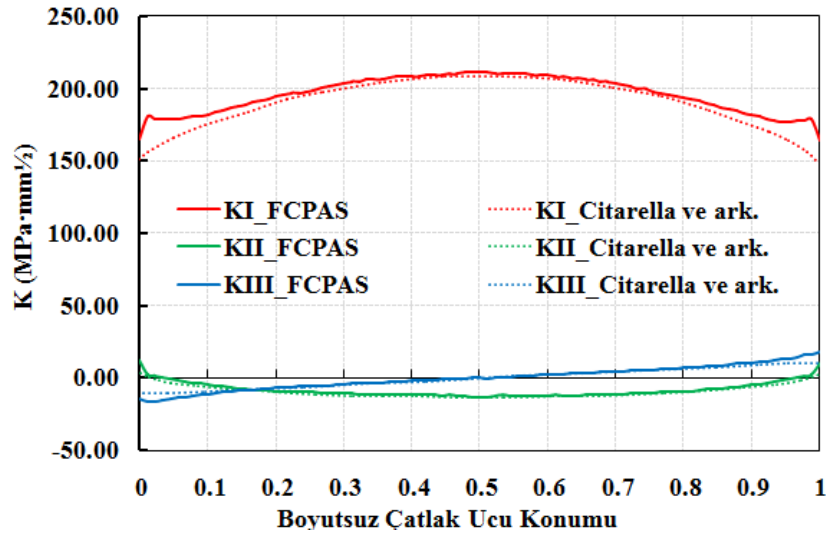


Şekil 3.1.24'te ise içi boş milin sonlu elemanlar modeli ve başlangıç çatlağının yakın görünümü verilmektedir.



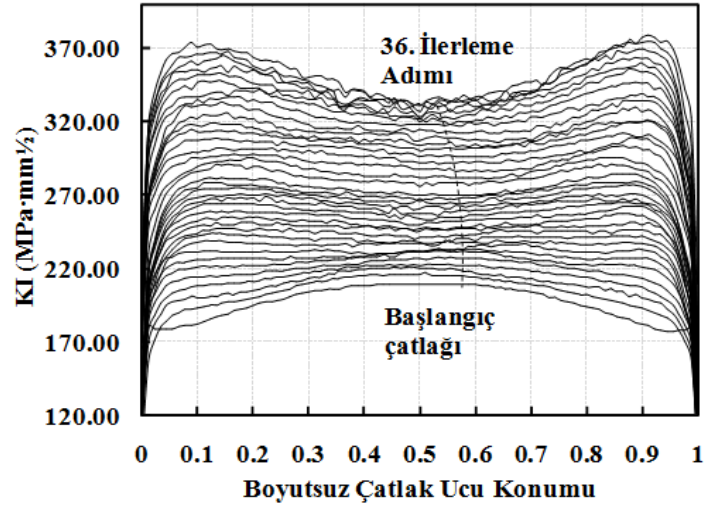
Şekil 3.1.24. İçi boş milin sonlu elemanlar modeli ve başlangıç çatlağının yakın görünümü.

Şekil 3.1.25'te başlangıç çatlağı için hesaplanan GŞF'lerin referans makaleden alınan değerler ile karşılaştırması verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi çatlak ucu boyunca hesaplanan  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF'leri referans makale verileri ile benzer eğilime sahip olup sonuçlar oldukça yakındır.

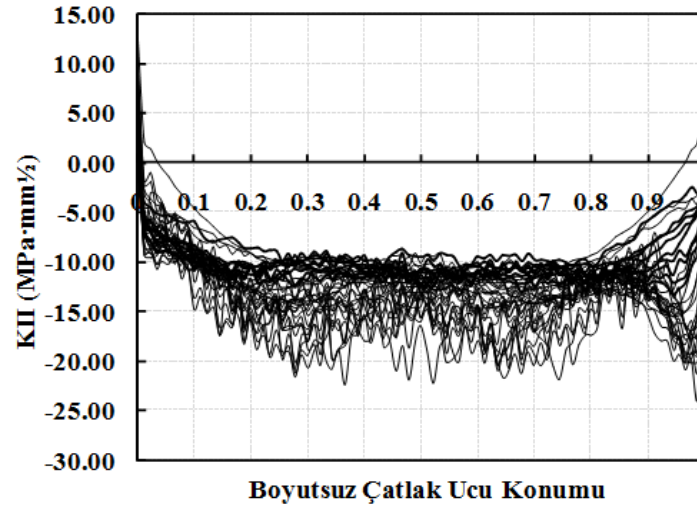


Şekil 3.1.25. Başlangıç çatlağı için elde edilen GŞF değerlerinin karşılaştırması.

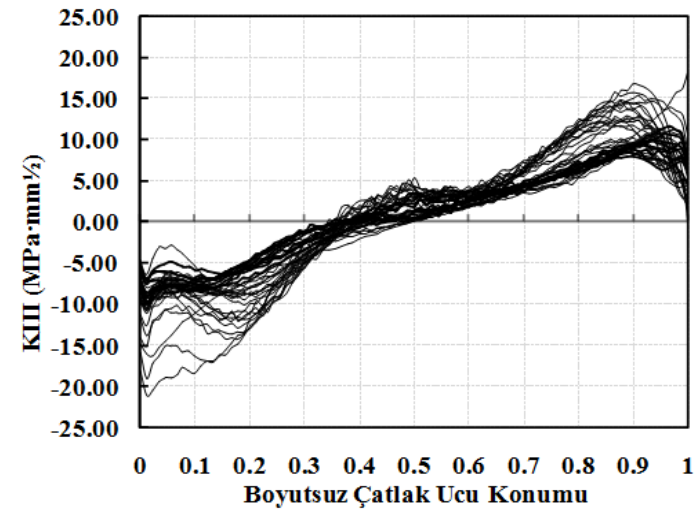
İçi boş milin malzeme özellikleri referans makaleden alınmıştır. Elastiklik modülü,  $E=210$  GPa, Poisson oranı,  $\nu=0.3$ , çatlak ilerleme malzeme sabitleri,  $C=1.23085 \cdot 10^{-12}$  mm/cycle\*(Pa\*mm<sup>0.5</sup>) ve  $n=2.82$ 'dir. Toplam 36 adım çatlak ilerleme analizi gerçekleştirilmiştir. Her bir çatlak ilerleme profili için çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF dağılımları Şekil 3.1.26'da verilmektedir.



(a)



(b)

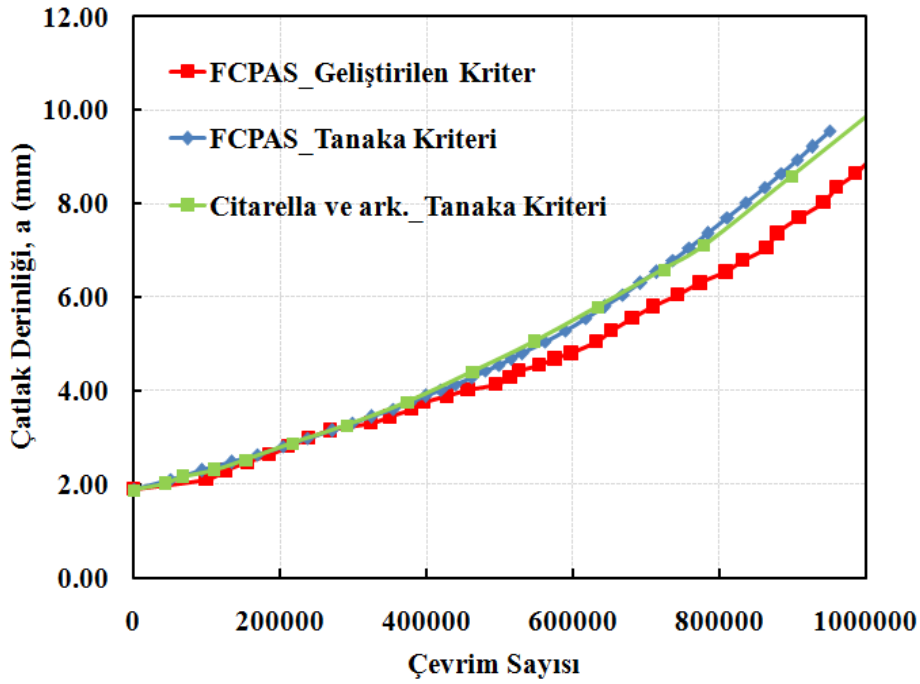


(c)

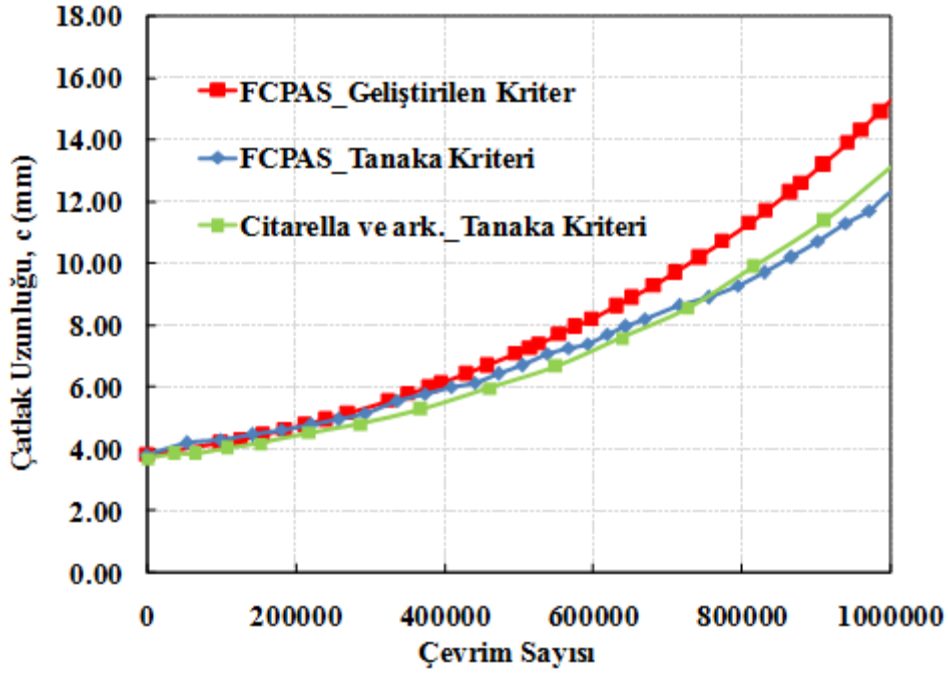
Şekil 3.1.26. Her bir çatlak ilerleme profili için çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF dağılımları, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$  ve (c)  $K_{III}$  grafikleri.

Şekil 3.1.27 ve 3.1.28'de her bir ilerleme adımı için elde edilen eşdeğer GŞF değerleri kullanılarak tahmin edilen çatlak ilerleme ömrünün referans makalenin verileri ile karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 3.1.27'de, düşey eksen çatlağın merkezindeki (derinlik noktası) ilerleme ömrünü, Şekil 3.1.28'de ise düşey eksen çatlağın serbest yüzeydeki ilerleme ömrünü temsil etmektedir. Referans makalede eşdeğer GŞF tahmini için Tanaka kriteri (Tanaka, 1974) kullanılmıştır (Denklemler 3.1.5).

$$K_{eq} = \left[ K_I^4 + 8K_{II}^4 + \frac{8K_{III}^4}{1-\nu} \right]^{0.25} \quad (3.1.5)$$



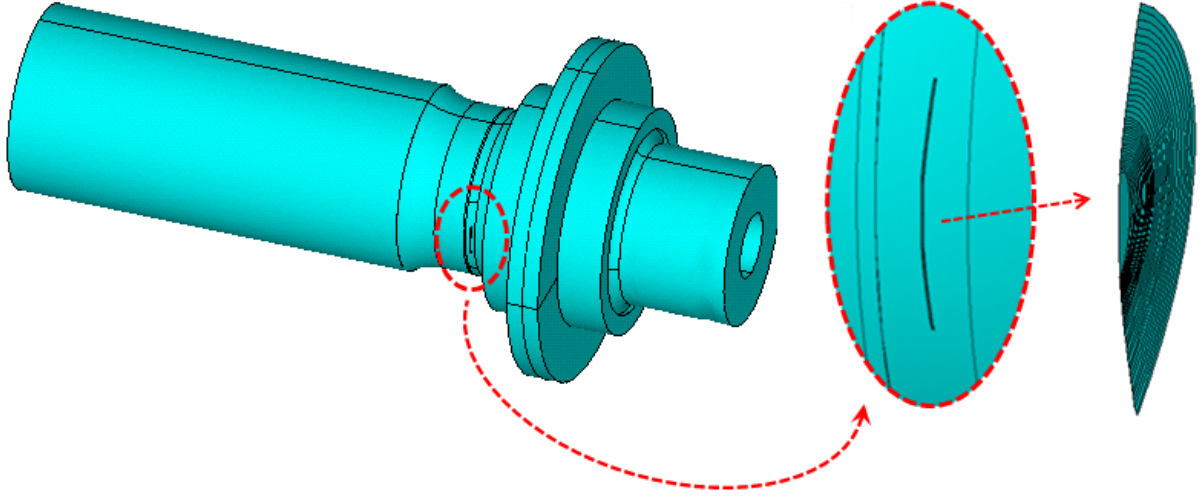
Şekil 3.1.27. Çevrim sayısı ve çatlak derinliği (a) değişiminin referans makale verileri ile karşılaştırılması.



Şekil 3.1.28. Çevrim sayısı ve çatlak yüzey uzunluğu (c) değişiminin referans makale verileri ile karşılaştırılması.

Şekillerde yeşil renk ile gösterilen ömür eğrisi, referans makalede Tanaka kriteri kullanılarak yapılan ömür tahminini göstermektedir. Mavi renk ile gösterilen ömür eğrisi ise, FCPAS kullanılarak gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası her bir ilerleme adımı için elde edilen GŞF değerleri kullanılarak Tanaka kriterine göre yapılan ömür tahminini temsil etmektedir. Kırmızı renk ile gösterilen ömür eğrisi ise FCPAS verileri kullanılarak FCPAS Aşama-2 projesi kapsamında geliştirilen kriter (Denklem 3.1.1, 3.1.2 ve 3.1.3) göre yapılan ömür tahminini göstermektedir. Her iki şekilde de görüldüğü gibi mavi ve yeşil renkli ömür eğrileri birbirine çok yakın bir eğilim göstermektedir. Kırmızı ve yeşil renkli ömür eğrilerinin elde edilmesinde, her bir çatlak ilerleme adımı için aynı  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri kullanılmış ve farklı çatlak ilerleme kriterlerine göre karşılık gelen eşdeğer GŞF ( $K_{eş}$ ) değerleri elde edilmiştir. Mavi ve yeşil renkli ömür eğrilerinin elde edilmesinde ise her bir çatlak ilerleme adımı için farklı  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF değerleri kullanılmış (referans makaledeki kırılma analizleri farklı program kullanılarak yapılmıştır) ve aynı çatlak ilerleme kriterine (Tanaka kriteri) göre karşılık gelen eşdeğer GŞF ( $K_{eş}$ ) değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç, FCPAS/FRAC3D ve referans makalede kullanılan analiz programından her bir çatlak adımı için birbirine yakın GŞF değerleri elde edildiğini göstermektedir. Referans makalede herhangi bir deneysel çalışmaya yer verilmediği için, Tanaka kriteri (mavi renk) ve geliştirilen kriterden (kırmızı renk) hangisinin daha iyi ömür tahmini yapabildiği ile ilgili bir yorum yapılamamaktadır.

Şekil 3.1.29'da ise çatlak ilerleme analizleri sonrası numunenin çatlak ilerleme yüzeylerinin perspektif görünümü verilmiştir.



Şekil 3.1.29. Eğilmeye maruz içi boş silindir için ilerlemiş çatlak yüzeylerinin görünümü.

### 3.1.5 Çeki Yüğü Altında Bulunan H-Kesitli Parçada Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod-I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi

M. Grasso ve ark. (2018), yapmış oldukları çalışmada, çeki yükü altında bulunan H-kesite sahip bir parçanın yüzeyinde bulunan, yükleme yönüne göre farklı açılara sahip başlangıç çatlaklarının çatlak ilerleme analizlerini gerçekleştirerek yorulma çatlak ilerleme davranışını incelemiştir. Başlangıç çatlakları yükleme yönüne göre açılı olduğu için, çatlak ucu bölgesinde karışık mod oluşmakta ve çatlak düzlemsel olmayan bir şekilde ilerlemektedir. M. Grasso ve ark. (2018) çatlak ilerleme analizlerini FRANC3D programını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çatlak ilerleme kriteri olarak Erdoğan ve Sih'in (1963) önermiş olduğu kriteri (Denklem 3.1.6 ve 3.1.7) kullanılarak çatlak ilerleme profilleri tahmin edilmiştir.

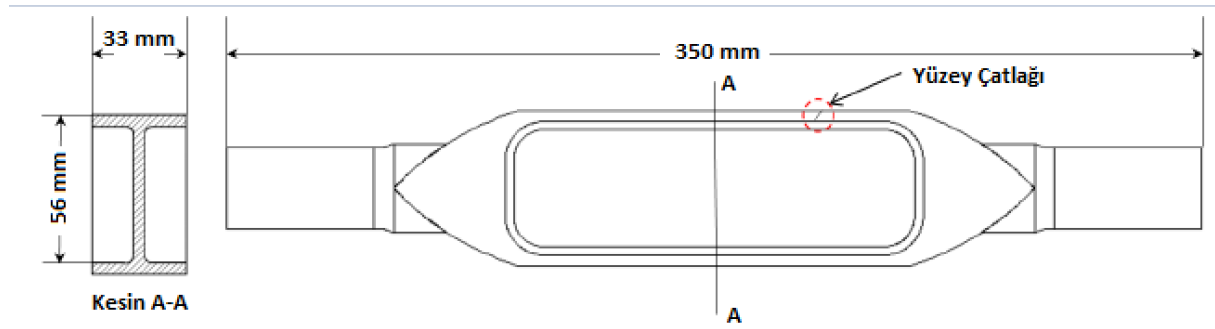
$$K_{eq} = \cos \frac{\theta_0}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right] \quad (3.1.6)$$

$$\theta_0 = -\arccos \left( \frac{3K_{II}^2 + K_I \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \quad (3.1.7)$$

Çatlak ilerleme modeli ise Denklem 3.1.8'de verilen NASGRO denklemidir (Newman, 1981).

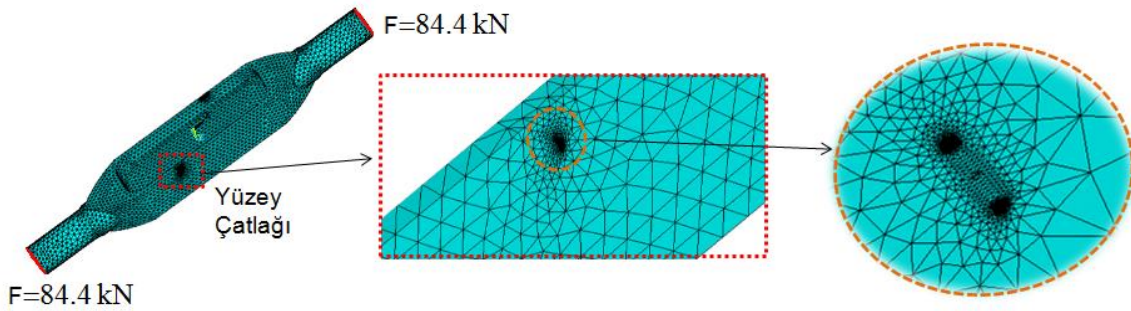
$$\frac{da}{aN} = C \left( \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right)^n \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{Th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_C} \right)^q} \quad (3.1.8)$$

Şekil 3.1.30'da H kesitli numuneye ait ölçü ve detaylar verilmektedir.



Şekil 3.1.30. H kesitli parçaya ait ölçü ve detaylar.

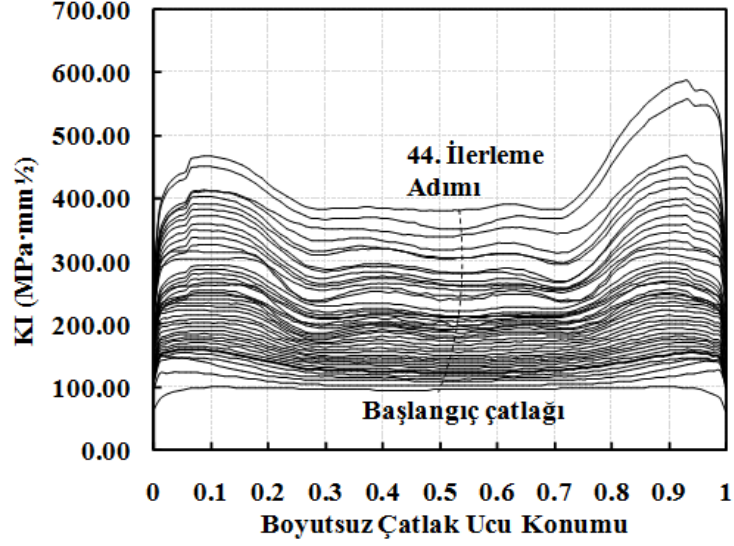
Referans makalede çatlakın yüklenme yönüne göre 3 farklı açıda bulunduğu durumlar için analizler gerçekleştirilmiş olup, bu çalışma kapsamında çatlakın yüklenme yönüyle 45 derecelik açı yaptığı durum seçilerek sonuçların doğrulaması ve karşılaştırılması yapılmıştır. Yukarıda geometrik detayları verilen H kesitli parçaya 1 mm çapında yarı-dairesel bir yüzey çatlağı yerleştirilmiş olup, parça 84.4 kN çekme yüküne maruzdur. Şekil 3.1.31'de H-kesitli parçaya ait sonlu elemanlar modeli ve başlangıç çatlakının yakın görünümü verilmektedir.



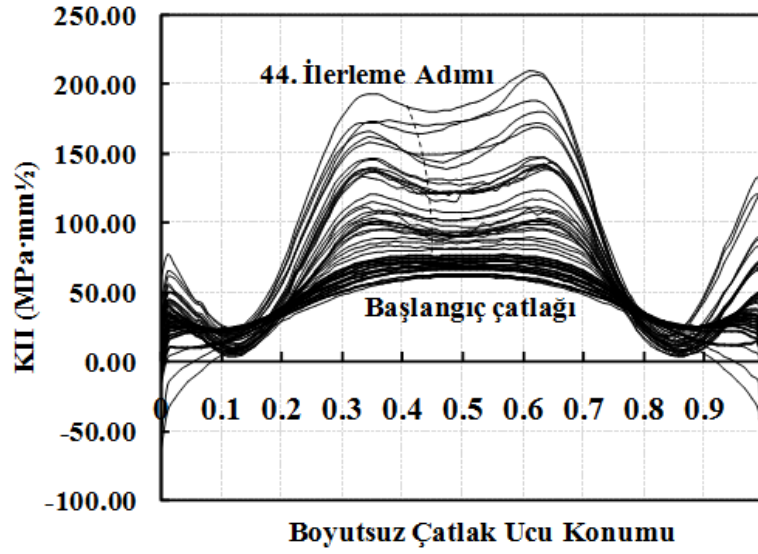
Şekil 3.1.31. H-kesitli parça sonlu elemanlar modeli (solda), çatlak bölgesi yakın görünümü (sağda).

Çatlak ilerleme analizi için kullanılan malzeme özellikleri ilgili makaleden alınmıştır. Malzemenin elastik modülü,  $E=71000$  MPa, poisson oranı,  $\nu=0.3$ , çatlak ilerleme malzeme özellikleri,  $C=3.0447 \cdot 10^{-11}$  mm/cycle\*(Pa\*mm<sup>0.5</sup>) ve  $n=2.54$ . Başlangıç çatlak için GŞF'ler hesaplanmış ve FCPAS Aşama-2 projesi kapsamında geliştirilen kritere (Denklem 3.1.1, 3.1.2

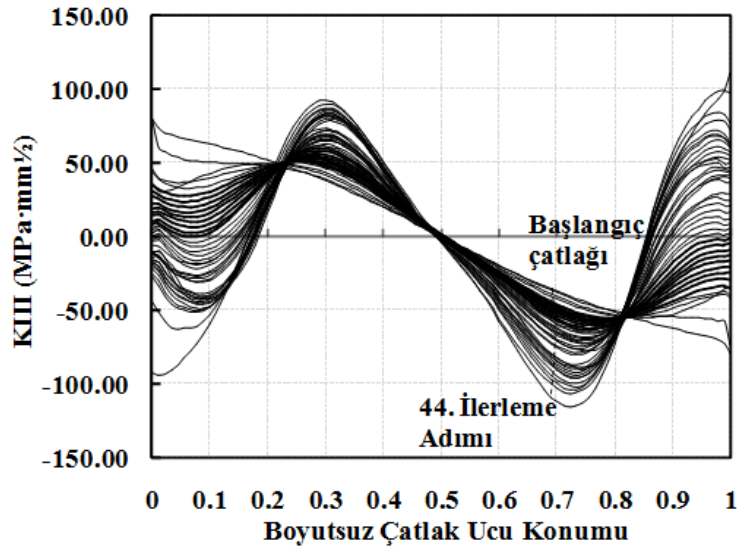
ve 3.1.3) göre FCPAS kullanılarak çatlak ilerleme profilleri tahmin edilmiştir. Toplam 43 adım çatlak ilerleme analizi gerçekleştirilmiştir. Her bir çatlak ilerleme profili için çatlak ucu boyunca elde edilen  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF dağılımları Şekil 3.1.32'de verilmektedir.



(a)



(b)

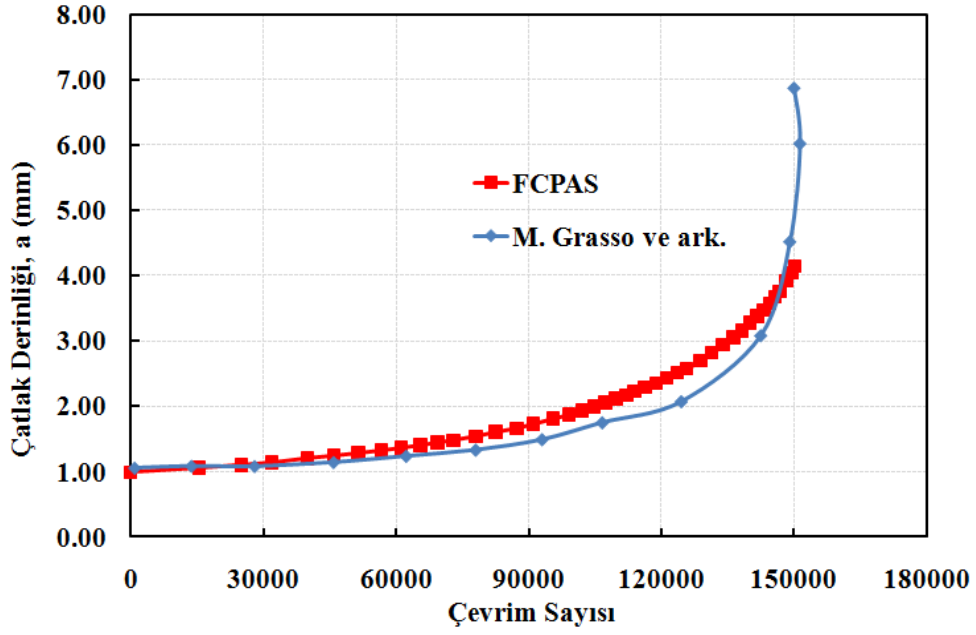


(c)

Şekil 3.1.32. Her bir çatlak ilerleme profili için çatlak ucu boyunca elde edilen GŞF dağılımları, (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$  ve (c)  $K_{III}$  grafikleri.

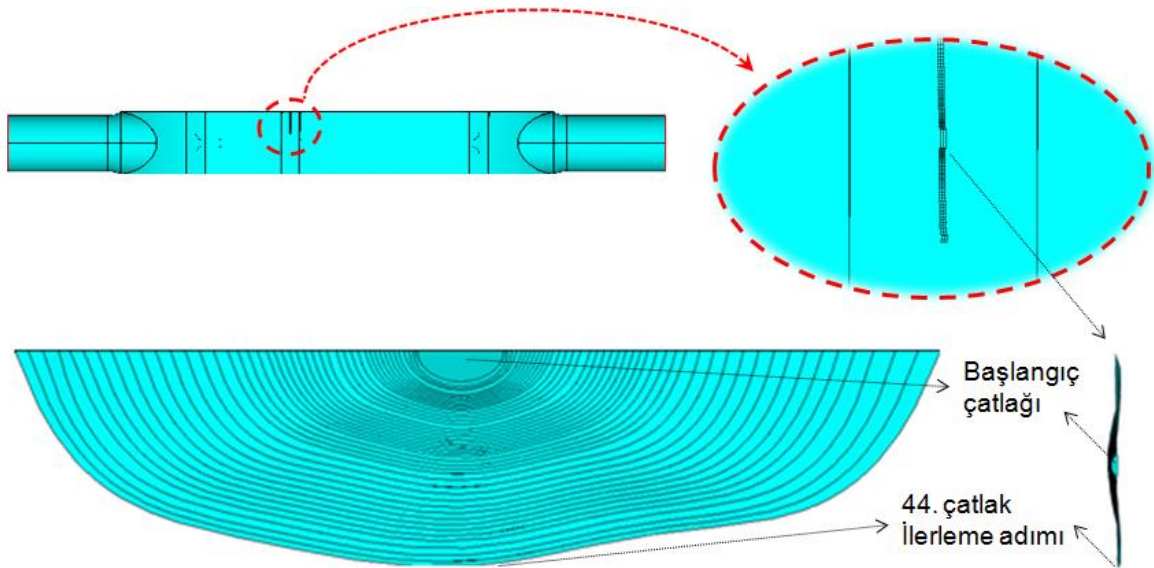
Her bir çatlak ilerleme profili için hesaplanan karışık mod GŞF'ler kullanılarak, geliştirilen kritere göre eşdeğer GŞF'ler hesaplanarak ömür tahmini gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1.33'te tahmin edilen çatlak ilerleme ömrünün referans makalenin verileri ile karşılaştırılması verilmektedir. Referans makalede eliptik çatlak ucunun farklı noktaları için (serbest yüzeye yakın ve merkez noktalarından) her bir çatlak ilerleme adımında GŞF değerlerinin değişimi verilmiş ve ömür grafiğinin elde edilmesinde kullanılan GŞF değerlerinin çatlağın hangi noktasına ait olduğu belirtilmemiştir. Şekilde FCPAS kullanılarak yapılan ömür tahmininde, serbest yüzeye yakın noktalar için elde edilen GŞF değerleri kullanılarak eşdeğer GŞF değerleri hesaplanmış ve çevrim sayısına karşılık çatlağın merkezdeki ilerlemesi gösterilmiştir. Referans makalede hem kullanılan GŞF değerlerinin hangi noktaya ait olduğu hem de şekildeki düşey eksenin çatlak ucunun hangi noktasını temsil ettiği net olarak belirtilmediği için iki eğrinin bitiş noktaları arasında farklılıklar mevcuttur. Bununla beraber, iki ömür eğrisinin de birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlenmektedir.





Şekil 3.1.33. H-kesitli parça için ömür değerleri karşılaştırılması.

Şekil 3.1.34'te ise çatlak ilerleme analizleri sonrası numunenin çatlak ilerleme yüzeylerinin farklı açılardan görünümü verilmiştir.



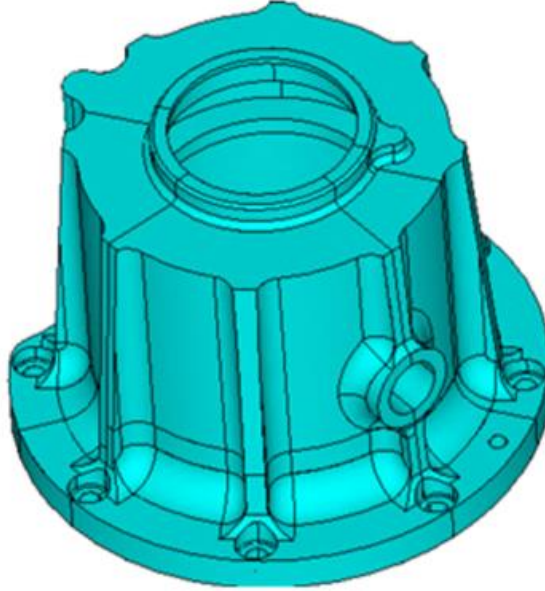
Şekil 3.1.34. H-kesitli parça için yorulma çatlak ilerleme yüzeylerinin farklı açılardan görünümü.

### 3.1.6 Bir Motor Parçasında Düzlemsel Olmayan (Karışık Mod- I/II/III) Çatlak İlerleme Analizi

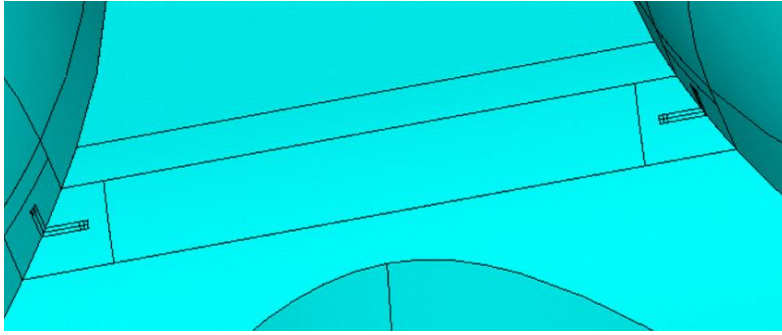
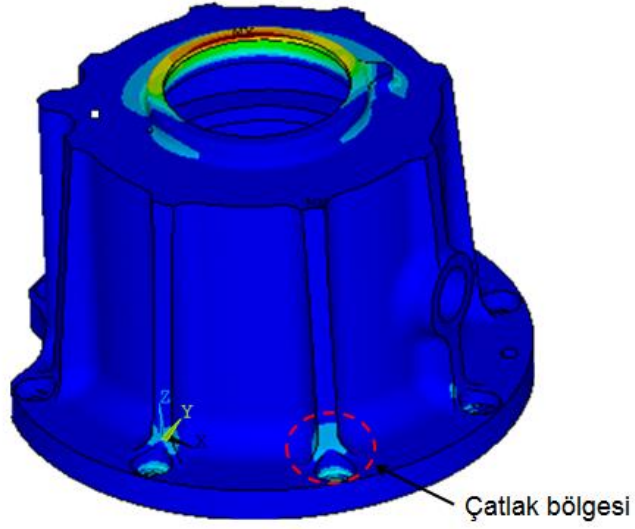
Bu kısımda; Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (Fracture and Crack Propagation Analysis System, FCPAS) -Aşama 2 projesinde (Ayhan,2016) elde edilen simülasyon

kabiliyetlerinin TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. (TEI) tarafından sağlanan bir motor parçasında uygulanması sunulmaktadır. Burada verilen kısıtlı bilgilerin, geometrik boyut ve diğer sayısal bilgiler verilmeden proje raporuna dâhil edilebileceğine dair TEI Şef Mühendislik tarafından onay verilmiştir. Bu kapsamda, geometrik boyutlar, parça kullanım yeri, kırılma analiz sonuçlarının sayısal değerleri vb. detaylar verilmeden, FCPAS/FRAC3D kullanılarak yapılan analizlerin boyutsuz hale getirilen bazı sonuç ve görüntüleri aşağıda verilmektedir.

İlgili parça için TEI tarafından sağlanan modelin genel perspektif görüntüsü Şekil 3.1.35'te verilmektedir. Öncelikle ilgili sistemden motor parçasına etkiyen yük hesaplanmış ve bu yük değeri ile sınır şartları uygulanarak gerilme analizi yapılmıştır. Gerilme analizi sonuçlarına göre, yüksek gerilme bölgesi belirlenerek Şekil 3.1.36'da gösterildiği gibi iki adet dairesel köşe çatlaklı yerleştirilmesine karar verilmiştir.



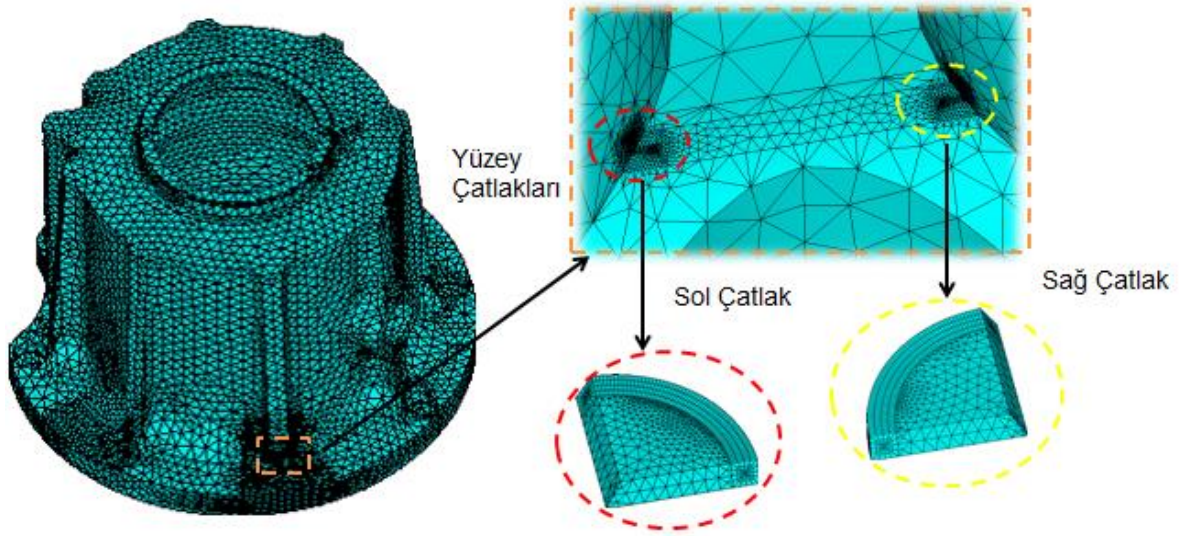
Şekil 3.1.35. Problem katı modeli perspektif görüntüsü.



Şekil 3.1.36. Probleme ait gerilme dağılımı ve başlangıç çatlakları.

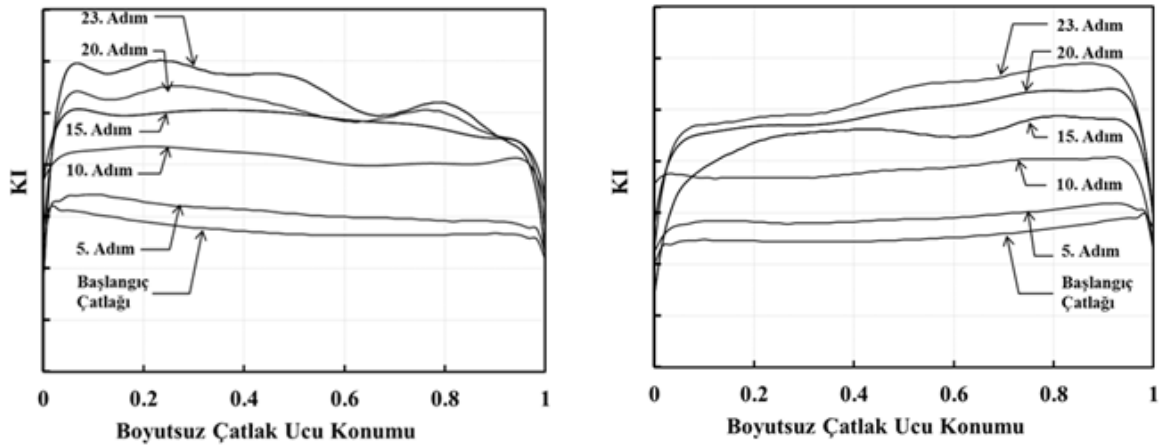
Motor parçasına etkiyen yük değeri, sınır şartları, malzeme özellikleri, başlangıç çatlak boyutu, ömür değeri ve hesaplanan GŞF gibi değerler yukarıda da belirtildiği üzere, TEI tarafından alınan onay sınırları çerçevesinde sayısal değerler olarak verilememekte olup, sadece grafiksel eğilim olarak verilebilmektedir.

Yukarıda belirtilen noktalarda parçaya çatlakların yerleştirilmesi ile simülasyon başlatılmıştır. Şekil 3.1.37'de çatlakları içeren parçaya ait sonlu elemanlar modeli görüntüleri verilmektedir.

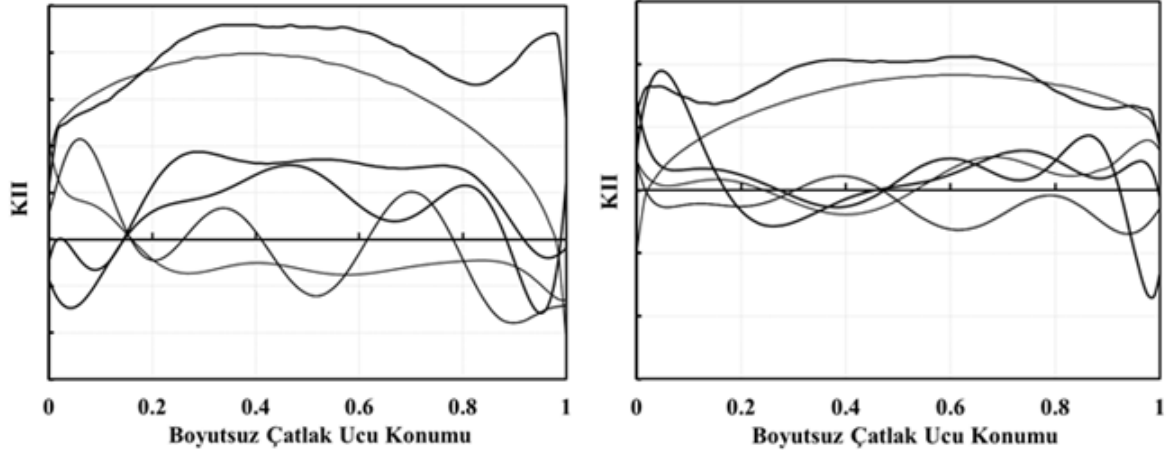


Şekil 3.1.37. Motor parçası sonlu elemanlar modeli (solda), çatlak bölgesi görüntüleri (sağda).

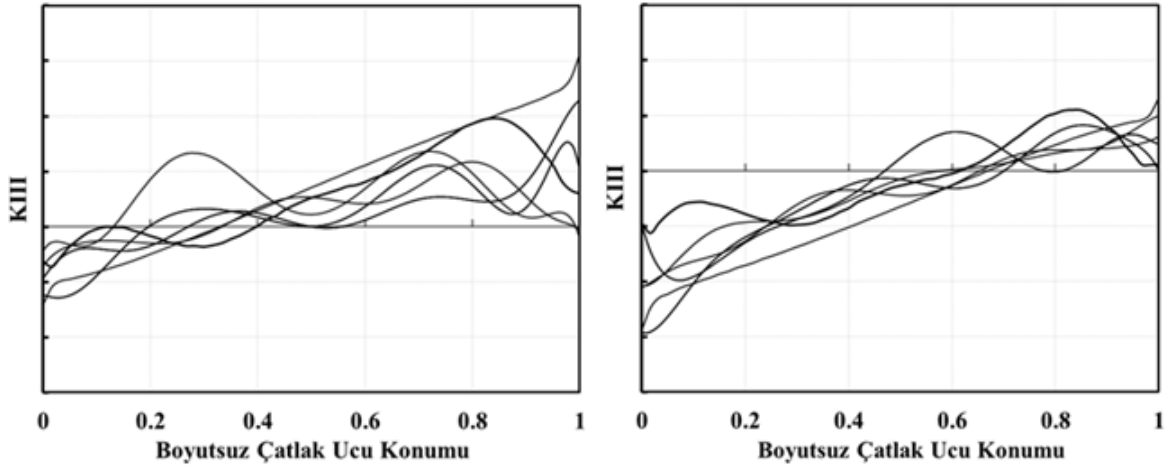
Öncelikle, başlangıç çatlakları için GŞF'ler hesaplanmış ve FCPAS Aşama-2 projesinde geliştirilen kritere göre FCPAS kullanılarak ilerleme profilleri tahmin edilmiştir. Toplam 38 adım çatlak ilerleme analizi yapılmıştır. Başlangıçta yerleştirilen çatlaklar 23. adımda birleşerek tek bir çatlak haline gelmişlerdir. İki ayrı çatlakın analiz edildiği çoğul çatlak durumu için bazı adımların  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF dağılımları Şekil 3.1.38'de verilmektedir. Çatlaklar birleştikten sonraki adımlar için  $K_I$ ,  $K_{II}$  ve  $K_{III}$  GŞF dağılımları ise Şekil 3.1.39'da verilmektedir. Çatlak, parçanın iç yüzeyine ulaştığında ise tekrar iki çatlak haline gelmektedir. Bu noktada çatlak ilerleme analizi durdurulmuştur.



(a)

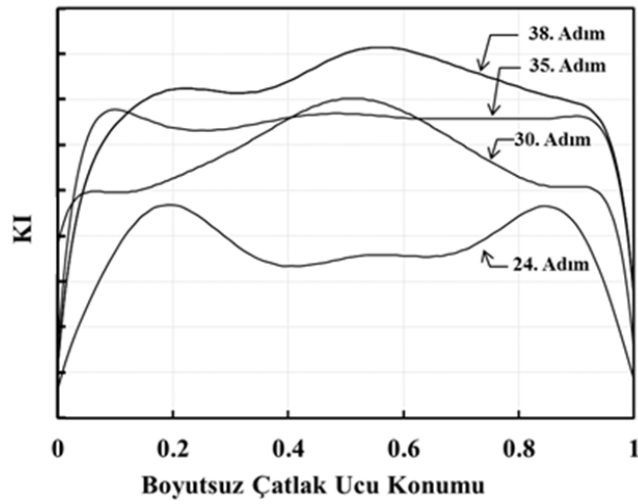


(b)

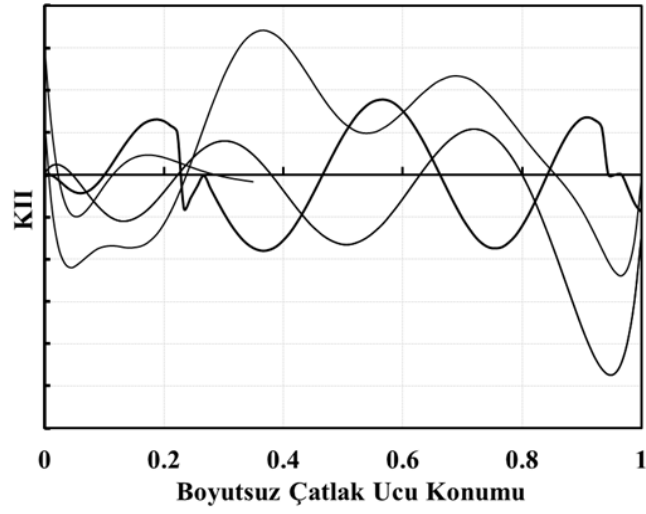


(c)

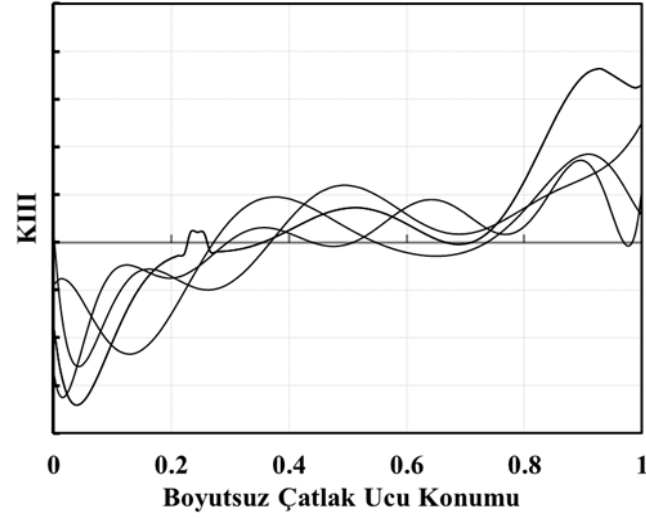
Şekil 3.1.38. Çoğul çatlak ilerleme için çatlak ucu boyunca bazı adımların boyutsuz GŞF dağılımları sol çatlak (solda), sağ çatlak (sağda), (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$  ve (c)  $K_{III}$ .



(a)



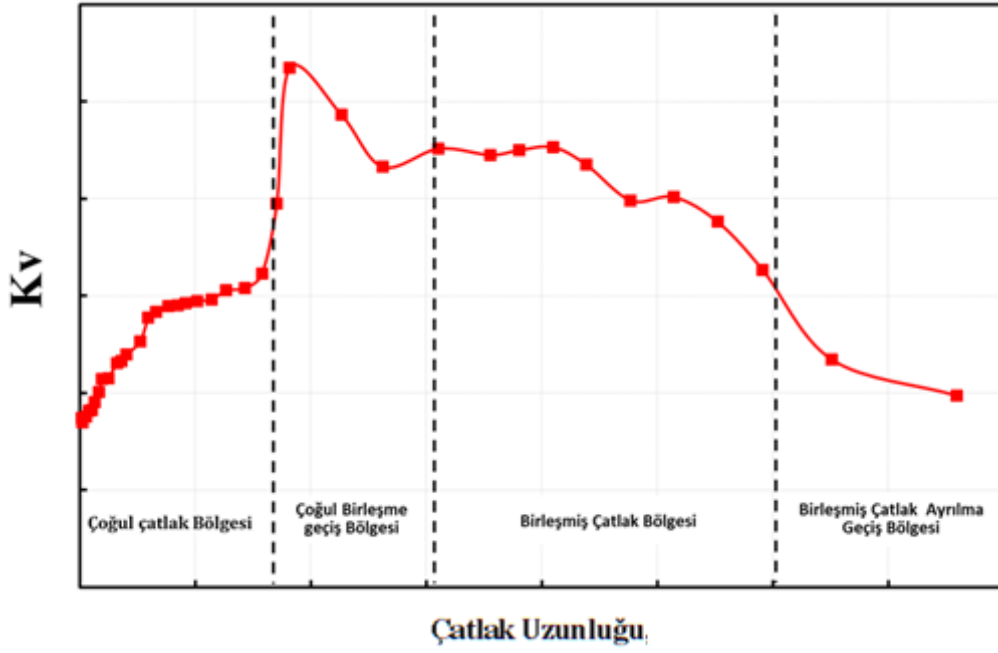
(b)



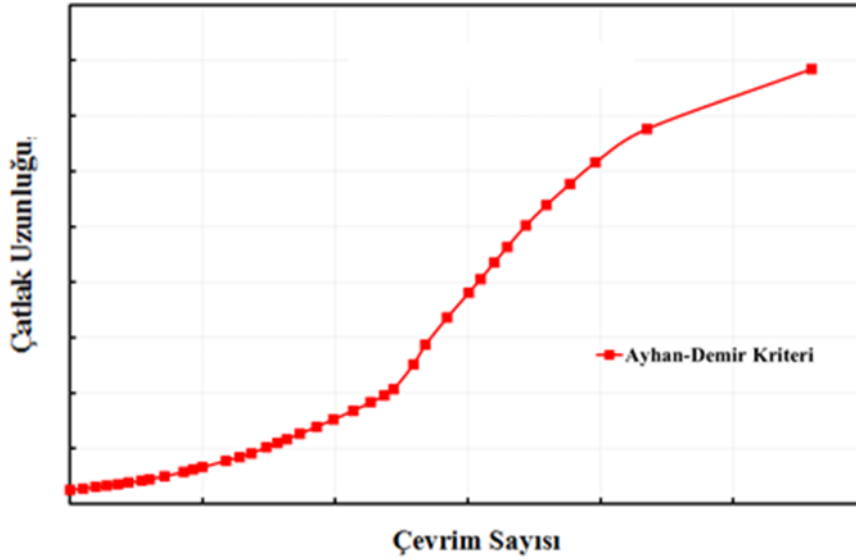
(c)

Şekil 3.1.39. Birleşmiş çatlak ilerleme profili için çatlak ucu boyunca elde edilen boyutsuz GŞF (a)  $K_I$ , (b)  $K_{II}$  ve (c)  $K_{III}$  dağılımları.

Her bir çatlak ilerleme profili için karışık modlu GŞF'ler kullanılarak eşdeğer GŞF'ler hesaplanmış ve ömür hesabında kullanılmak üzere çatlak yüzeyindeki GŞF'ler ile bir K-a eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 3.1.40).

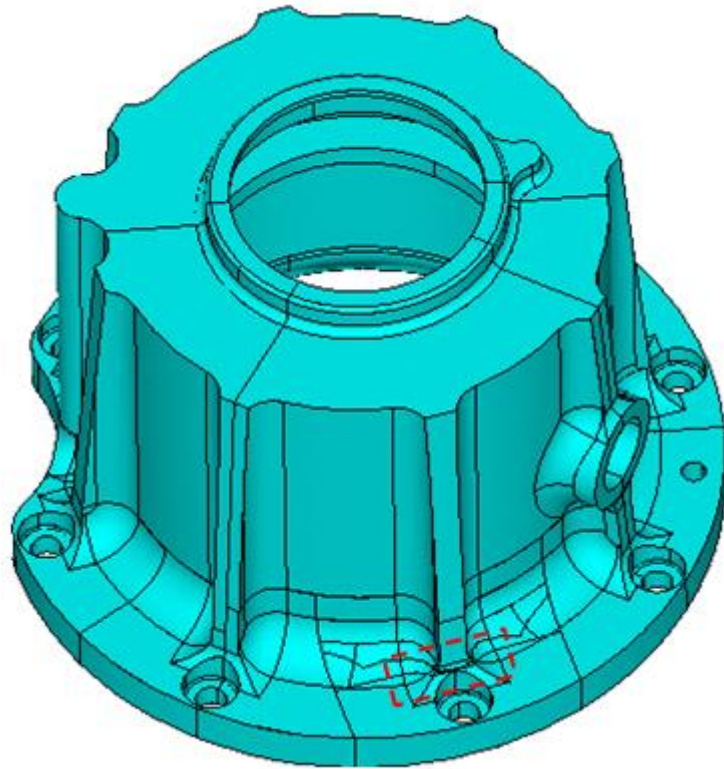


Şekil 3.1.40. Her bir çatlak adımı için GŞF'ler kullanılarak oluşturulan boyutsuz K-a eğrisi K-a eğrisindeki eşdeğer GŞF'ler ve çatlak uzunluğu bilgileri kullanılarak çatlak ilerleme ömrü tahmin edilmiştir. Şekil 3.1.41'de sayısal değerlerin olmadığı çatlak ilerleme ömür eğrisi verilmektedir.

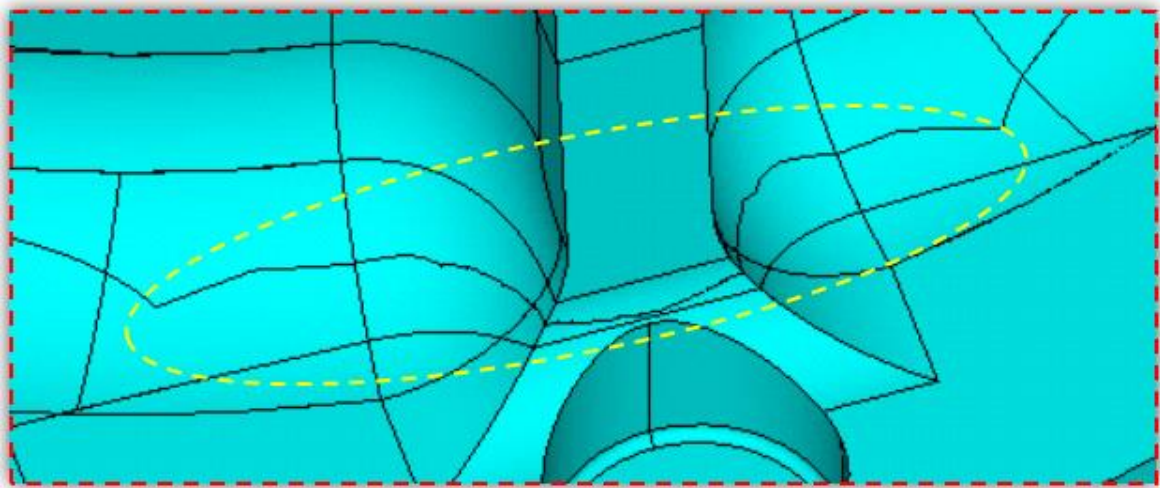


Şekil 3.1.41. Boyutsuz çatlak ilerleme ömür eğrisi.

Şekil 3.1.42'de ise çatlak ilerleme analizleri sonrası elde edilen çatlak yüzeylerinin farklı açılardan gösterimi sunulmaktadır.

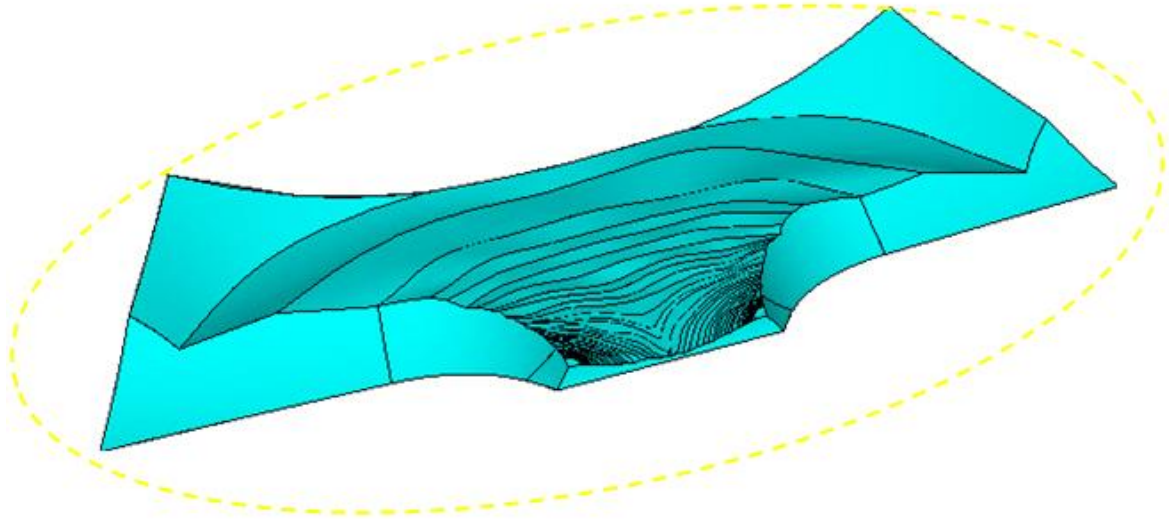


(a)



(b)





(c)

Şekil 3.1.42. Çatlak ilerleme yüzeylerinin farklı açılardan görünümü, (a) perspektif görünüşü, (b) çatlağın yakın görünüşü, (c) tahmin edilen çatlak ilerleme profillerinin alt çatlak yüzeyi üzerinde yakın görünüşü.

Yukarıda verilen sonuçlardan görüleceği üzere, FCPAS/FRAC3D analiz kabiliyetleri, karmaşık sayılabilecek bir geometriye sahip bir parçada oluşabilecek çatlağın, çoğul çatlak analizleri de dâhil olmak üzere, ilerleme analizleri için başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir.

### 3.2 Karışık Mod Kırılma Problemlerinin Üç-Boyutlu Analizi

3.1 nolu kısımda, karışık mod yükler altında düzlemsel olmayan üç-boyutlu çatlak ilerleme içeren, literatür ve saha ziyaretlerinden elde edilen altı adet probleme ait detaylı tanımlamalar, elde edilen sonuçlar ve literatür verileri ile karşılaştırmaları verilmişti. Proje önergesinde, 3.1 nolu kısımda gerçekleştirilen çalışmalar için yeterli sayıda ve/veya nitelikte uygulama bulunamaması ihtimaline karşı, B-planı olarak pratikte sıkça karşılaşılan levha veya silindir gibi temel geometrilerde karşılaşılabilecek statik çatlaklar için karışık mod üç-boyutlu kırılma analizlerinin kapsamlı bir şekilde parametrik olarak yapılması ve geniş bir gerilme şiddet faktörü (GŞF) kütüphanesi oluşturulması planlanmıştır. 3.1 nolu kısımda, proje önergesinde öngörülenden daha fazla sayıda uygulama başarı ile gerçekleştirilebilmiştir. Ancak, ilgili iş paketinin başarısını riske atmamak için, 3.1 nolu kısımda detaylı olarak sunulan yorulma çatlak ilerleme simülasyon çalışmalarının başlangıcından kısa bir zaman sonra, B-planı olarak planlanan ve yukarıda tarif edilen levhalarda karışık mod yüzey çatlakları için geniş kapsamlı kırılma analizleri de başlatılmış ve bir yüksek lisans tezi kapsamında başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Bu iş paketi kapsamında, pratikte sıklıkla karşılaşılan geometrilerde karışık mod yük altında bulunan üç boyutlu çatlaklar için, problemi tanımlayan temel parametrelerin değişim aralıkları dikkate alınarak kırılma analizlerinin yapılması ve geniş bir yelpazeyi kapsayan gerilme şiddet faktörü kütüphanesi oluşturulması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, levhalar pratikte yaygın olarak kullanılmakta olup, bazı kırılma problemleri, lokal olarak düşünülduğünde levha problemine de indirgenebilmektedir. Dolayısıyla, bu iş paketi kapsamında üniform ve eğilme gerilme dağılımı yüklemesine maruz levhalardaki eğik (inclined - düzlem dışı eksen etrafında dönmüş) ve dönmüş (deflected-düzlem içi yatay eksen etrafında dönmüş) yüzey çatlakları için tüm parametrelerin kombinasyonları göz önünde bulundurularak kırılma analizleri yapılmış ve problemi tanımlayan ilgili parametrelerin oldukça geniş kombinasyonlarını kapsayan durumlar için karışık mod gerilme şiddet faktörleri elde edilmiştir. Bu iş paketi kapsamında dört ayrı problem parametrik olarak analiz edilmiş ve aşağıdaki alt bölümlerde sunulmaktadır.

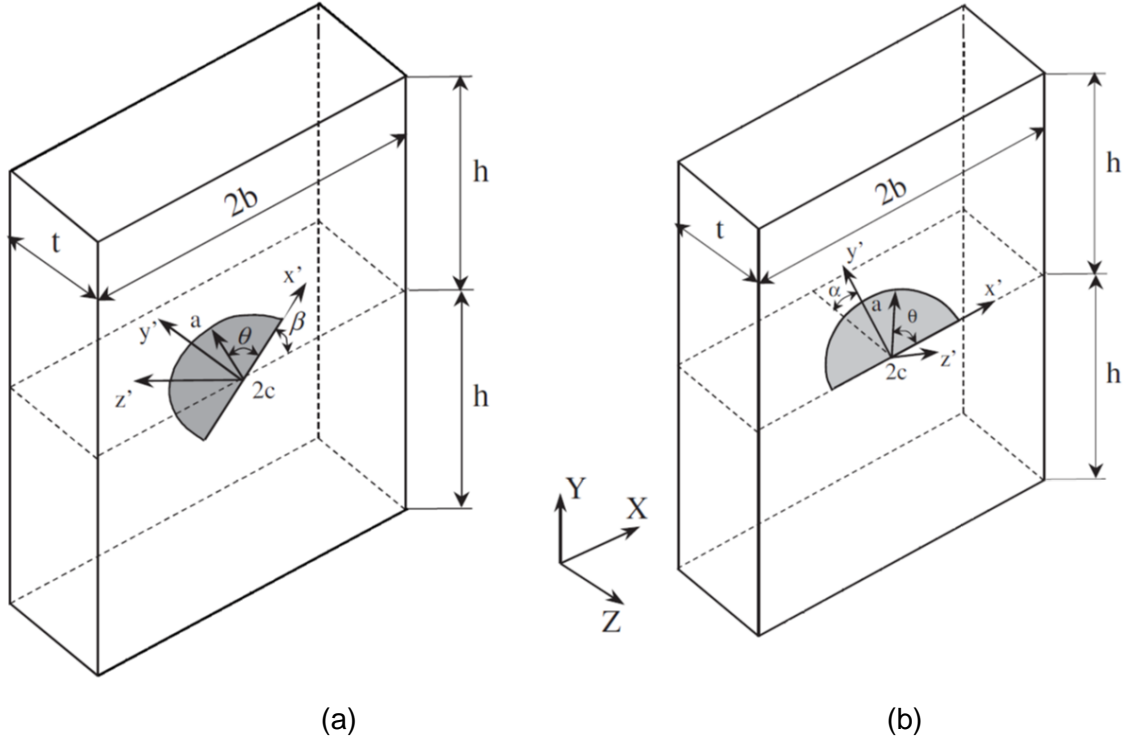
3.2.1. Üniform Çekme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Eğik Yüzey Çatlağı Analizleri

3.2.2. Üniform Çekme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Dönmüş Yüzey Çatlağı Analizleri

3.2.3. Eğilme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Eğik Yüzey Çatlağı Analizleri

3.2.4. Eğilme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Dönmüş Yüzey Çatlağı Analizleri

Belirtilen problemler kapsamında, Ayhan (2004) tarafından üniform gerilme yükü altındaki levhalarda bulunan yüzey çatlakları sadece  $a/c=1$  (yarım dairesel yüzey çatlağı) durumu için analiz edilmiştir. Ancak, yukarıdan anlaşılacağı üzere bu iş paketinde farklı yükleme durumlarına (üniform ve eğilme gerilmesi) ek olarak farklı eliptik oranlarındaki ( $a/c$ ) eğik ve dönmüş yüzey çatlakları da dâhil edilmektedir (Şekil 3.2.1).



Şekil 3.2.1. Levhaya yerleştirilen eliptik eğik yüzey çatlak (solda) ve eliptik dönmüş yüzey çatlak (sağda) ile problemi tanımlayıcı parametreler (Ayhan, 2004)

Problemlerin analizlerinde kullanılan parametrelerin değerleri ve analiz sayıları Tablo 3.2.1a ve 3.2.1b'de verilmektedir.

Tablo 3.2.1. (a) Problemleri tanımlayan parametreler, (b) Analiz sayıları

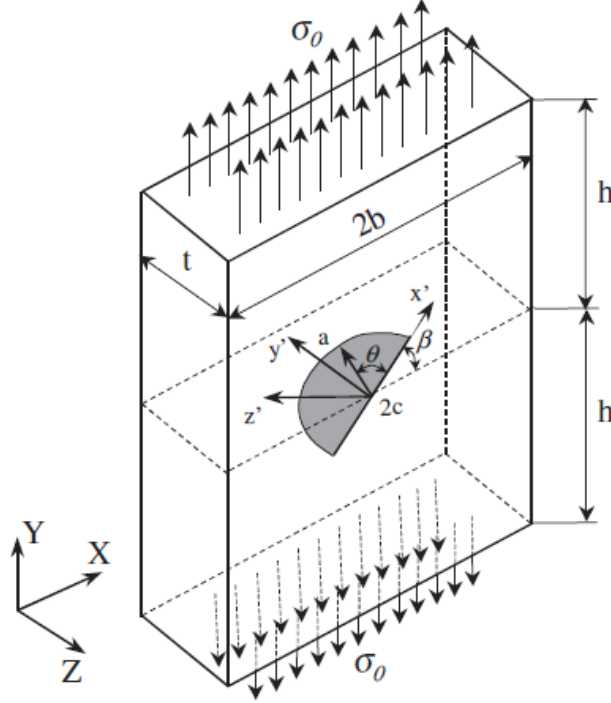
(a)

$a/c$	0,25	0,50	1.00	2.00	4.00	
$a/t$	0.20	0,40	0,60	0,80		
$\beta$	0	15	30	45	60	75
$\alpha$	0	15	30	45	60	75

(b)

Çekme Yüğü	$\beta$ için 5x4x6 = 120 adet
	$\alpha$ için 5x4x6 = 120 adet
Eğilme Yüğü	$\beta$ için 5x4x6 = 120 adet
	$\alpha$ için 5x4x6 = 120 adet
Toplam 480 adet	

### 3.2.1 Üniform Çekme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Eğik Yüzey Çatlağı Analizleri



Şekil 3.2.2. Üniform çekme gerilmesi altındaki levhada eğik yüzey çatlağı (Ayhan,2004)

Analiz edilen problem Şekil 3.2.2'de verilmektedir. Çatlak ucunda oluşan gerilme şiddet faktörüne etki eden parametreler sırasıyla çatlak derinliği/et kalınlığı oranı ( $a/t$ ), çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı ( $a/c$ ), çatlağın yatayla yaptığı açıdır ( $\beta$ ), (Ayhan, 2004).

Çatlağın yatay eksenle yaptığı açının 0 derece olması durumunda gerilme şiddet faktörünün kayma ve yırtılma bileşenleri sıfır olup, sadece açılma modu olan mod-I gerilme şiddet faktörü oluşmaktadır. Yüzey çatlakları için mod-I çözümleri literatürde yaygın olarak bulunmaktadır. Ancak çatlak açısının sıfırdan farklı olduğu durumlarda ilgili düzlemlerde ve yönlerde farklı kayma gerilme bileşenleri de aktif olduğundan dolayı gerilme şiddet faktörünün kayma modu (mod-II) ve yırtılma modu (mod-III) da oluşmaktadır. Bu amaçla, çatlağın yatay eksenle yaptığı açı olan  $\beta = 0, 15, 30, 45, 60, 75$  derece olarak ele alınmıştır.  $\theta$  açısı ise çatlak önü (crack front) konumsal açısıdır. Şekilden de görüleceği üzere, konumsal açı da 0'dan 180 dereceye kadar değişmektedir. Burada çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı ( $a/c$ ) sırasıyla 0.25, 0.5, 1, 2, 4; çatlak derinliği/et kalınlığı ( $a/t$ ) oranları sırasıyla 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 seçilmiştir.

Analizi yapılacak olan eliptik çatlak, çatlak uzunluk veya derinliğinden hangisi daha büyük ise bu boyutun on katı yükseklik ve genişliğe sahip levhanın merkezine yerleştirilmektedir.

Levhanın merkezine yerleştirilen eliptik yüzey çatlakına eğik ve dönmüş çatlak olmak üzere toplam 480 adet analiz çözülmesi planlanmıştır. İlk olarak aksel düzgün gerilmeye maruz bir levhaya eğik konumunda eliptik yüzey çatlakı için analizler (120 adet) yapılmıştır.

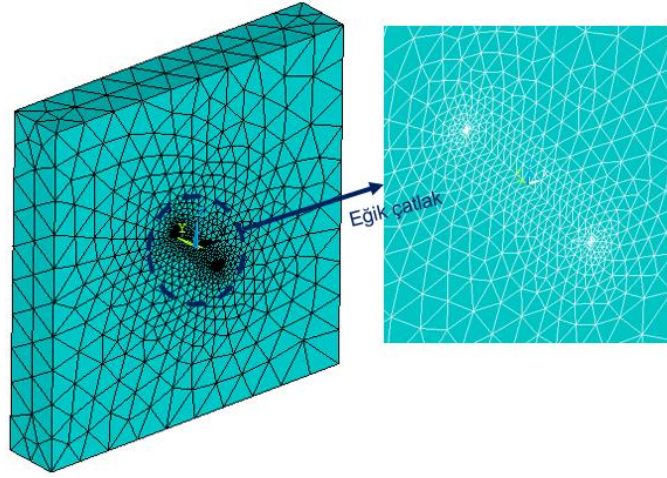
Gerilme şiddet faktörü sonuçları, normalize edilerek boyutsuz olarak verilmektedir. Yapılan analizlerde çatlak derinliği olan  $a$ , 1 birim alınmıştır. Bu sınırlama yapıldıktan sonra analizi yapılacak durum için istenen oranlara göre çatlak yüzey uzunluğu ve diğer boyutlar belirlenmiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi, levhanın yükseklik ve genişliği çatlak derinliği ya da çatlak uzunluğundan büyük olan ölçünün on katı olarak alınmaktadır. Hesaplanan ölçüler ile ilgili sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Tablo 3.2.2 de levha ve çatlak boyutlandırması ile ilgili parametre değerleri verilmektedir.

Tablo 3.2.2. Analizlerde kullanılan yüzey çatlakı ve levha boyutları

$a/c$	$a/t$	$a$	$c$	$t$	$b$	$h$
0.25	0.2	1	4	5	20	20
	0.4		4	2.5	20	20
	0.6		4	1.666667	20	20
	0.8		4	1.25	20	20
0.5	0.2		2	5	10	10
	0.4		2	2.5	10	10
	0.6		2	1.666667	10	10
	0.8		2	1.25	10	10
1	0.2		1	5	5	5
	0.4		1	2.5	5	5
	0.6		1	1.666667	5	5
	0.8		1	1.25	5	5
2	0.2		0.5	5	5	5
	0.4		0.5	2.5	5	5
	0.6		0.5	1.666667	5	5
	0.8		0.5	1.25	5	5
4	0.2	0.25	5	5	5	
	0.4	0.25	2.5	5	5	
	0.6	0.25	1.666667	5	5	
	0.8	0.25	1.25	5	5	

Tablo 3.2.2'deki veriler kullanılarak ve eğik eliptik yüzey çatlakının eğiklik açısı da dâhil edilerek, ANSYS programında ilgili sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller

içerisinden, örnek olarak  $a/c=1$ ,  $a/t=0.6$ ,  $\beta=45^\circ$  durumunu temsil eden sonlu elemanlar modeli bölüntüleme görüntüsü Şekil 3.2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.2.3. Eğik yüzey çatlaklı levha sonlu elemanlar modeli genel görüntüsü (solda), çatlak bölgesi yakın görüntüsü (sağda)

Levhanın üst ve alt kısımlarından düzgün yayılı aksenal gerilme uygulanmış olup, alt taban köşelerinden bir noktadan üç eksenle, diğer bir noktadan iki eksenle ve başka bir noktadan tek eksenle sabitlenmiştir. Böylece levha parçasının rijit cisim hareketi kısıtlanmıştır.

İlk olarak, dairesel yüzey çatlaklı için elde edilen veriler Ayhan'ın (2004) makalesi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.2.4'te levhaya yerleştirilen dairesel eğik yüzey çatlaklı için normalize edilmiş  $K_1$  değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir ( $a/c=1$ ,  $a/t=0.2$  ve  $\beta=75$  derece). Çatlak ucu boyunca sıralanan elemanların sayısı 90 olacak şekilde ağ yapıları örülmüştür. Grafikte sürekli çizgi ile gösterilen sonuçlar proje kapsamında gerçekleştirilen analizlerin çözümü olup, kesikli çizgi ile verilen sonuçlar ise Ayhan (2004) çalışmasından alınan verilerdir. FRAC3D sonuçları ile makaleden okunan verilerin grafiklerinin çizdirilmesi sonucu, grafiklerin birbirine yakın çıktığı görülmektedir.

Şekil 3.2.4'ten görüleceği üzere, karşılaştırma işleminde çatlak ucundaki elemanların çatlak ucuna dik yöndeki düzlemlerdeki kenar uzunluğu boyut değerleri için farklı değerler kullanılarak bölüntülenme hassasiyet çalışması da yapılmıştır. Bu bölüntülenme hassasiyet çalışmasına göre, çatlak derinliğine ( $a$ ) bağlı olarak belirli oranlarda çatlak ucu elemanlarının boyutlarının çözüme etkisi araştırılmış olup, eleman boyutu açısından  $a/400$ 'ün en yakın sonucu verdiği görülmüştür. Daha küçük eleman boyutlarının da yakın sonuçlar verdiği gözlemlendiğinden dolayı, yapılan analizlerde çatlak ucundaki eleman boyut değeri  $a/400$  olarak alınmıştır. Ayrıca, bölüntülenme çalışmasında çatlakın bulunduğu çatlak ucu çizgisi boyunca farklı sayılarda

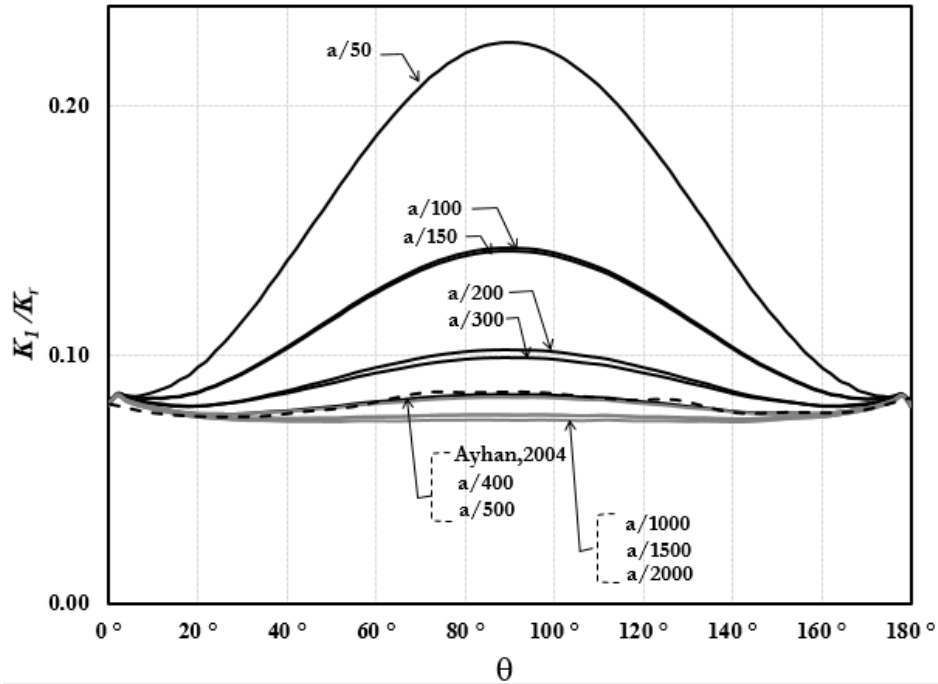
eleman kullanılarak (baz analizde 90 eleman kullanılmıştır) analizler de yapılmış olup, sonucun çok değişmediği gözlemlenmiştir.

FRAC3D kullanılarak karışık mod gerilme şiddet faktörleri hesaplandıktan sonra uygulanan gerilme yükü ve çatlak uzunluğu/derinliğine bağlı olan bir referans  $K_R$  değeri ile normalize edilmiştir.  $Q$  eliptik çatlak için şekil faktörüdür.  $K_R$  ve  $Q$  formülasyonları denklem 3.2.1-3.2.3'te verilmiştir (Newman ve Raju, 1981).

$$K_R = \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (3.2.1)$$

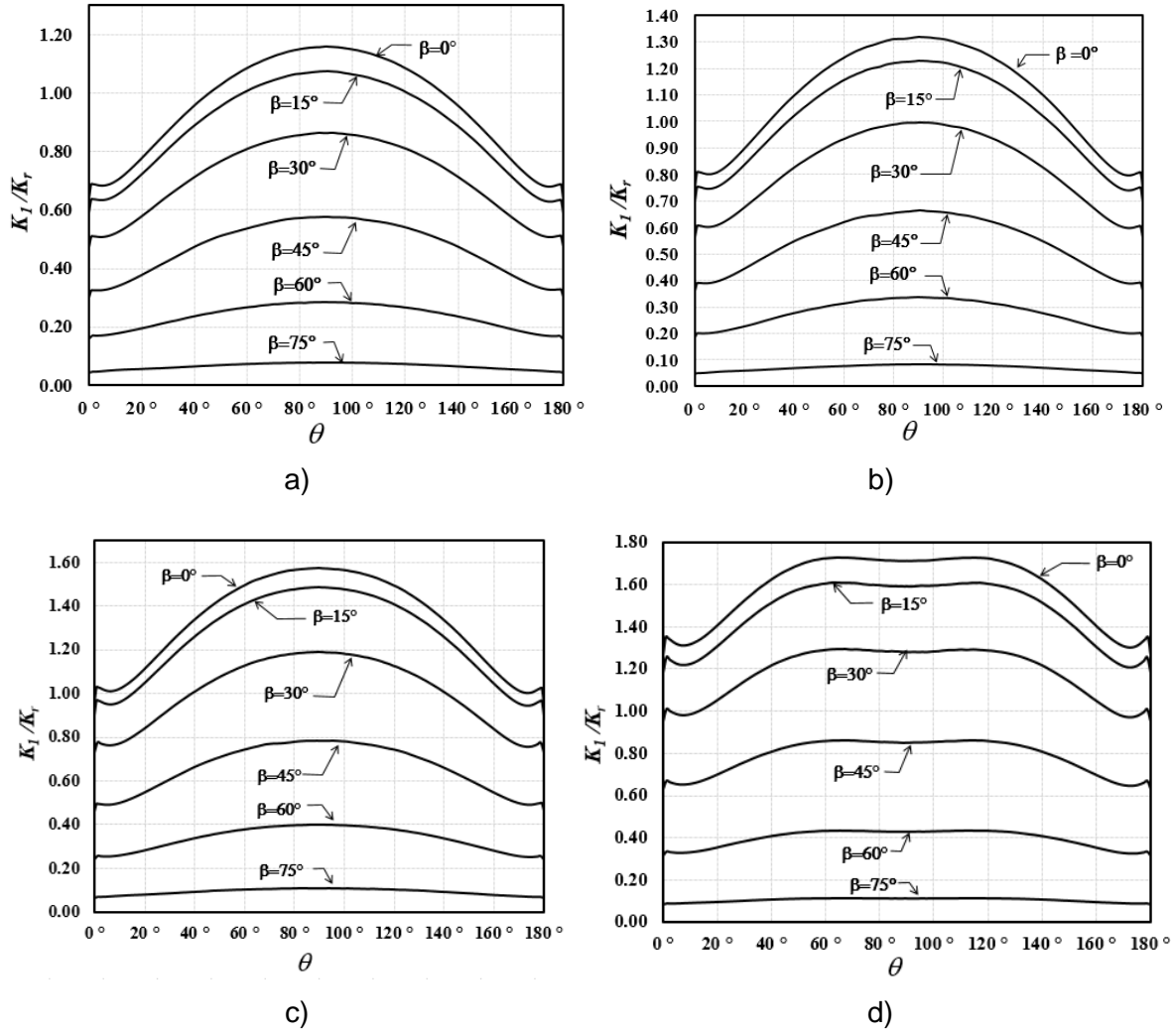
$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}; \quad \frac{a}{c} < 1 \quad (3.2.2)$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.65}; \quad \frac{a}{c} > 1 \quad (3.2.3)$$



Şekil 3.2.4: Eğik eliptik yüzey çatlakları için çatlak ucundaki eleman boyutunun farklı değerlerinde normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımı ( $a/c=1$ ,  $a/t=0.2$ ,  $\beta=75^\circ$ )

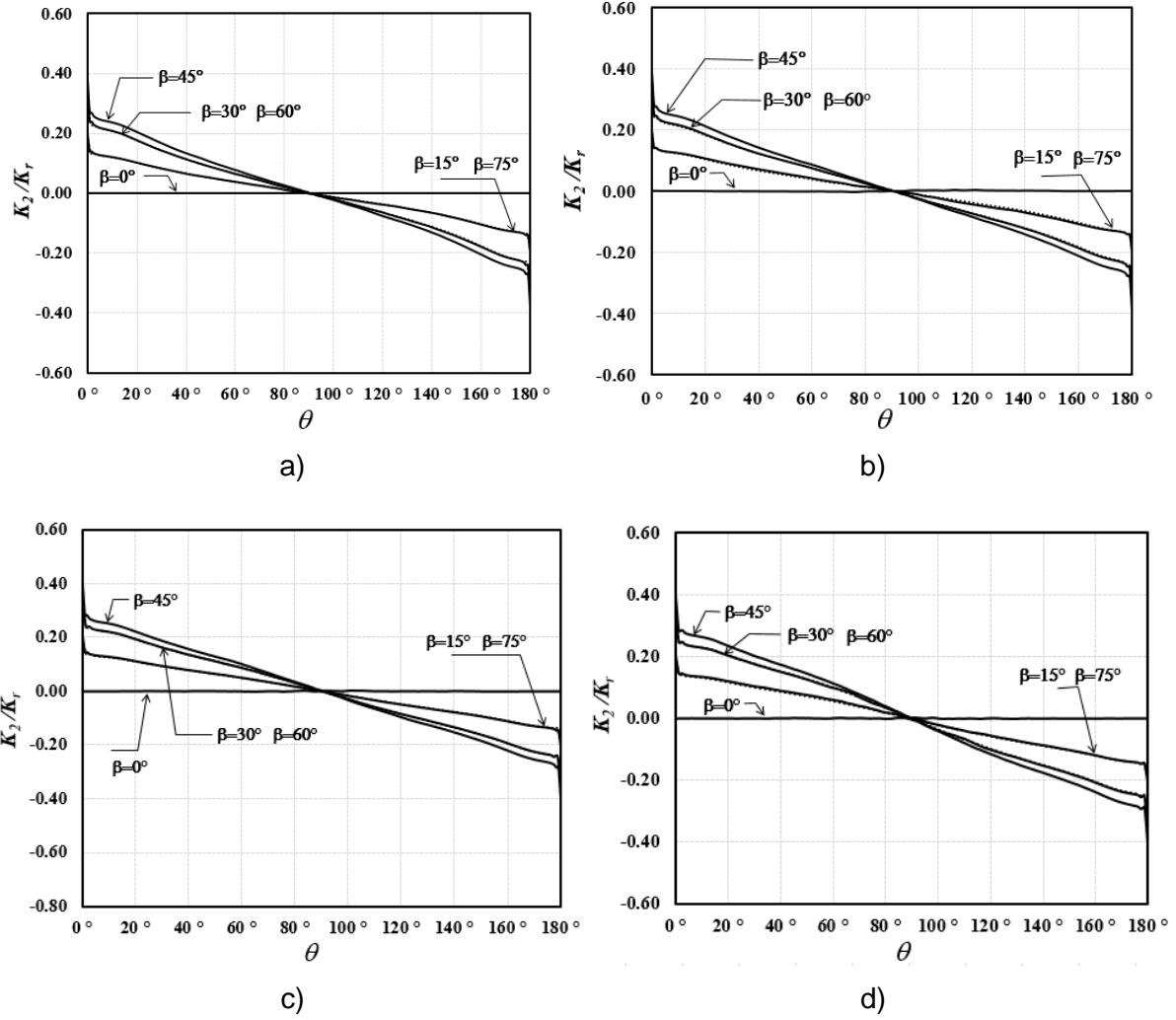
Eleman boyut duyarlılık analizinden sonra, ilgili parametrelerin tüm kombinasyonlarına göre yapılan analiz sonuçları, farklı  $a/c$  grupları halinde farklı  $a/t$  oranlarına göre aşağıda verilmektedir. Önce, çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı  $a/c=0.25$  çatlak derinliği/et kalınlığı oranı  $a/t$  sırasıyla 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 durumları için karışık mod gerilme şiddet faktörlerinin dağılımları Şekil 3.2.5-3.2.7'de verilmektedir.



Şekil 3.2.5. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

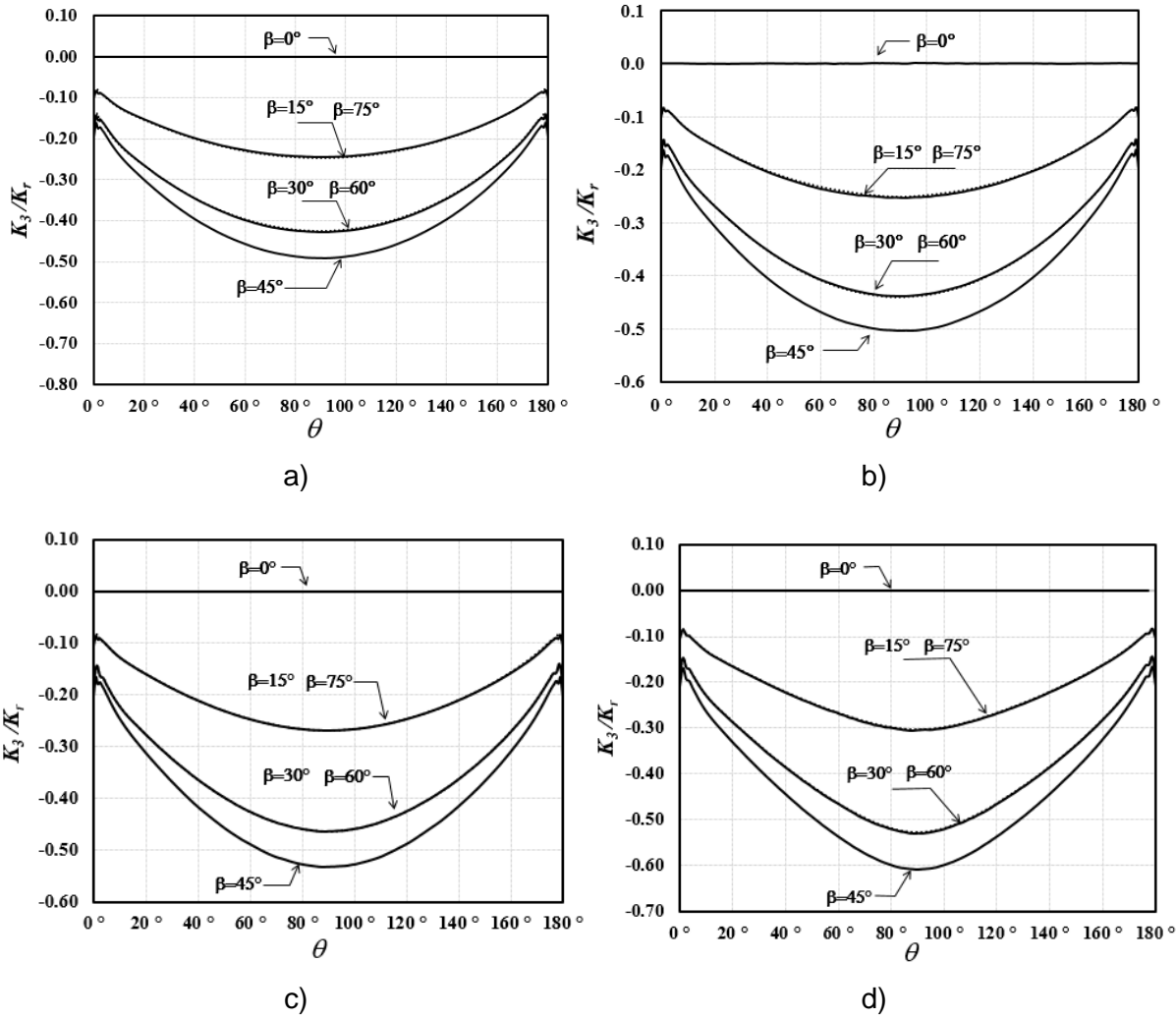
Şekil 3.2.5'te normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörleri gösterilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere,  $a/c=0.25$  için, çatlak derinliği sabit kaldığında levhanın et kalınlığı azaldıkça normalize edilmiş  $K_I$  değerleri artmaktadır. Bir başka deyişle, eğik eliptik yüzey çatlak sabit  $a/c$  değerinde  $a/t$  değerinin artması ile gerilme şiddet faktörlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, eğiklik açısı arttıkça, mod-I gerilme şiddet faktörleri de azalmaktadır.





Şekil 3.2.6. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

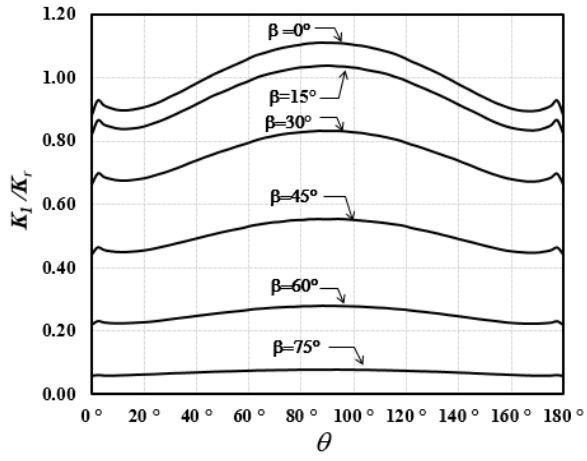
Şekil 3.2.6'da normalize edilmiş mod-II gerilme şiddet faktörü dağılımları gösterilmektedir. Mod-II için en yüksek değerlerin çatlakın yatayla yaptığı açı olan 45 derecede (maksimum kayma gerilmesinin olduğu düzlem) elde edildiği görülmektedir. Sıfır derecede normalize edilmiş  $K_2$  değeri ise 0'dır. Eksenel gerilmeye maruz bir levhada, aynı kayma gerilmesi değerlerine sahip olduklarından dolayı, birbirlerini 90 dereceye tamamlayan 15 ve 75 ile 30 ve 60 derece eğik açılı düzlemlerdeki yüzey çatlakları, beklendiği üzere aynı mod-II gerilme şiddet faktörlerini oluşturmaktadır. Normalize edilmiş  $K_2$  değerlerinde, aynı  $a/t$  değerleri için  $\theta=0^\circ-90^\circ$  ile  $90^\circ-180^\circ$  bölgeleri arasında anti-simetrik bir dağılım olduğu görülmektedir.



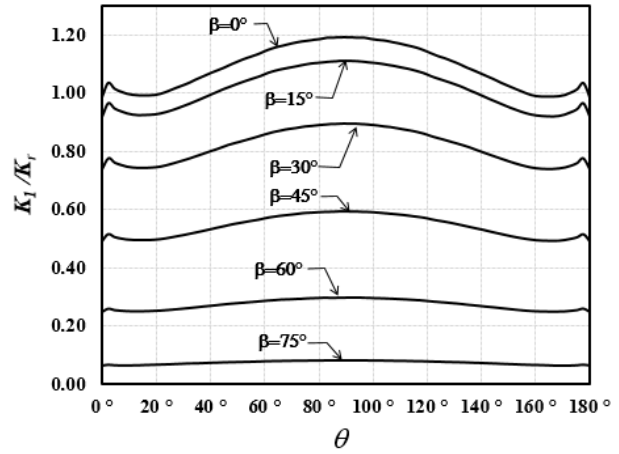
Şekil 3.2.7. Normalize edilen  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

Şekil 3.2.7’de normalize edilmiş mod-III gerilme şiddet faktörü dağılımları gösterilmektedir. Mod-II’de olduğu gibi, en yüksek değerlerin çatlakın yatayla yaptığı açı olan 45 derecede elde edildiği, birbirlerini 90 dereceye tamamlayan 15 ve 75 ile 30 ve 60 derece eğik açılı düzlemlerdeki yüzey çatlakları için aynı mod-III gerilme şiddet faktörlerinin oluştuğu görülmektedir. Normalize edilmiş  $K_3$  değerleri ise, simetrik bir dağılım göstermektedir. Ayrıca, mod-I’den farklı olarak, mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörü değerlerinin normalize edilmiş çatlak derinliği ( $a/t$ ) ile kayda değer şekilde değişmediği gözlemlenmektedir.

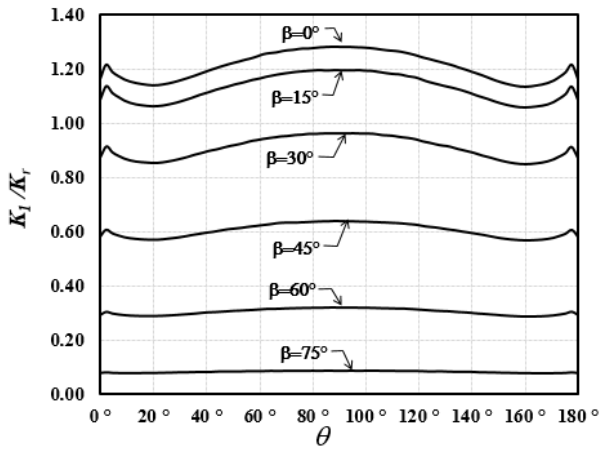
Yukarıda Şekil 3.2.5-3.2.7’de  $a/c=0.25$  ve  $a/t$ ’nin farklı değerleri için verilen normalize edilmiş mod-I, mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörü dağılımları, aynı format ve sıra ile  $a/c=0.5, 1.0, 2.0$  ve  $4.0$  için Şekil 3.2.8-3.2.19’da verilmiş olup, benzer sonuçlar bu grafiklerden çıkarılabilmektedir.



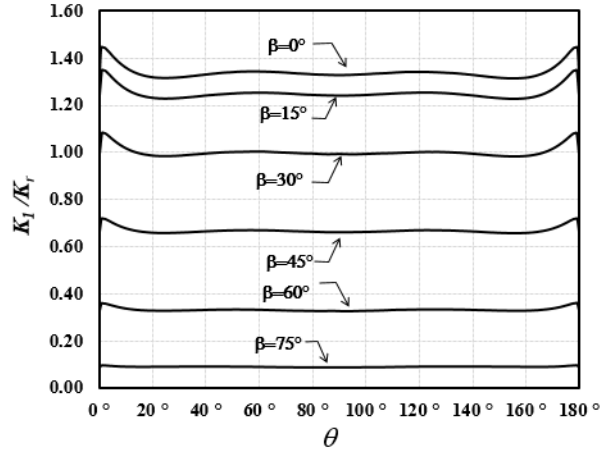
a)



b)

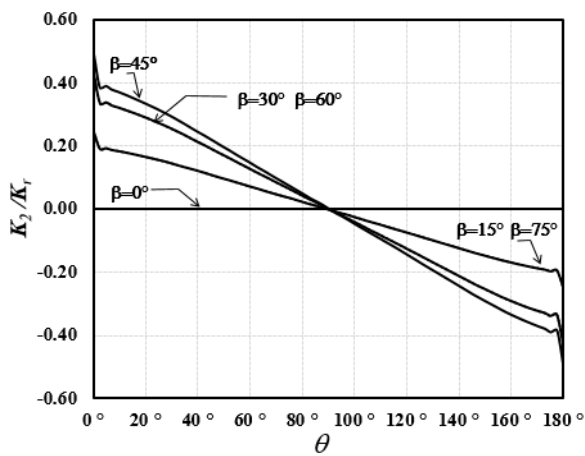


c)

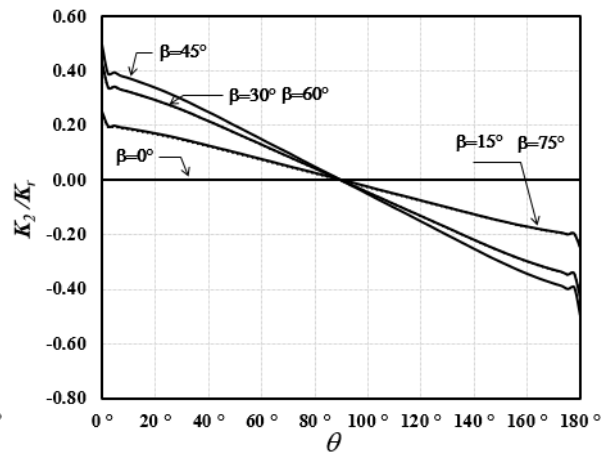


d)

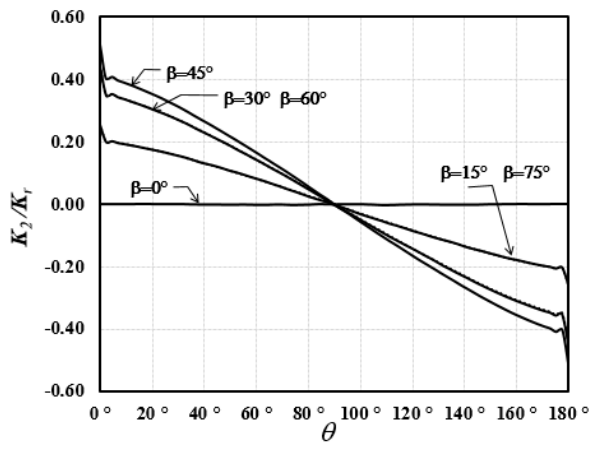
Şekil 3.2.8. Normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



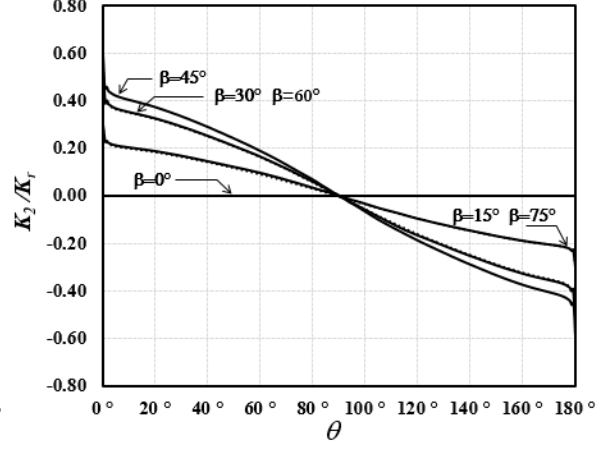
a)



b)

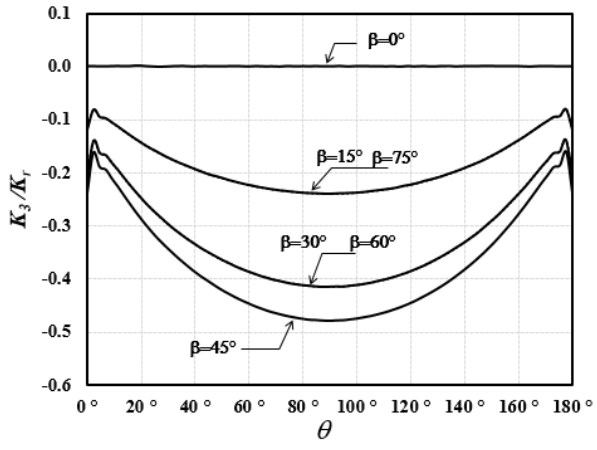


c)

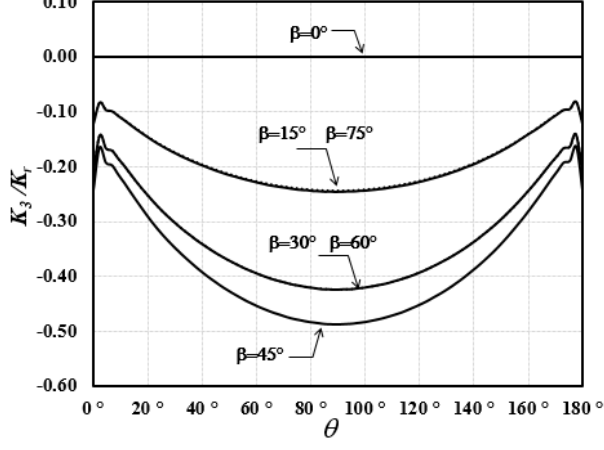


d)

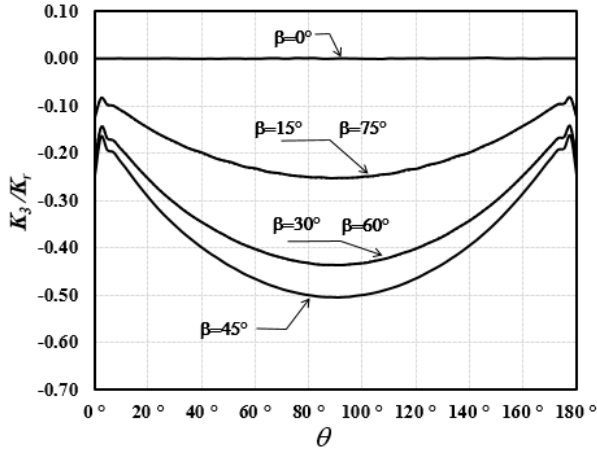
Şekil 3.2.9. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



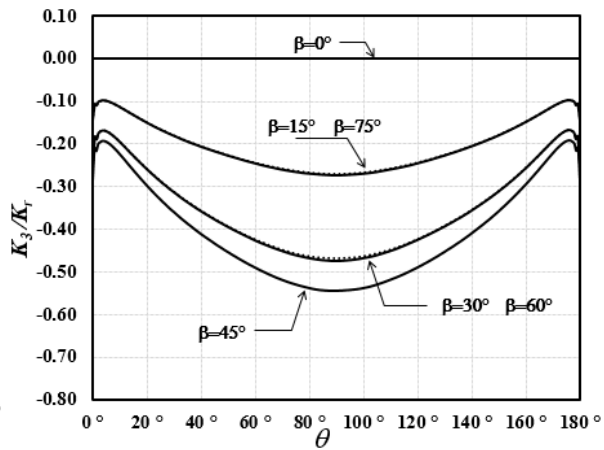
a)



b)

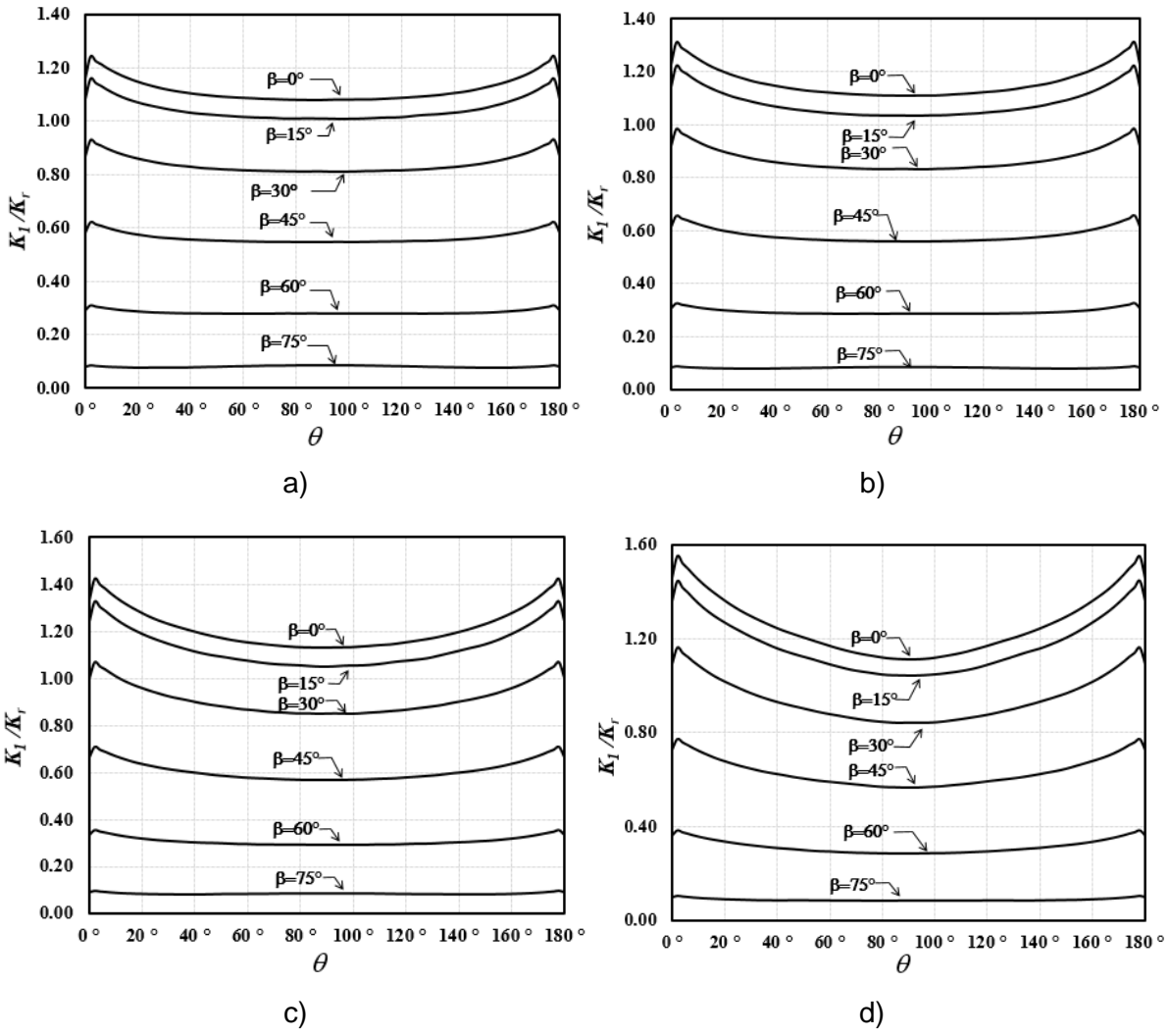


c)

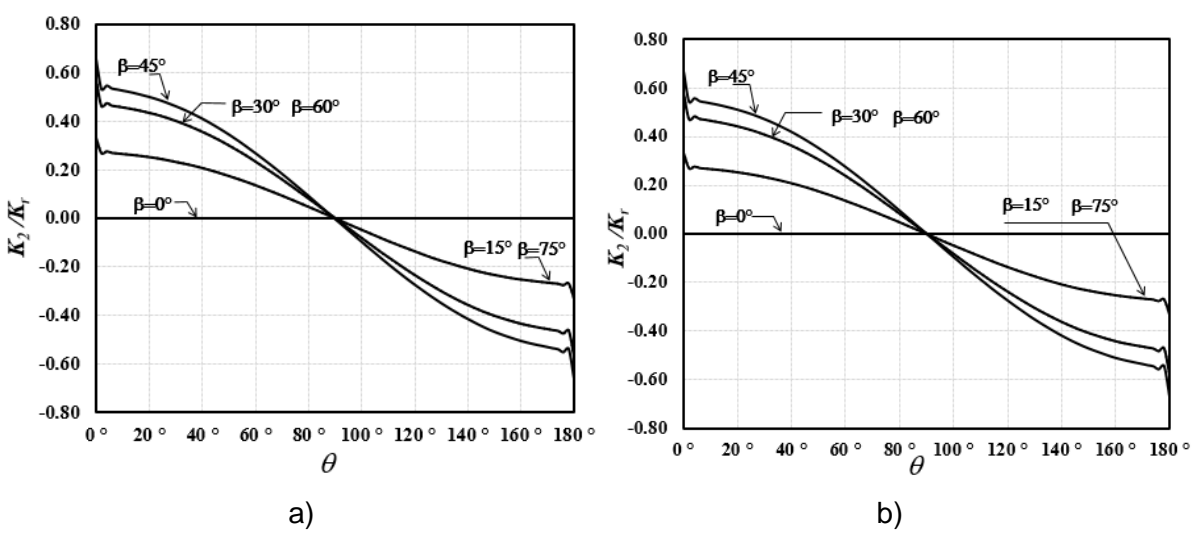


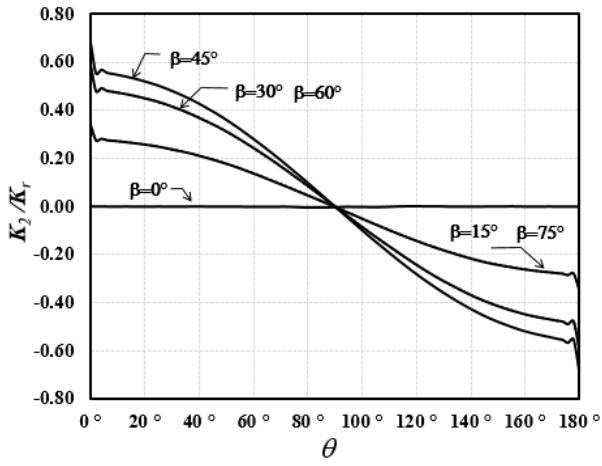
d)

Şekil 3.2.10. Normalize edilen  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

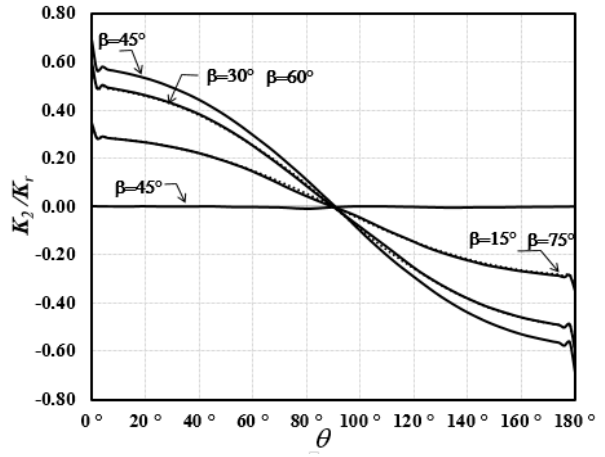


Şekil 3.2.11. Normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



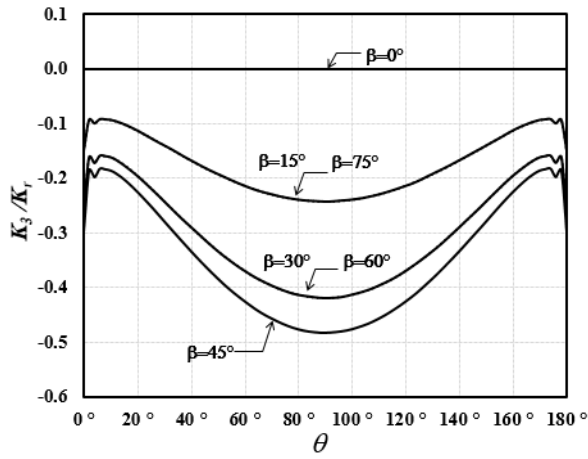


c)

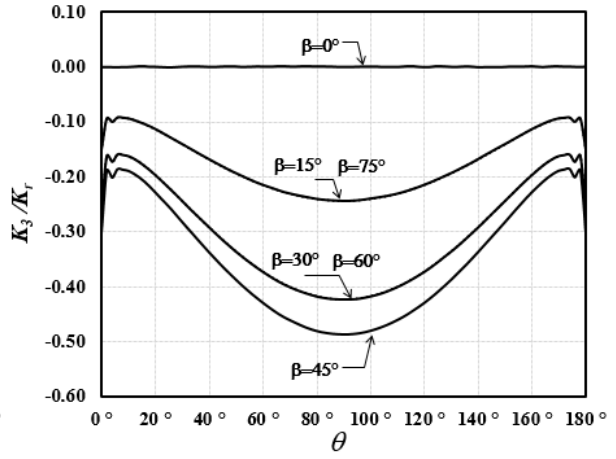


d)

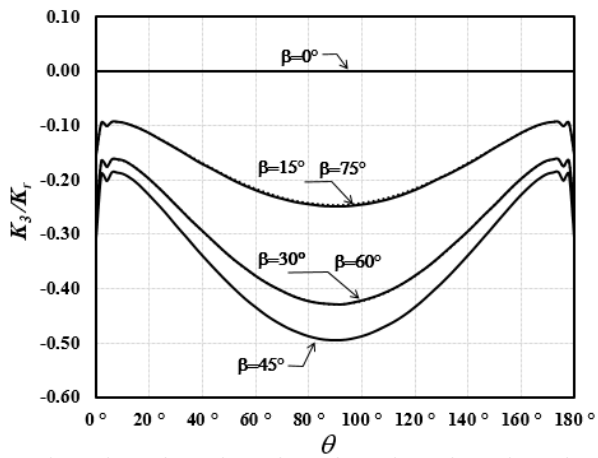
Şekil 3.2.12. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



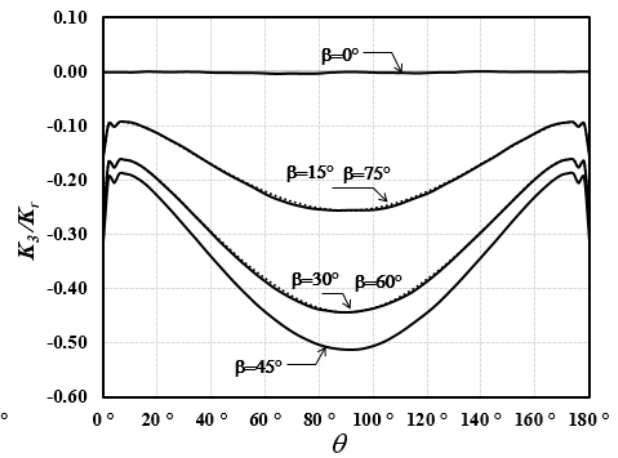
a)



b)

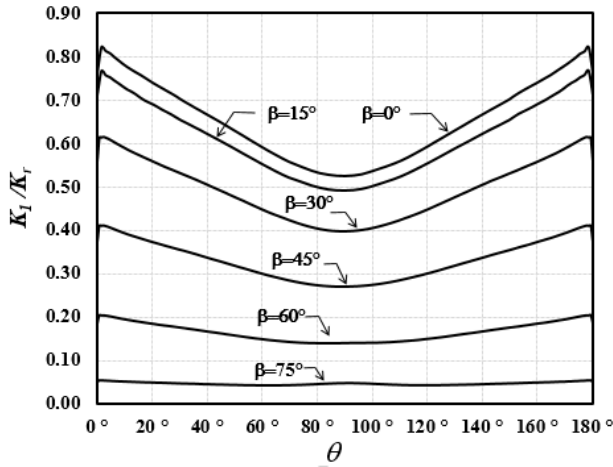


c)

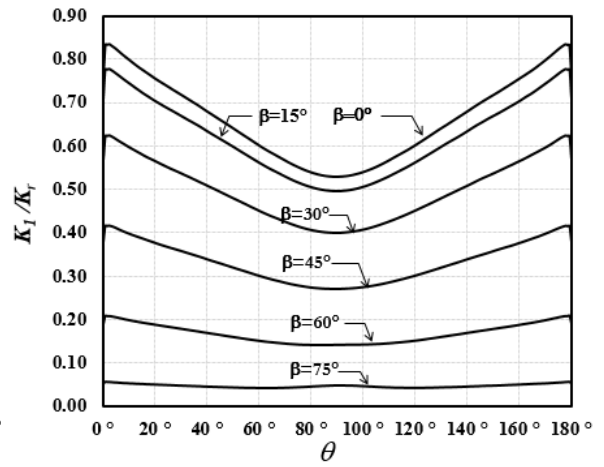


d)

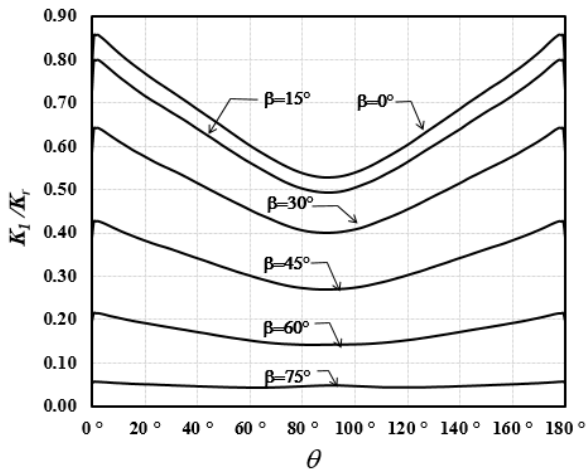
Şekil 3.2.13. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



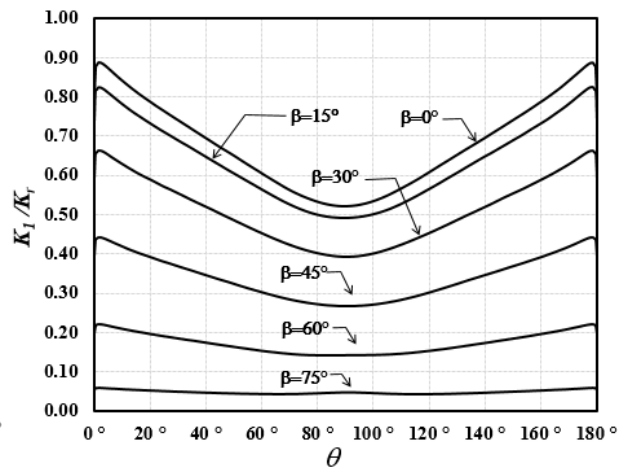
a)



b)

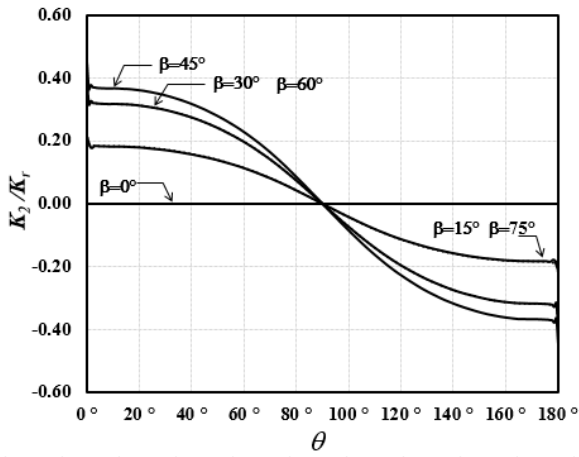


c)

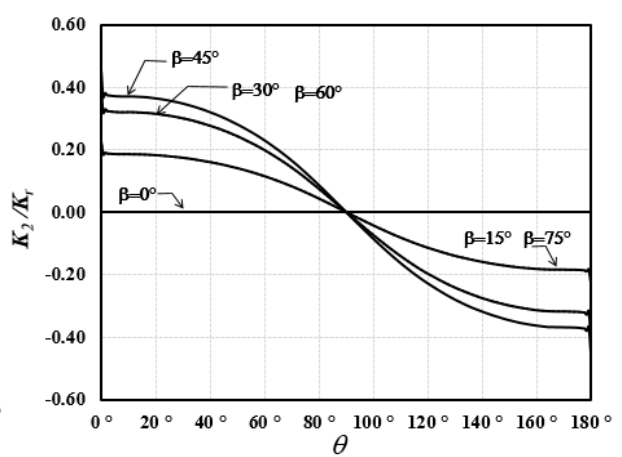


d)

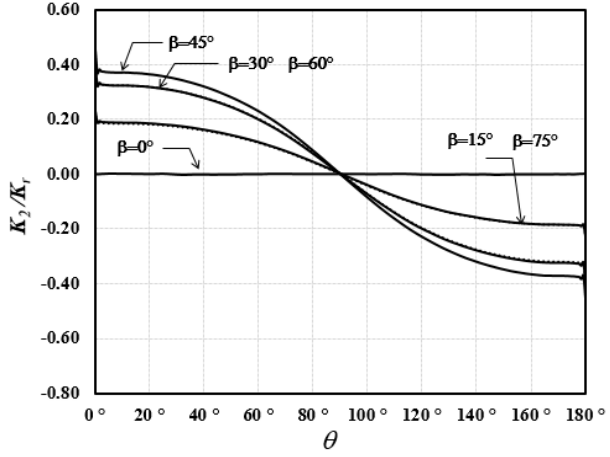
Şekil 3.2.14: Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$ .



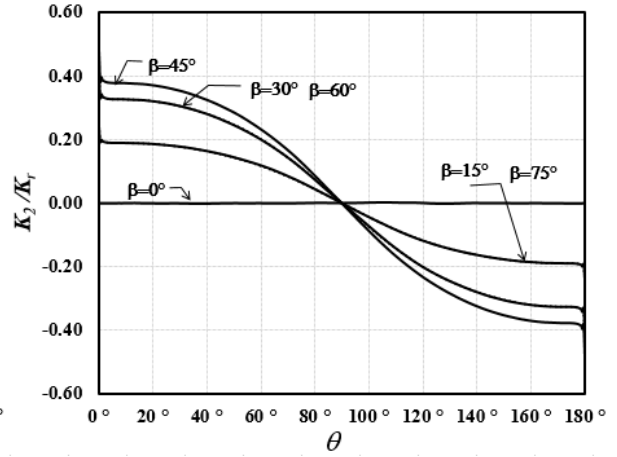
a)



b)

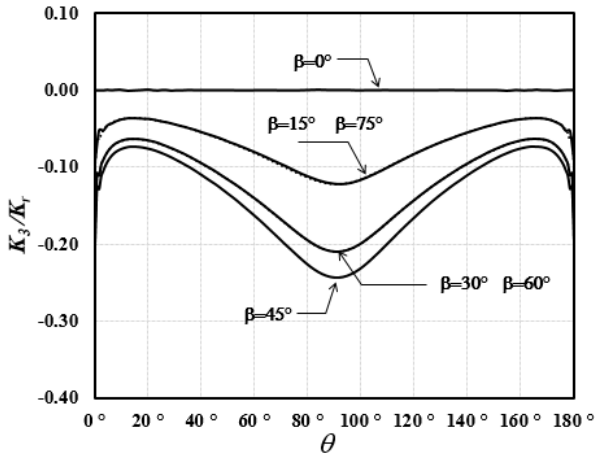


c)

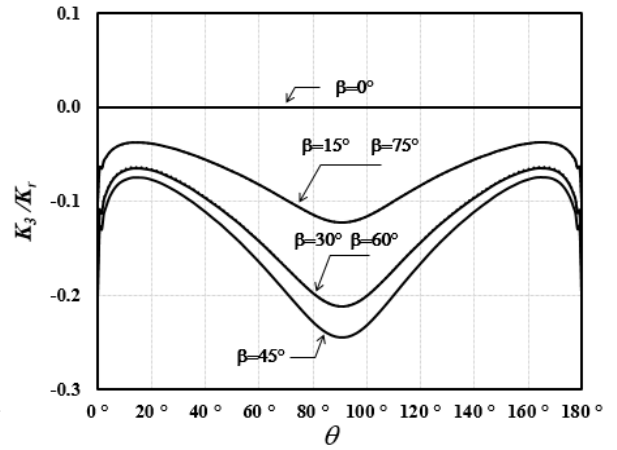


d)

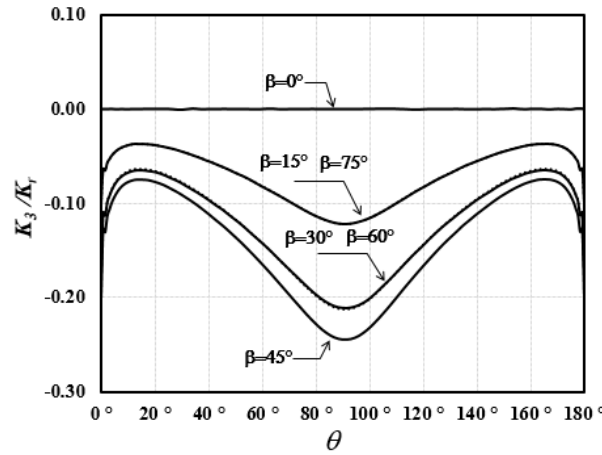
Şekil 3.2.15. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



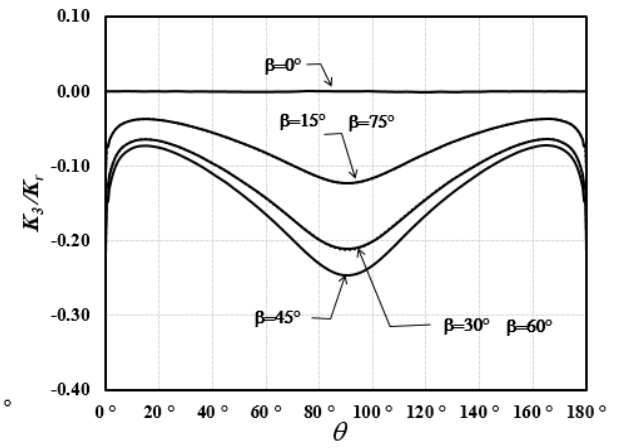
a)



b)



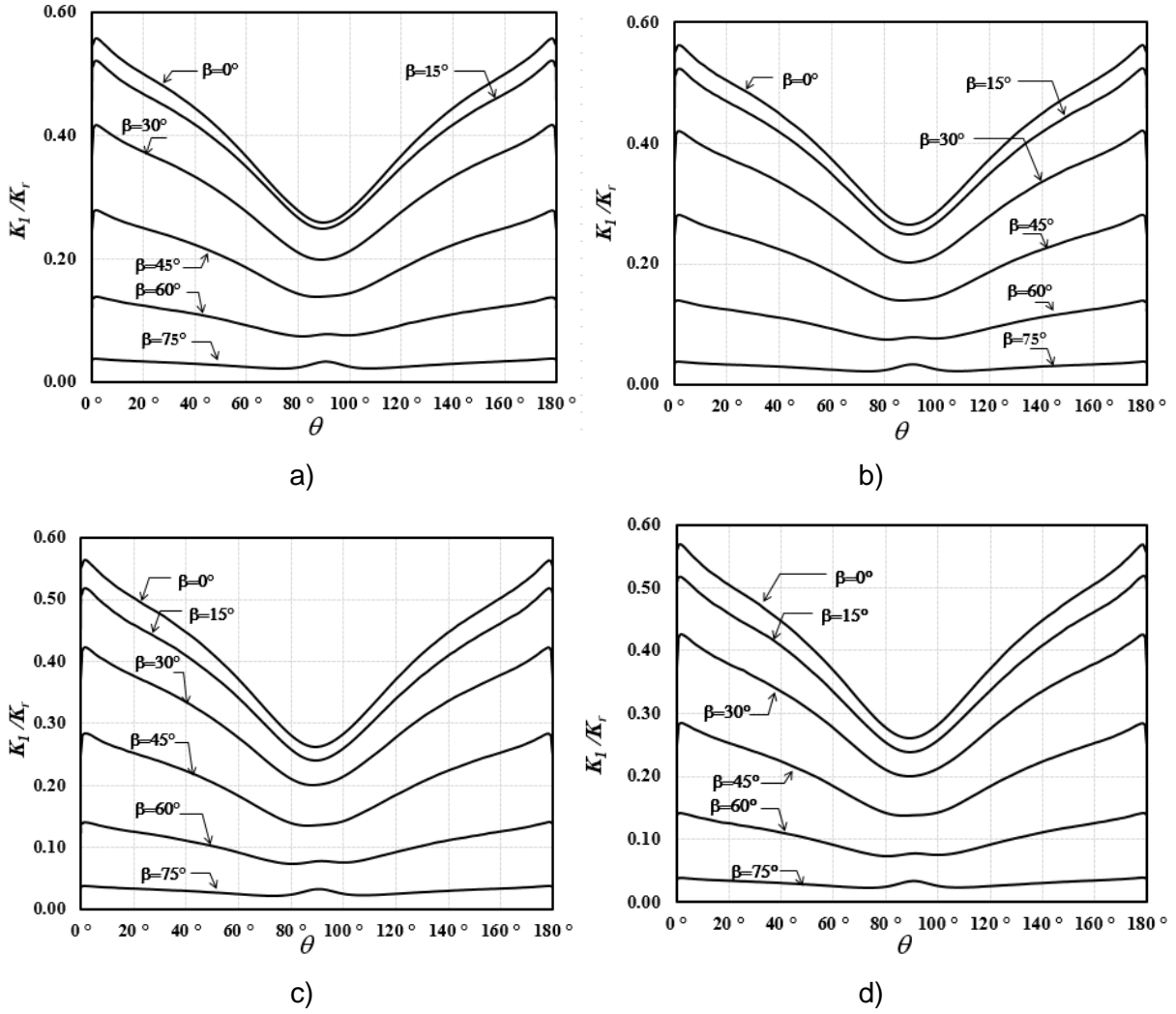
c)



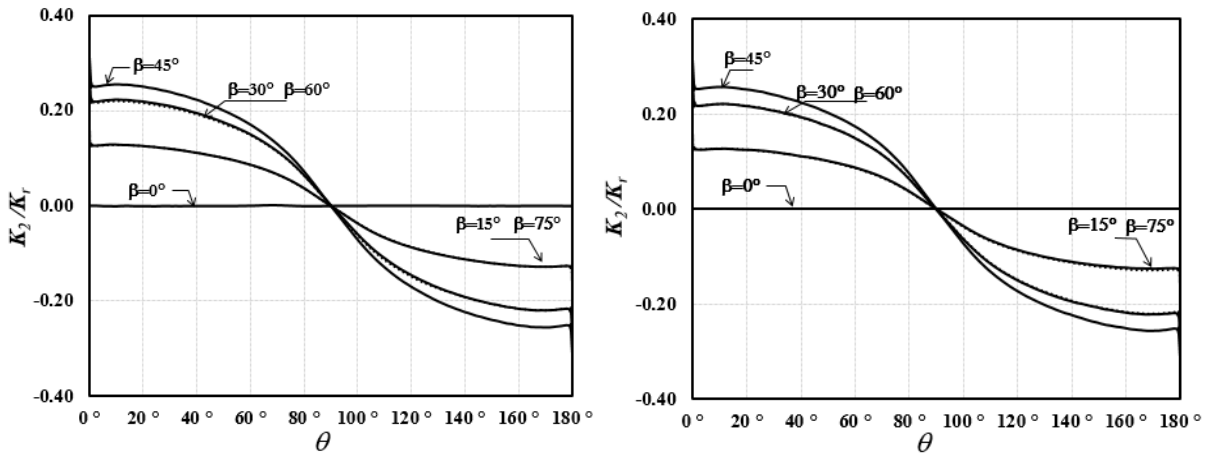
d)

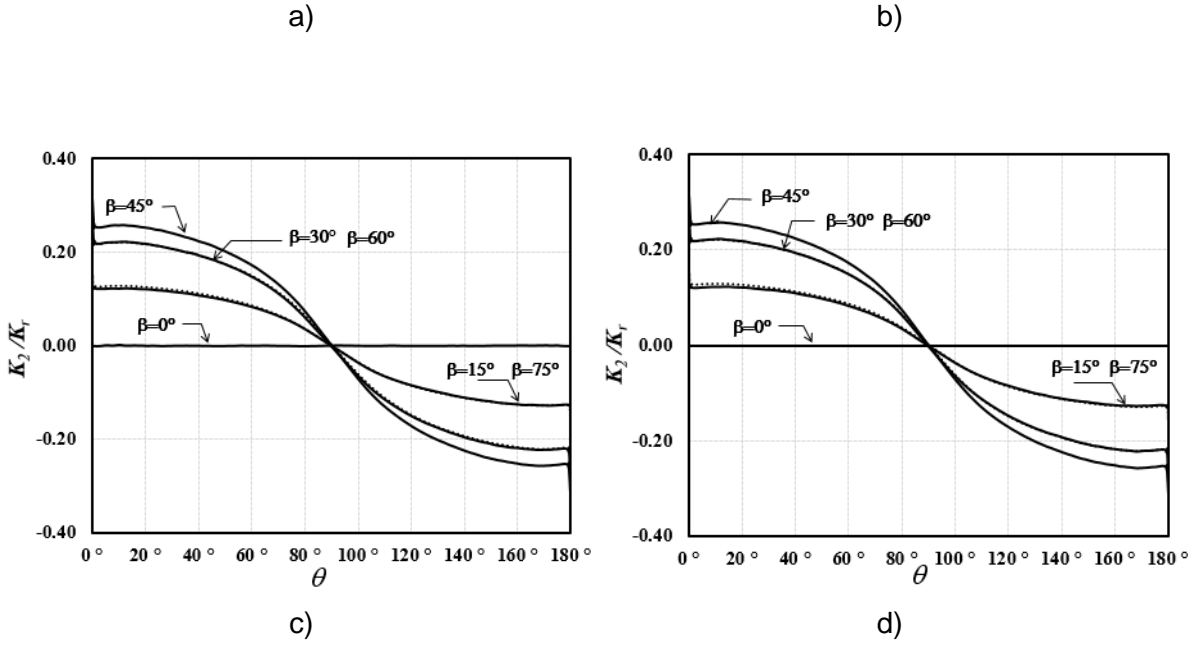
Şekil 3.2.16. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



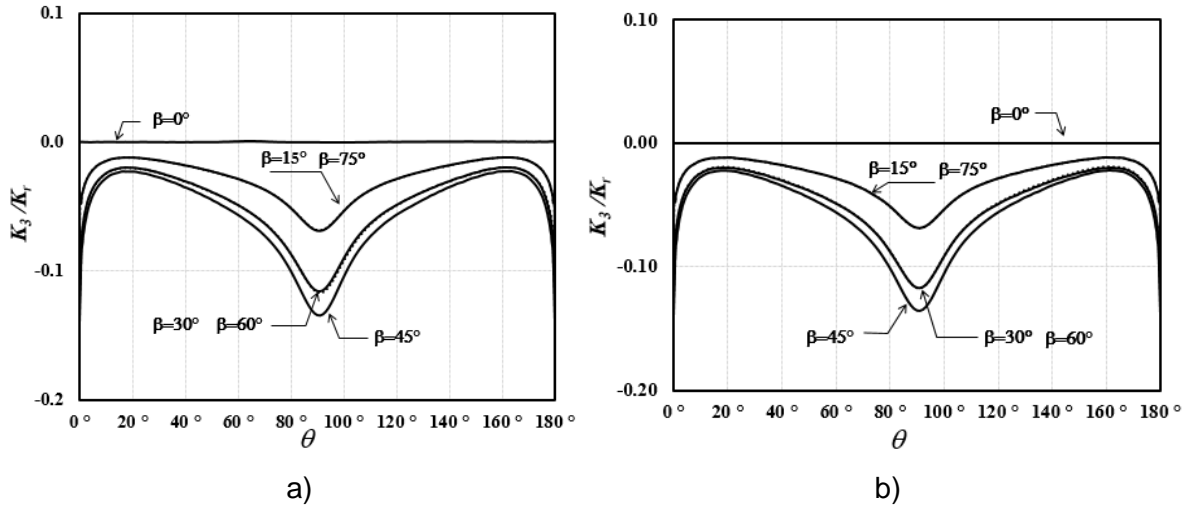


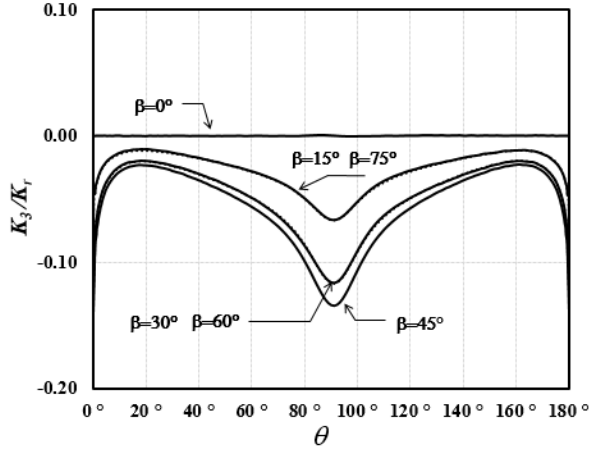
Şekil 3.2.17. Normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



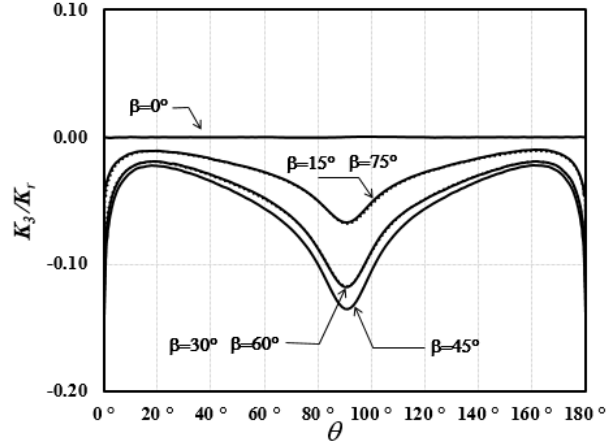


Şekil 3.2.18. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$





c)

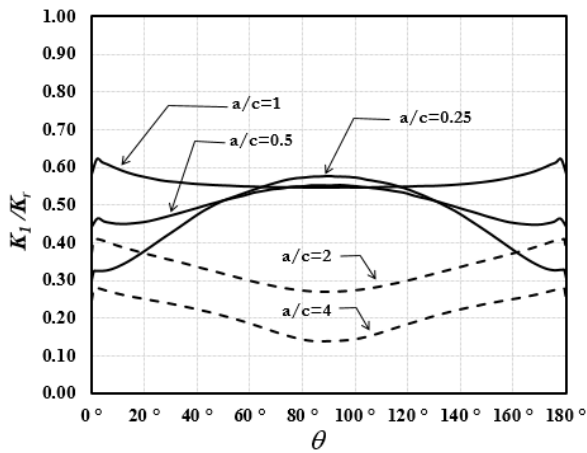


d)

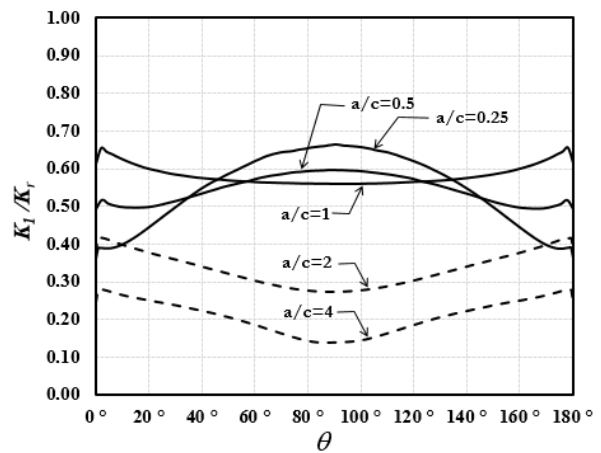
Şekil 3.2.19. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

Şekil 3.2.5-3.2.19'da verilen grafiklerin her birinde, karışık mod gerilme şiddet faktörleri farklı eğiklik açıları için verilmiştir. Diğer parametreler olan normalize edilmiş çatlak derinliği ( $a/t$ ) ve çatlak şekil oranının ( $a/c$ ) etkileri, grafikler arasında görsel olarak karşılaştırılarak anlaşılabilmele beraber, bu parametrelerin etkilerinin de müstakil grafikler ile gösterilmesi istenen bir durumdur. Bu amaçla, çatlak bölgesinde orta seviye karışık mod gerilme/yüklemeye oluşturan  $45^\circ$  eğim açılı eliptik yüzey çatlakları için hesaplanan gerilme şiddet faktörü dağılımları, her bir grafikte ayrı bir  $a/t$  oranı temsil edilerek farklı  $a/c$  oranlarında karşılaştırılmıştır (Şekil 3.2.20-3.2.22).

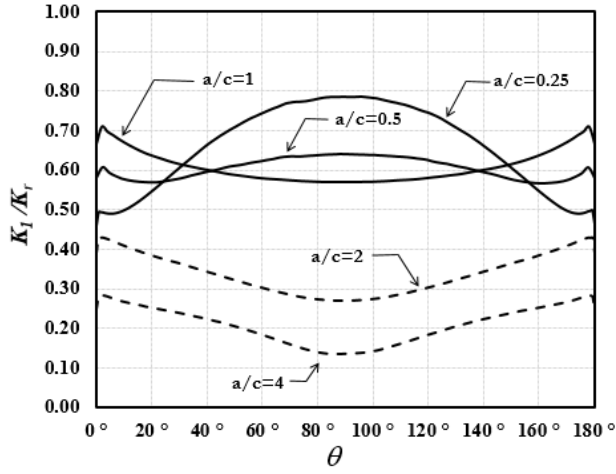
Şekil 3.2.20'den,  $a/c$  oranı arttıkça, derinlik noktası ile mukayese edildiğinde mod-I gerilme şiddet faktörünün serbest yüzeylerde daha fazla olduğu,  $a/c$  oranı azaldıkça ise çatlak derinlik noktasında arttığı ve  $a/c=0.25$  için maksimum değerini aldığı görülmektedir.



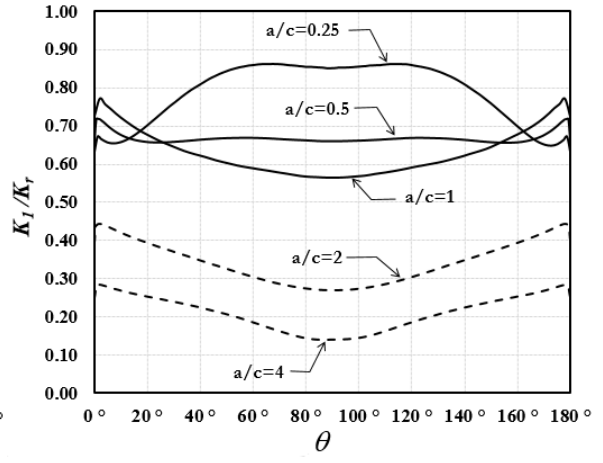
a)



b)



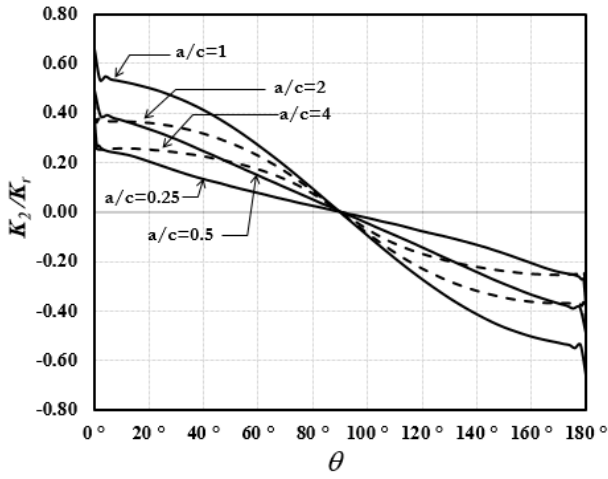
c)



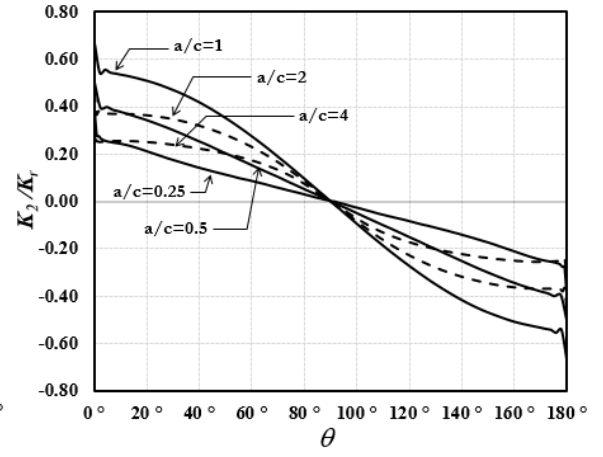
d)

Şekil 3.2.20. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

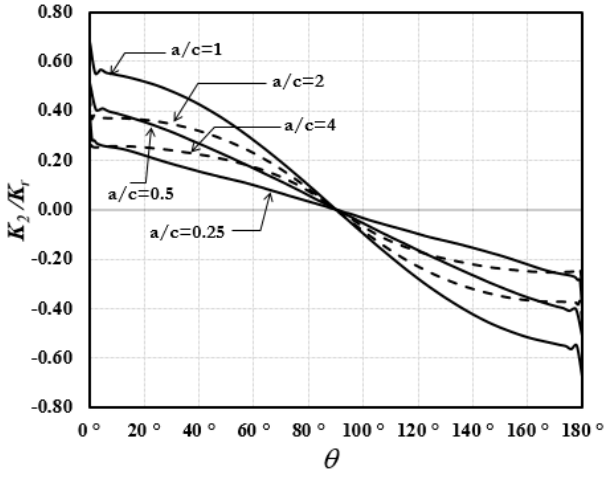
Şekil 3.2.21'den,  $a/c$  oranı 0.25'ten 1.0 değerine arttıkça, çatlak önü boyunca mod-II gerilme şiddet faktörünün arttığı,  $a/c$  oranının 2.0 ve 4.0 değerleri için ise azaldığı görülmektedir.



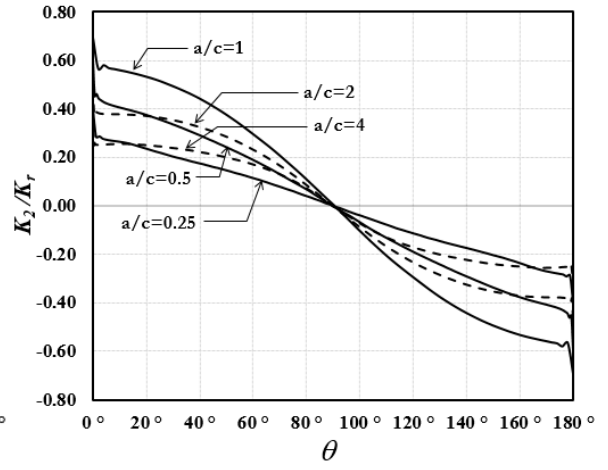
a)



b)



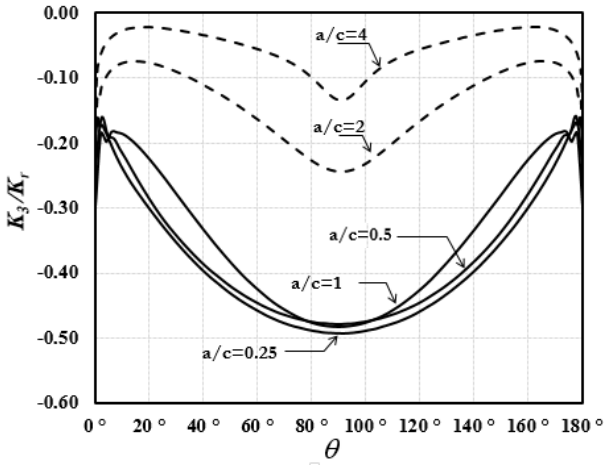
c)



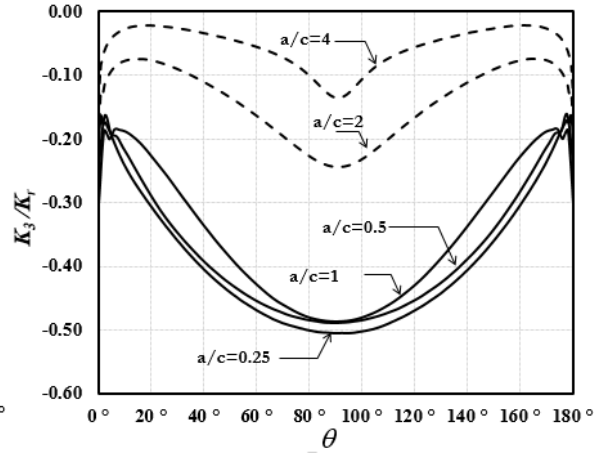
d)

Şekil 3.2.21. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

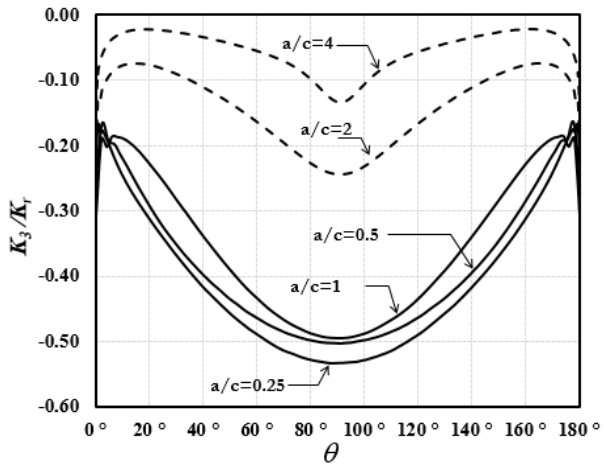
Şekil 3.2.22'den,  $a/c$  oranı azaldıkça, çatlak önü boyunca mod-III gerilme şiddet faktörü şiddetinin arttığı görülmektedir.



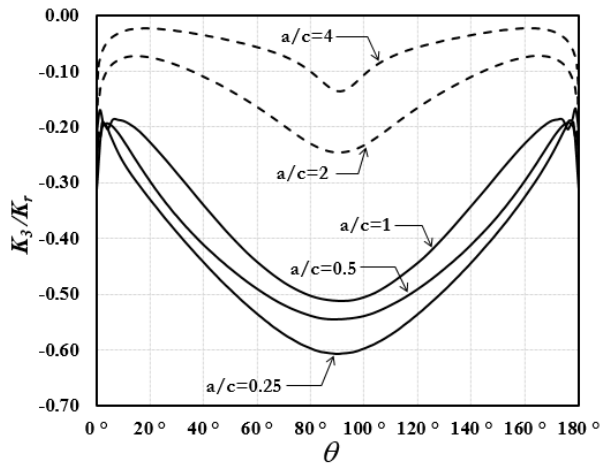
a)



b)



c)

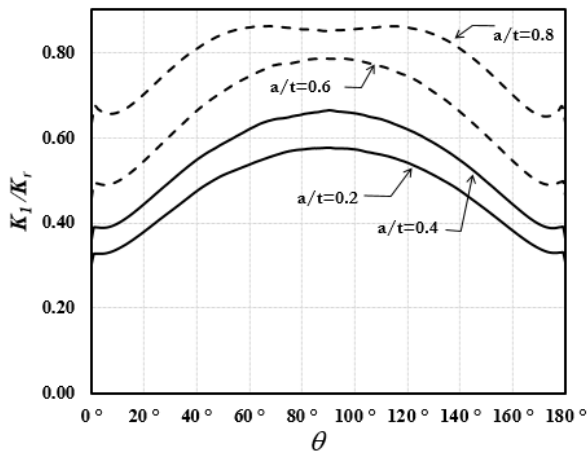


d)

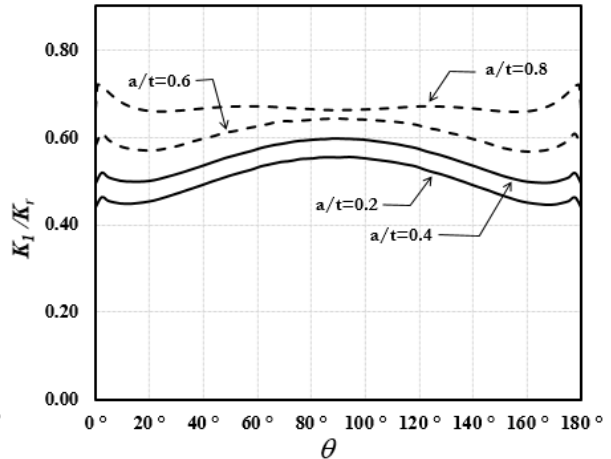
Şekil 3.2.22. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

Benzer şekilde, çatlak bölgesinde orta seviye karışık mod gerilme/yüklemeye oluşturan  $45^\circ$  eğim açılı eliptik yüzey çatlakları için hesaplanan gerilme şiddet faktörü dağılımları, her bir grafikte ayrı bir  $a/c$  oranı temsil edilerek farklı  $a/t$  oranlarında karşılaştırılmıştır (Şekil 3.2.23-3.2.25).

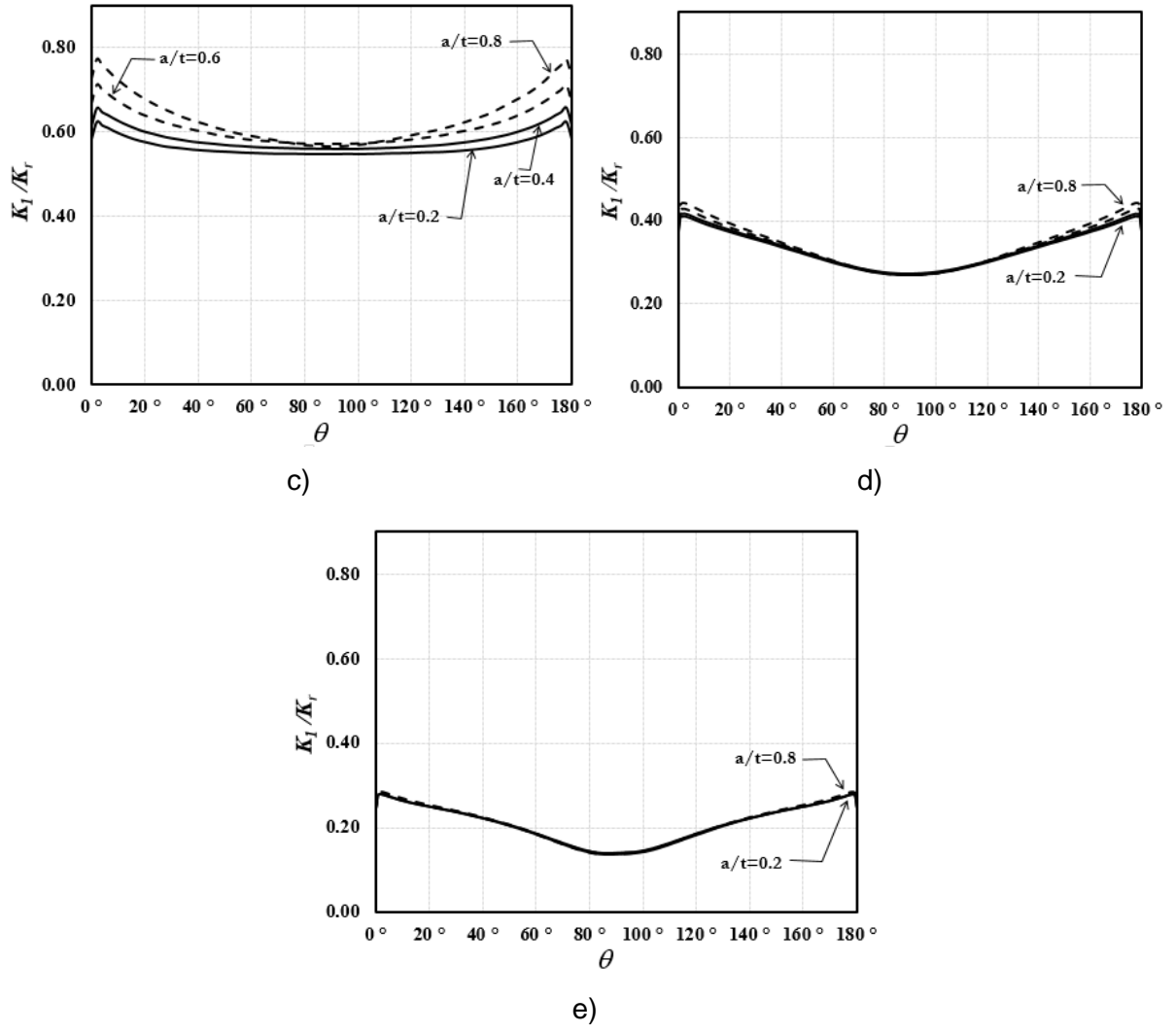
Şekil 3.2.23,  $a/c$  oranının 1.0 veya daha küçük olması durumlarında, normalize edilmiş çatlak derinliği arttıkça, bir başka deyişle çatlak derinliği sabit kalıp levha kalınlığı azaldıkça, çatlak önü boyunca mod-I gerilme şiddet faktörünün arttığı,  $a/c=2$  ve 4 için kayda değer bir değişim olmadığını göstermektedir.



a)

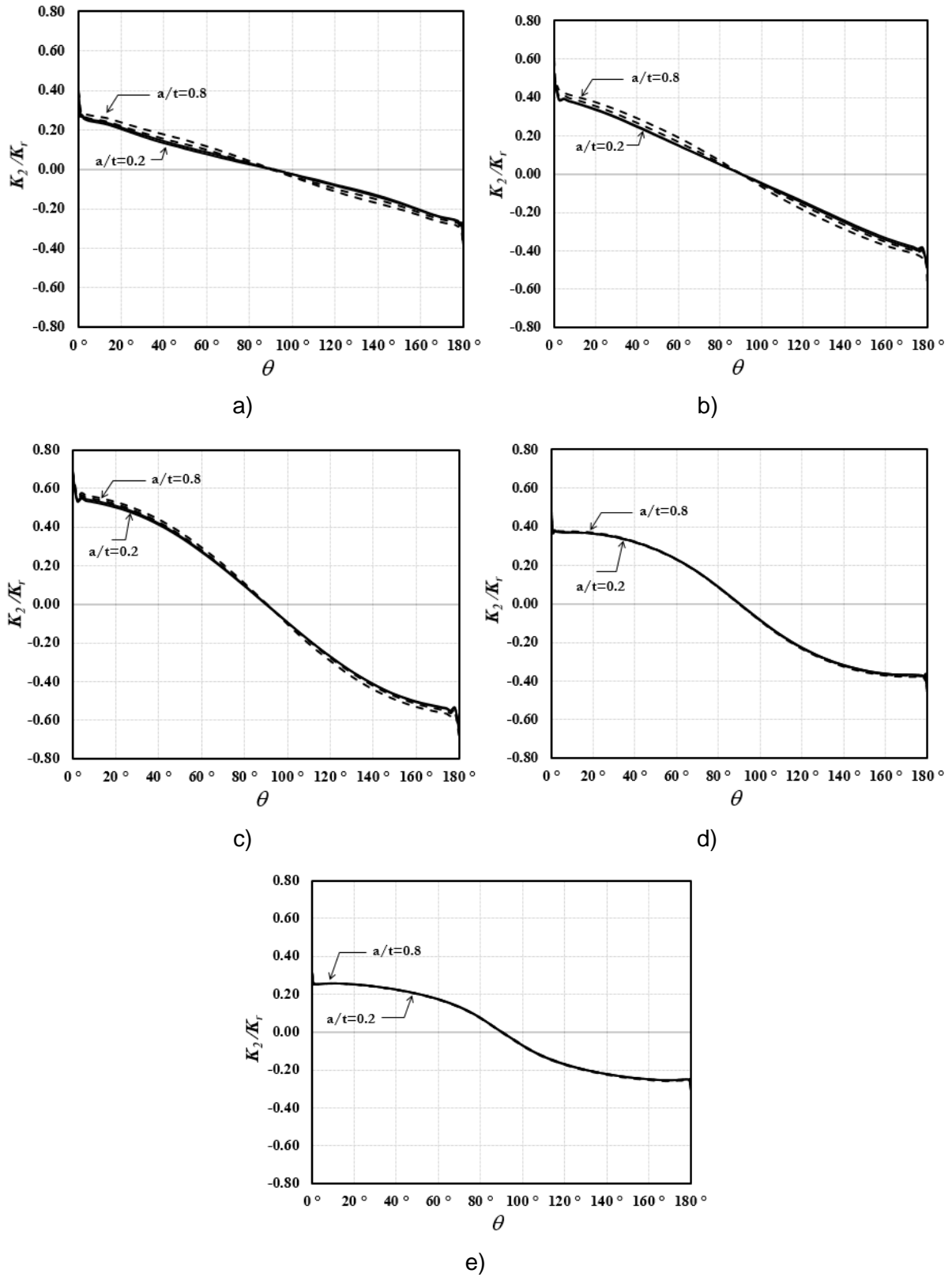


b)



Şekil 3.2.23. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$

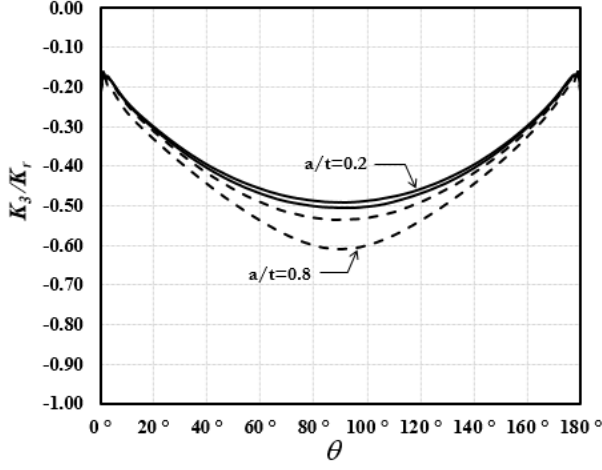
Şekil 3.2.24'ten,  $a/t$  oranı arttıkça, düşük  $a/c$  değerleri için mod-II gerilme şiddet faktörünün az miktarda arttığı, yüksek  $a/c$  değerleri için ise yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir.



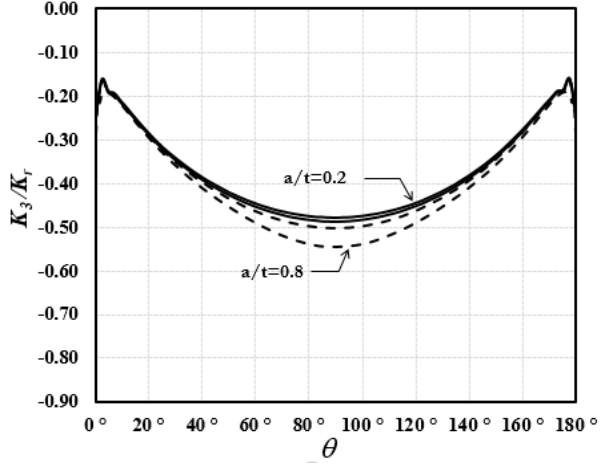
Şekil 3.2.24. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$



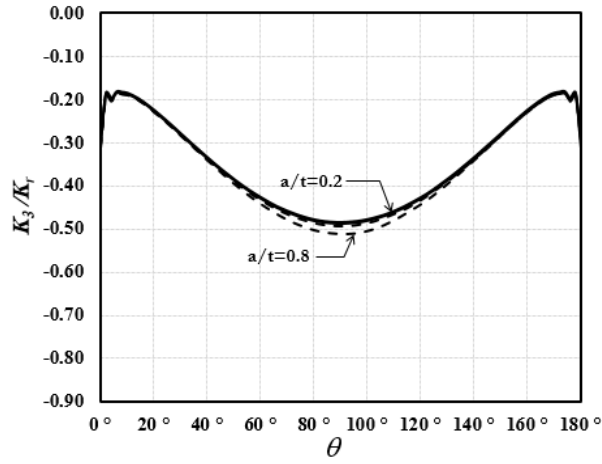
Benzer şekilde, Şekil 3.2.25'te de,  $a/t$  oranı arttıkça, düşük  $a/c$  değerleri için mod-III gerilme şiddet faktörü şiddetinin çatlak önü boyunca az miktarda arttığı, yüksek  $a/c$  değerleri için ise yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir.



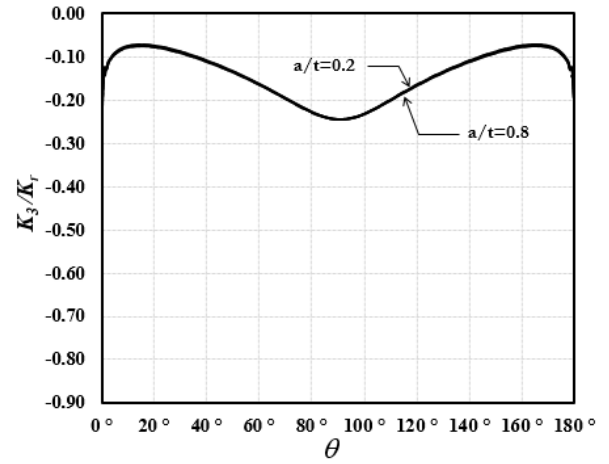
a)



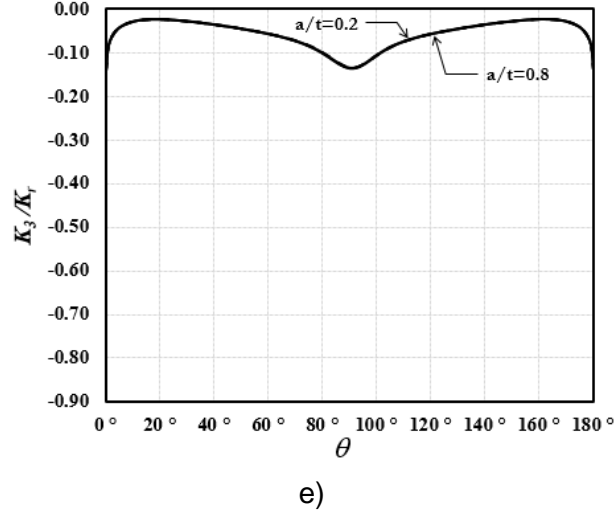
b)



c)

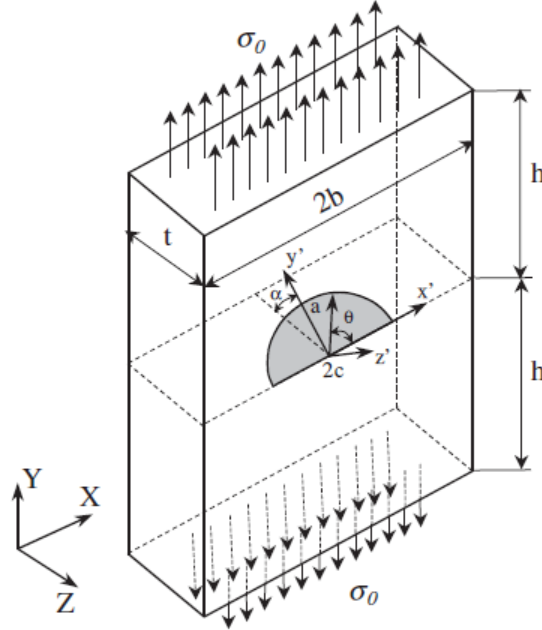


d)



Şekil 3.2.25. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$

### 3.2.2 Üniform Çekme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Dönmüş Yüzey Çatlağı Analizleri

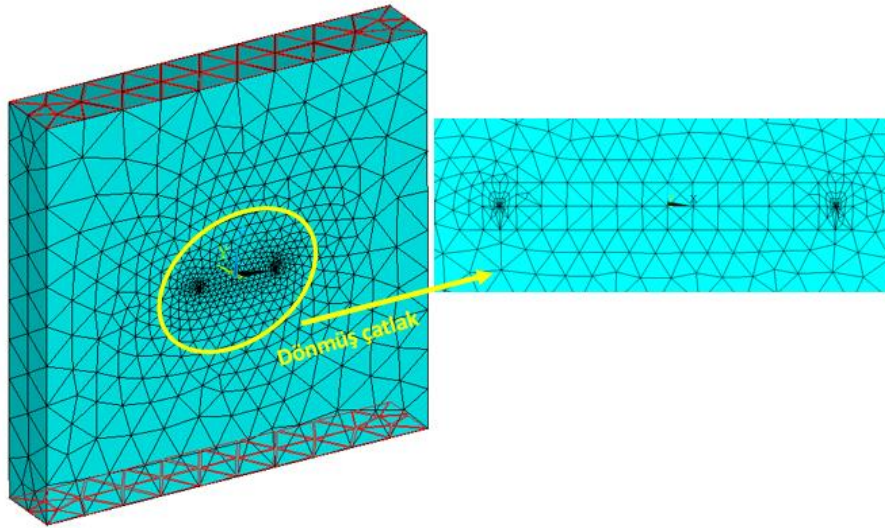


Şekil 3.2.26. Üniform çekme gerilmesi altındaki levhada dönmüş yüzey çatlağı (Ayhan,2004)

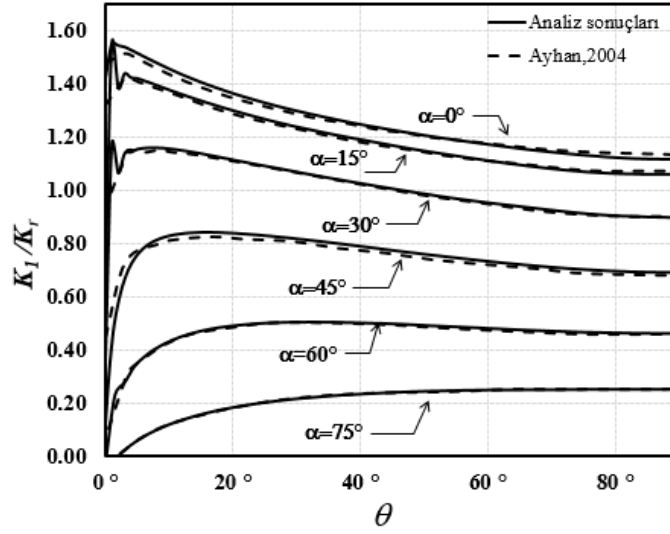
Üniform gerilmeye maruz levhada bulunan dönmüş çatlak problemi Şekil 3.2.26'da gösterilmektedir. Tablo 3.2.1 deki parametreler kullanılarak her bir durum için geçerli olan boyutlar ve açıdaki yüzey çatlağı levhaya yerleştirilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, eliptik yüzey çatlağı düzlemi ile gerilmeye dik levha kesiti arasındaki açı  $\alpha$ 'dır. Üniform çekme gerilmesi altında bulunan eğik yüzey çatlak probleminde farklı  $\beta$  açılarında yapılan analizlerde

olduğu gibi,  $\alpha$  açısı da 0, 15, 30, 45, 60, 75 derece alınarak ve diğer parametrelerin değişimi de dahil edilerek farklı analizler yapılmıştır. Şekil 3.2.26'dan görüldüğü üzere,  $\alpha$  dönme açısından dolayı çatlak düzleminde hem kayma hem de normal gerilme aktif olarak bulunmaktadır. Böylece, açılma moduna ek olarak çatlak ucunda kayma modu ve yırtılma modu da aktif hale gelmektedir.

Üniform çekme gerilmesi altındaki levhada bulunan eğik çatlak probleminde olduğu gibi ANSYS yazılımı kullanılarak ilgili sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller içerisinde, örnek olarak  $a/c=1$ ,  $a/t=0.6$ ,  $\beta=45^\circ$  durumunu temsil eden sonlu elemanlar modeli Şekil 3.2.27'de gösterilmektedir. Şekil 3.2.28'de,  $a/c=1$ ,  $a/t=0.8$  durumu için elde edilen mod-I GŞF dağılımı, Ayhan (2004) verileri ile karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere, oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Eğik çatlak probleminde olduğu gibi, rijit cisim hareketini engelleyecek şekilde levha sabitlenip, üniform çekme gerilmesi üst ve alt tabana uygulanmıştır. FRAC3D kullanılarak karışık mod gerilme şiddet faktörleri hesaplanmış ve Denklem 3.2.1-3.2.3 kullanılarak hesaplanan referans GŞF,  $K_r$  ile gerilme şiddet faktörleri normalize edilmiş ve ilgili sonuçlar Şekil 3.2.29-3.2.43 arasındaki grafikler ile verilmiştir. İlgili eğrilerin daha iyi seçilebilmesi amacıyla mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörleri  $\alpha=60$  ve  $75$  derece durumları için kesikli çizgiler ile gösterilmiştir.

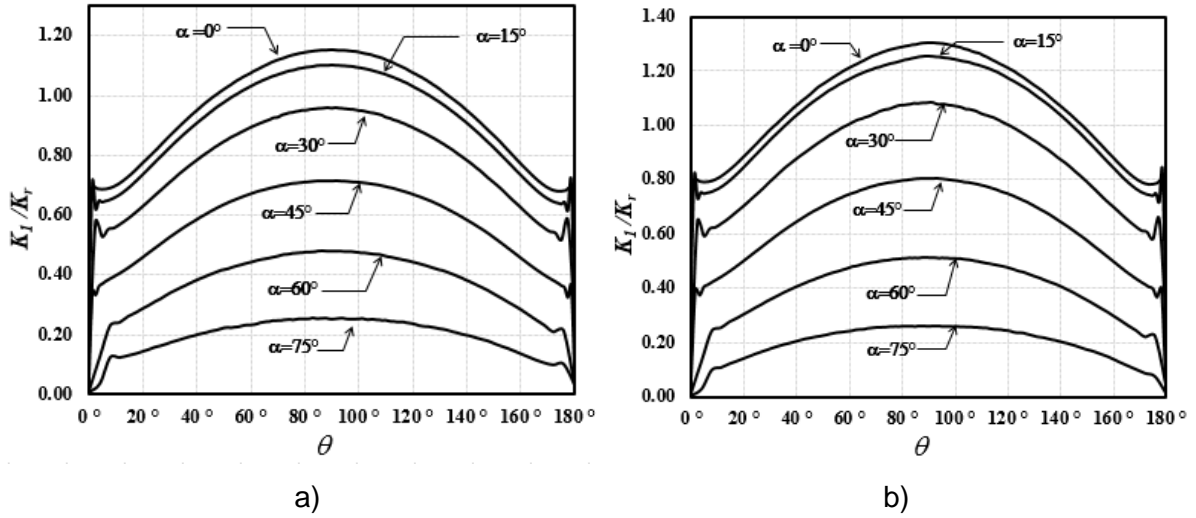


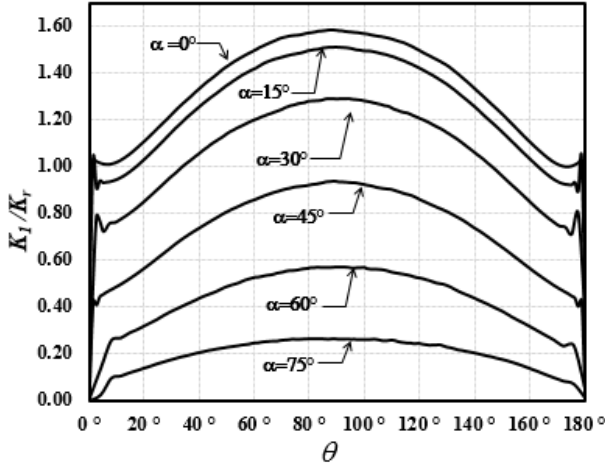
Şekil 3.2.27. Dönmüş yüzey çatlaklı levha sonlu elemanlar modeli genel görüntüsü (solda), çatlak bölgesi yakın görüntüsü (sağda)



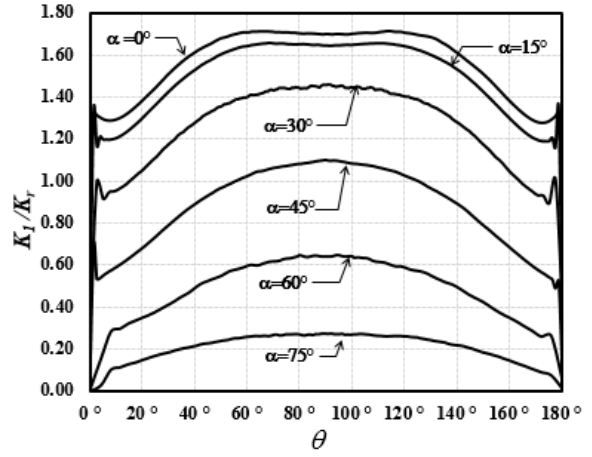
Şekil 3.2.28. Dönmüş eliptik yüzey çatlakı için normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımı ( $a/c=1$ ,  $a/t=0.8$ )

Elde edilen tüm kombinasyonlar içerisinde, çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı  $a/c=0.25$ , çatlak derinliği/levha kalınlığı oranı  $a/t$  sırasıyla 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 durumları için normalize edilmiş karışık mod gerilme şiddet faktörlerinin dağılımları Şekil 3.2.29'da verilmektedir.





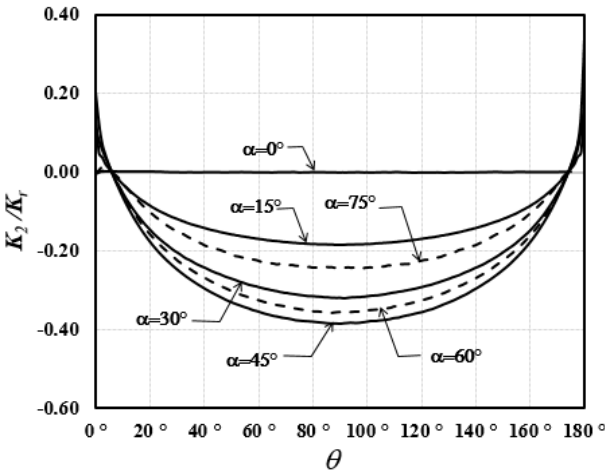
c)



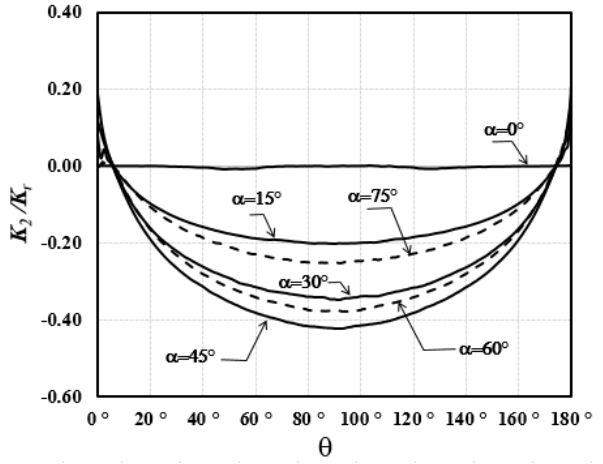
d)

Şekil 3.2.29. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

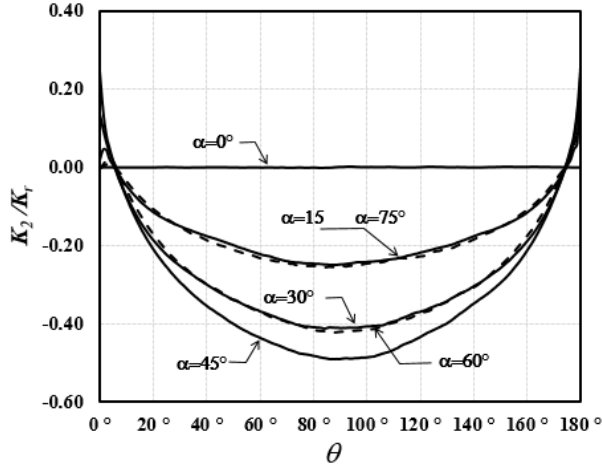
Şekil 3.2.29'da normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörleri gösterilmektedir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere,  $a/c = 0.25$  için, çatlak derinliği sabit kaldığında levhanın et kalınlığı azaldıkça normalize edilmiş  $K_I$  değerleri artmaktadır. Bir başka deyişle, dönmüş eliptik yüzey çatlaklı problemlerinde, sabit  $a/c$  değerinde  $a/t$  değerinin artması ile gerilme şiddet faktörlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, dönme açısı arttıkça, mod-I gerilme şiddet faktörleri de azalmaktadır.



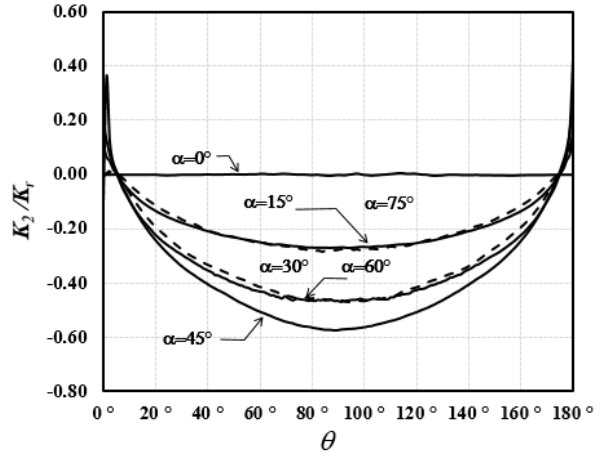
a)



b)



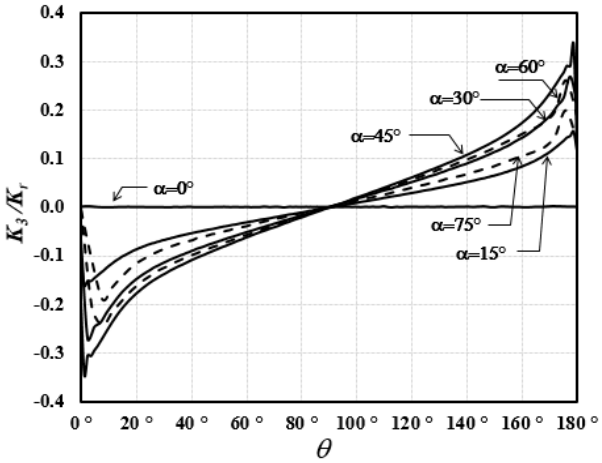
c)



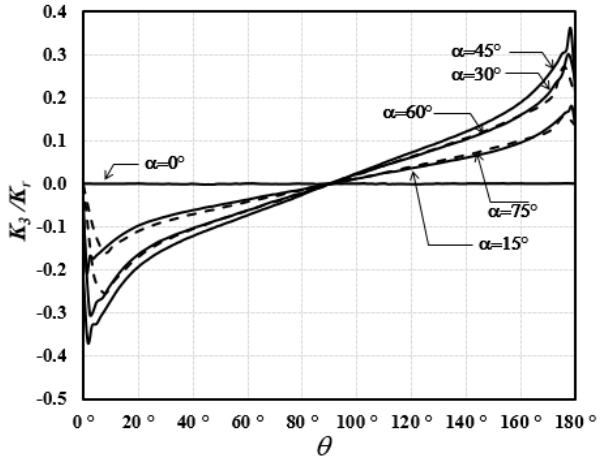
d)

Şekil 3.2.30. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

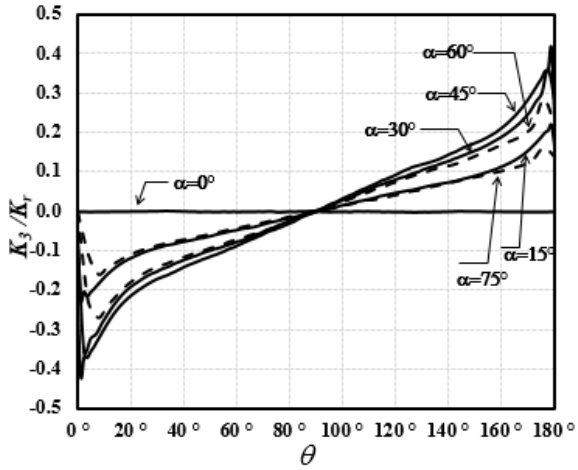
Şekil 3.2.30'da normalize edilmiş mod-II gerilme şiddet faktörü dağılımları gösterilmektedir. Mod-II için en yüksek değerlerin çatlakın yatayla yaptığı açı olan 45 derecede (maksimum kayma gerilmesinin olduğu düzlem) elde edildiği görülmektedir. Sıfır derecede normalize edilmiş  $K_2$  değeri ise 0'dır. Grafiklerden anlaşılacağı üzere,  $a/c=0.25$  için, çatlak derinliği sabit kaldığında levhanın et kalınlığı azaldıkça normalize edilmiş  $K_2$  değerleri artmaktadır. Bir başka deyişle, eğik eliptik yüzey çatlak problemlerinde, sabit  $a/c$  değerinde  $a/t$  değerinin artması ile gerilme şiddet faktörü şiddetinin arttığı gözlemlenmektedir.



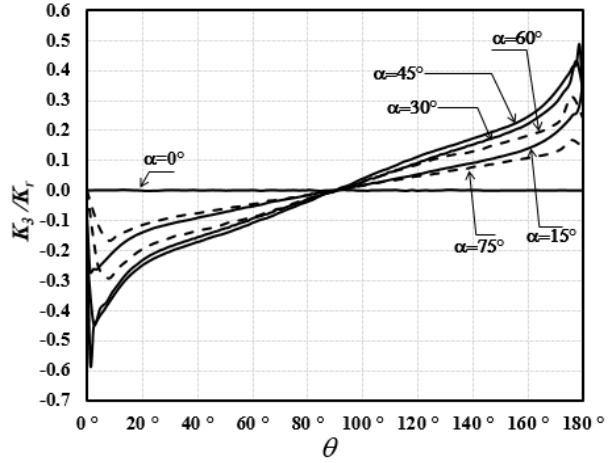
a)



b)



c)

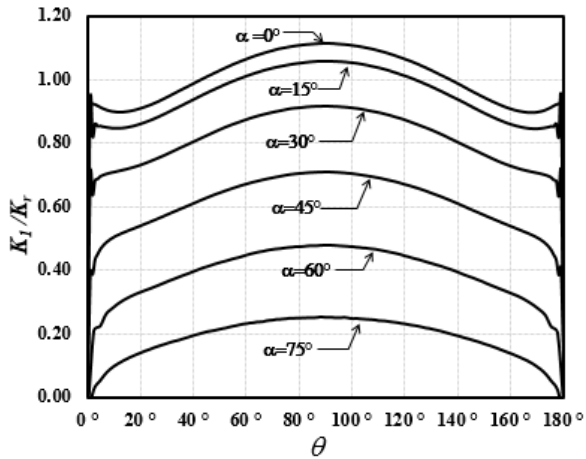


d)

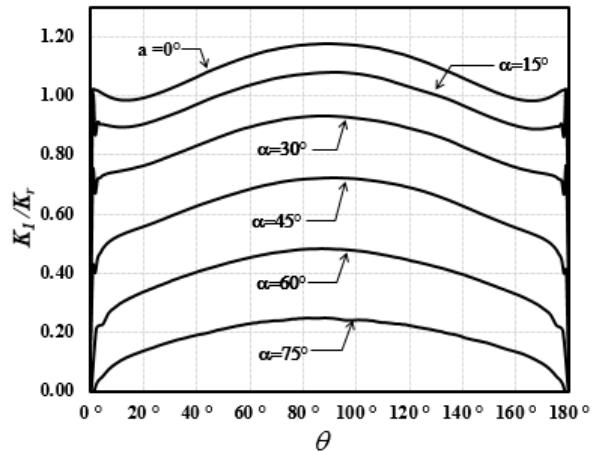
Şekil 3.2.31. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

Şekil 3.2.31'de normalize edilmiş mod-III gerilme şiddet faktörü dağılımları gösterilmektedir. Mod-III için en yüksek değerlerin çatlakın yatayla yaptığı açı olan 45 derecede (maksimum kayma gerilmesinin olduğu düzlem) elde edildiği görülmektedir. Sıfır derecede normalize edilmiş  $K_3$  değeri ise 0'dır.

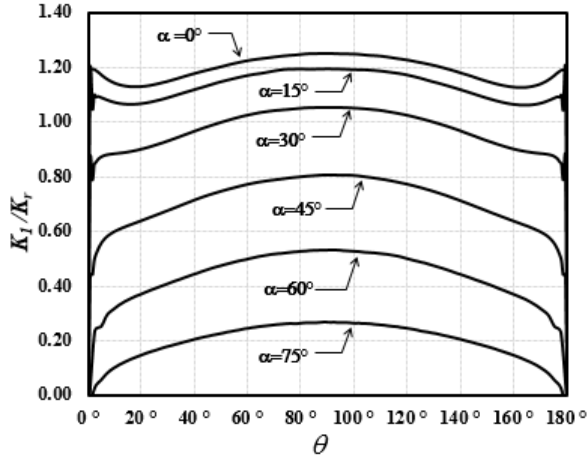
Yukarıda Şekil 3.2.29-3.2.31'de  $a/c=0.25$  için farklı  $a/t$  oranlarında verilen normalize edilmiş mod-I, mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörü dağılımları, aynı format ve sıra ile  $a/c=0.5$ , 1.0, 2.0 ve 4.0 için Şekil 3.2.32-3.2.43'te verilmiş olup, benzer sonuçlar bu grafiklerden de çıkarılabilmektedir.



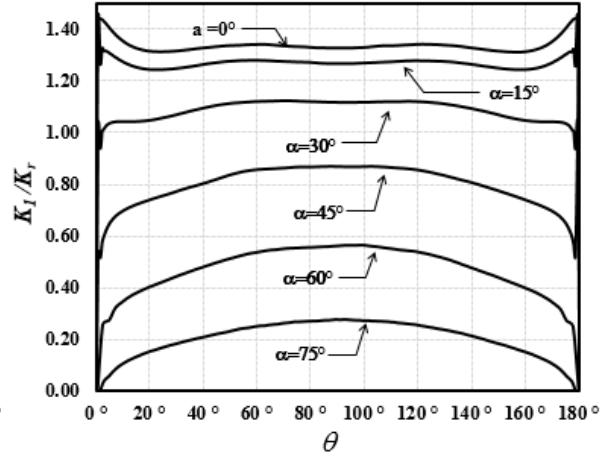
a)



b)

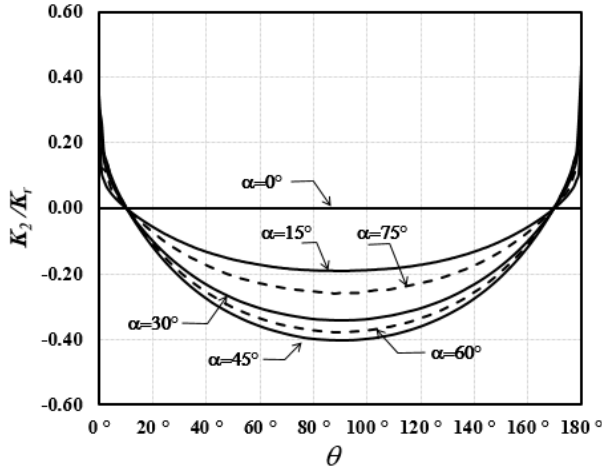


c)

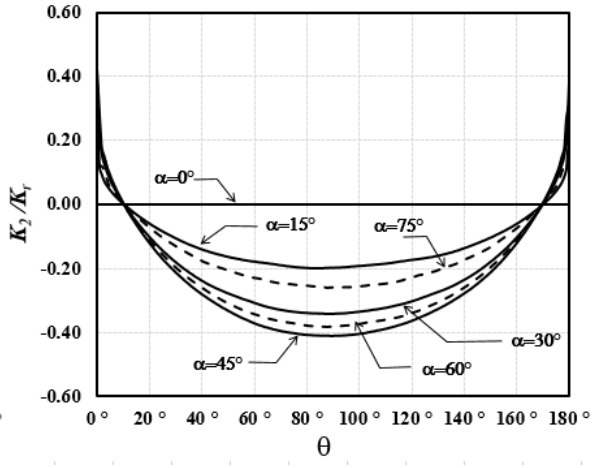


d)

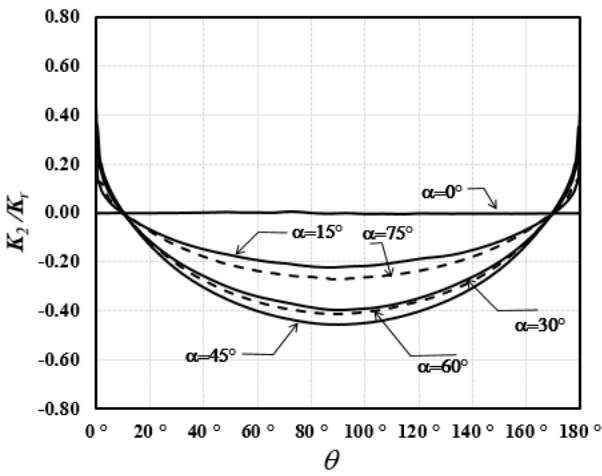
Şekil 3.2.32. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



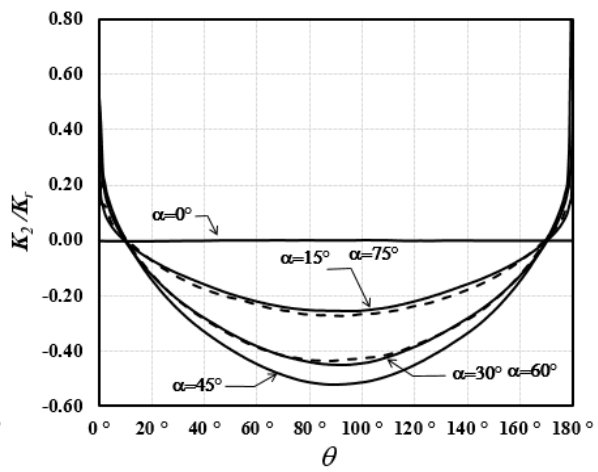
a)



b)



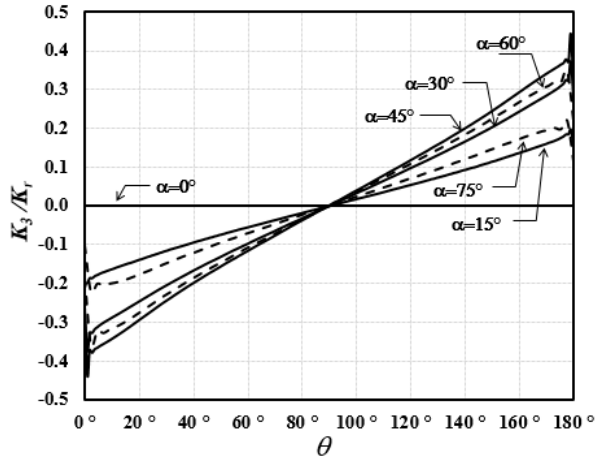
c)



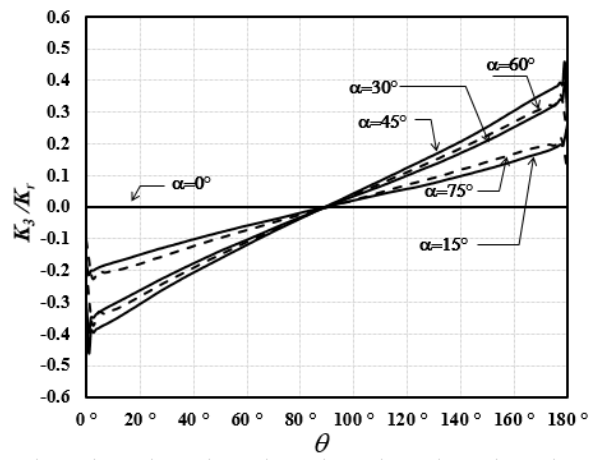
d)

Şekil 3.2.33. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

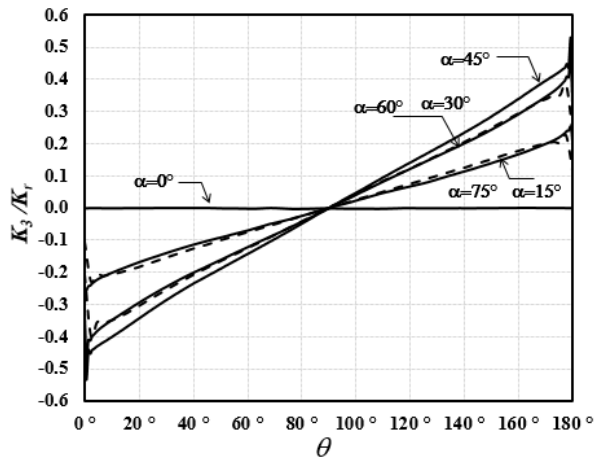




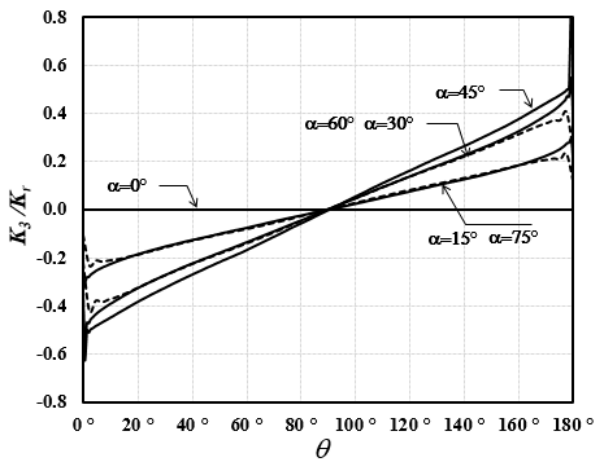
a)



b)

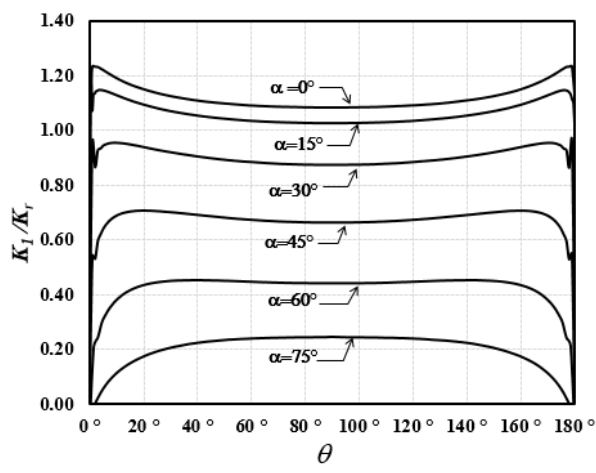


c)

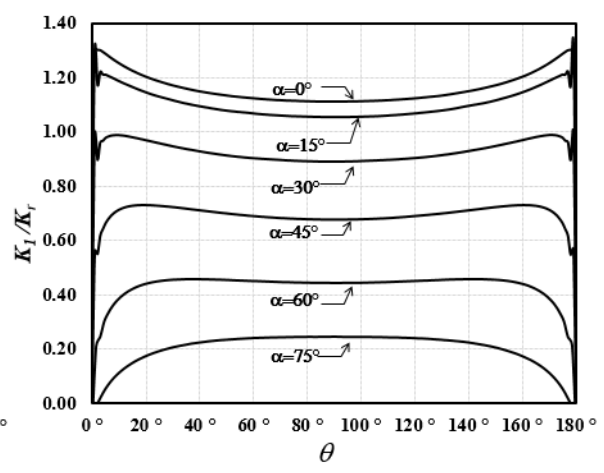


d)

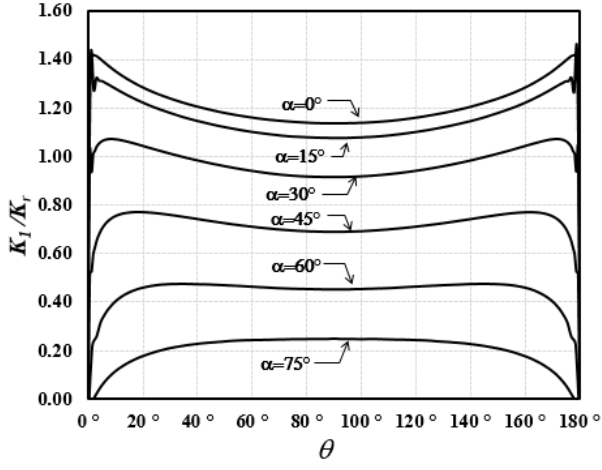
Şekil 3.2.34. Normalize edilen  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



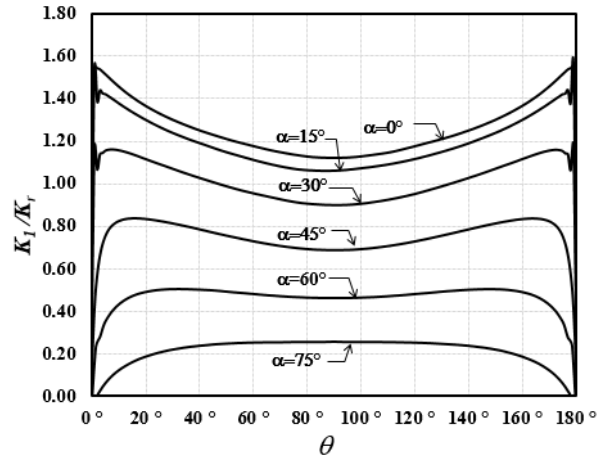
a)



b)

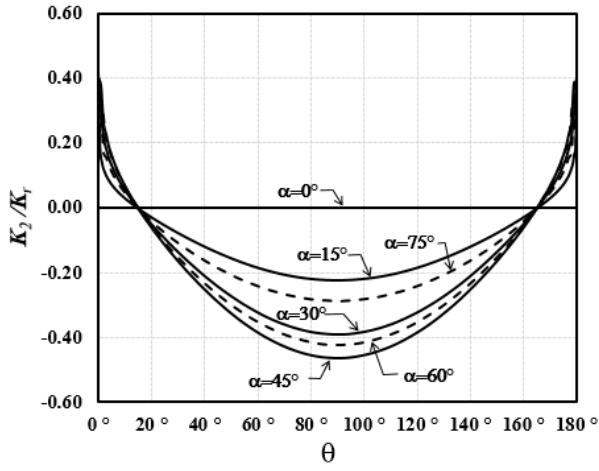


c)

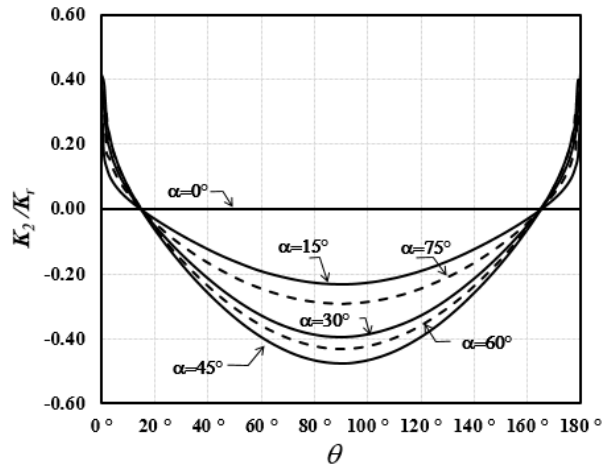


d)

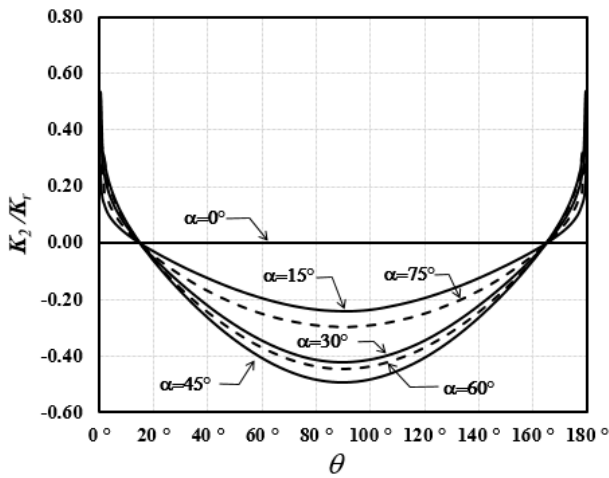
Şekil 3.2.35. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



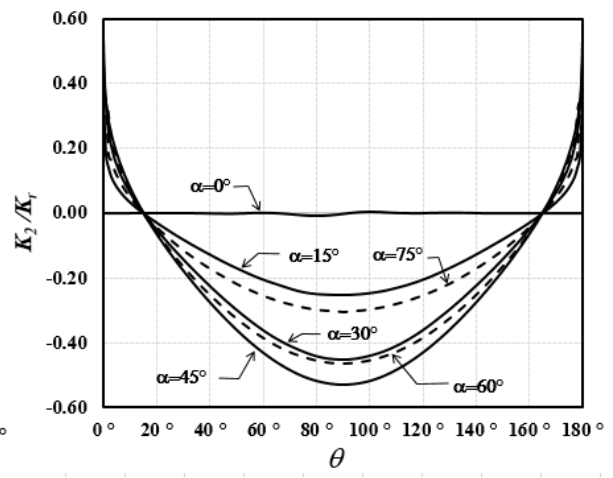
a)



b)

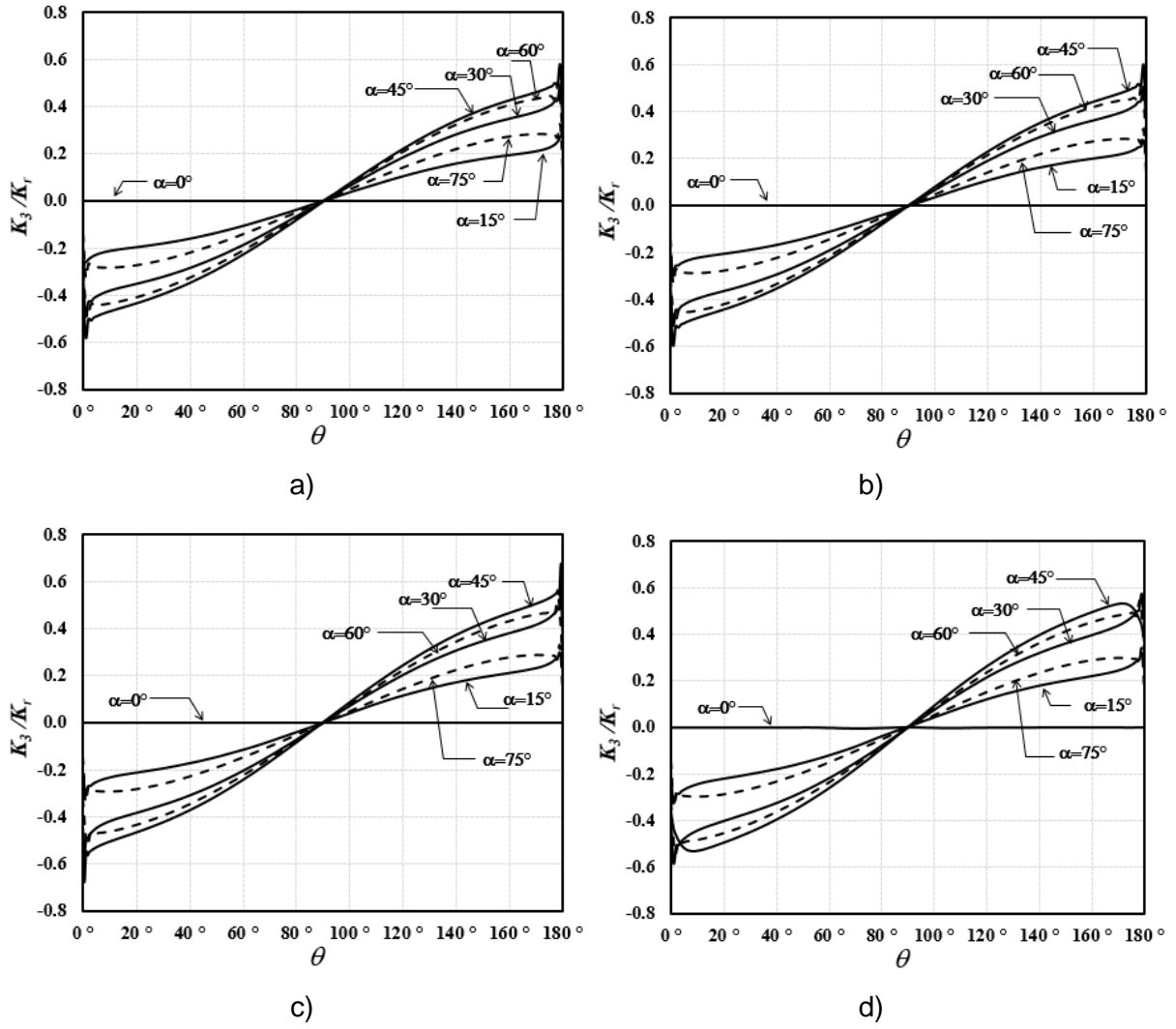


c)

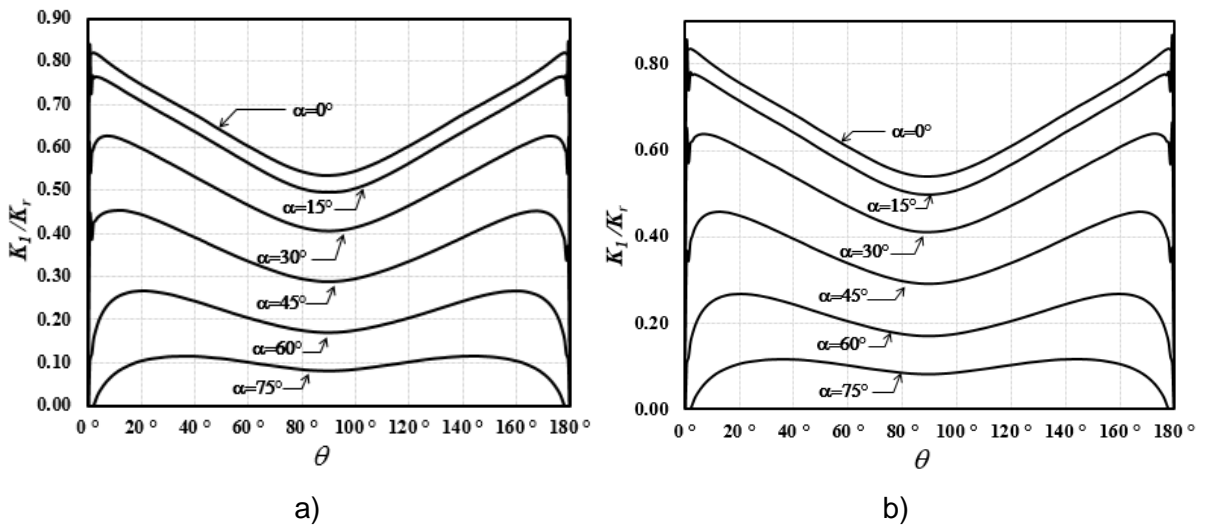


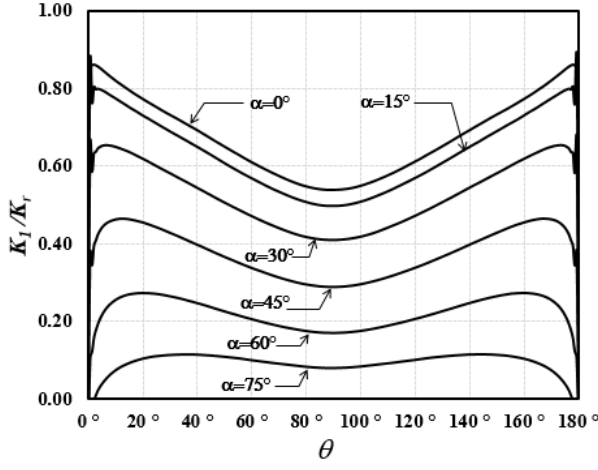
d)

Şekil 3.2.36. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

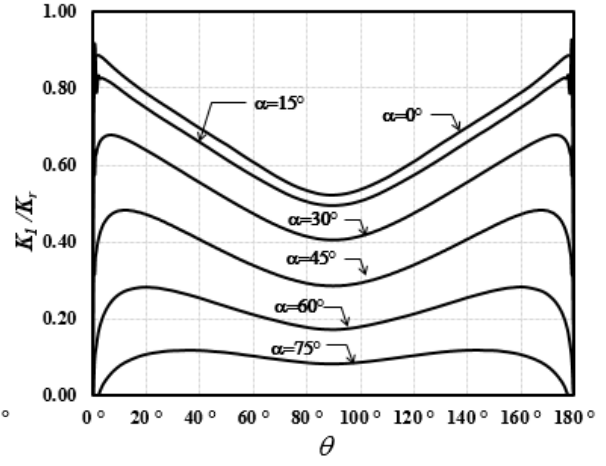


Şekil 3.2.37. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



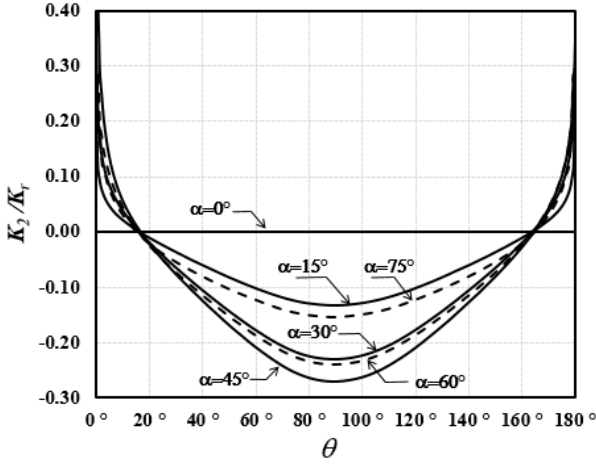


c)

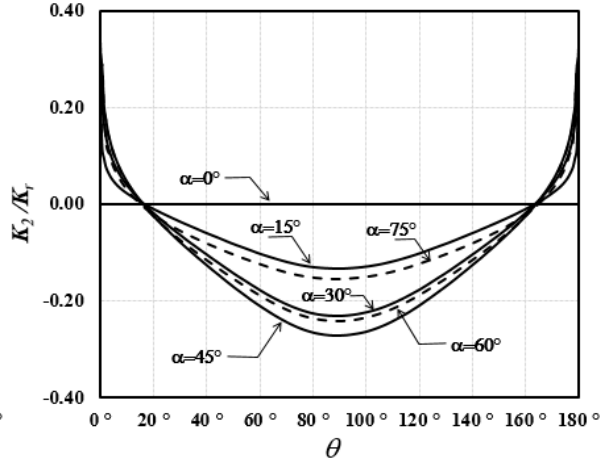


d)

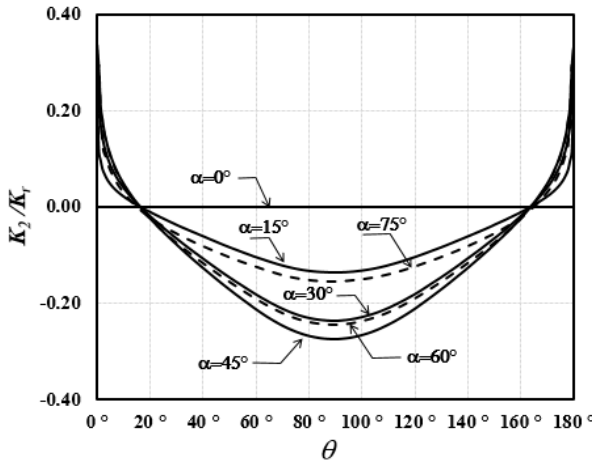
Şekil 3.2.38. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



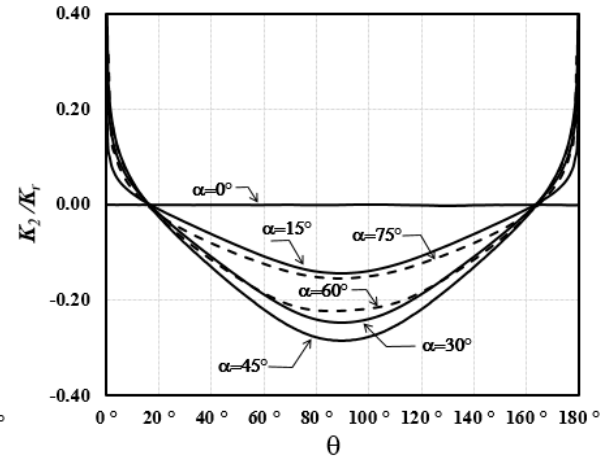
a)



b)

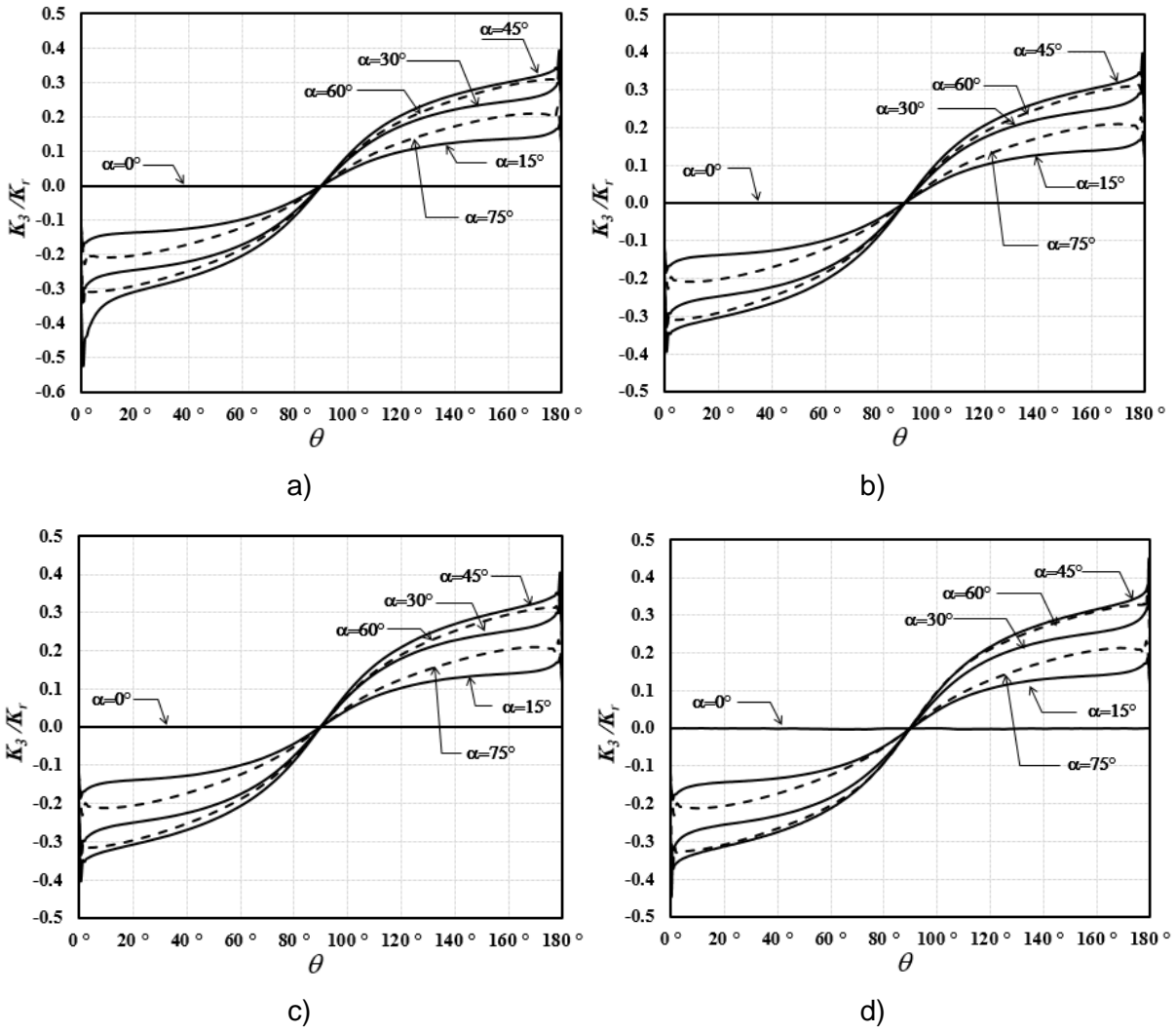


c)

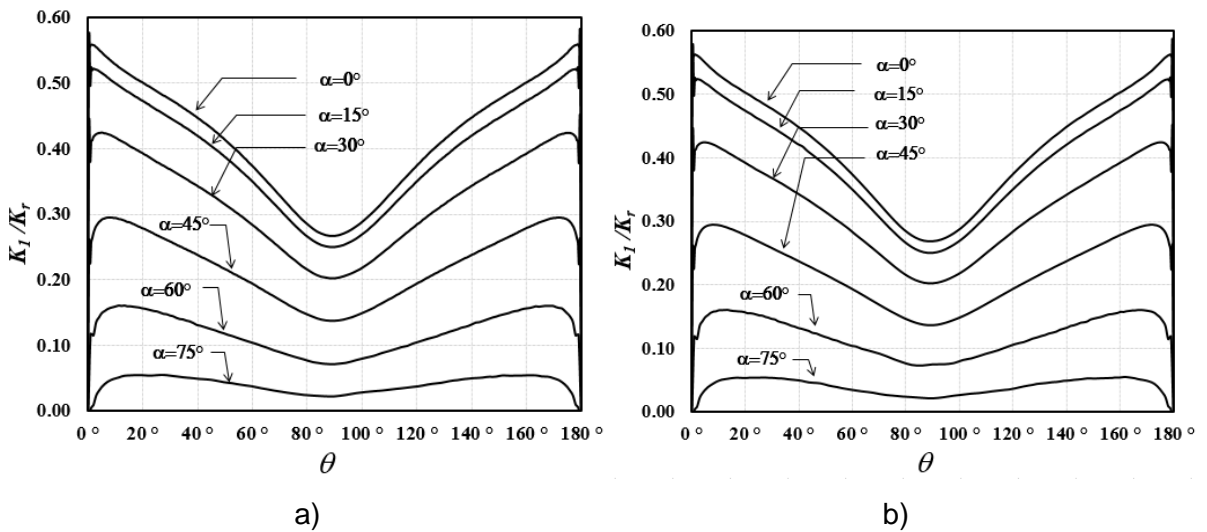


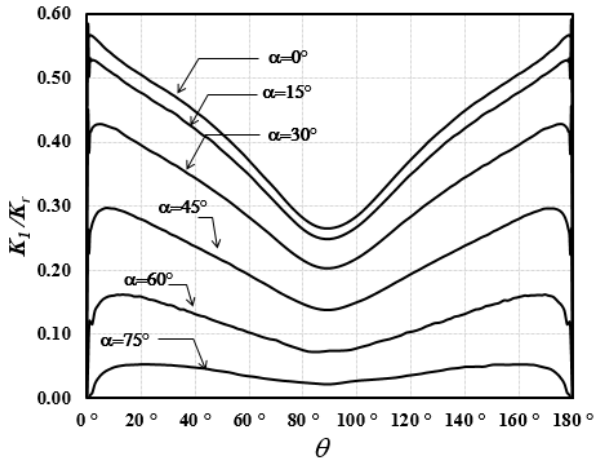
d)

Şekil 3.2.39. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

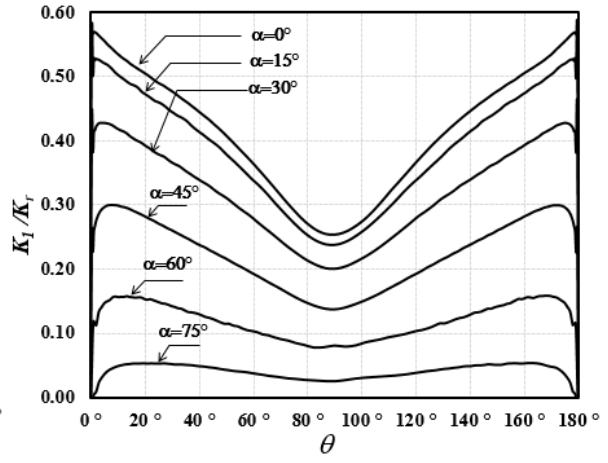


Şekil 3.2.40. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



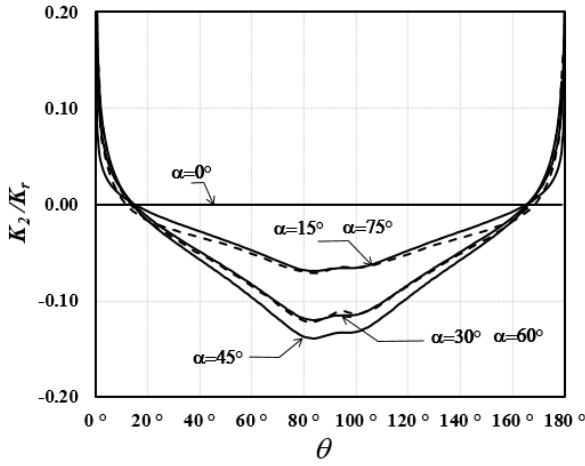


c)

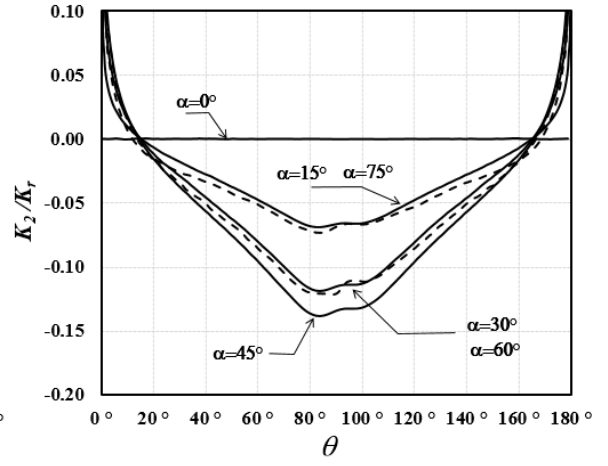


d)

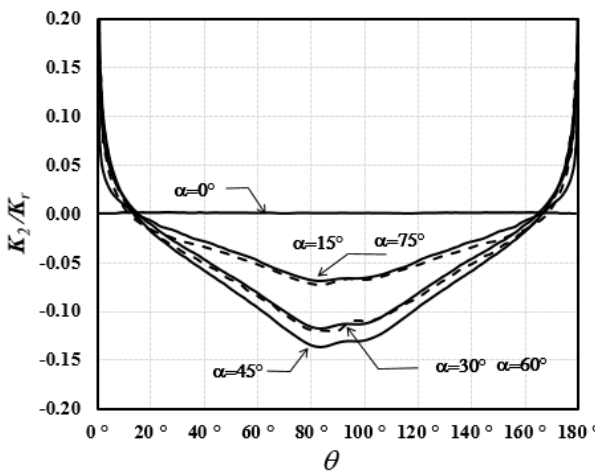
Şekil 3.2.41. Normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



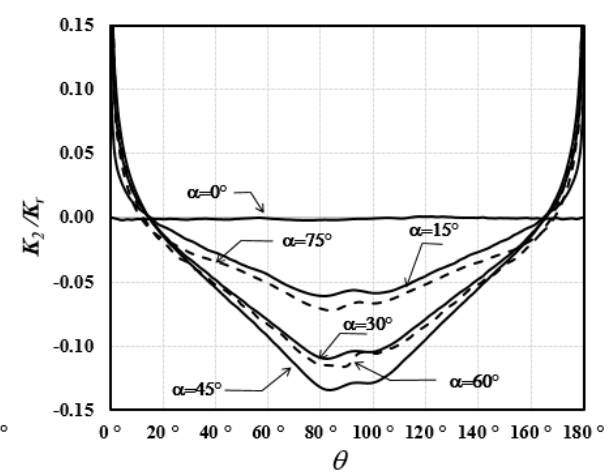
a)



b)

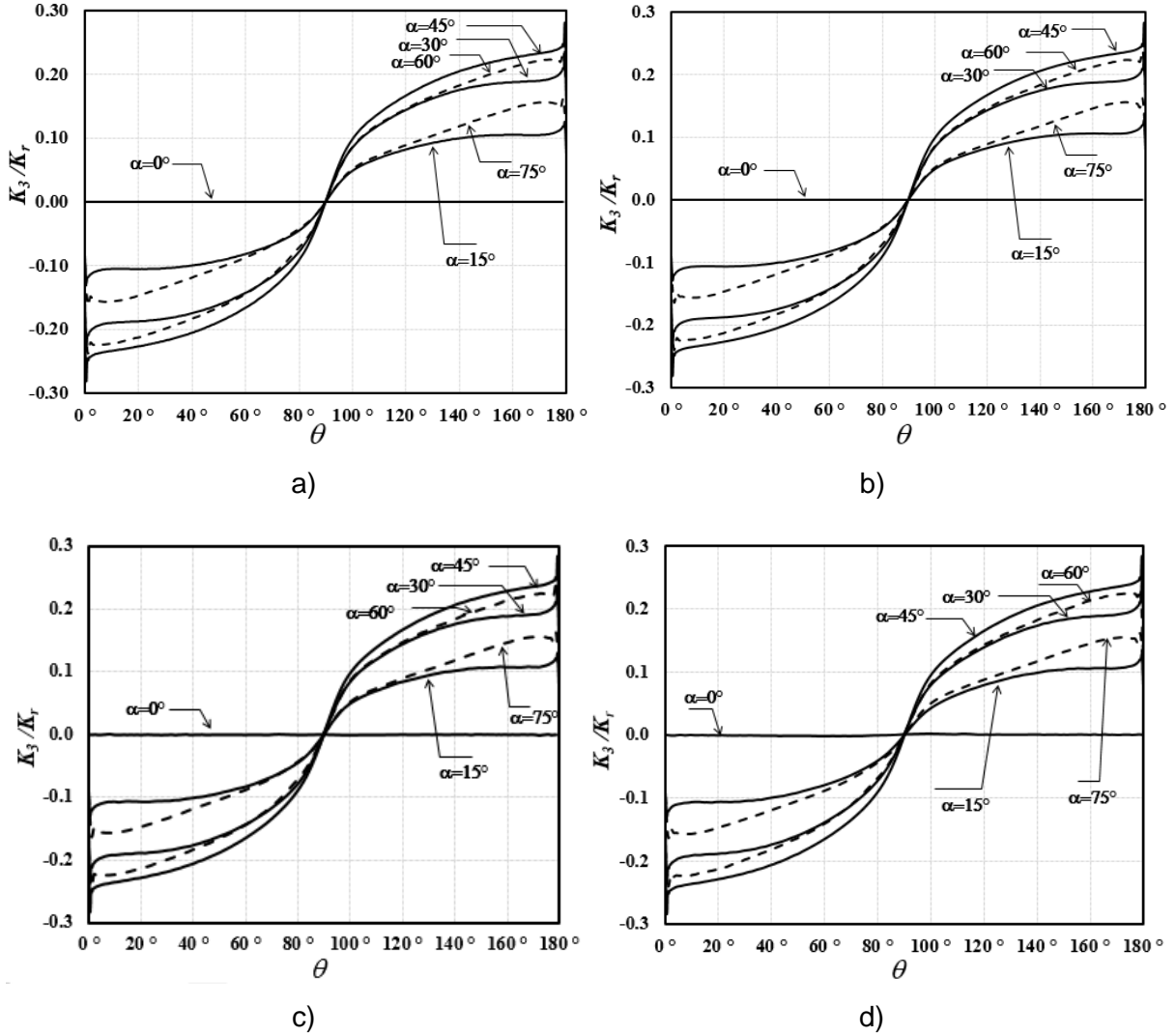


c)



d)

Şekil 3.2.42. Normalize edilmiş  $K_2$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

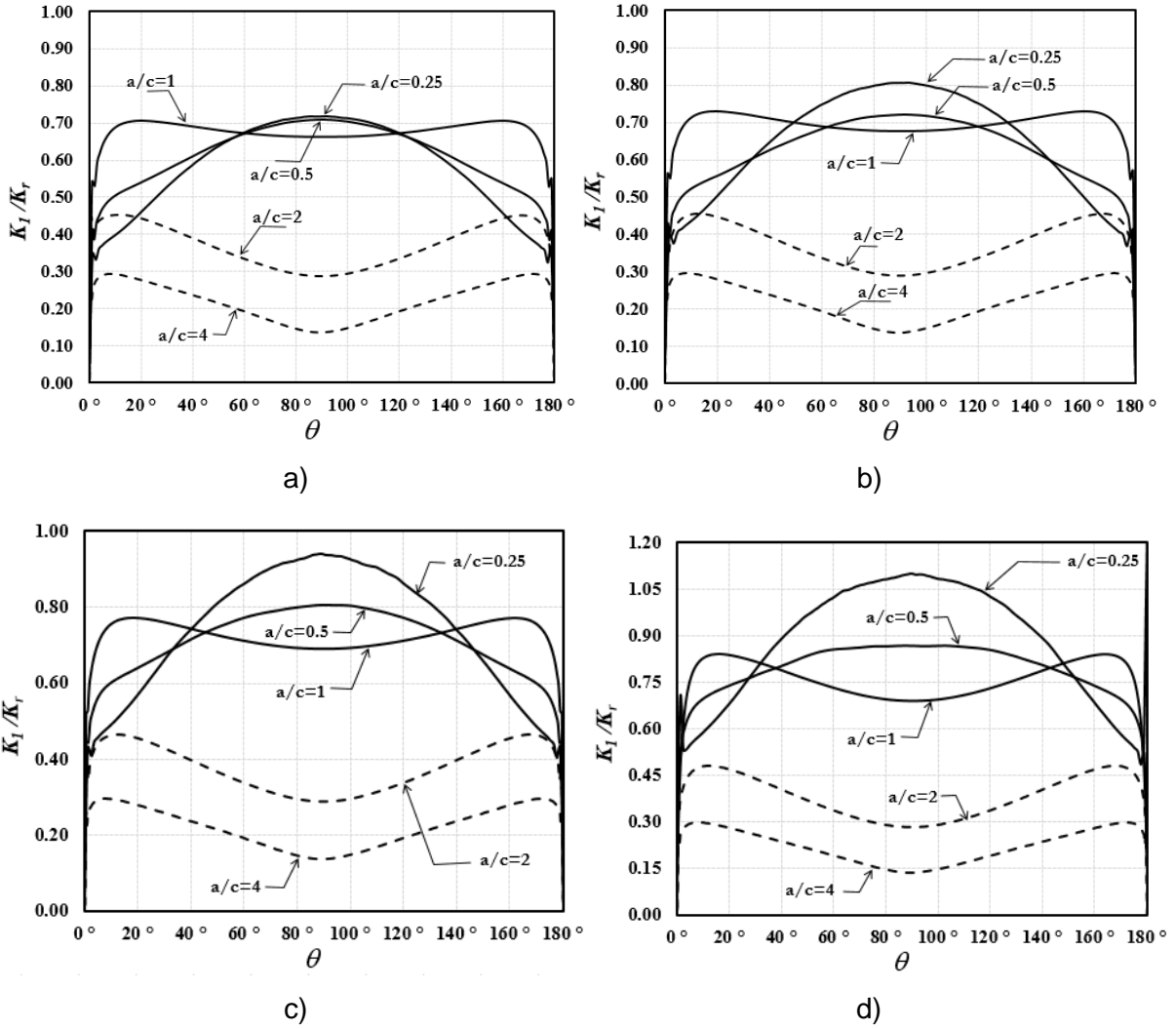


Şekil 3.2.43. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

Şekil 3.2.29-3.2.43'te verilen her bir grafikte farklı dönme açıları için karışık mod gerilme şiddet faktörleri verilmiştir. Eğik çatlak probleminde olduğu gibi bu problem için de, diğer parametreler olan normalize edilmiş çatlak derinliği ( $a/t$ ) ve çatlak şekil oranı ( $a/c$ ) etkilerinin müstakil grafikler halinde gösterilmesi istenen bir durumdur. Bu amaçla, çatlak bölgesinde orta seviye karışık mod gerilme/yüklemeye oluşturan  $45^\circ$  dönmüş açılı eliptik yüzey çatlakları için hesaplanan gerilme şiddet faktörü dağılımları, her bir grafikte ayrı bir  $a/t$  oranı temsil edilerek farklı  $a/c$  oranlarında karşılaştırılmıştır (Şekil 3.2.44-3.2.46).

Şekil 3.2.44'te,  $a/c$  oranı arttıkça, derinlik noktası ile mukayese edildiğinde mod-I gerilme şiddet faktörünün serbest yüzeylerde daha fazla olduğu,  $a/c$  oranı azaldıkça ise çatlak derinlik noktasında arttığı ve  $a/c=0.25$  için maksimum değerini aldığı görülmektedir. Şekil 3.2.44-3.2.49

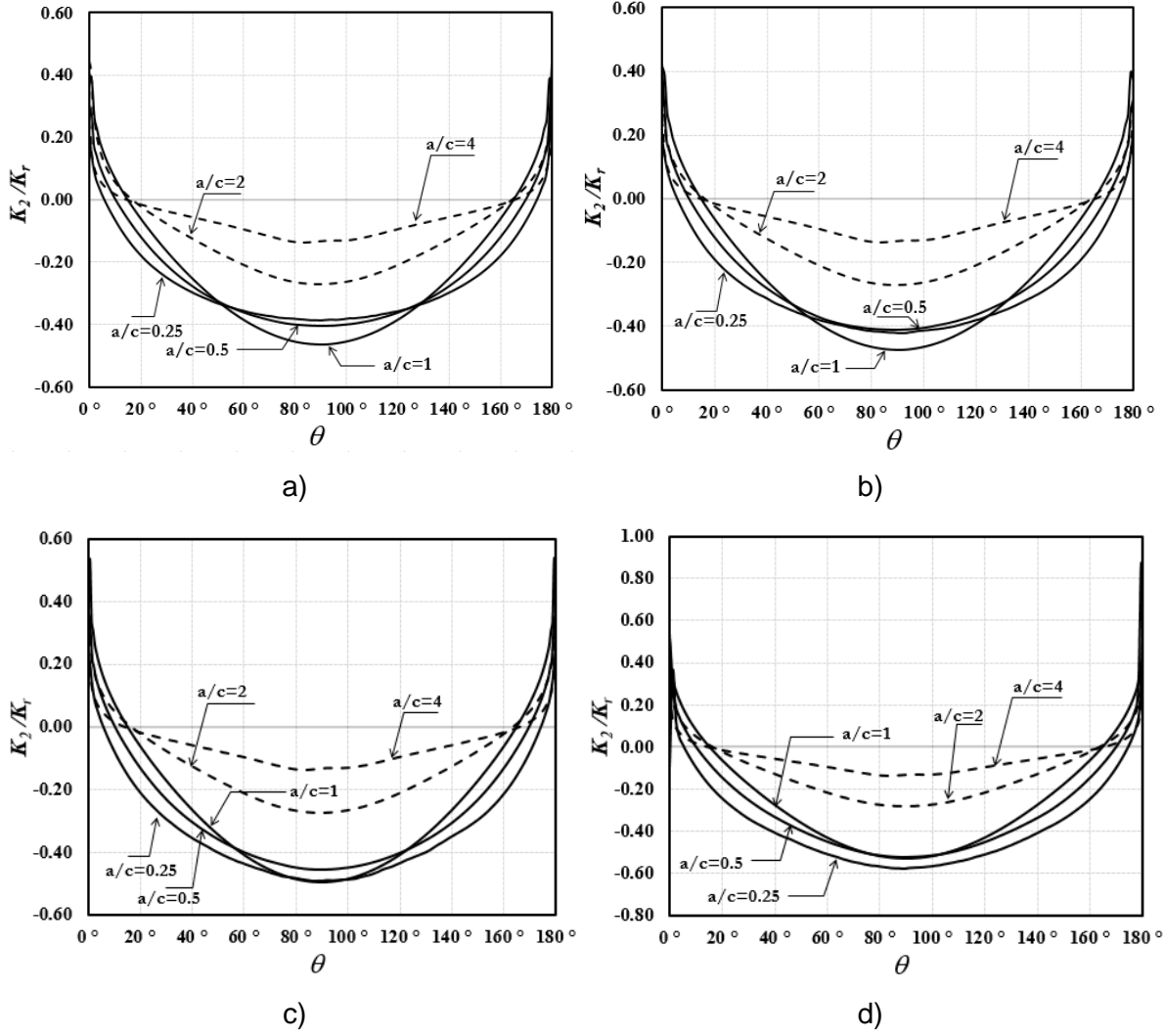
arasındaki grafiklerin daha iyi anlaşılması için sabit  $a/t$  grafiklerinde  $a/c=2$  ve 4, sabit  $a/c$  grafiklerinde ise  $a/t=0.6$  ve 0.8 için kesikli çizgiler kullanılmıştır.



Şekil 3.2.44. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

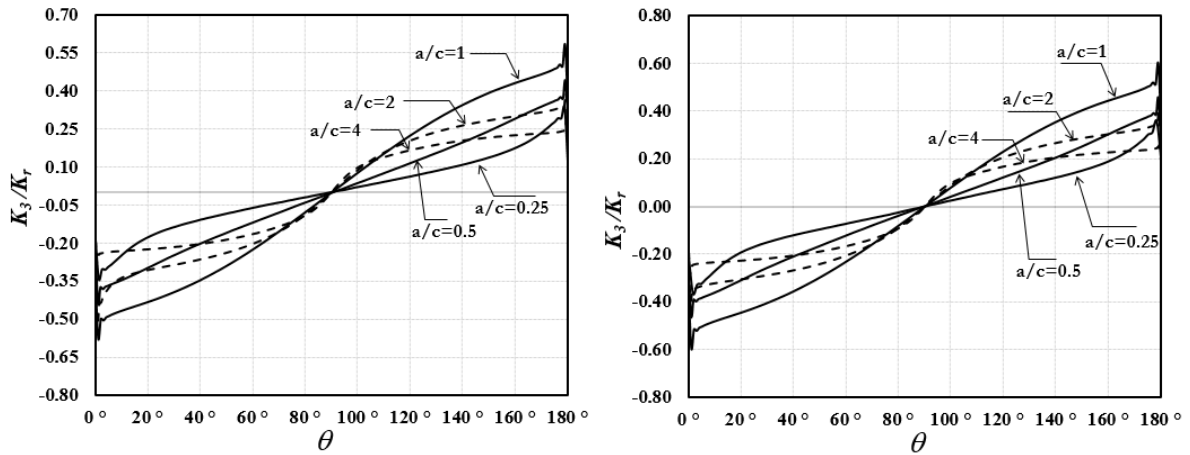
Şekil 3.2.45'te verilen grafiklerden  $a/c$  oranı azaldıkça, çatlak önü boyunca mod-II gerilme şiddet faktörü şiddetinin arttığı görülmektedir.

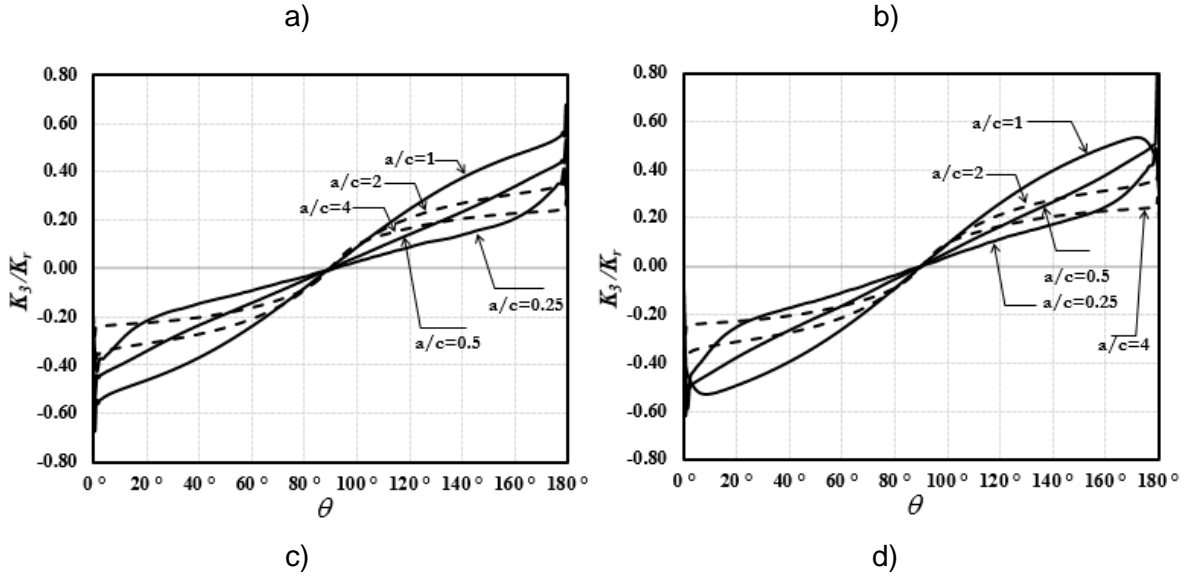




Şekil 3.2.45. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

Şekil 3.2.46'da verilen grafiklerden,  $a/c$  oranı 0.25'ten 1.0 değerine arttıkça, çatlak önü boyunca mod-III gerilme şiddet faktörünün arttığı,  $a/c$  oranının 2.0 ve 4.0 değerleri için ise serbest yüzey noktalarına yaklaştıkça azaldığı görülmektedir.

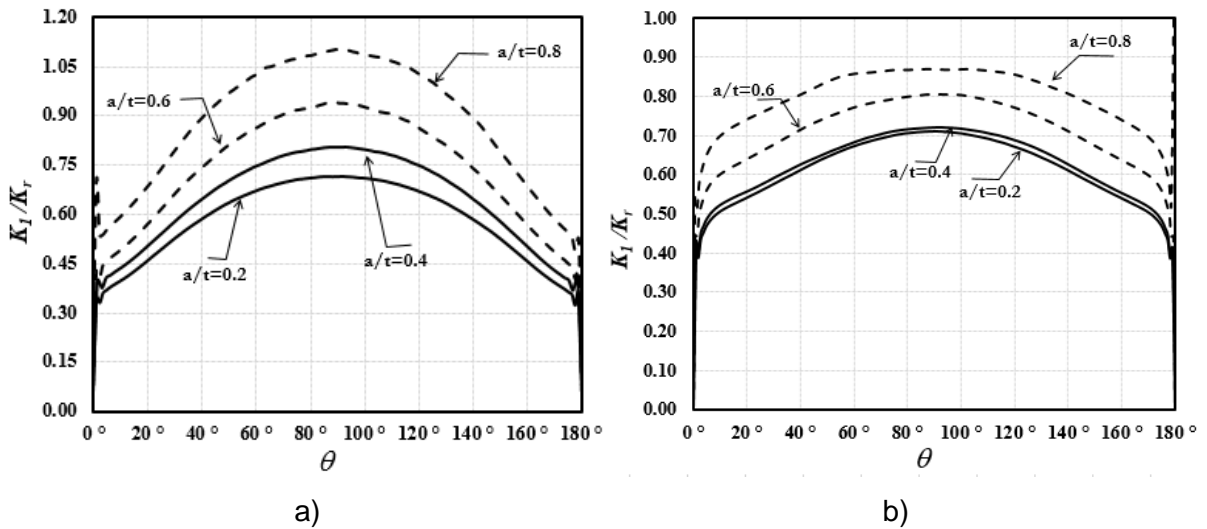


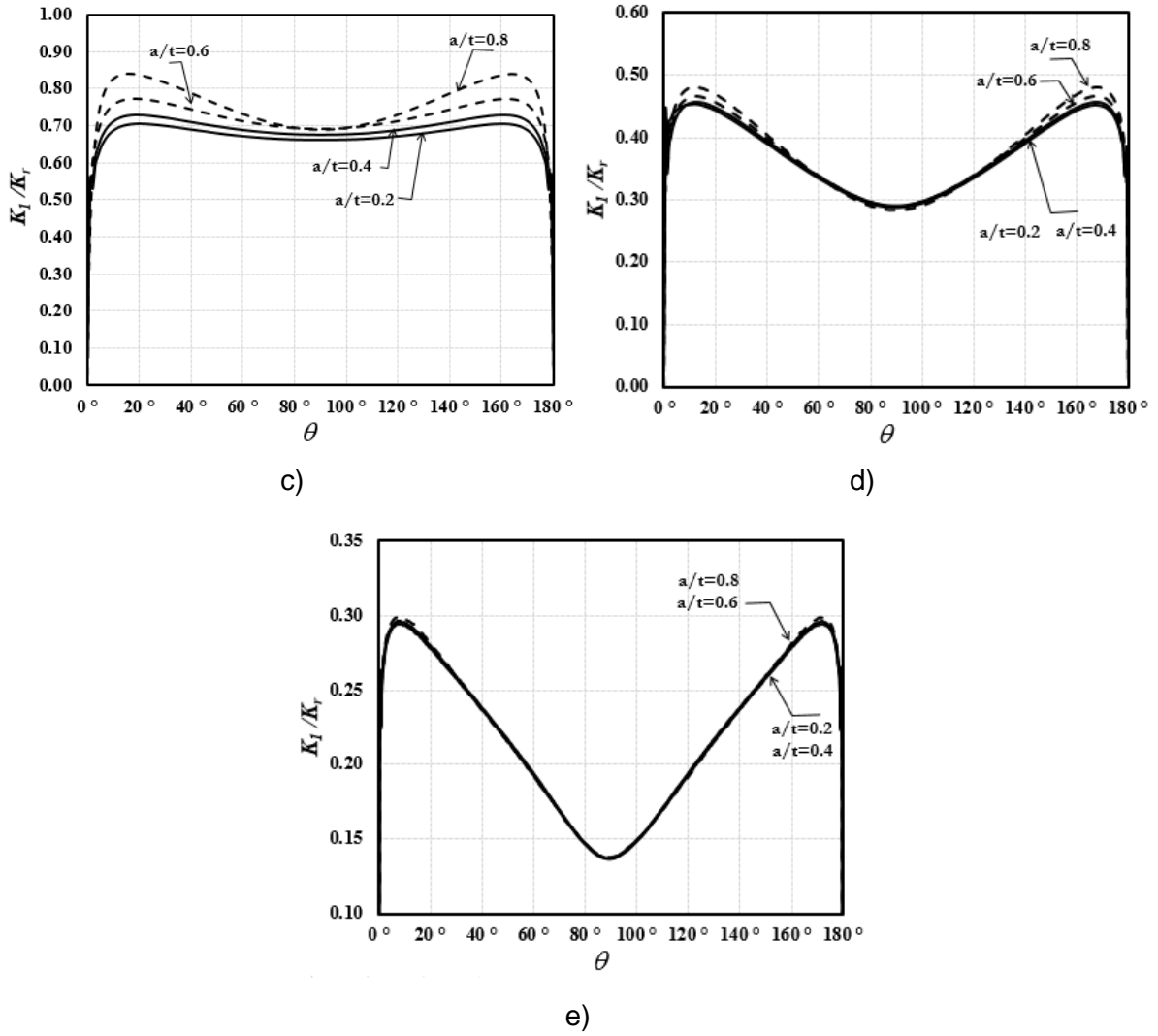


Şekil 3.2.46. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

Benzer şekilde, çatlak bölgesinde orta seviye karışık mod gerilme/yükleme oluşturan  $45^\circ$  eğim açılı eliptik yüzey çatlakları için hesaplanan gerilme şiddet faktörü dağılımları, her bir grafikte ayrı bir  $a/c$  oranı temsil edilerek farklı  $a/t$  oranları için de karşılaştırılmıştır (Şekil 3.2.47-3.2.49).

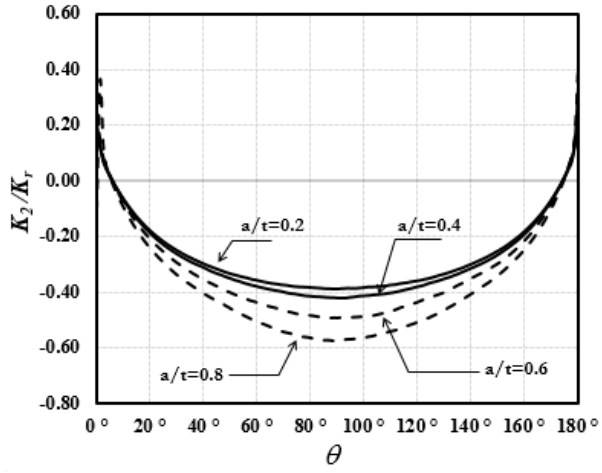
Şekil 3.2.47'den  $a/c$  oranının 1.0 veya daha küçük olması durumlarında, çatlak derinliği arttıkça, çatlak önü boyunca normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörünün arttığı,  $a/c=2$  ve 4 için kayda değer bir değişim olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi, çatlak yüzey alanı/levha kesit alanı oranının  $a/c \leq 1$  oranına sahip çatlaklarda, yüksek  $a/c$  oranlı çatlaklara göre çok daha büyük olmasıdır (levha genişliği  $a$  veya  $c$  değerlerinden hangisi büyükse,  $5a$  veya  $5c$  olarak alınmaktadır).



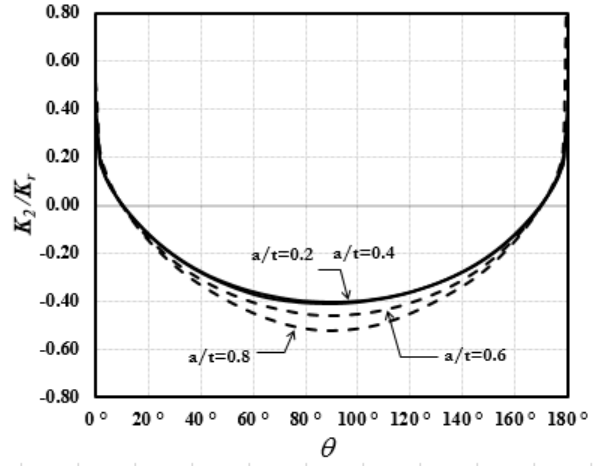


Şekil 3.2.47. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$

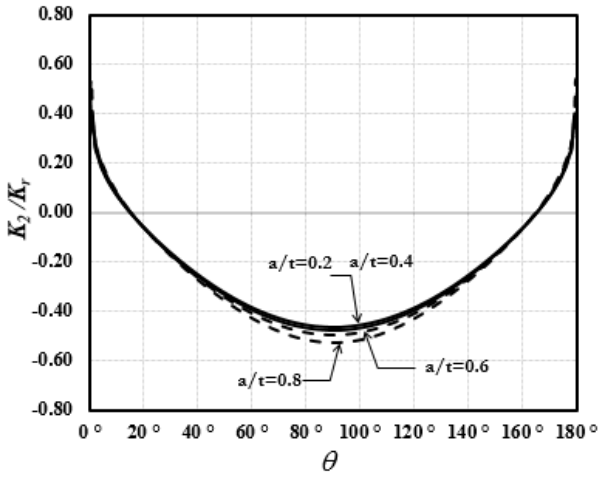
Şekil 3.2.48'den,  $a/t$  oranı arttıkça, düşük  $a/c$  değerleri için mod-II gerilme şiddet faktörünün az miktarda arttığı, yüksek  $a/c$  değerleri için ise yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir.



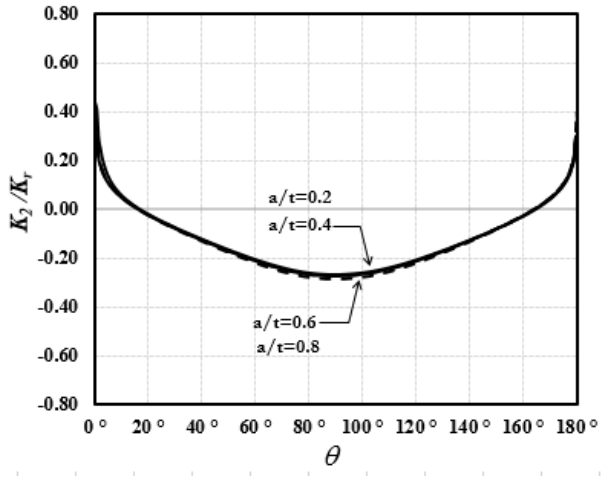
a)



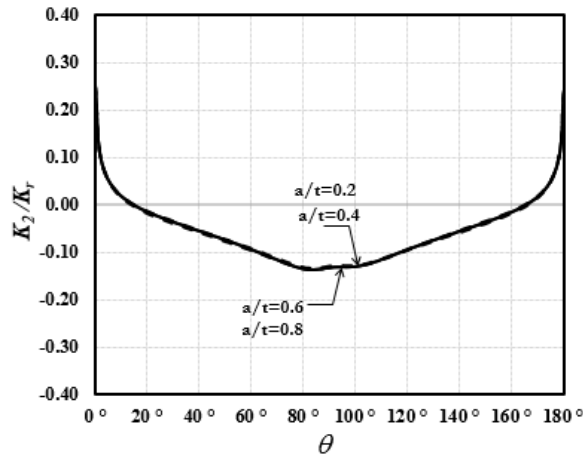
b)



c)

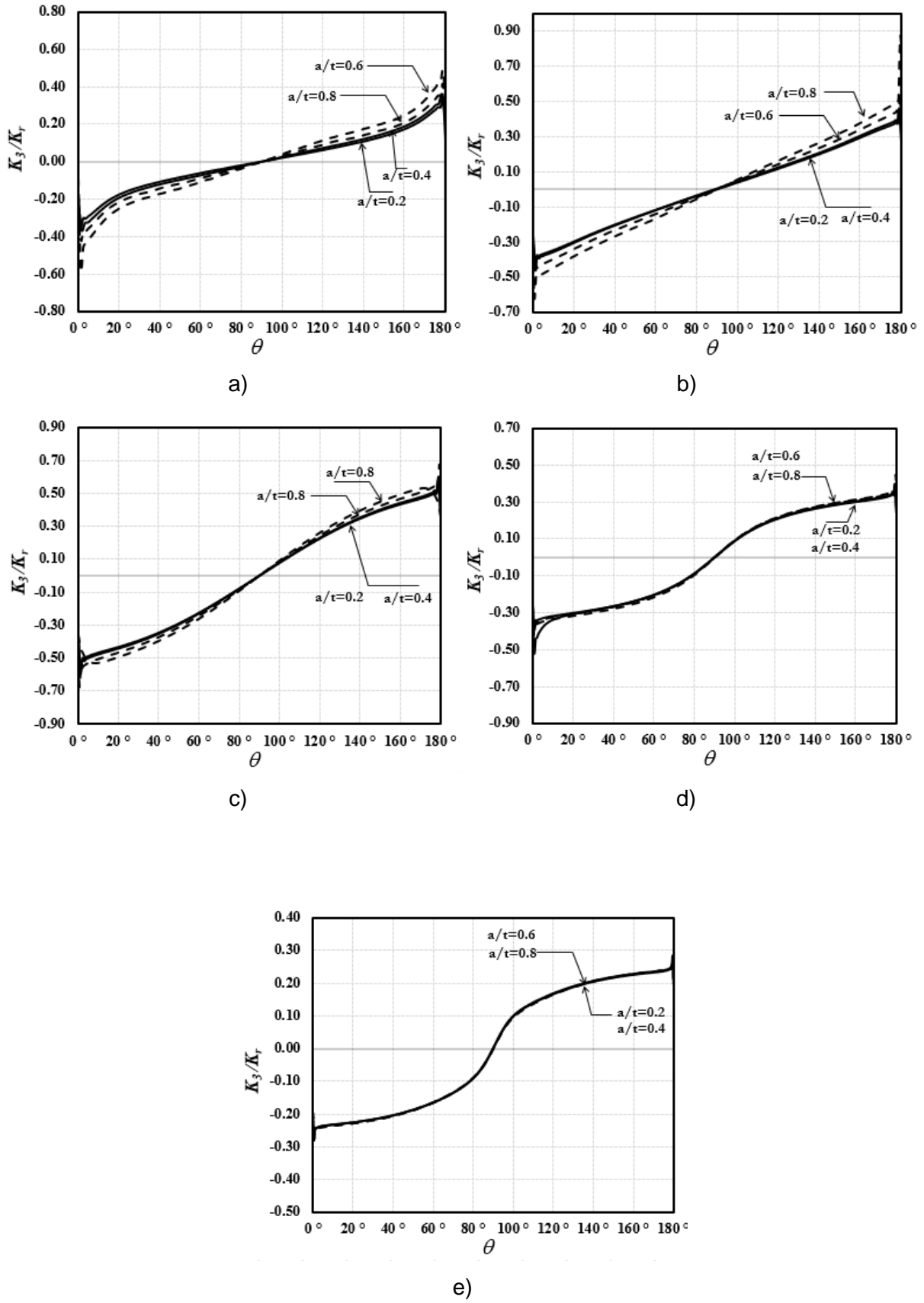


d)



e)

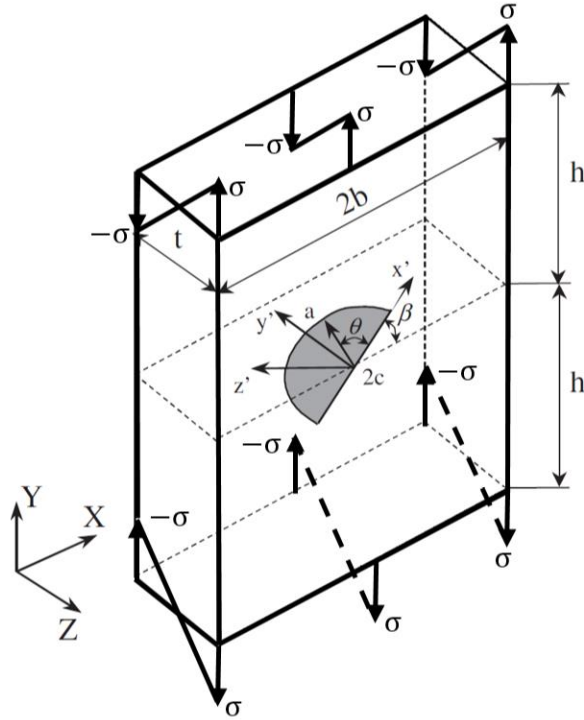
Şekil 3.2.48. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$



Şekil 3.2.49. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$

Benzer şekilde, Şekil 3.2.49'da da,  $a/t$  oranı arttıkça, düşük  $a/c$  değerleri için mod-III gerilme şiddet faktörü şiddetinin çatlak önü boyunca az miktarda arttığı, yüksek  $a/c$  değerleri için ise yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir.

### 3.2.3 Eğilme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Eğik Yüzey Çatlağı Analizleri

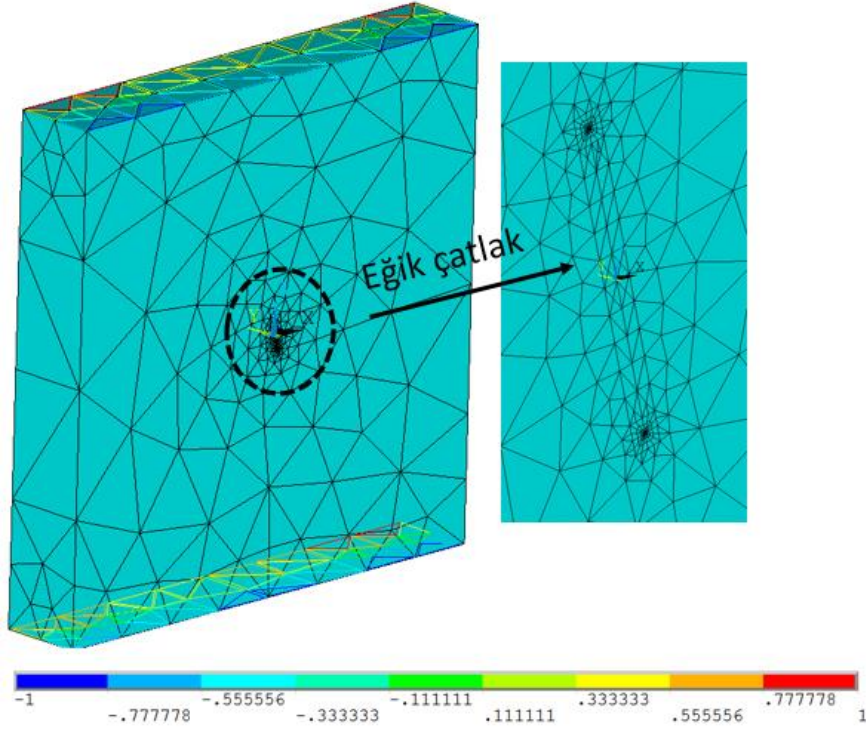


Şekil 3.2.50. Eğilme gerilmesi altındaki levhada eğik yüzey çatlağı

Eğilme gerilmesi altında bulunan ve yarı eliptik eğik çatlak içeren levha problemi Şekil 3.2.50'de verilmektedir. Tablo 3.2.1'de verilen parametreler kullanılarak değişik kombinasyonları temsil eden her bir problem için geçerli boyut ve yönlerdeki yüzey çatlaklarını içeren sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Çatlak ucunda oluşan gerilme şiddet faktörüne etki eden parametreler arasında çatlağın düzlem içi yatay eksenle yaptığı  $\beta$  açısı da bulunmaktadır. Üniorm çekme gerilmesi altında bulunan eğik yüzey çatlağında da olduğu gibi  $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  açı değerleri için analizler yapılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, böylece çatlak ucu boyunca kayma modu ve yırtılma modu aktif hale gelmektedir.

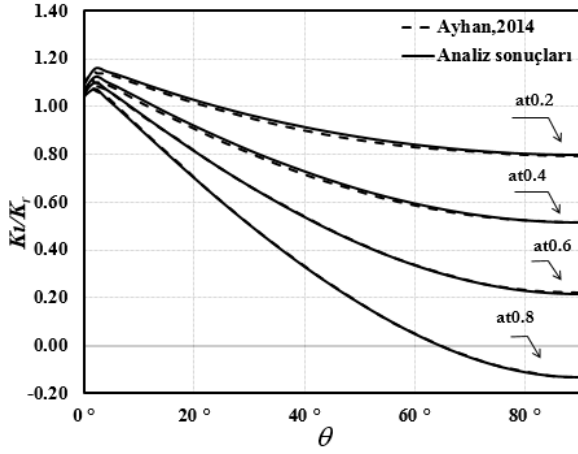
Diğer çatlak problemlerinde olduğu gibi, eğilme gerilmesi altında bulunan ve eğik çatlak içeren levha için ilgili sonlu elemanlar modelleri ANSYS programı kullanılarak oluşturulmuş ve FRAC3D kullanılarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.51'de  $a/c=4$ ,  $a/t=0.6$ ,  $\beta=75^\circ$  durumunu temsil eden sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Levha modelinin alt ve üst yüzey elemanlarının sınırlarında görülen renkli çizgiler eğilme gerilmesi konturlarını temsil

etmektedir. Bir başka deyişle, doğrusal ve anti-simetrik olarak ön yüzeyden arka yüzeye çekme gerilmesinden basma gerilmesine dönüşen aksenal gerilme değişimi eğilme yüklemesini temsil etmektedir.

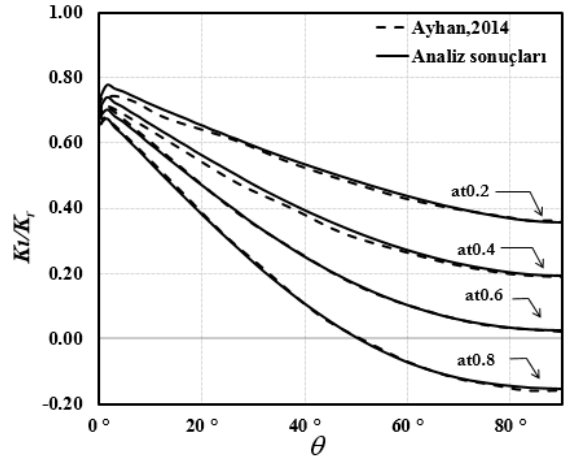


Şekil 3.2.51. Eğilme gerilmesi altında eğik yüzey çatlakları içeren levhanın sonlu elemanlar modeli: genel görüntü (solda), çatlak bölgesi yakın görüntüsü (sağda)

Sınır şartları olarak, kalınlık yönünde levhanın merkezi sıfır olacak şekilde doğrusal değişen yayılı yük gerilmesi üst taban ve alt taban alanlarına uygulanarak eğilme momenti tanımlanmıştır. Alt taban köşelerinden bir nokta üç ekseninde, diğer bir nokta iki ekseninde ve başka bir nokta ise tek ekseninde sabitlenmiştir. Böylece levhanın rijit cisim hareketi kısıtlanmıştır. FRAC3D kullanılarak karışık mod gerilme şiddet faktörleri hesaplanmış ve Denklem 3.2.1-3.2.3 kullanılarak hesaplanan referans  $K_r$  ile gerilme şiddet faktörleri normalize edilmiştir. Hesaplanan bazı normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörlerinin Ayhan ve ark (2014) verileri ile karşılaştırılması Şekil 3.2.52'de verilmektedir. Yine aynı makaledeki verilerden  $a/c=1$ ,  $a/t=0.2$  için ağ bölüntüleme çalışması yapılmıştır (Şekil 3.2.53). İlgili sonuçlara bağlı olarak, 3.2.1 nolu bölümdeki ağ bölüntüleme değerleri kullanılmaya devam edilmiştir. Levhanın üst ve alt yüzeylerinde doğrusal değişken gerilme etki ettiğinden dolayı, sadece bu yüzeylerdeki ağ yapısında sıkılaştırma yapılmıştır.

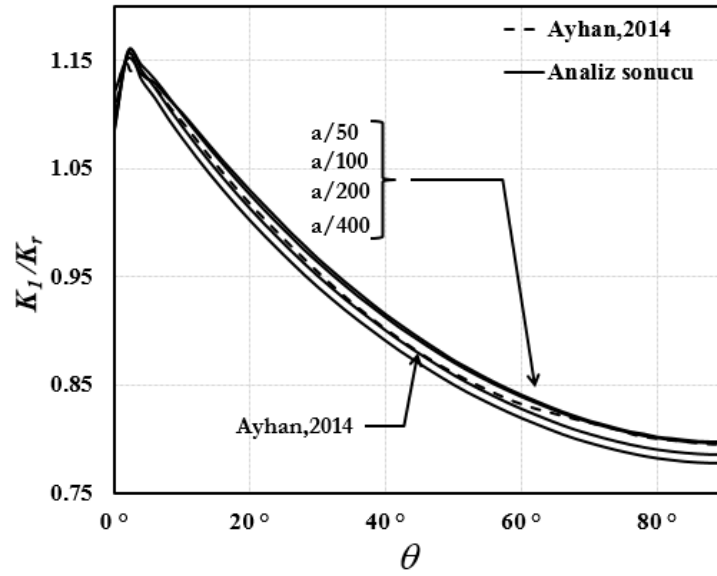


a)



b)

Şekil 3.2.52. Eliptik yüzey çatlak için normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımı  $\beta=0$ , a)  $a/c=1$ , b)  $a/c=2$



Şekil 3.2.53. Eliptik yüzey çatlak için çatlak ucunda farklı eleman boyutları kullanılarak elde edilen normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörlerinin çatlak önü boyunca dağılımları ( $a/c=1$ ,  $a/t=0.2$ ,  $\beta=0^\circ$ )

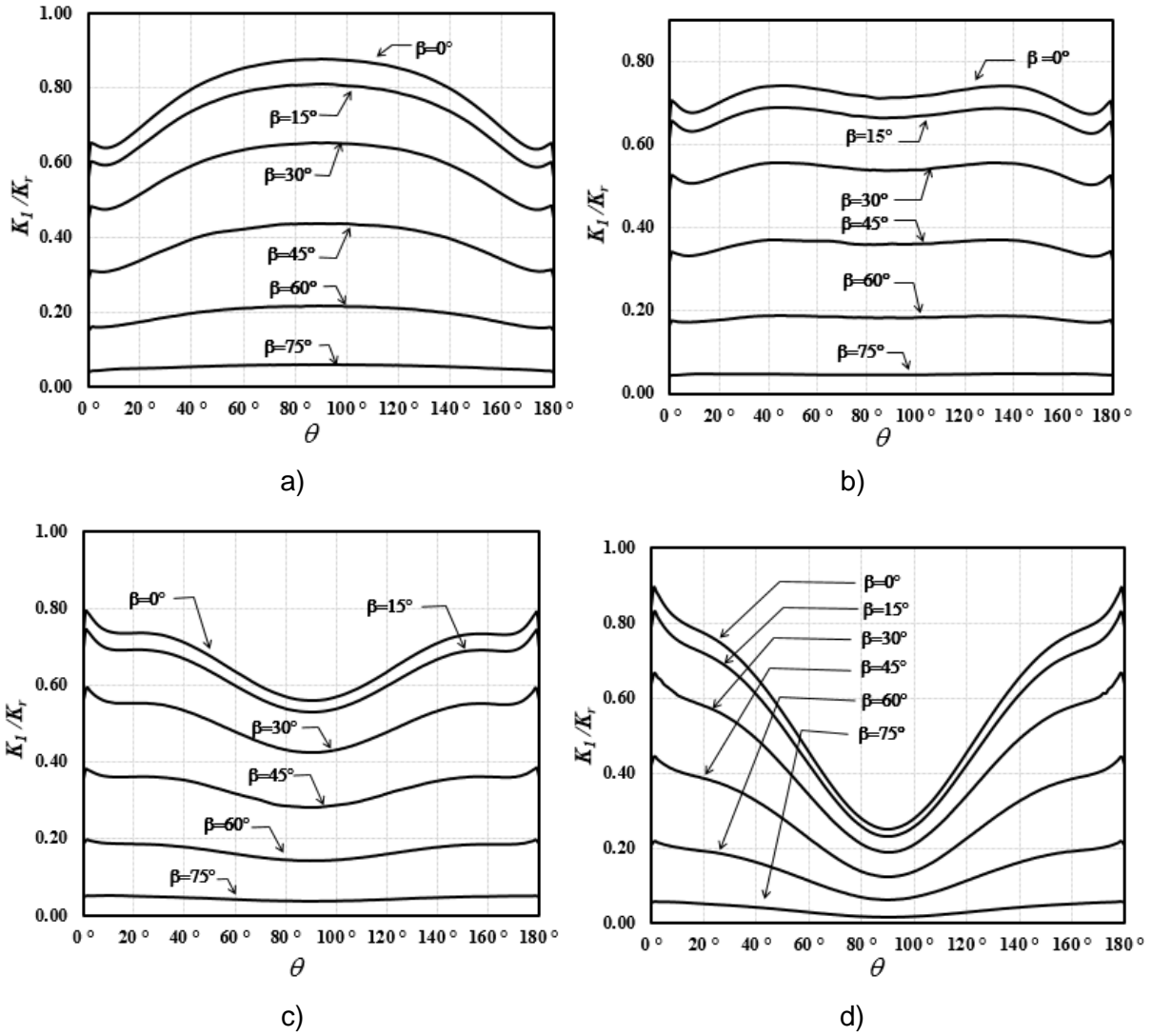
Elde edilen tüm kombinasyonlara göre, çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı  $a/c=0.25$  çatlak derinliği/et kalınlığı oranı  $a/t$  sırasıyla 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 durumları için karışık mod gerilme şiddet faktörlerinin dağılımları Şekil 3.2.54-3.2.56'da verilmektedir.

Şekil 3.2.54'te normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörleri gösterilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere,  $a/c=0.25$  için, çatlak derinliği sabit kaldığında levhanın et kalınlığı azaldıkça, bir başka deyişle  $a/t$  değeri arttıkça, normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörü değerleri serbest yüzey noktalarında artmakta, derinlik noktası bölgelerinde ise azalmaktadır.



Derinlik noktası bölgelerindeki azalmanın sebebi, levha kesiti üzerinde derinlik noktasına denk gelen nokta üzerindeki aksel gerilmenin  $a/t$  arttıkça çeki yönünde azalması ve yüksek  $a/t$  değerleri için bası yönünde artmasından kaynaklanmaktadır.

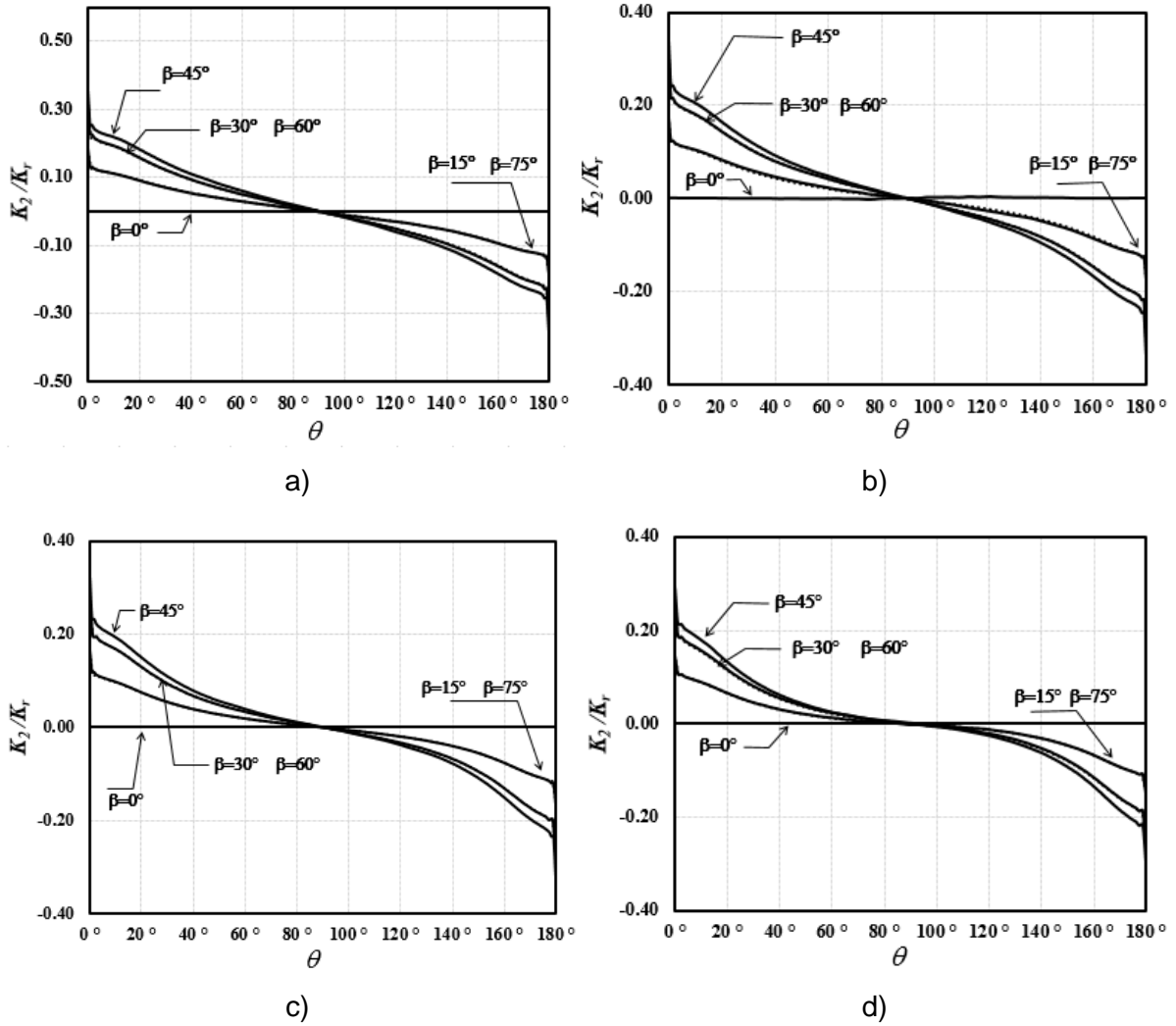
Ayrıca, eğiklik açısı arttıkça, mod-I gerilme şiddet faktörleri de azalmaktadır. Şekil 3.2.54-3.2.68 arasındaki grafiklerin daha iyi seçilebilmesi amacıyla mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörleri  $\beta=60$  ve  $75$  derece durumları için kesikli çizgiler ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2.54. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

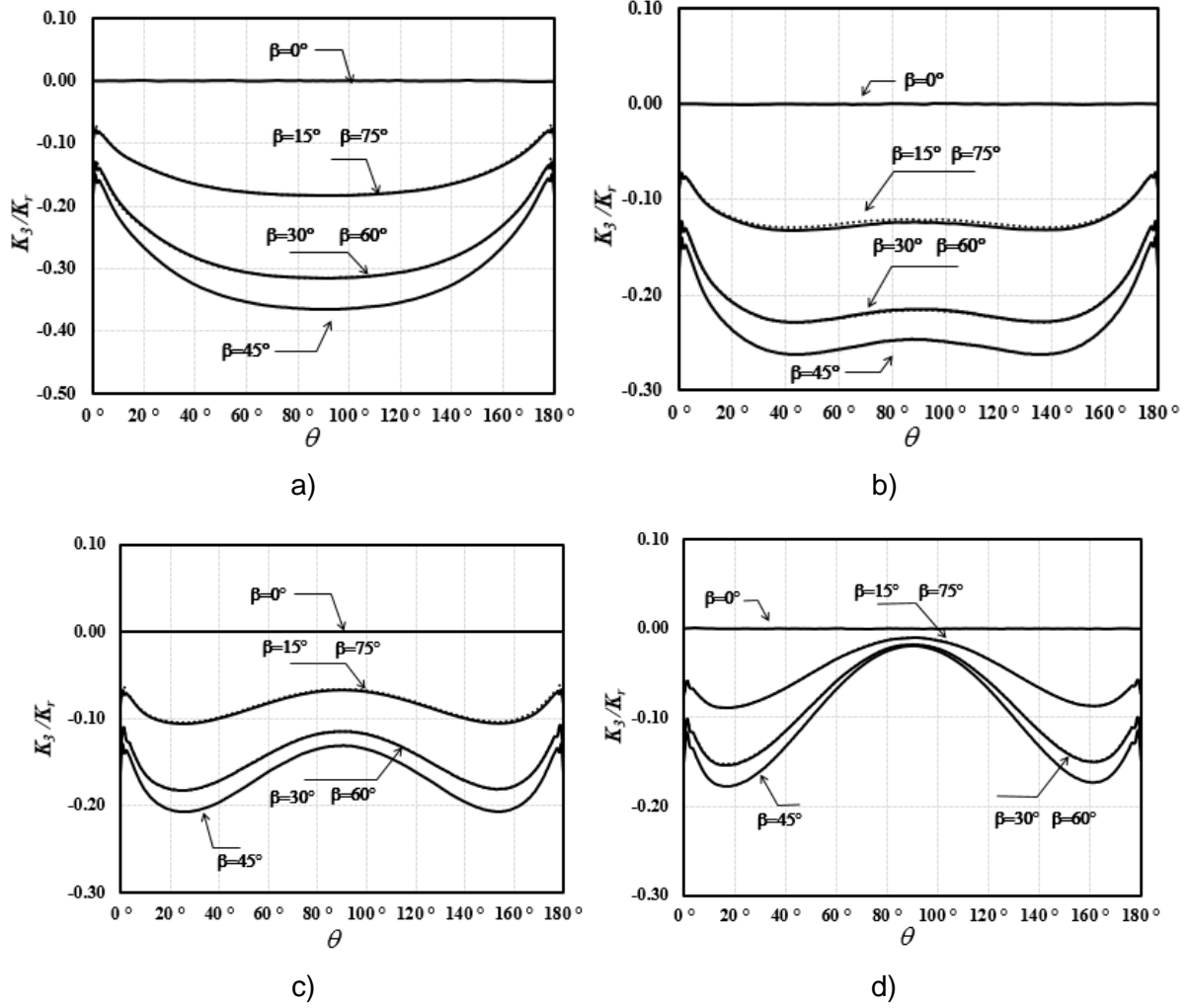
Şekil 3.2.55'te normalize edilmiş mod-II gerilme şiddet faktörü dağılımları gösterilmektedir. Mod-II için en yüksek değerlerin çatlağın yatayla yaptığı açı olan  $45$  derecede (maksimum kayma gerilmesinin olduğu düzlem) elde edildiği görülmektedir. Sıfır derecede ise normalize edilmiş  $K_2$  değeri 0'dır. İlgili açılarda aynı kayma gerilmesi değerlerine sahip olduklarından dolayı, birbirlerini  $90$  dereceye tamamlayan  $15$  ve  $75$  ile  $30$  ve  $60$  derece eğik açılı

düzlemlerdeki yüzey çatlakları, beklendiği üzere aynı mod-II gerilme şiddet faktörlerini oluşturmaktadır.



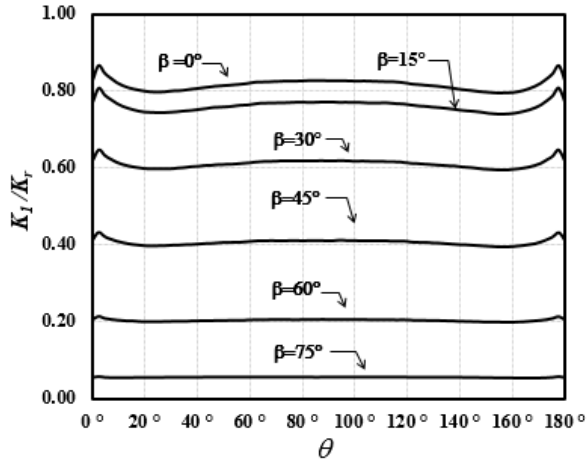
Şekil 3.2.55. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

Şekil 3.2.56'da normalize edilmiş mod-III gerilme şiddet faktörü dağılımları gösterilmektedir. Mod-III için en yüksek değerlerin çatlakın yatayla yaptığı açı olan 45 derecede (maksimum kayma gerilmesinin olduğu düzlem) elde edildiği görülmektedir. Sıfır derecede ise normalize edilmiş  $K_3$  değeri 0'dır.

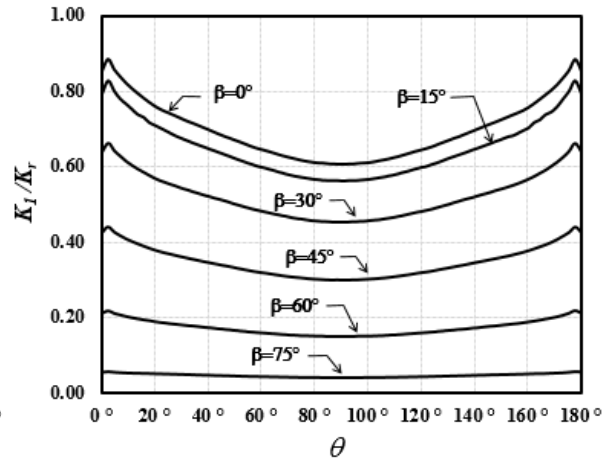


Şekil 3.2.56. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

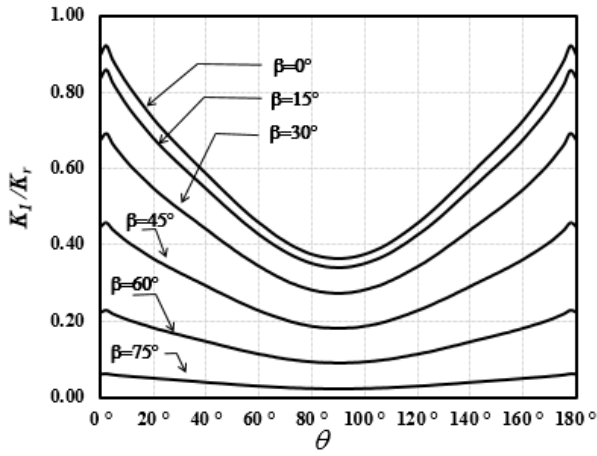
Yukarıda Şekil 3.2.54-3.2.56'da  $a/c=0.25$  ve farklı  $a/t$  değerleri için verilen normalize edilmiş mod-I, mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörü dağılımları, aynı format ve sıra ile  $a/c=0.5$ , 1.0, 2.0 ve 4.0 için Şekil 3.2.57-3.2.68'de verilmiş olup, benzer sonuçlar bu grafiklerden çıkarılabilmektedir.  $a/c$  değeri 1 ve daha büyük olduğunda normalize edilmiş mod-I GŞF değerlerinin sıfırın altına düştüğü görülmektedir. Bu da, çatlak ucunun ilgili bölgelerinde çatlak yüzeylerinin kapandığını göstermektedir. Bu kısımlar mod-II ve mod-III grafiklerinde de noktali şekilde gösterilmiştir. Not edilmelidir ki, yapılan analizlerde çatlak yüzeylerinde temas mekaniği dâhil edilmediğinden dolayı, bu durumdaki analiz sonuçları tam olarak doğru olmamaktadır. Ancak, ilgili durumlar için çatlak yüzeylerinin kapandığı ve dolayısıyla bu durumun açılan bir çatlakla göre mekanik olarak daha emniyetli olduğunun bilinmesi oldukça faydalı bir bilgidir.



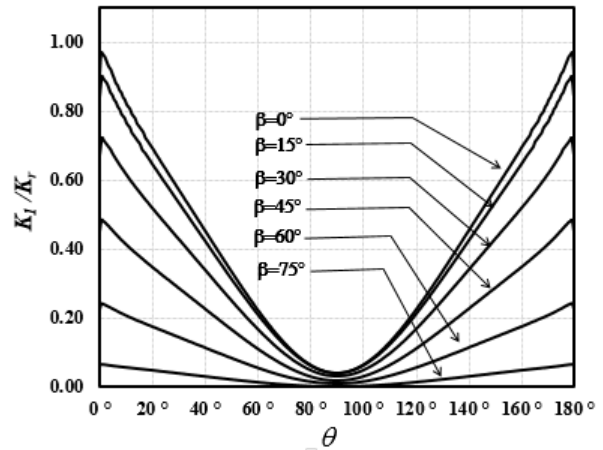
a)



b)

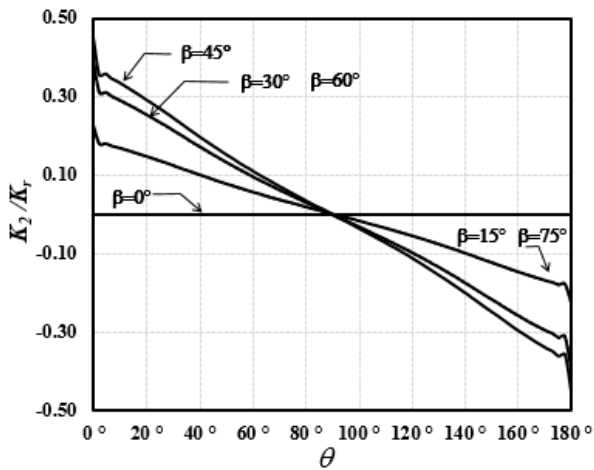


c)

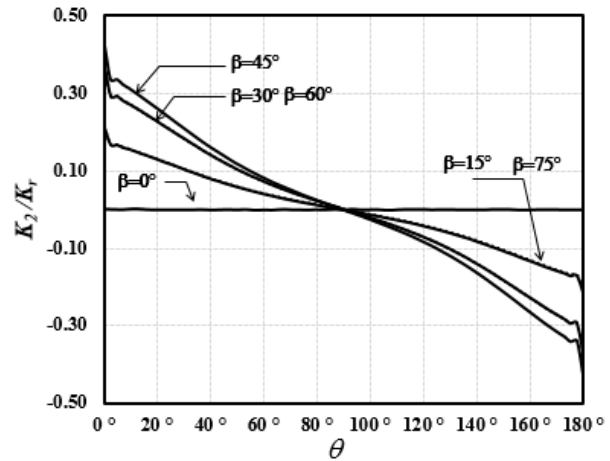


d)

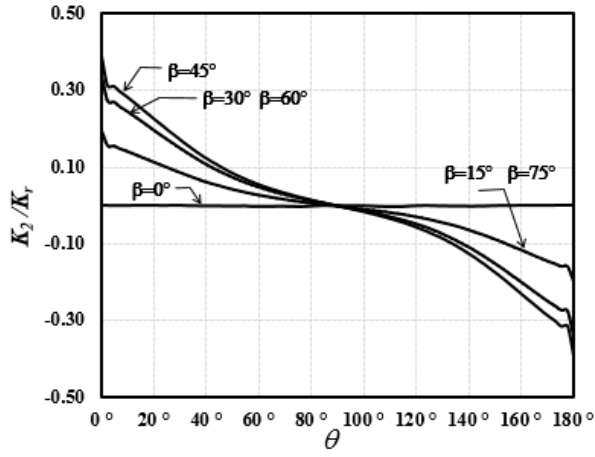
Şekil 3.2.57. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



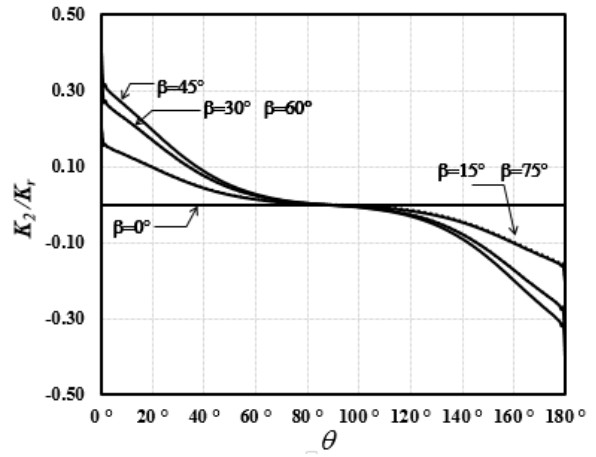
a)



b)

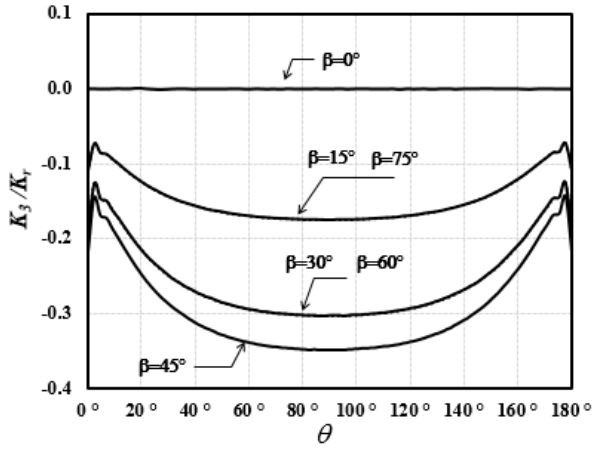


c)

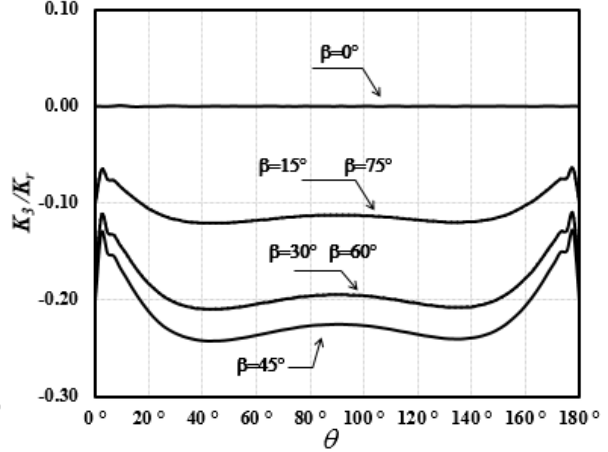


d)

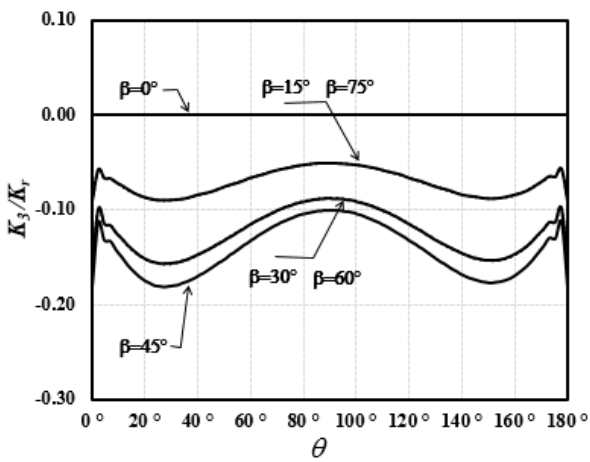
Şekil 3.2.58. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



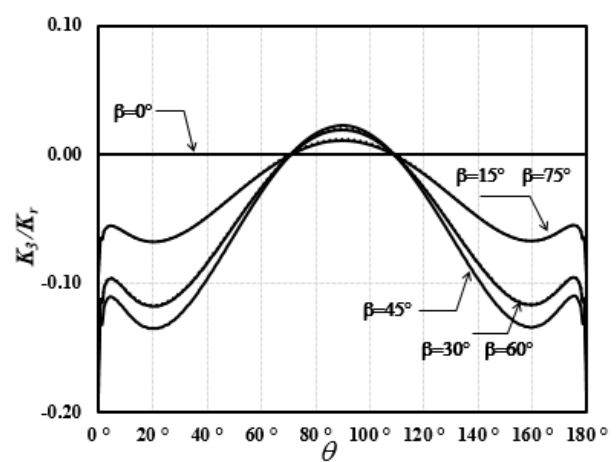
a)



b)

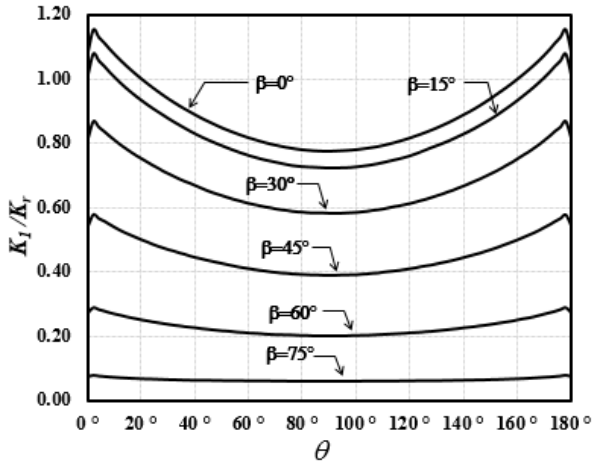


c)

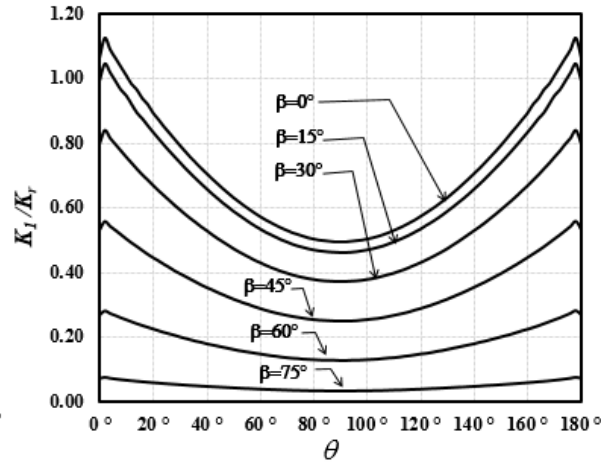


d)

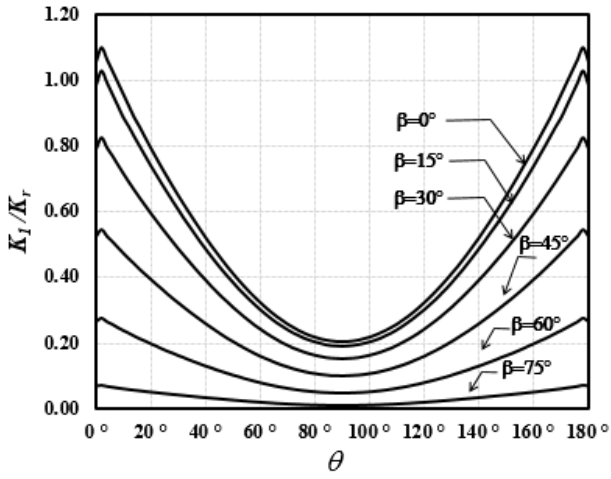
Şekil 3.2.59. Normalize edilen  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



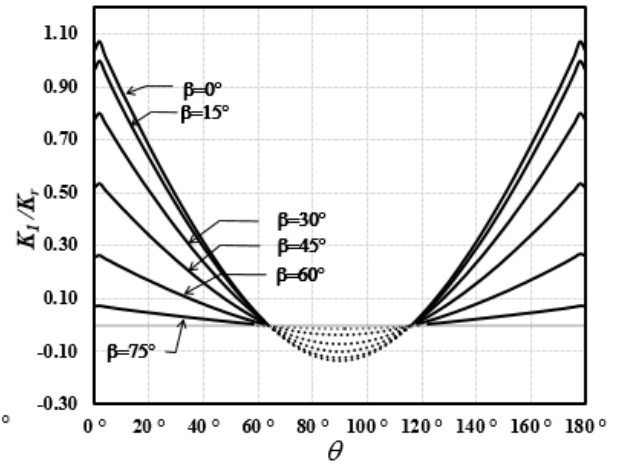
a)



b)

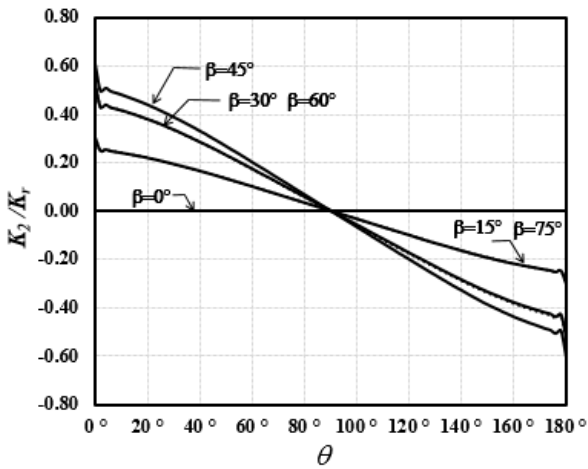


c)

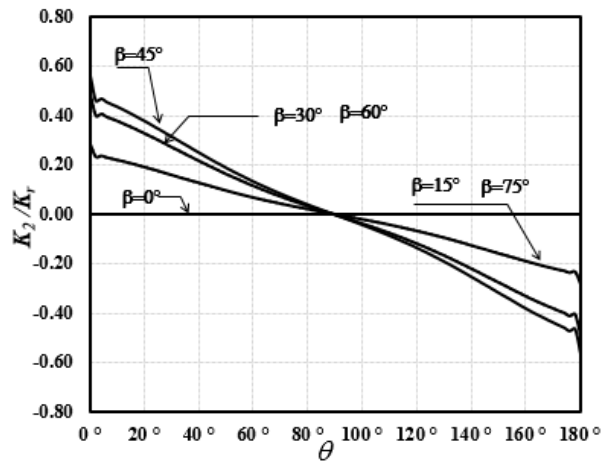


d)

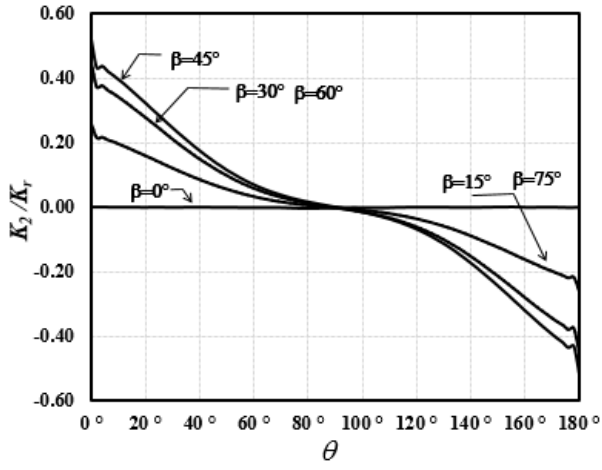
Şekil 3.2.60. Normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



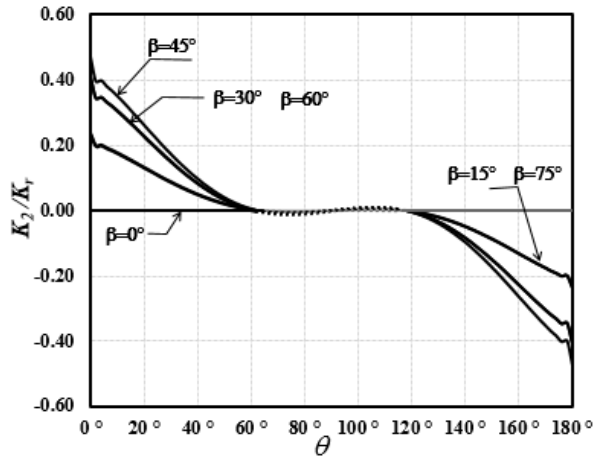
a)



b)

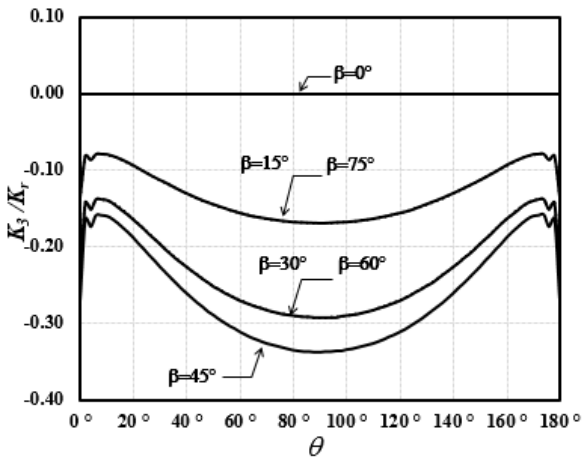


c)

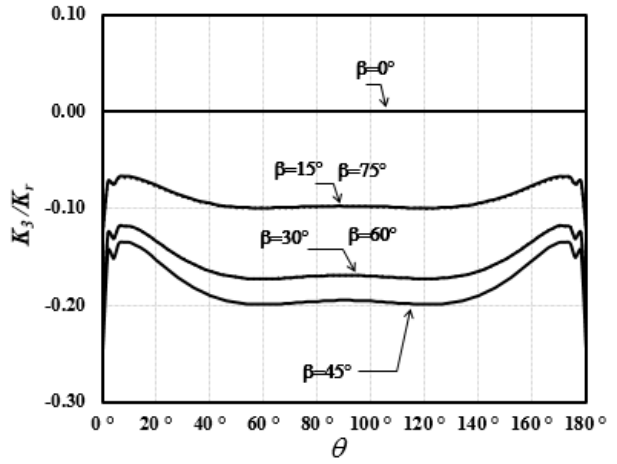


d)

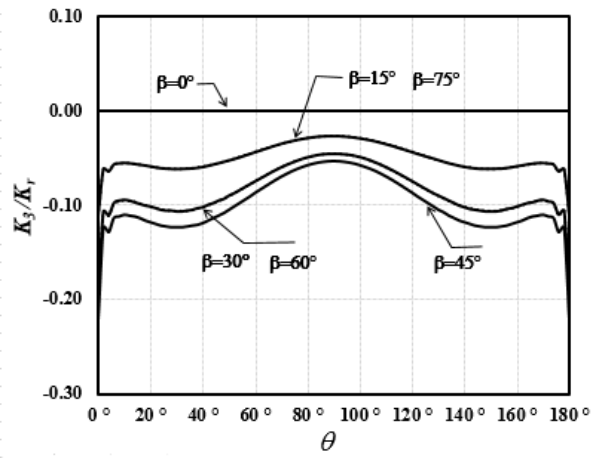
Şekil 3.2.61. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



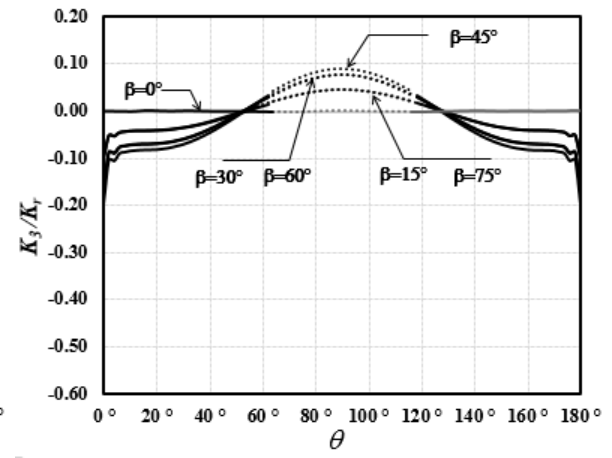
a)



b)

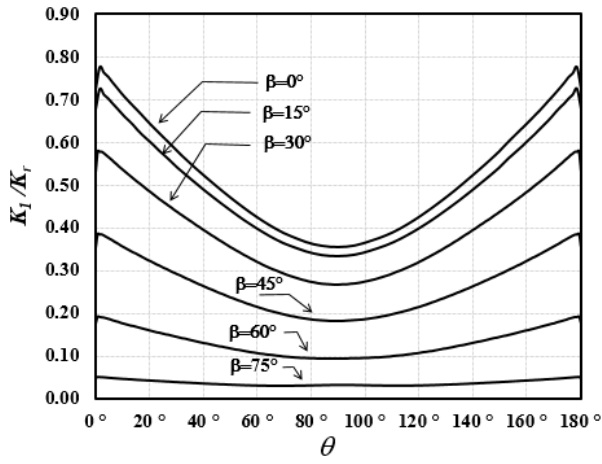


c)

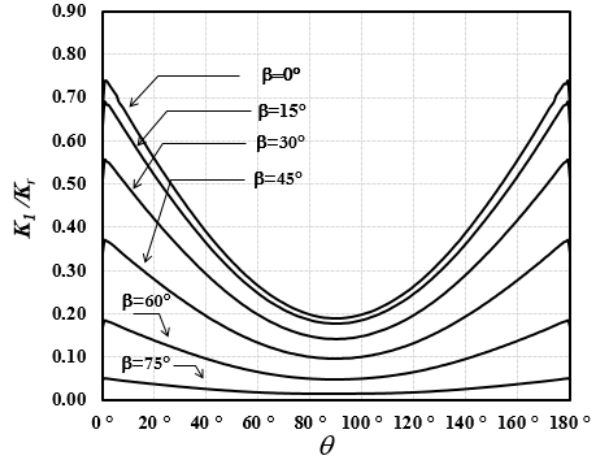


d)

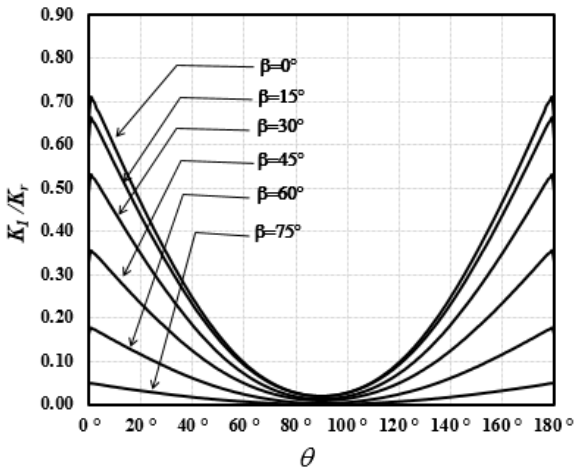
Şekil 3.2.62. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



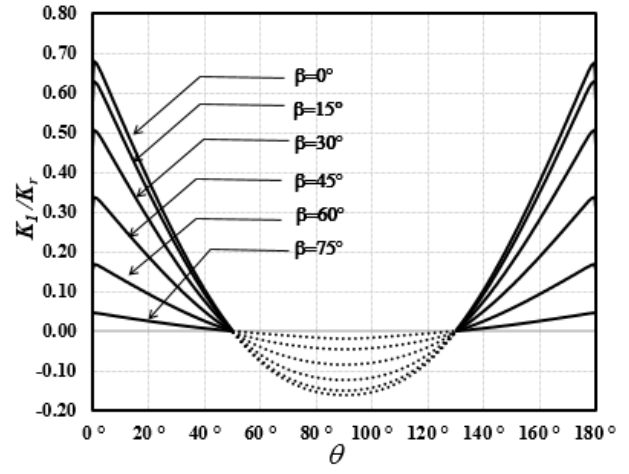
a)



b)

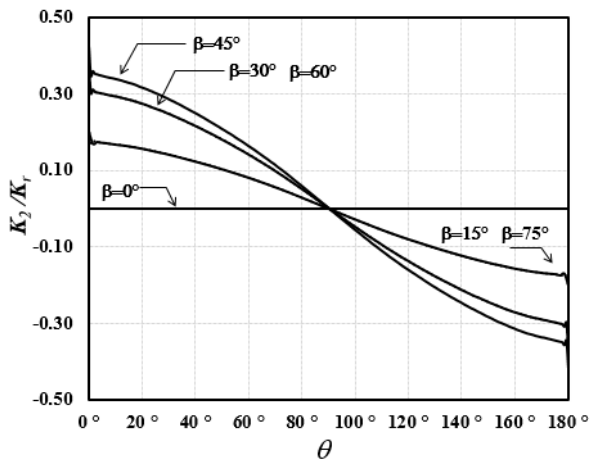


c)

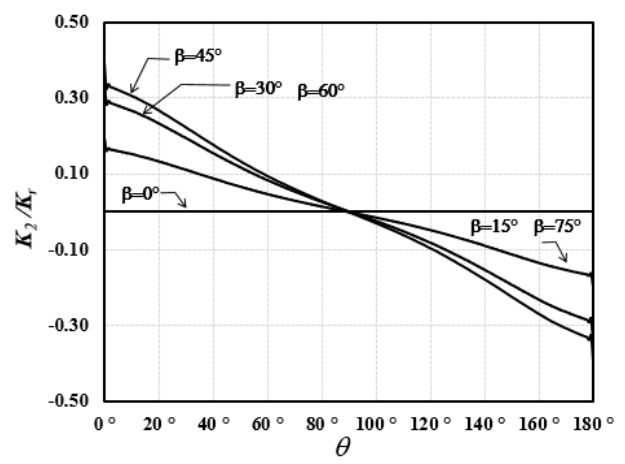


d)

Şekil 3.2.63. Normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

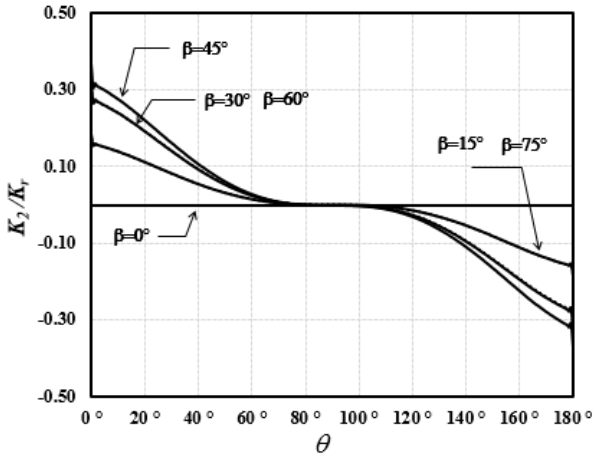


a)

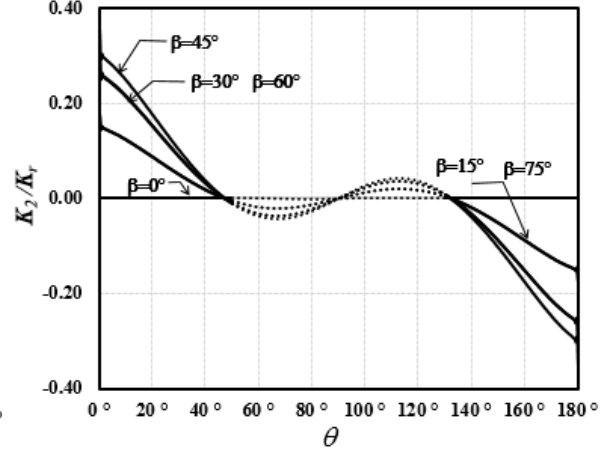


b)



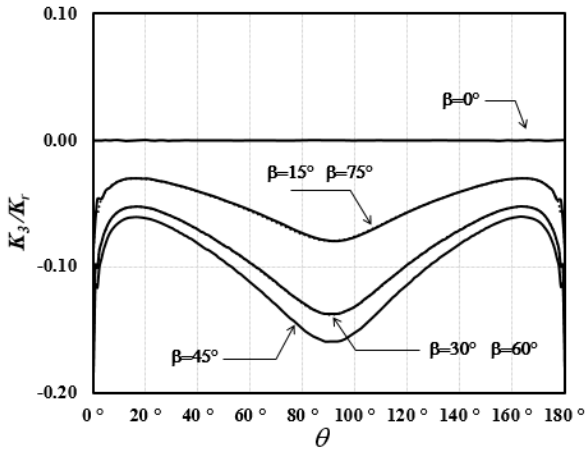


c)

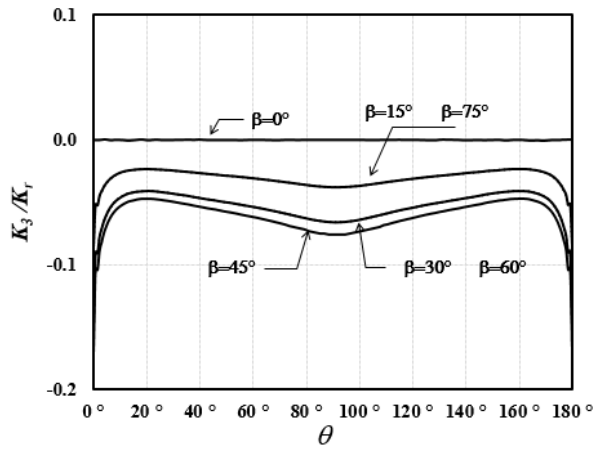


d)

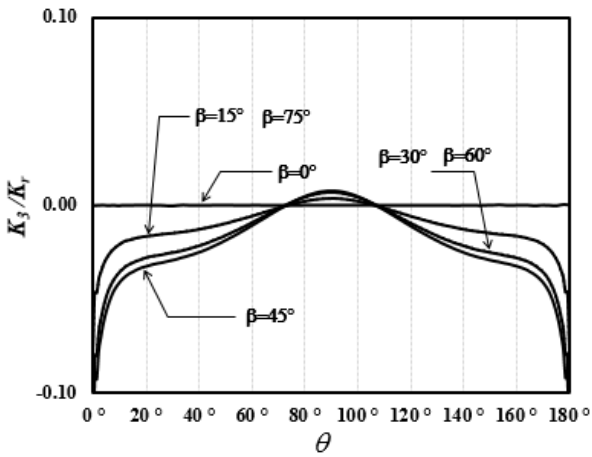
Şekil 3.2.64. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



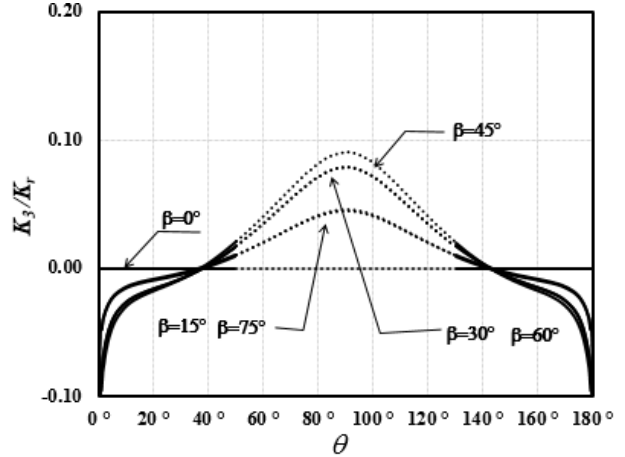
a)



b)

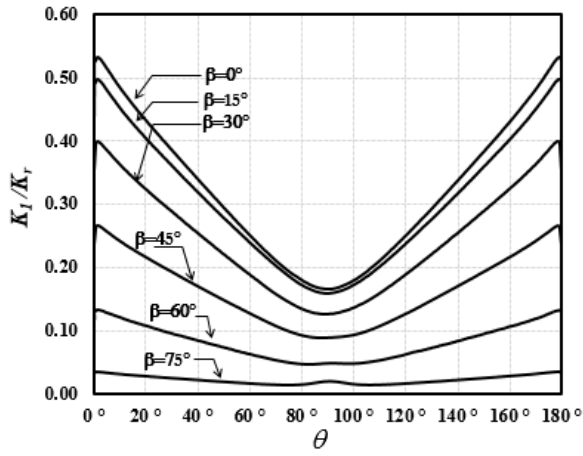


c)

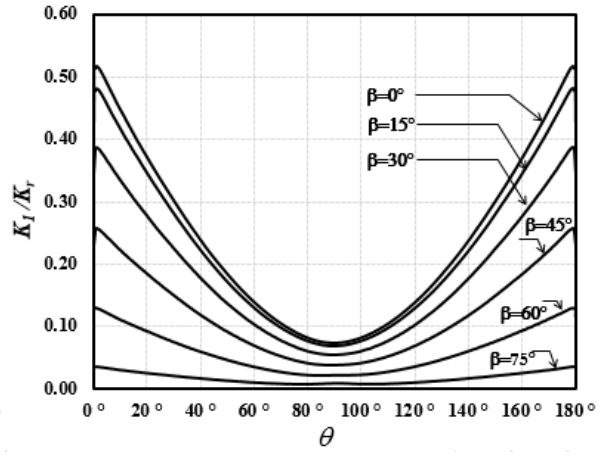


d)

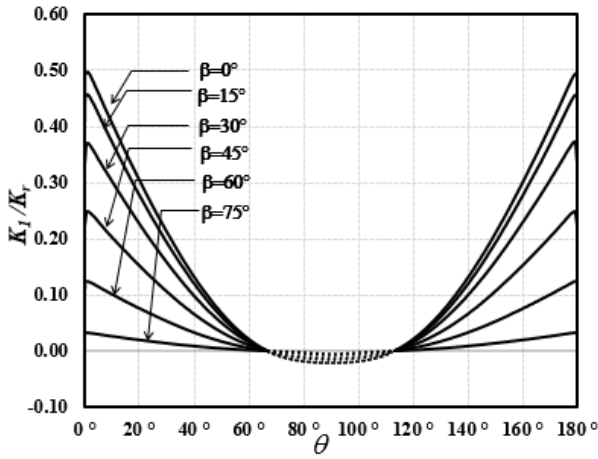
Şekil 3.2.65. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



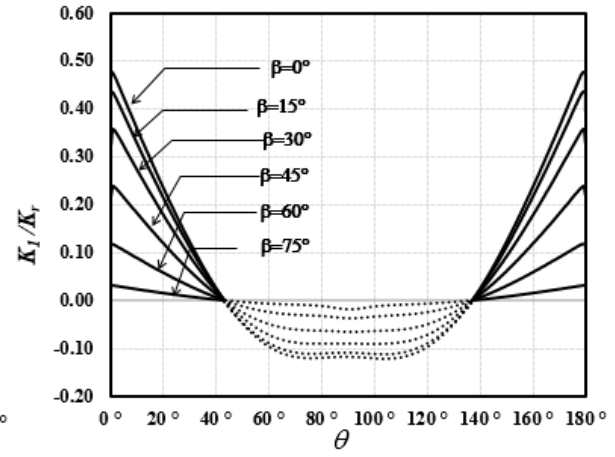
a)



b)

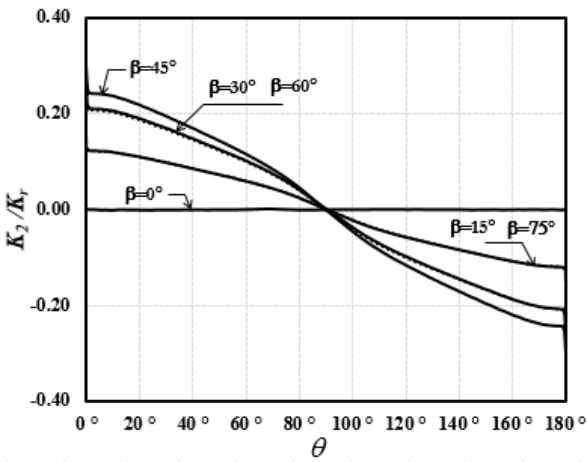


c)

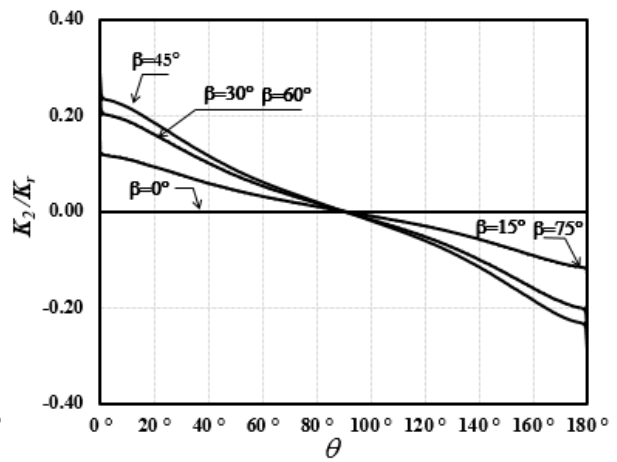


d)

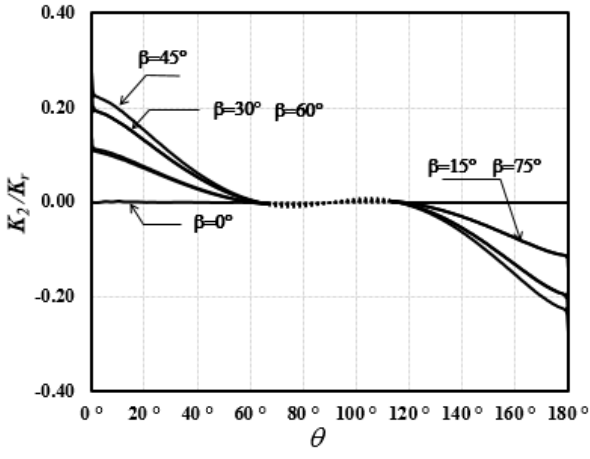
Şekil 3.2.66. Normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



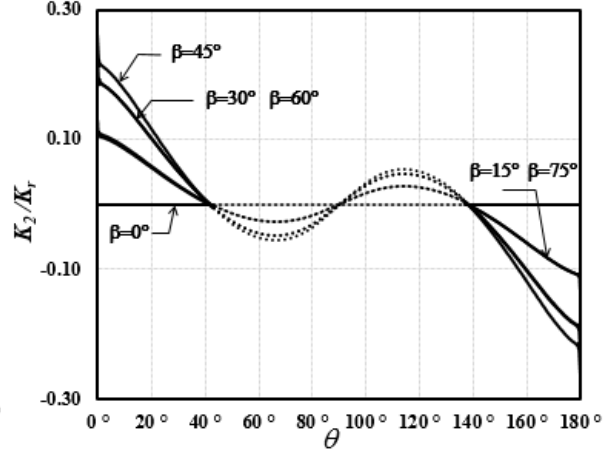
a)



b)

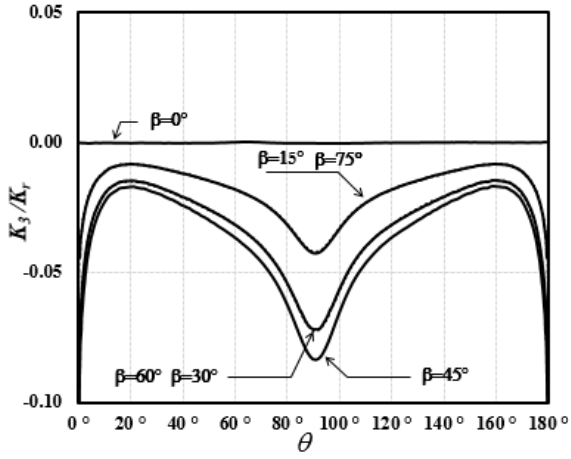


c)

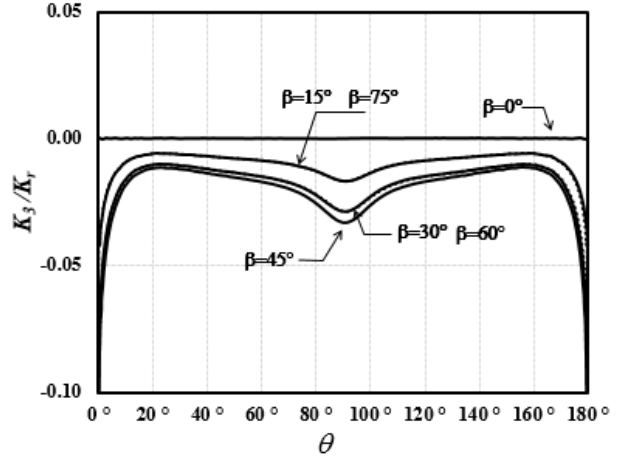


d)

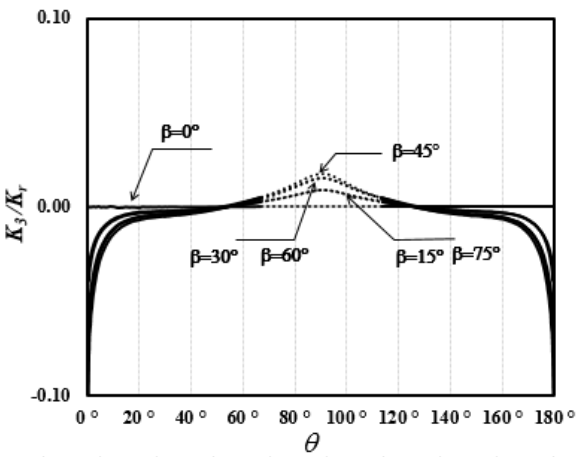
Şekil 3.2.67. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



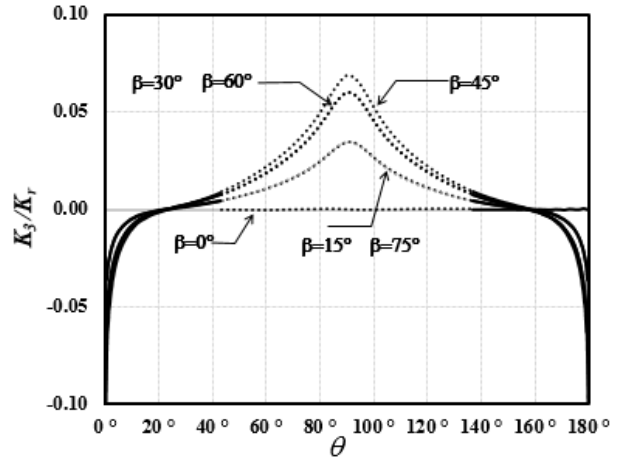
a)



b)



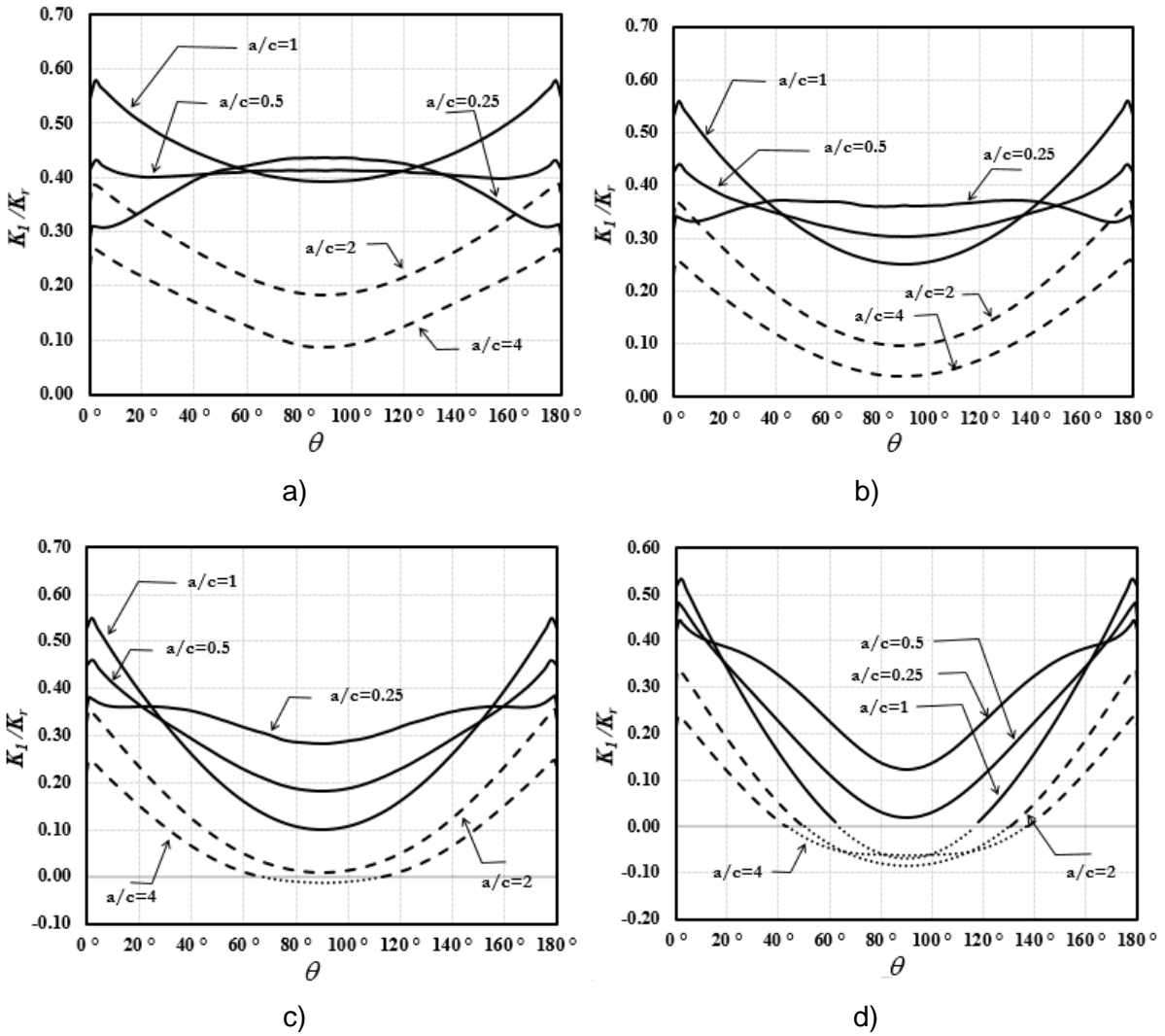
c)



d)

Şekil 3.2.68. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

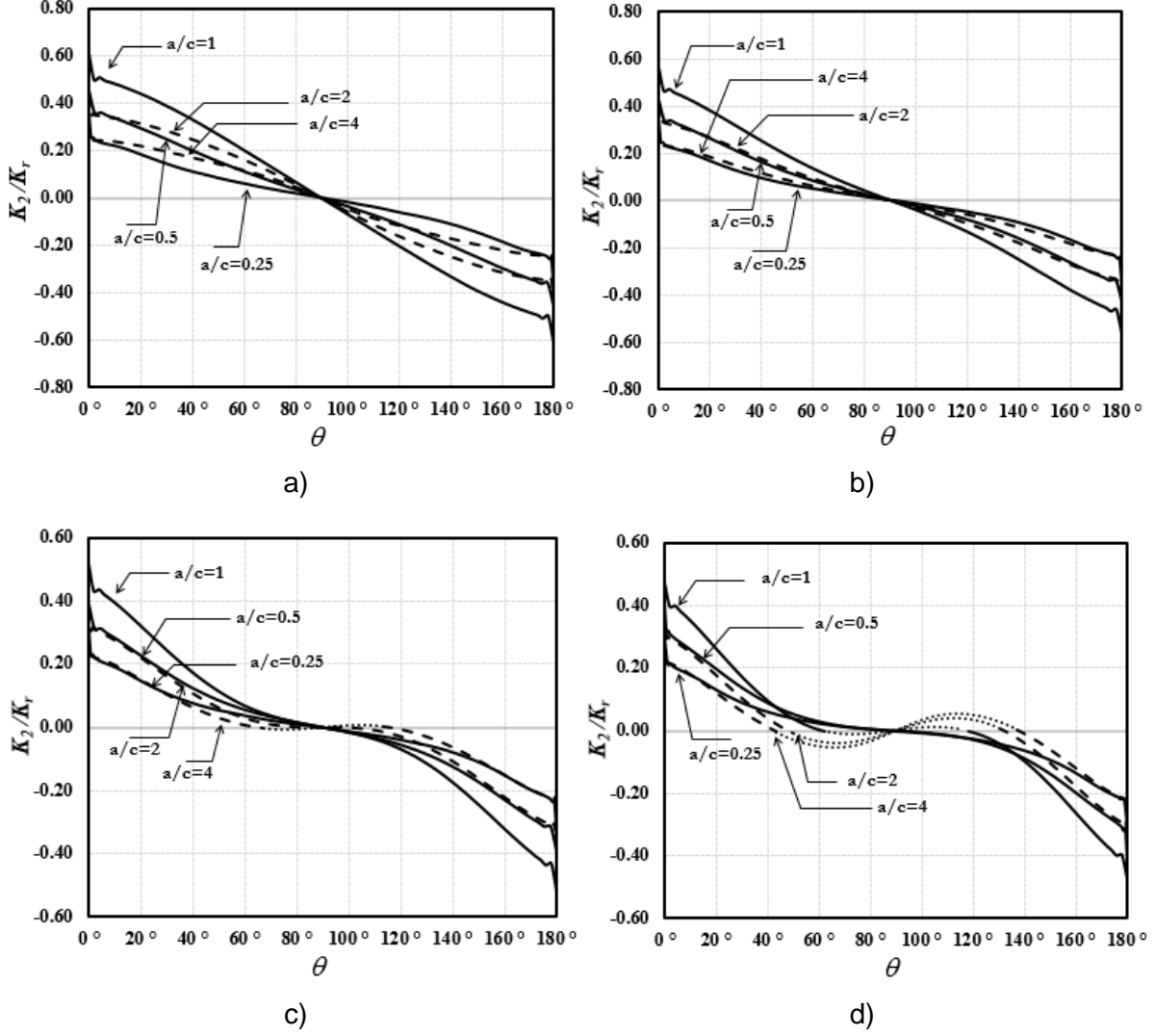
Şekil 3.2.54-3.2.68'de verilen grafiklerde farklı eğilme açıları için sonuçlar verilmiştir.Yine burada diğer parametreler olan normalize edilmiş çatlak derinliği ( $a/t$ ) ve çatlak şekil oranı ( $a/c$ ) etkilerinin de müstakil grafikler ile gösterilmesi istenen bir durumdur. Bu amaçla, çatlak bölgesinde orta seviye karışık mod gerilme/yüklemeye oluşturan  $45^\circ$  eğik açılı eliptik yüzey çatlakları için hesaplanan normalize edilmiş karışık mod gerilme şiddet faktörü dağılımları, her bir grafikte ayrı bir  $a/t$  oranı temsil edilerek farklı  $a/c$  oranlarında karşılaştırılmıştır (Şekil 3.2.69-3.2.71).



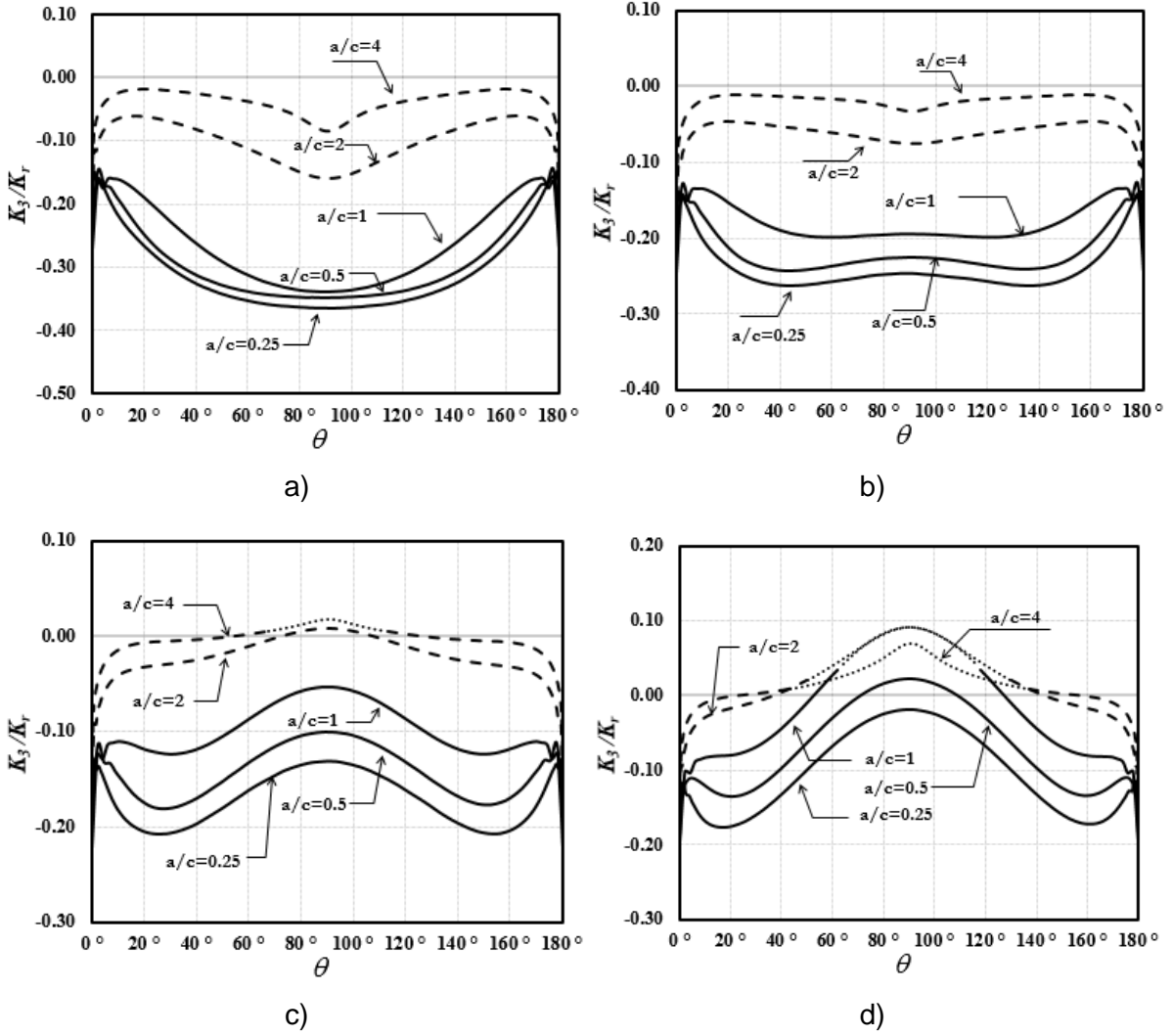
Şekil 3.2.69. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

Şekil 3.2.69'da,  $a/c$  oranı arttıkça, derinlik noktası ile mukayese edildiğinde mod-I gerilme şiddet faktörünün serbest yüzeylerde daha fazla olduğu,  $a/c$  oranı azaldıkça ise çatlak derinlik noktasında arttığı ve  $a/c=0.25$  için maksimum değerini aldığı görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 3.2.70-3.2.71'den, farklı  $a/c$  oranları için mod-II ve -III gerilme şiddet faktörlerinin, çatlak ucu boyunca hem değer hem de dağılım açısından ciddi oranda değişiklik gösterdiği

izlenmektedir. Şekil 3.2.69-3.2.74 arasındaki grafikleri daha iyi anlamak için sabit  $a/t$  grafiklerinde  $a/c=2, 4$  ve sabit  $a/c$  grafiklerinde  $a/t=0.6, 0.8$  durumları kesikli çizgiler ile gösterilmiştir.

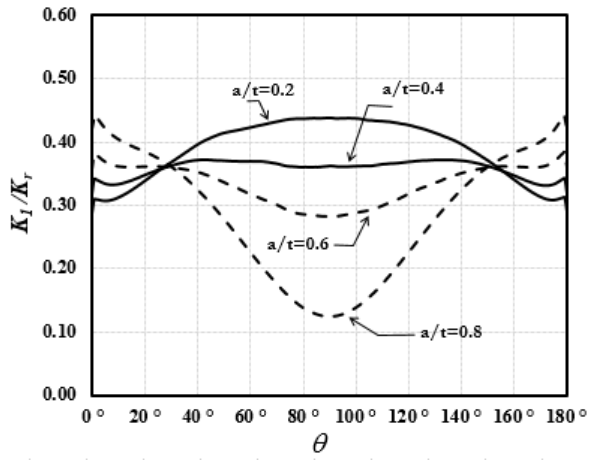


Şekil 3.2.70. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

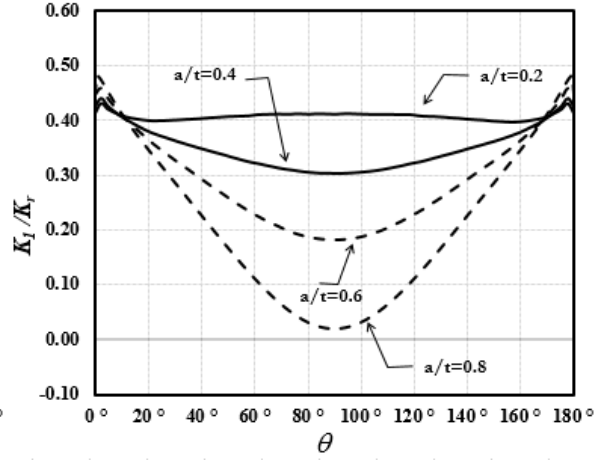


Şekil 3.2.71. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

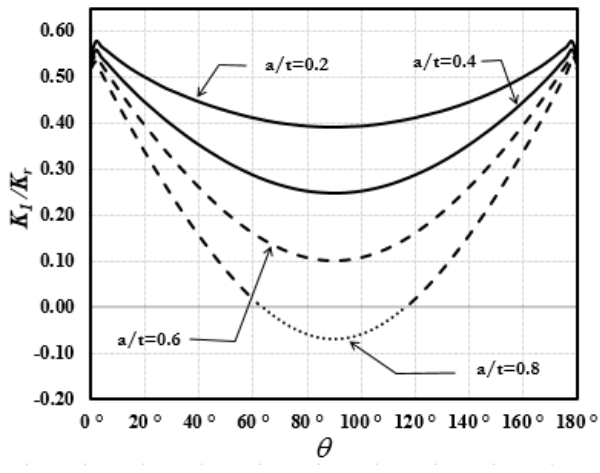
Benzer şekilde, çatlak bölgesinde orta seviye karışık mod gerilme/yüklemeye oluşturan  $45^\circ$  eğim açılı eliptik yüzey çatlakları için hesaplanan gerilme şiddet faktörü dağılımları, her bir grafikte ayrı bir  $a/c$  oranı temsil edilerek farklı  $a/t$  oranlarında karşılaştırılmıştır (Şekil 3.2.72-3.2.74).



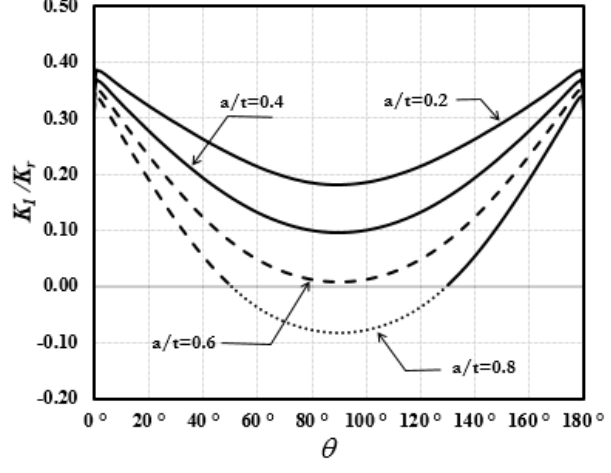
a)



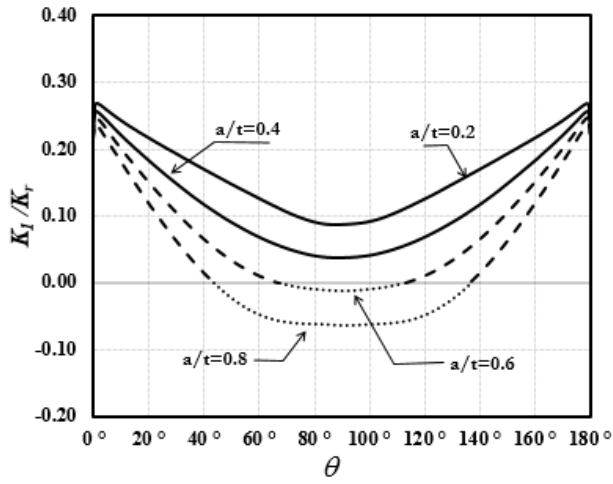
b)



c)

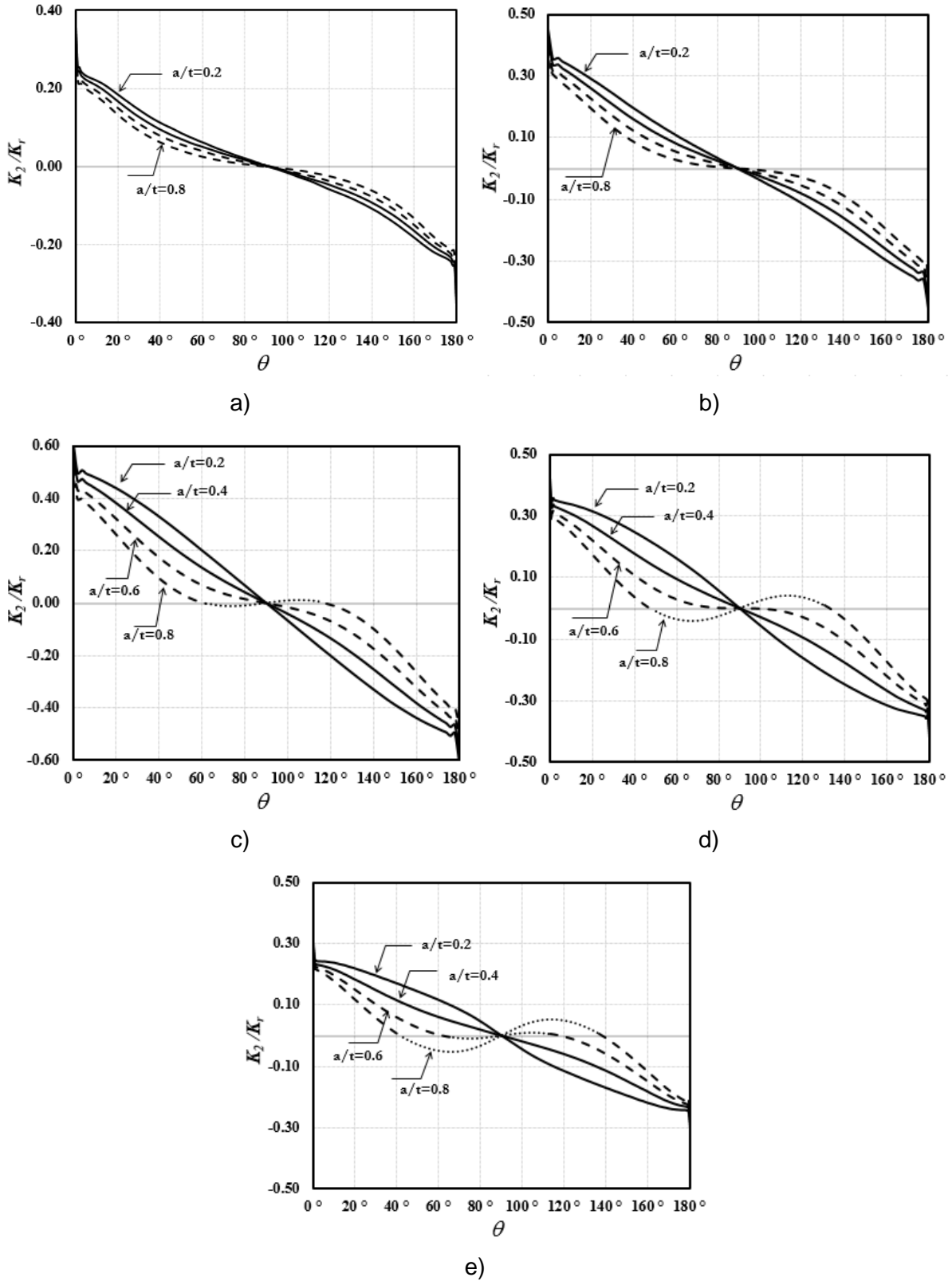


d)



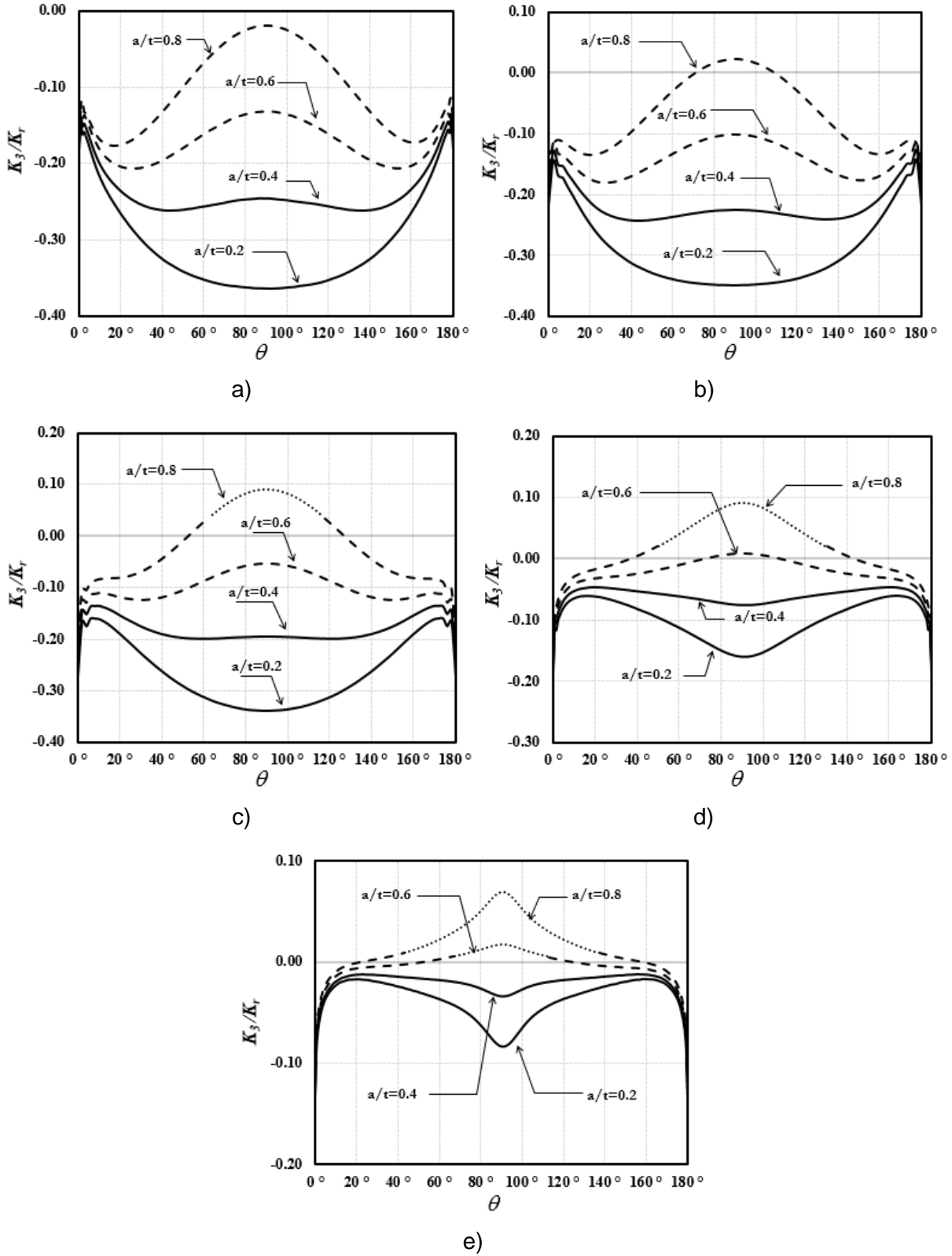
e)

Şekil 3.2.72. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$



Şekil 3.2.73. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$

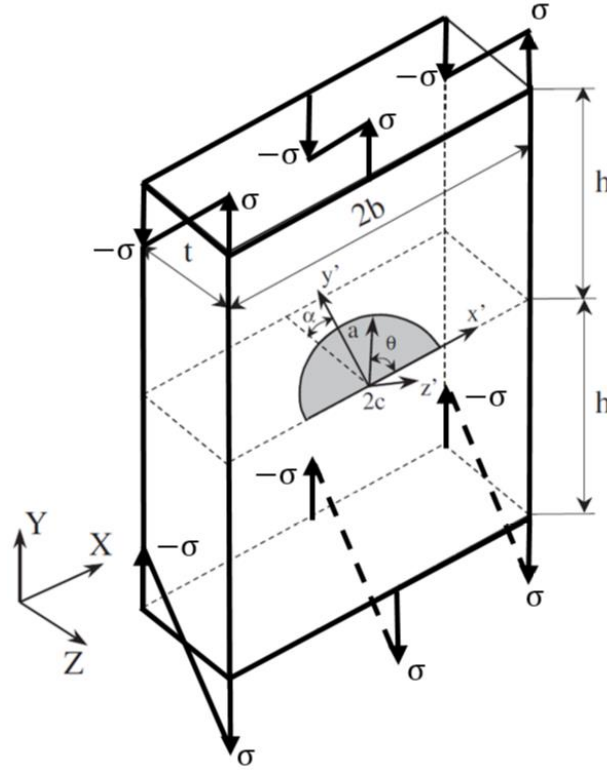




Şekil 3.2.74. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $\beta=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$

Aşağıdaki alt bölümde, eğilme gerilmesi altında bulunan ve dönmüş eliptik yüzey çatlakları içeren levha için ilgili çözümler sunulmaktadır.

### 3.2.4 Eğilme Gerilmesi Altında Bulunan Levhada Dönmüş Yüzey Çatlağı Analizleri

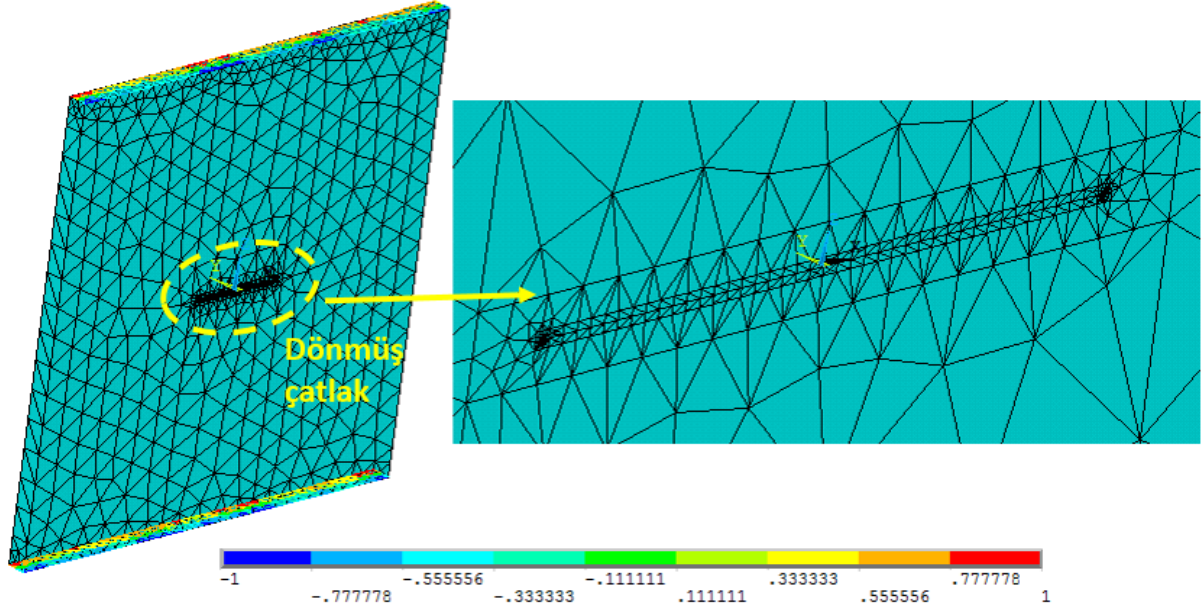


Şekil 3.2.75. Eğilme gerilmesi altında bulunan levhada dönmüş yüzey çatlağı

Eğilme gerilmesi altında bulunan ve yarı eliptik dönmüş çatlak içeren levha problemi Şekil 3.2.75'te verilmektedir. Tablo 3.2.1'de verilen parametreler kullanılarak değişik kombinasyonları temsil eden her bir problem için geçerli boyut ve yönlerde yüzey çatlakları içeren sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Çatlak ucunda oluşan gerilme şiddet faktörüne etki eden parametreler arasında çatlakın levha kesiti ile yaptığı  $\alpha$  açısı da bulunmaktadır. Üniform çekme gerilmesi altında bulunan dönmüş yüzey çatlağında olduğu gibi  $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  açı değerleri için analizler yapılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere,  $\alpha$  açısının değişimi ile çatlak ucu boyunca kayma modu ve yırtılma modu aktif hale gelmektedir.

Diğer çatlak problemlerinde olduğu gibi, eğilme gerilmesi altında bulunan ve dönmüş çatlak içeren levha için ilgili sonlu elemanlar modelleri ANSYS programı kullanılarak oluşturulmuş ve FRAC3D kullanılarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.76'da  $a/c=0.25$ ,  $a/t=0.6$ ,  $\alpha=15^\circ$  durumunu temsil eden sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Levha modelinin alt ve üst yüzey elemanlarının sınırlarında görülen renkli çizgiler eğilme gerilmesi konturlarını temsil etmektedir. Bir başka deyişle, doğrusal ve anti-simetrik olarak ön yüzeyden arka yüzeye çekme

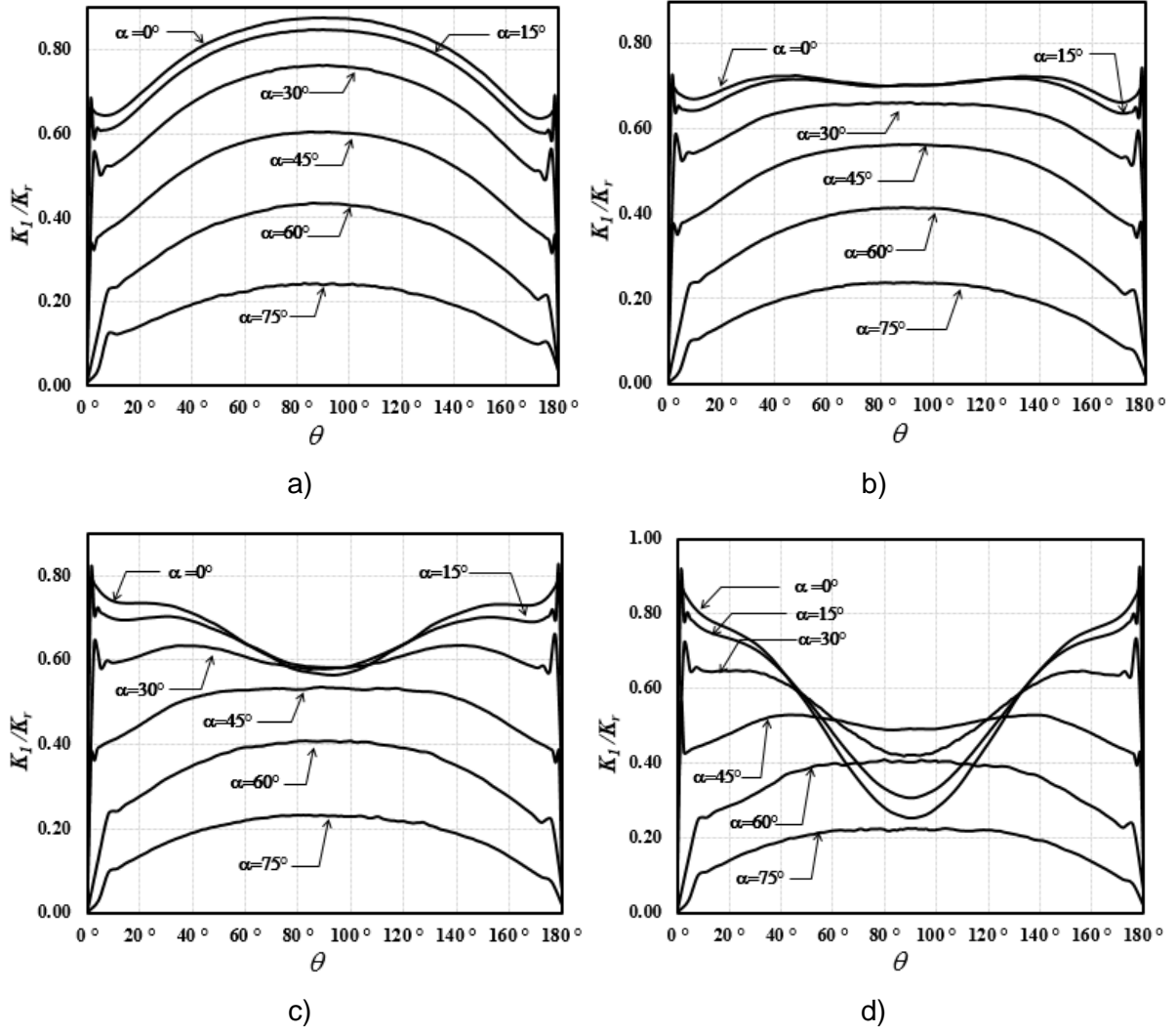
gerilmesinden basma gerilmesine dönüşen aksenal gerilme dağılımı eğilme momenti yüklemesini temsil etmektedir.



Şekil 3.2.76. Eğilme gerilmesi altında dönmüş yüzey çatlakları içeren levhanın sonlu elemanlar modeli: genel görüntü (solda), çatlak bölgesi yakın görüntüsü (sağda)

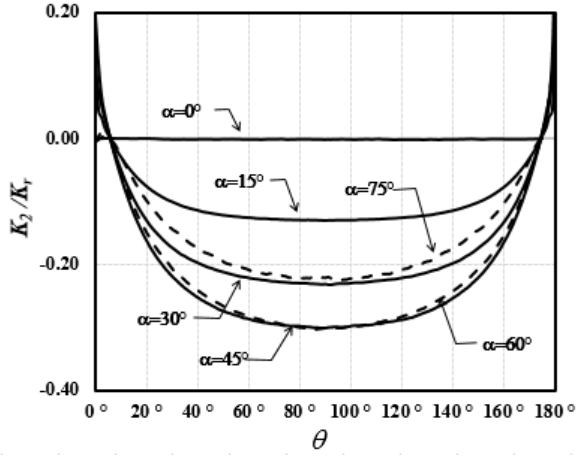
Sınır şartları olarak, kalınlık yönünde levhanın merkezi sıfır olacak şekilde doğrusal değişen yayılı yük gerilmesi üst taban ve alt taban alanlarına uygulanarak eğilme momenti tanımlanmıştır. Alt taban köşelerinden bir nokta üç eksende, diğer bir nokta iki eksen ve başka bir nokta ise tek eksende sabitlenmiştir. Böylece levhanın rijit cisim hareketi kısıtlanmıştır. FRAC3D kullanılarak karışık mod gerilme şiddet faktörleri hesaplanmış ve Denklem 3.2.1-3.2.3 kullanılarak hesaplanan referans  $Kr$  ile gerilme şiddet faktörleri normalize edilmiştir.

Elde edilen tüm kombinasyonlar içerisinde, çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı  $a/c=0.25$ , çatlak derinliği/et kalınlığı oranı  $a/t$  sırasıyla 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 durumları için karışık mod gerilme şiddet faktörlerinin dağılımları Şekil 3.2.77-3.2.79'da verilmektedir. Tüm parametrelerin değişik değerlerini içeren Şekil 3.2.77-3.2.91 arasındaki grafikleri daha iyi anlamak için normalize edilmiş mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörü dağılımları,  $\alpha=60$  ve  $75$  dereceleri için kesikli çizgiler ile gösterilmiştir.

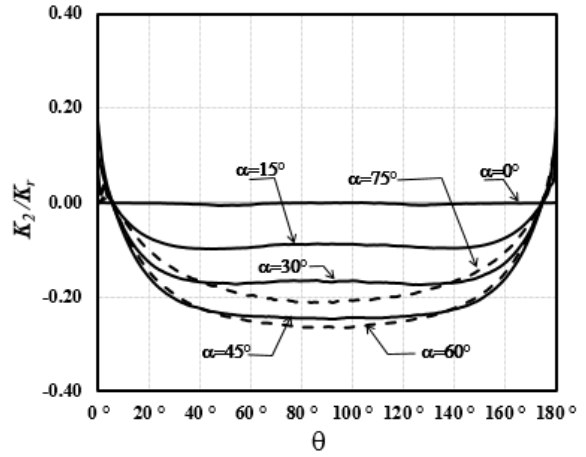


Şekil 3.2.77. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

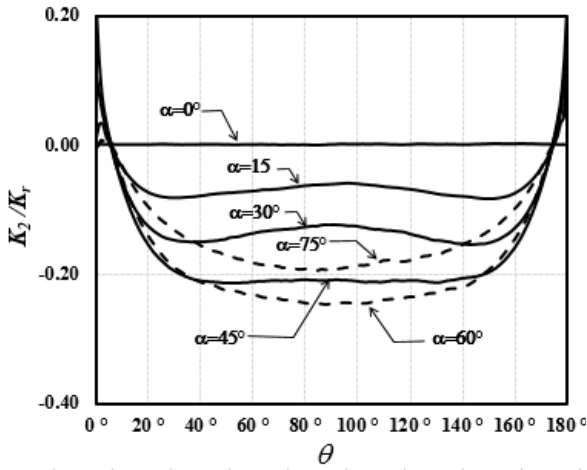
Şekil 3.2.77'de,  $a/t$  oranı arttıkça verilen bir çatlak dönme açısı için normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörlerinin derinlik noktası bölgesinde azaldığı serbest yüzey noktalarında arttığı görülmektedir.



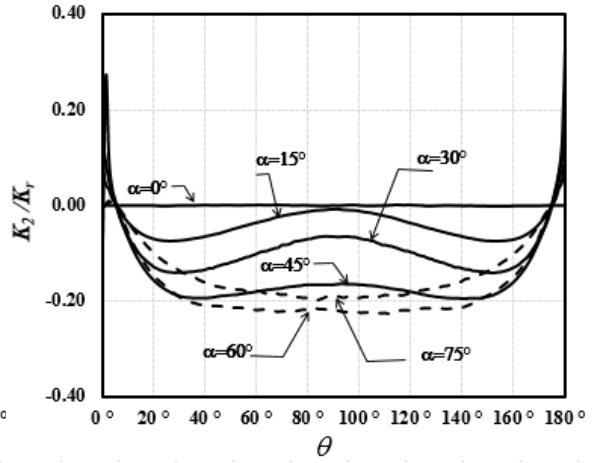
a)



b)



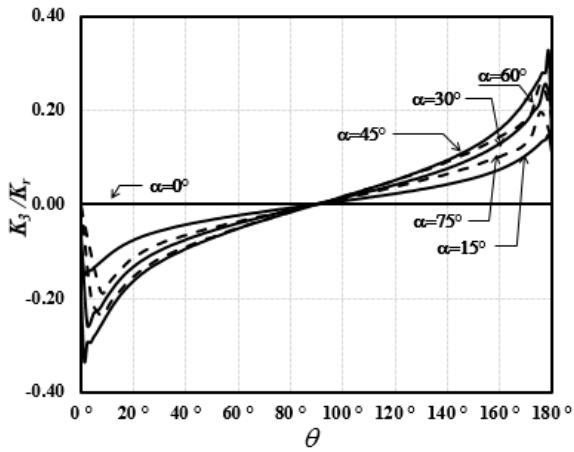
c)



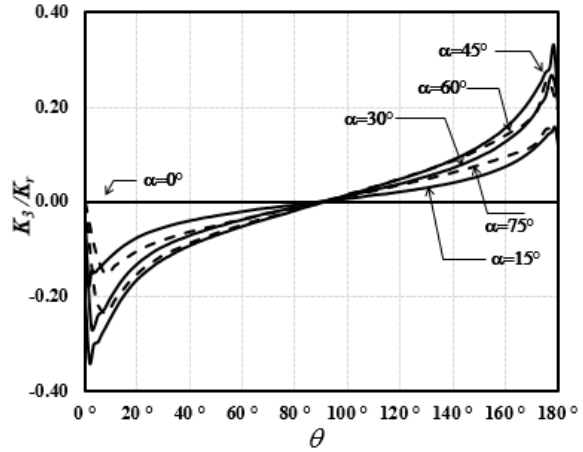
d)

Şekil 3.2.78. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

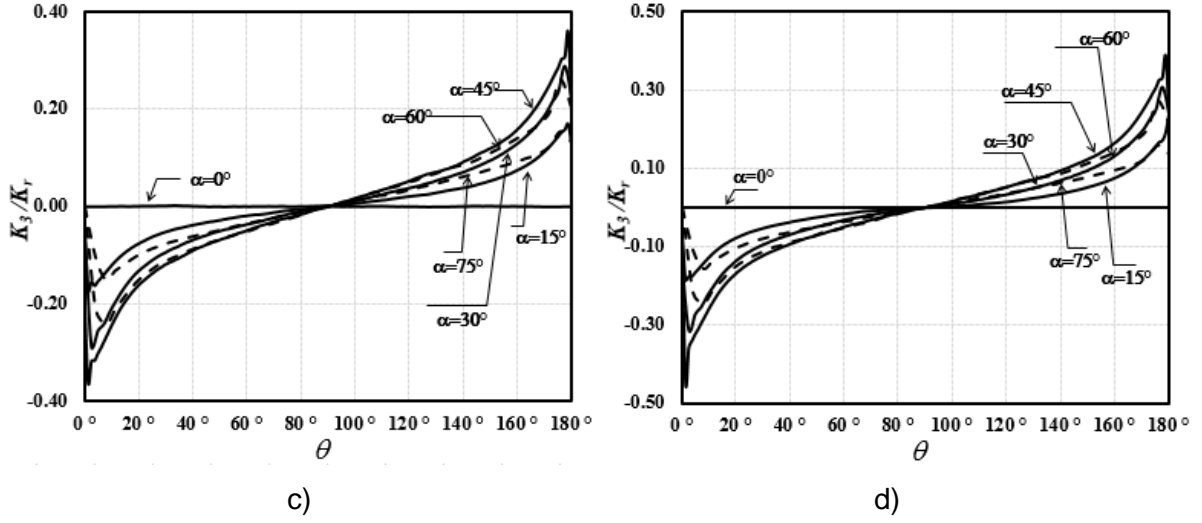
Şekil 3.2.78'de,  $a/t$  oranı arttıkça verilen bir çatlak dönme açısı için normalize edilmiş mod-II gerilme şiddet faktörlerinin derinlik noktası bölgesinde azaldığı görülmektedir.



a)



b)

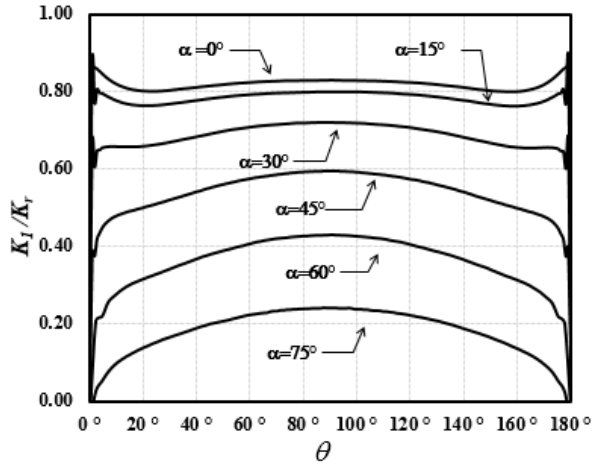


Şekil 3.2.79. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.25$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

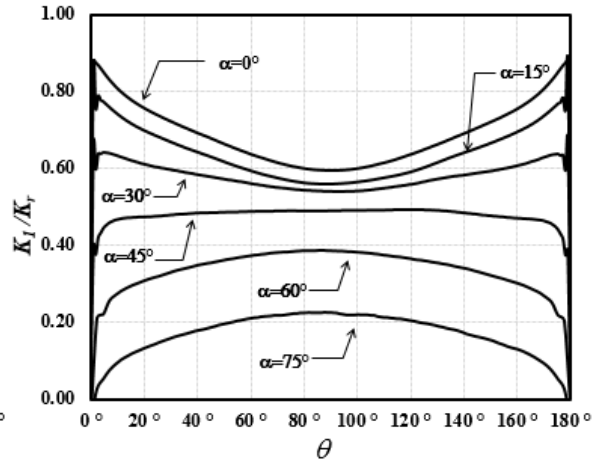
Şekil 3.2.79'da verilen grafiklerden,  $a/t$  arttıkça, verilen bir çatlak dönme açısı için serbest yüzey bölgelerinde normalize edilmiş mod-III gerilme şiddet faktörünün arttığı görülmektedir.

Benzer şekilde, Şekil 3.2.80-3.2.91'de diğer  $a/c$  oranları olan  $a/c=0.5$ , 1.0, 2.0, 4.0 için normalize edilmiş mod-I, -II ve -III gerilme şiddet faktörleri verilmektedir.

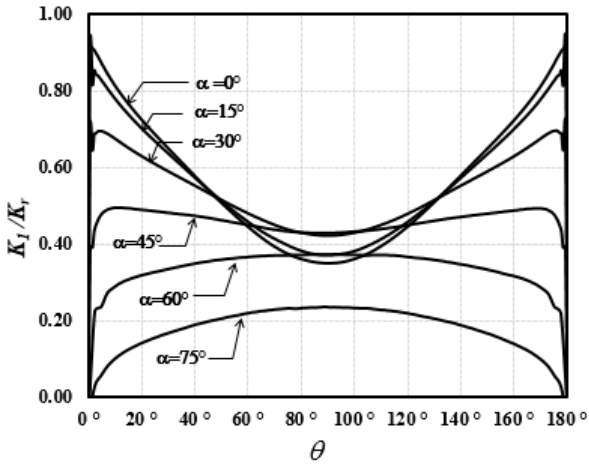
Eğilme gerilmesi altında bulunan eğik yüzey çatlağında olduğu gibi,  $a/c=1$ 'den başlayarak yüksek  $a/t$  oranlarında çatlak derinlik noktalarında negatif mod-I gerilme şiddet faktörü elde edilmektedir. Bu da, çatlak ucunun bu bölgelerinde çatlak yüzeylerinin kapanacağını göstermektedir. Bu bölgeler kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. Eğik çatlak probleminde de belirtildiği üzere, not edilmelidir ki, yapılan analizlerde çatlak yüzeylerinde temas mekaniği dâhil edilmediğinden dolayı, bu durumdaki analiz sonuçları tam olarak doğru olmamaktadır. Ancak, ilgili durumlar için çatlak yüzeylerinin kapandığı ve dolayısıyla bu durumun açılan bir çatlağa göre mekanik olarak daha emniyetli olduğunun bilinmesi oldukça faydalı bir bilgidir.



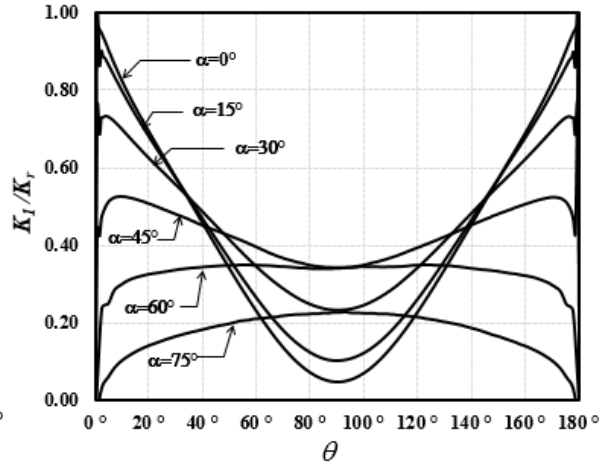
a)



b)

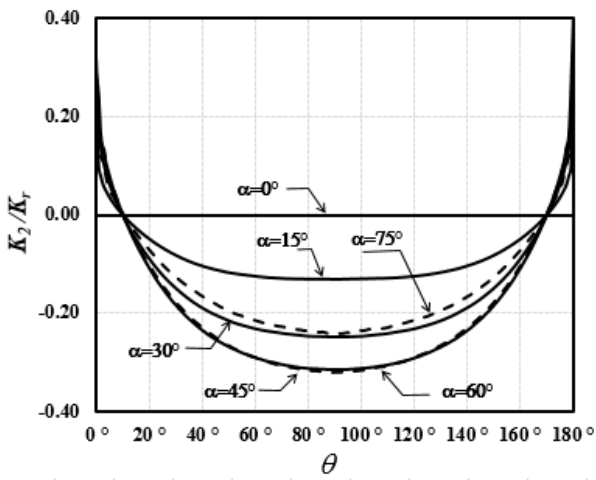


c)

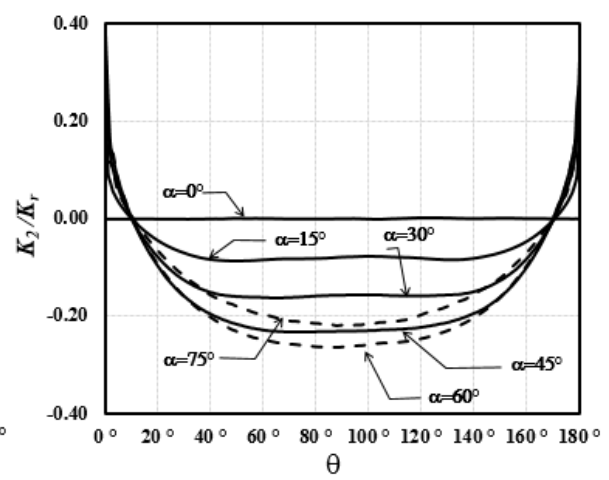


d)

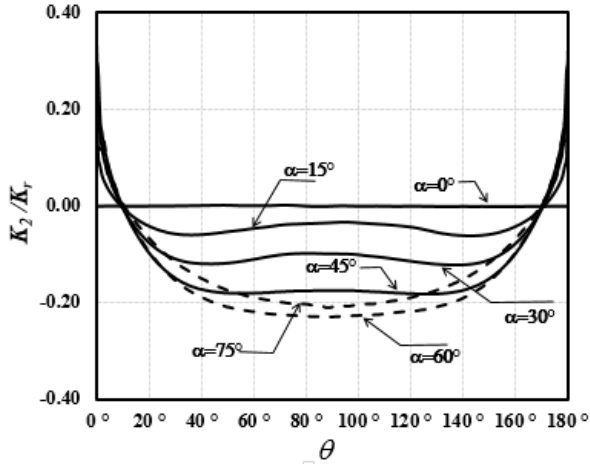
Şekil 3.2.80. Normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



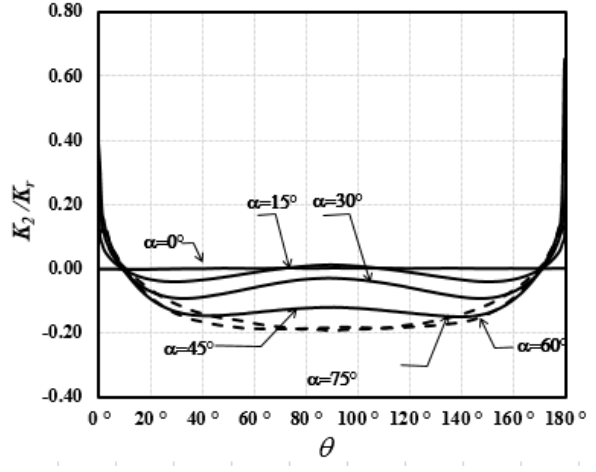
a)



b)

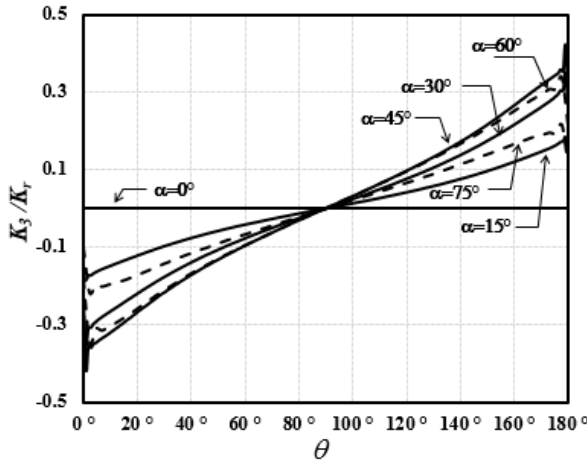


c)

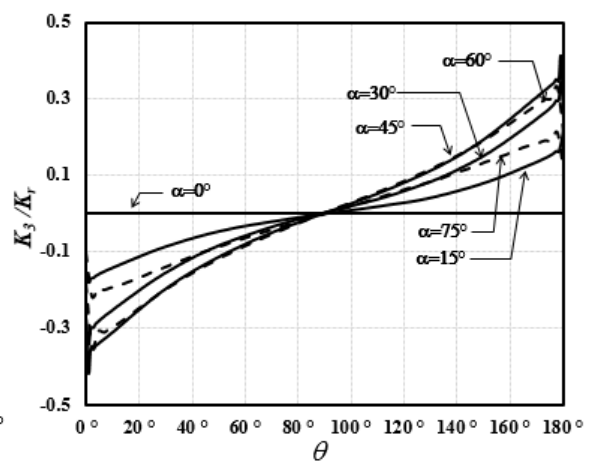


d)

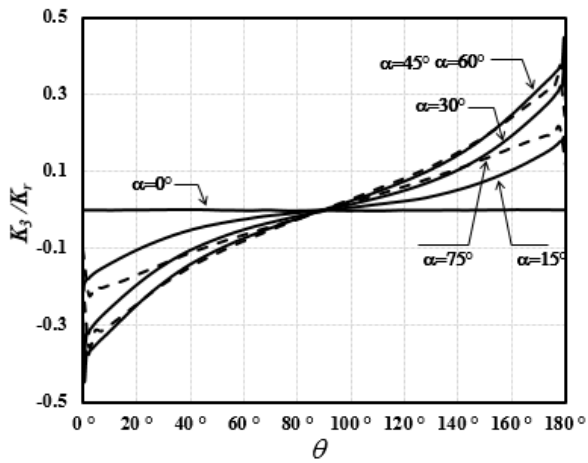
Şekil 3.2.81. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



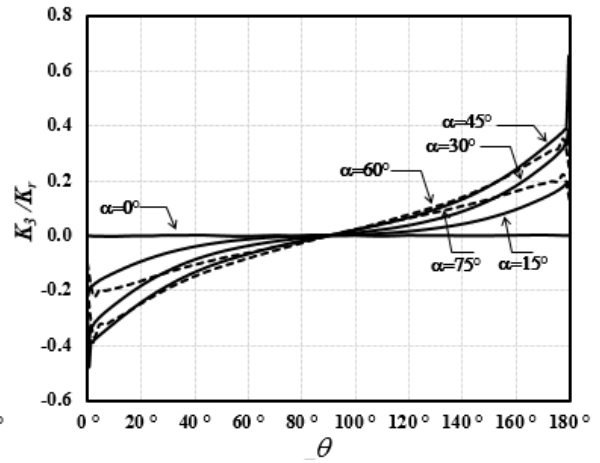
a)



b)



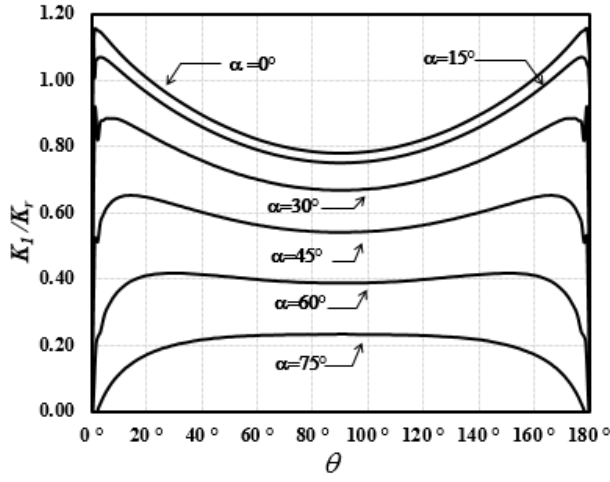
c)



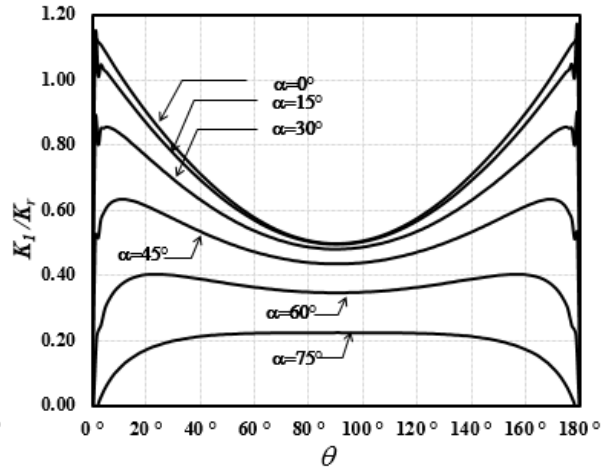
d)

Şekil 3.2.82. Normalize edilen  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=0.5$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

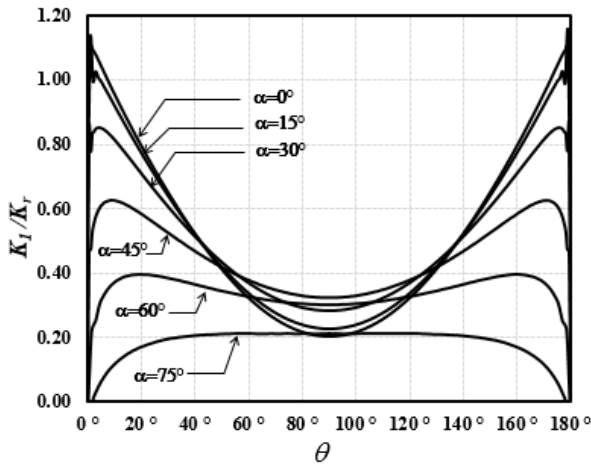




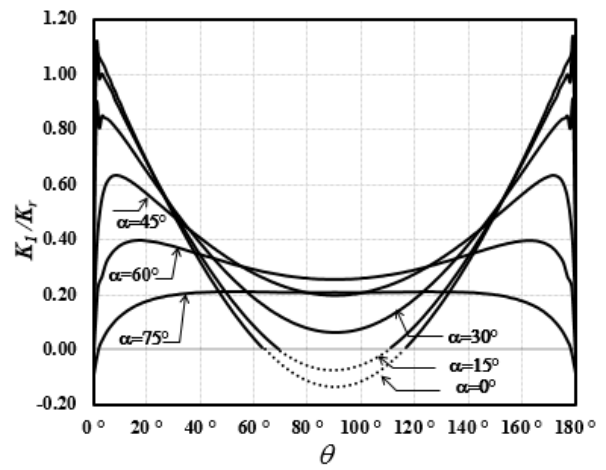
a)



b)

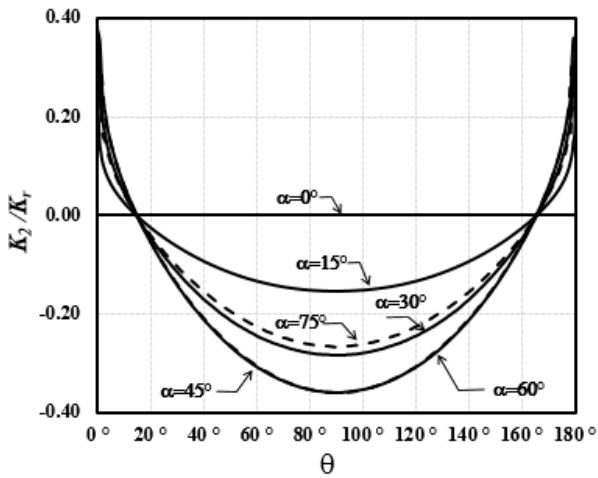


c)

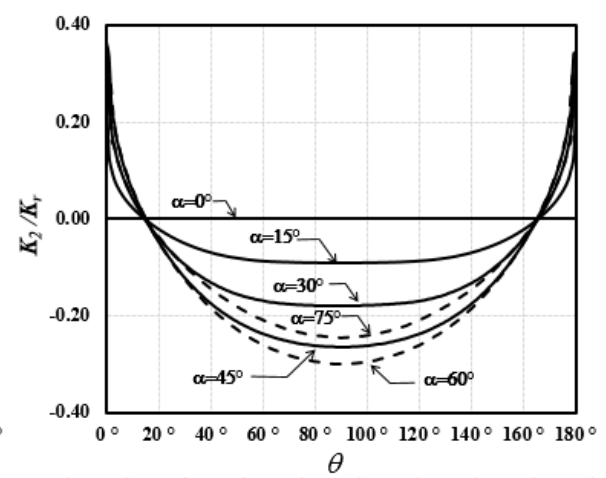


d)

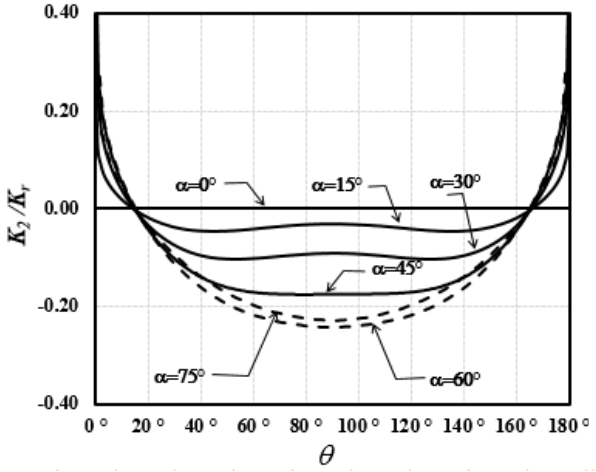
Şekil 3.2.83. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



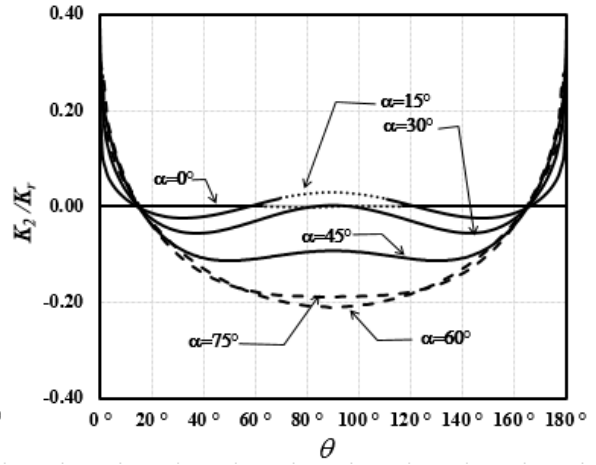
a)



b)

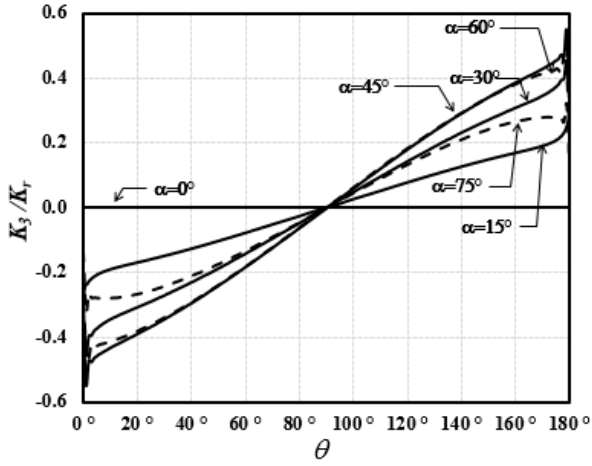


c)

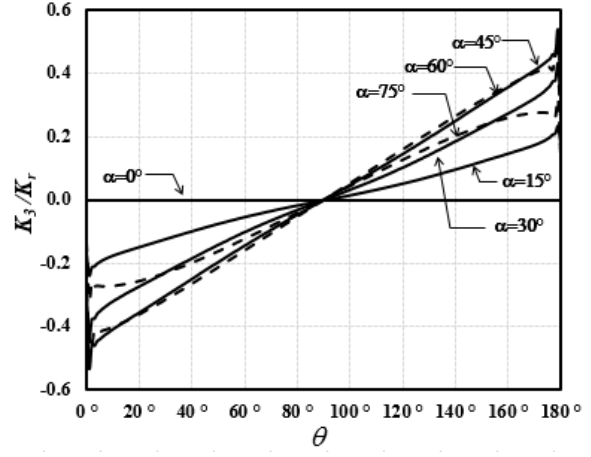


d)

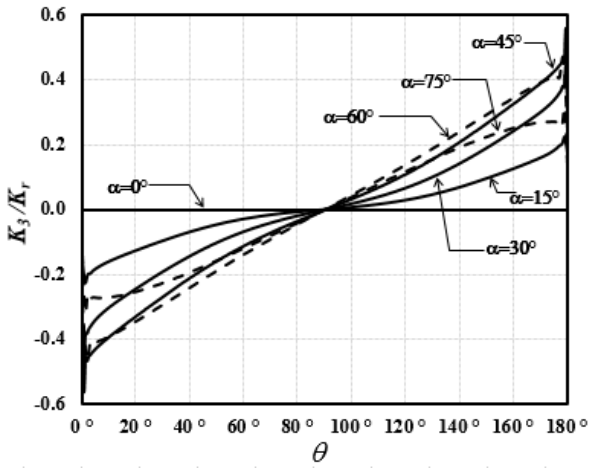
Şekil 3.2.84. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



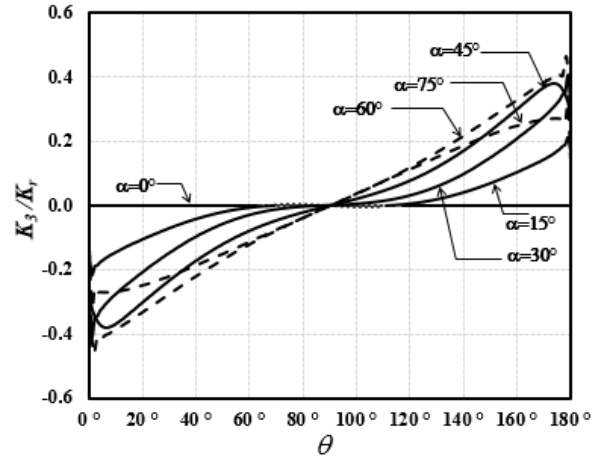
a)



b)

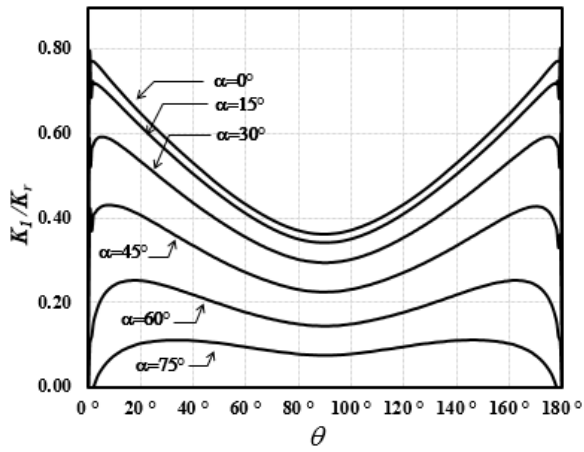


c)

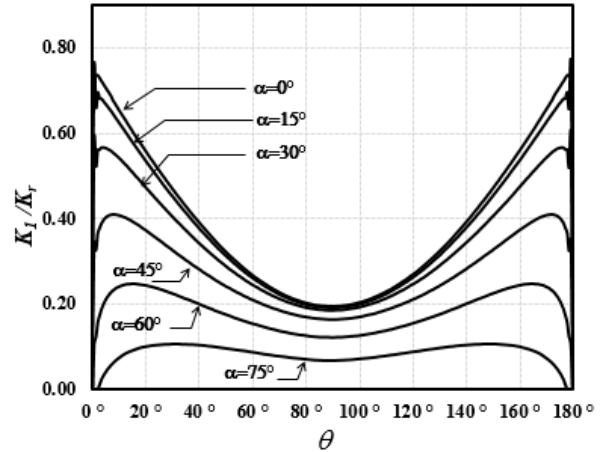


d)

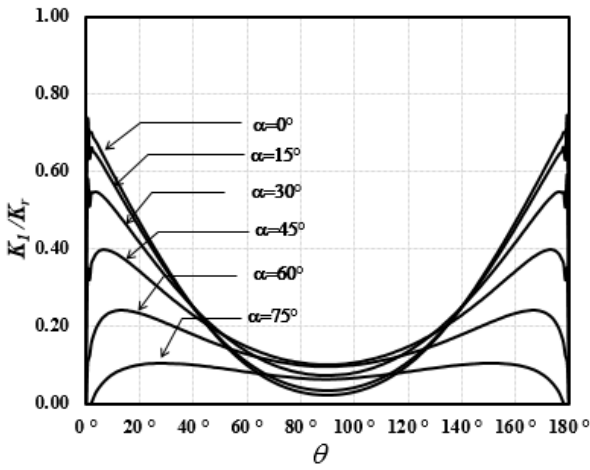
Şekil 3.2.85. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=1$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



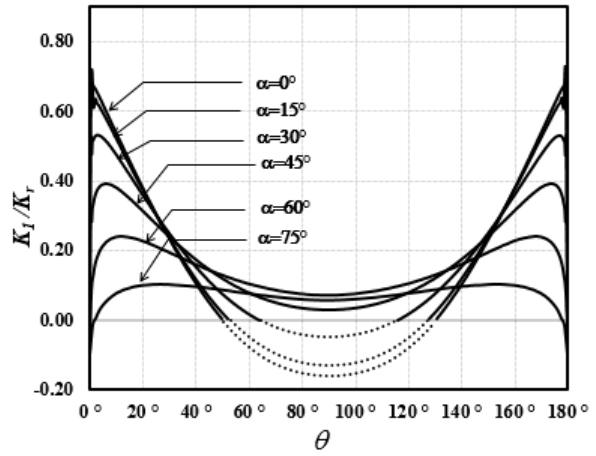
a)



b)

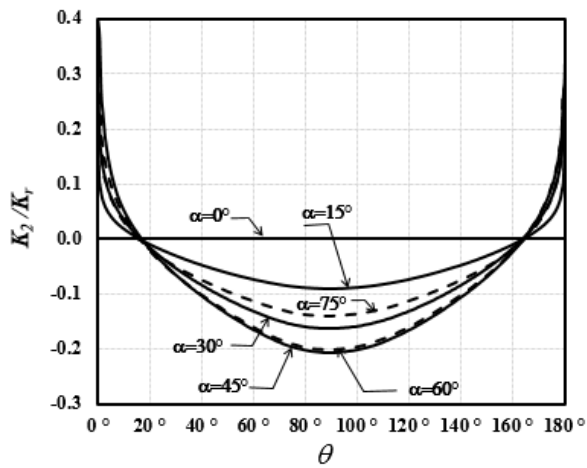


c)

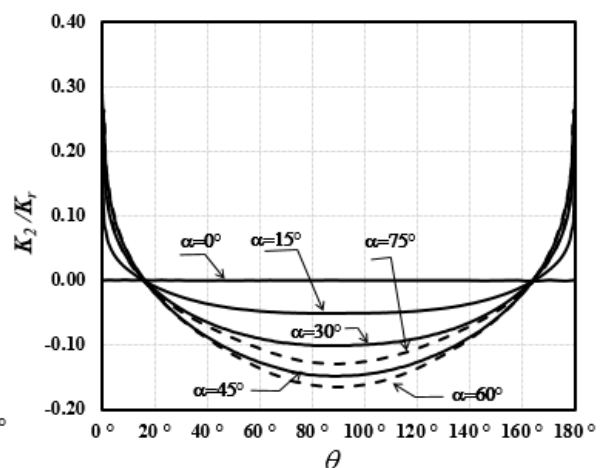


d)

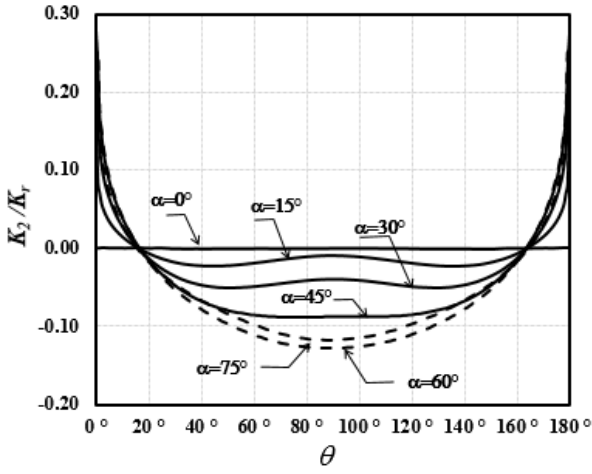
Şekil 3.2.86. Normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı, a/c=2, a) a/t=0.2, b) a/t=0.4, c) a/t=0.6, d) a/t=0.8



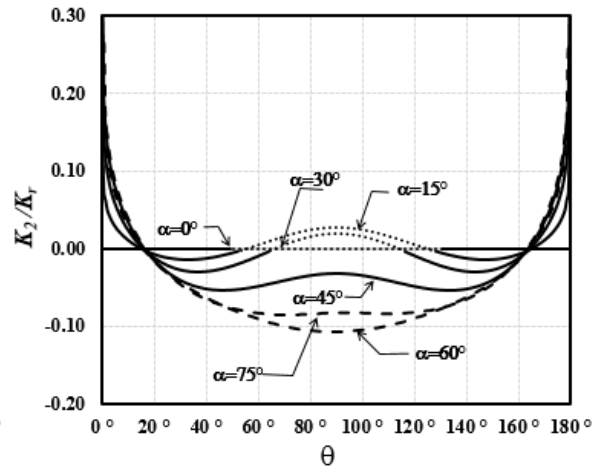
a)



b)

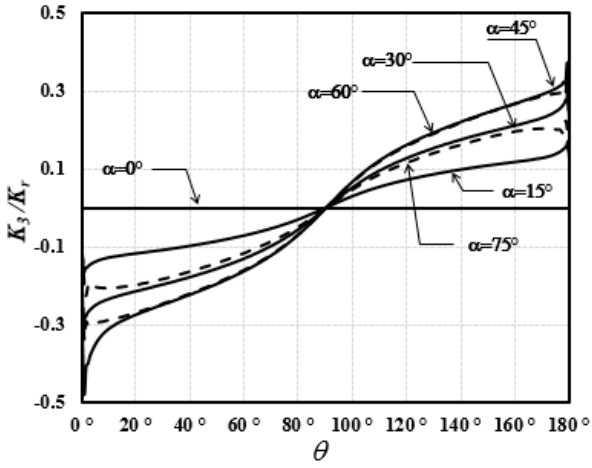


c)

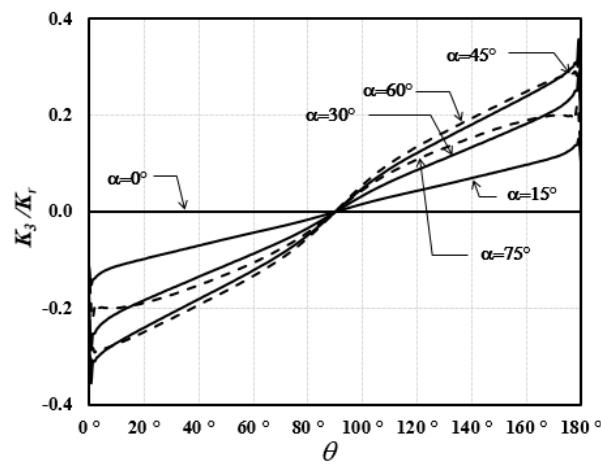


d)

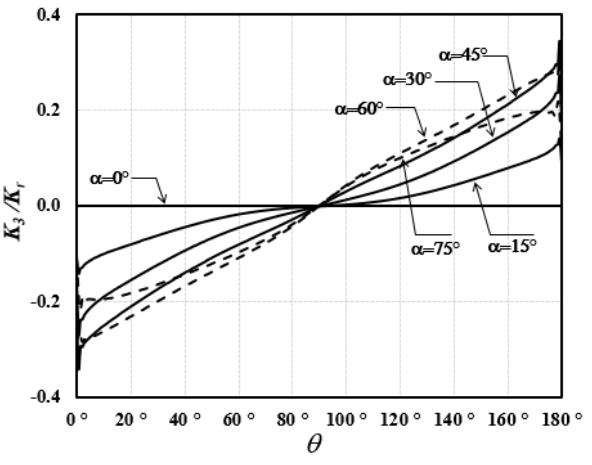
Şekil 3.2.87. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



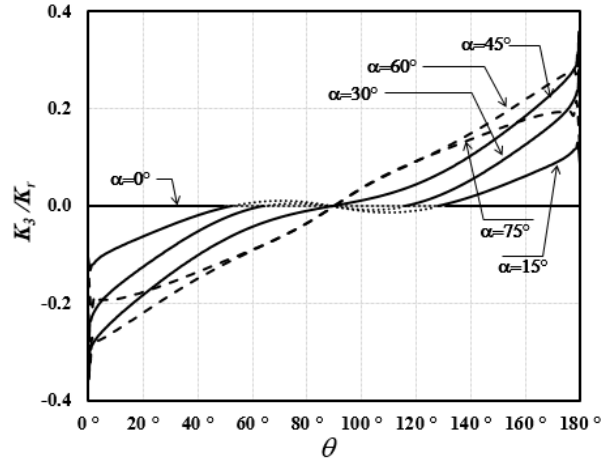
a)



b)

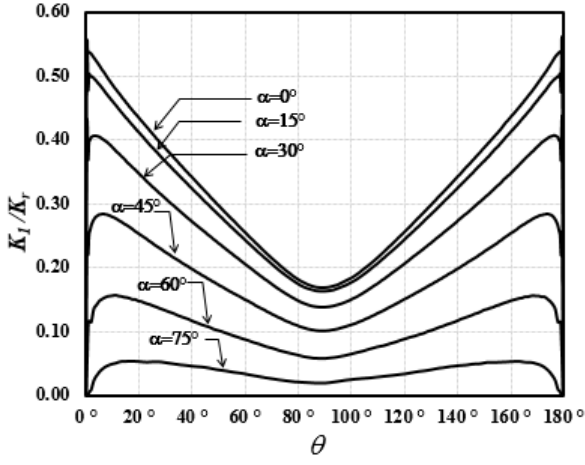


c)

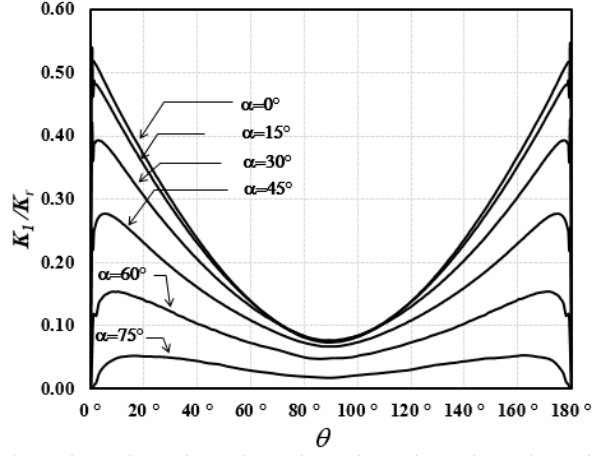


d)

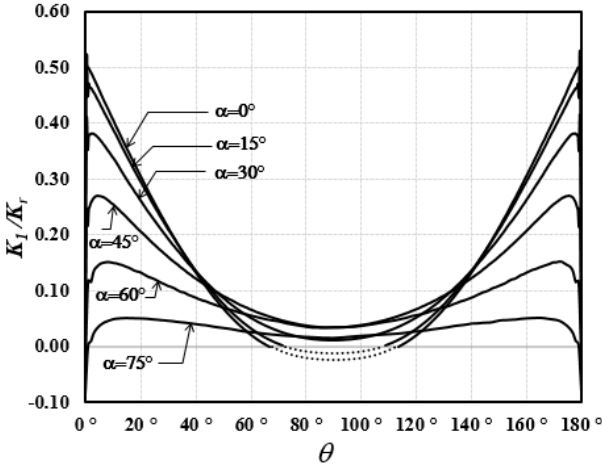
Şekil 3.2.88. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=2$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



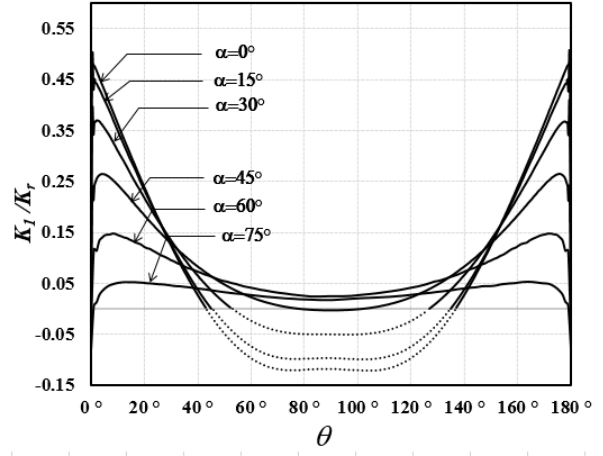
a)



b)

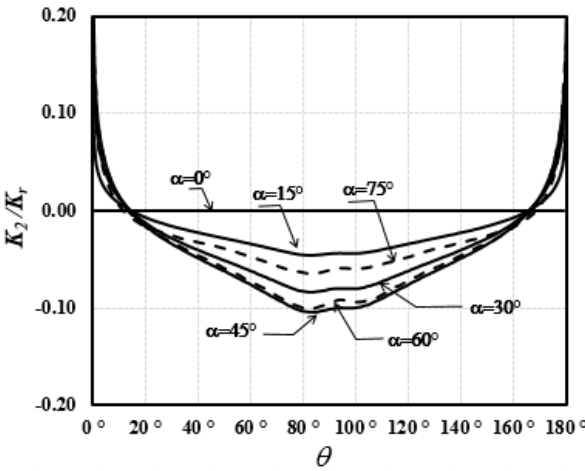


c)

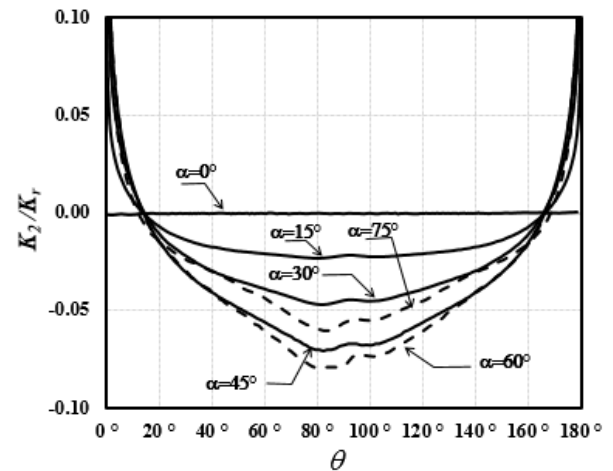


d)

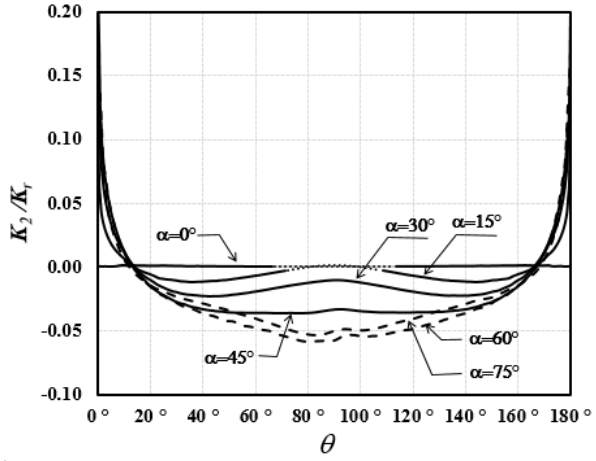
Şekil 3.2.89. Normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



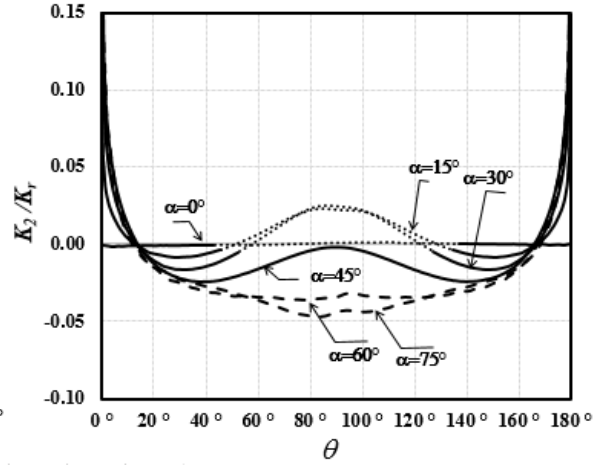
a)



b)

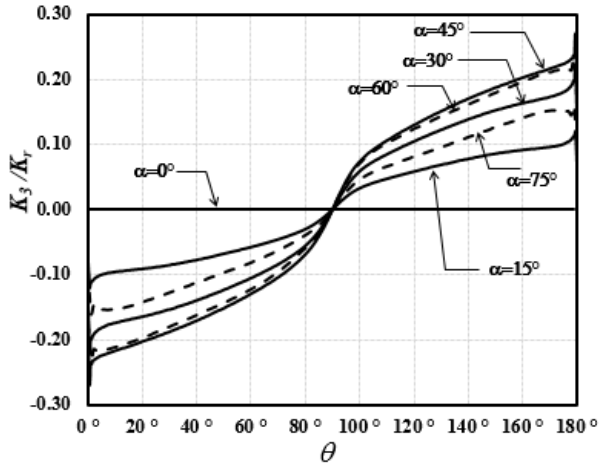


c)

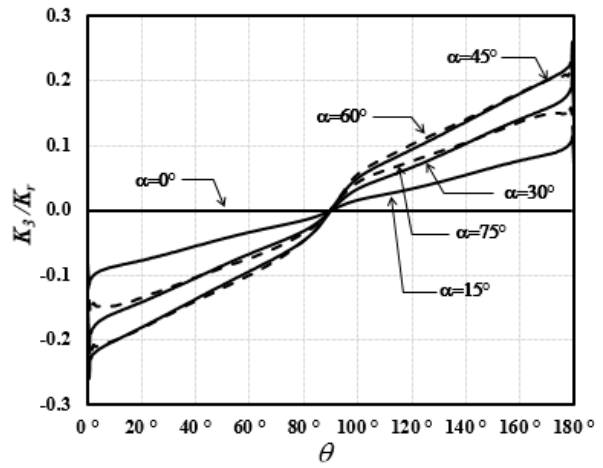


d)

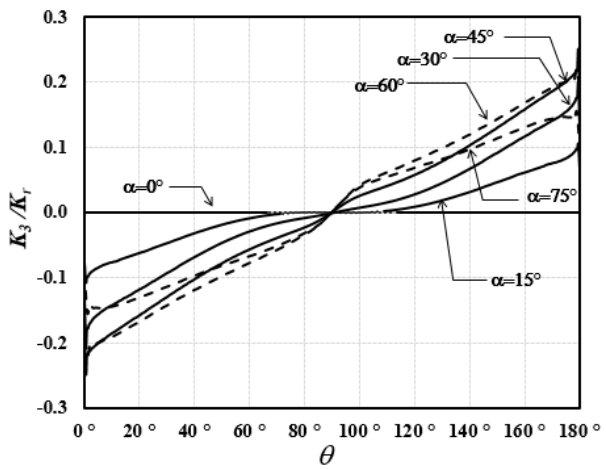
Şekil 3.2.90. Normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



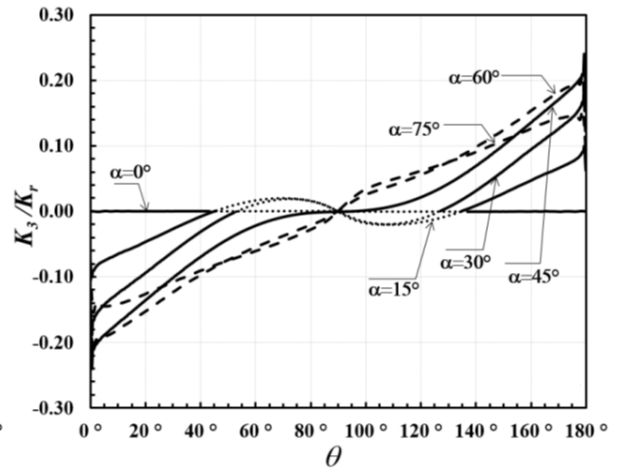
a)



b)



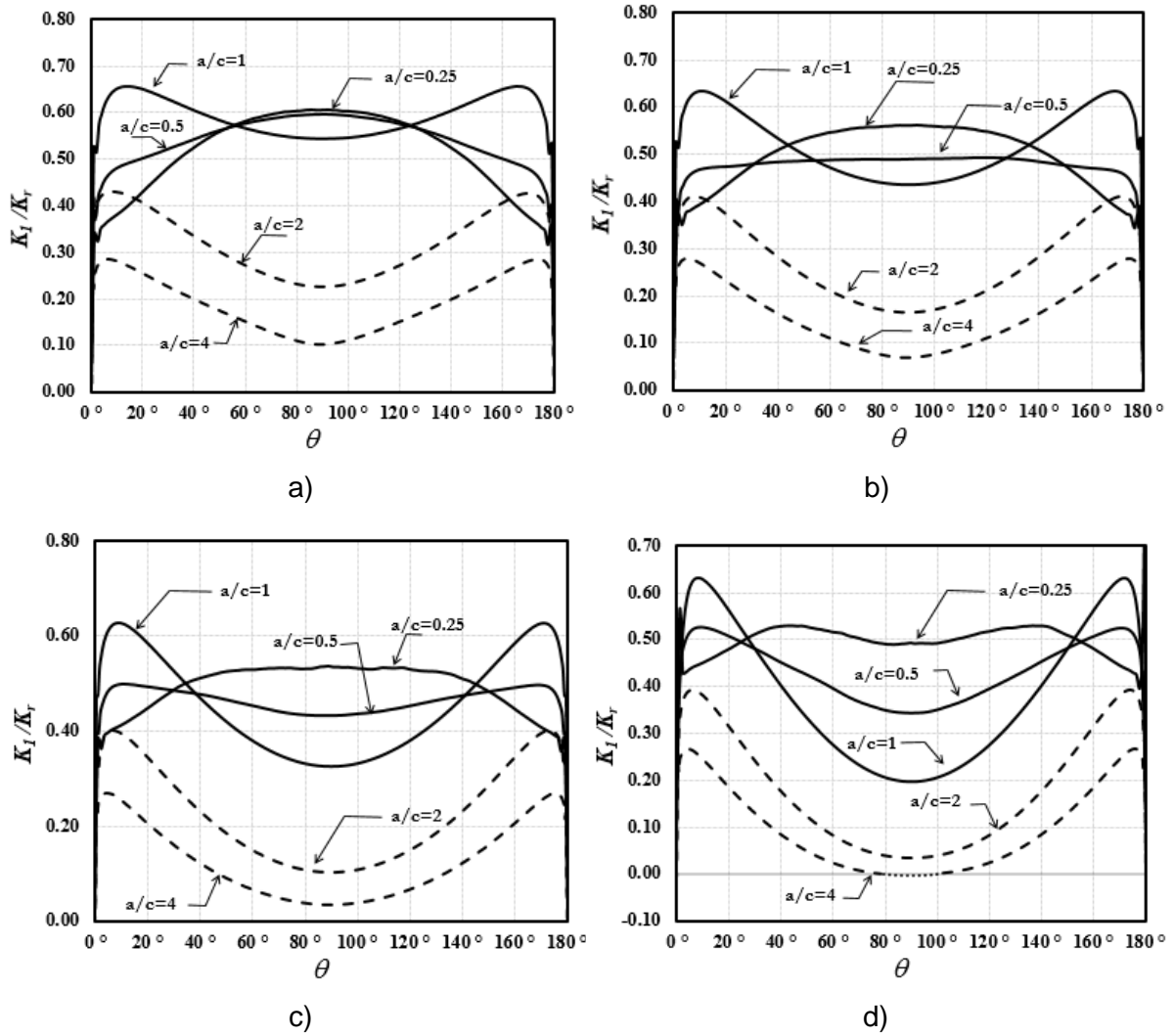
c)



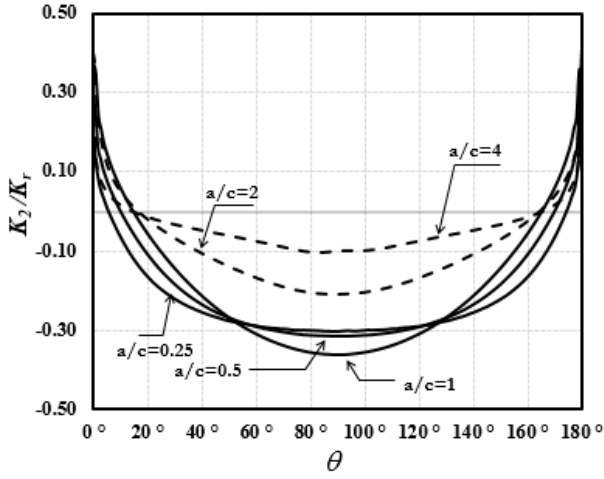
d)

Şekil 3.2.91. Normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $a/c=4$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

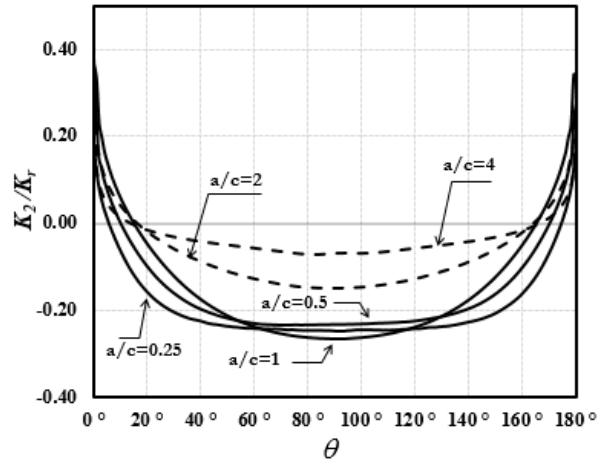
Daha önce verilen her bir grafikte çatlak dönme açısının karışık mod gerilme şiddet faktörlerine etkisi görülmektedir. Diğer parametreler olan  $a/c$  ve  $a/t$ 'nin de etkisini görmek için, orta seviye karışık mod yükleme durumuna karşılık gelen  $\alpha=45^\circ$  durumu göz önüne alınarak, Şekil 3.2.92-3.2.94'de, verilen bir  $a/t$  değeri için  $a/c$ 'nin, Şekil 3.2.95-3.2.97 arasındaki grafiklerde ise verilen bir  $a/c$  için  $a/t$ 'nin karışık mod gerilme şiddet faktörleri üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Grafikleri daha iyi gözlemlenmek için sabit  $a/t$  grafiklerinde  $a/c=2$  ve 4, sabit  $a/c$  grafiklerinde ise  $a/t=0.6$  ve 0.8 durumları için kesikli çizgiler kullanılmıştır.



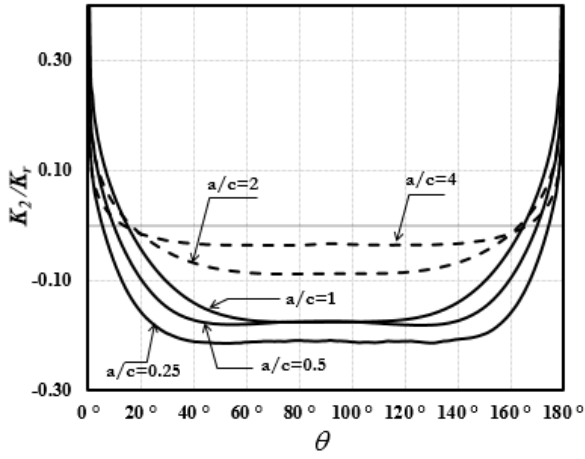
Şekil 3.2.92. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_I$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$



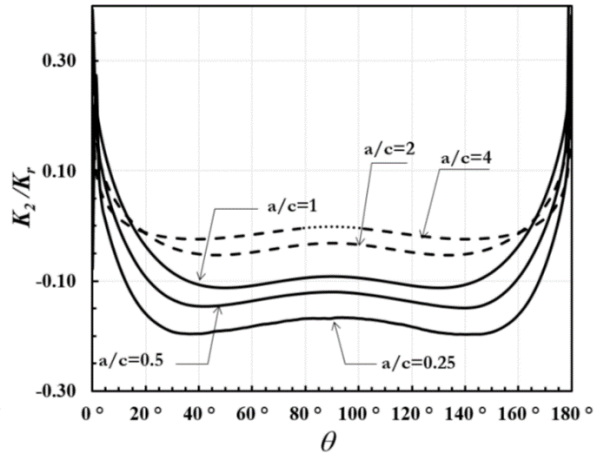
a)



b)

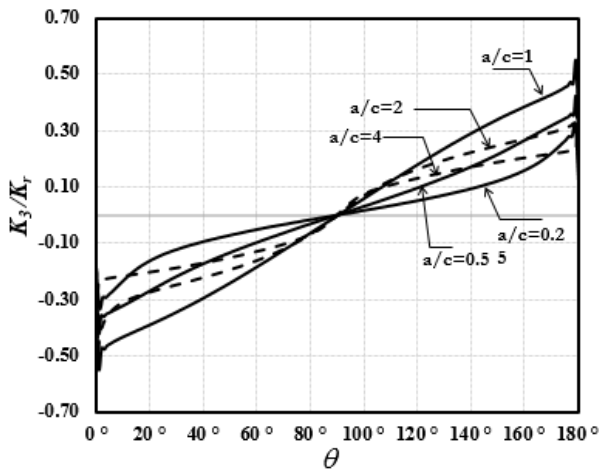


c)

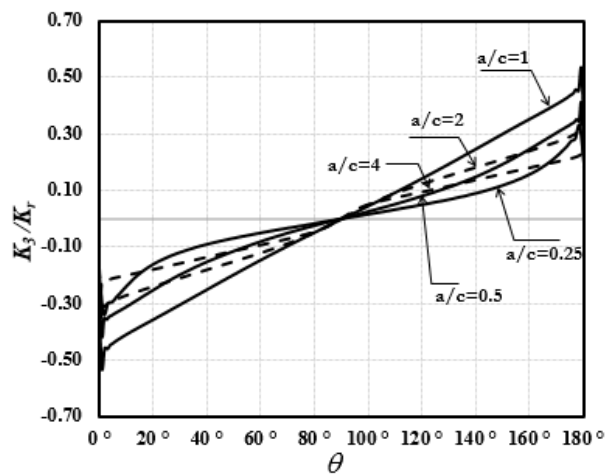


d)

Şekil 3.2.93. Sabit  $a/t$  için normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/t=0.2$ , b)  $a/t=0.4$ , c)  $a/t=0.6$ , d)  $a/t=0.8$

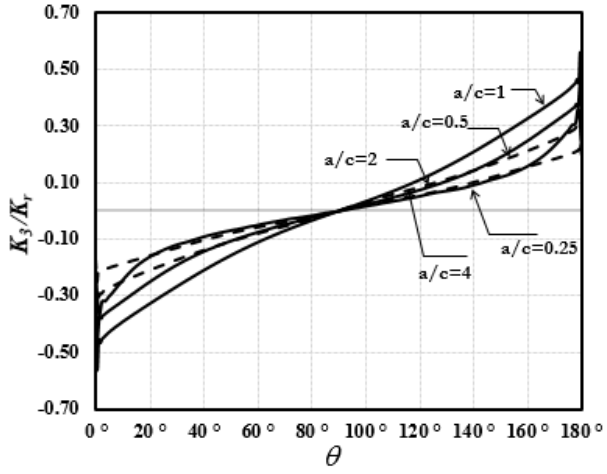


a)

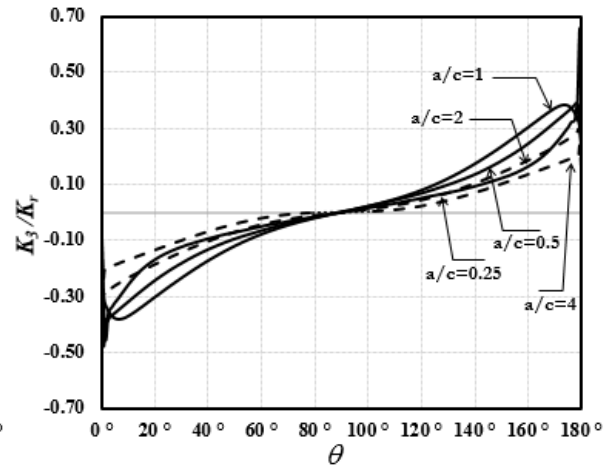


b)



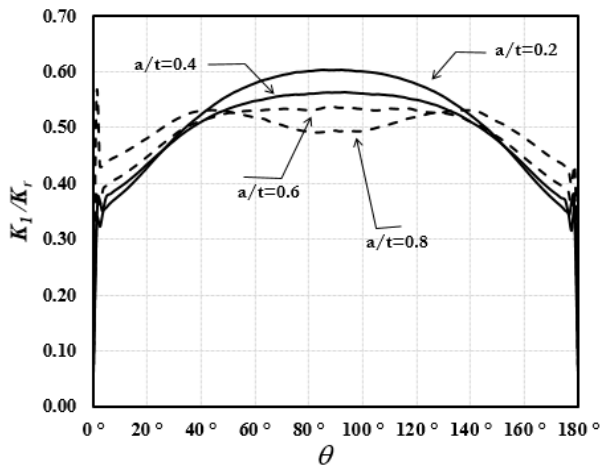


c)

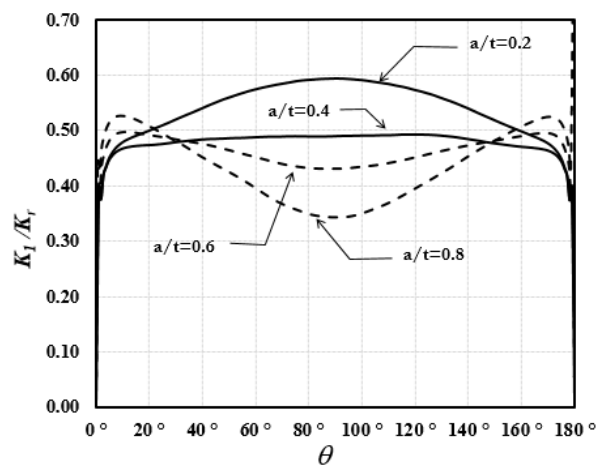


d)

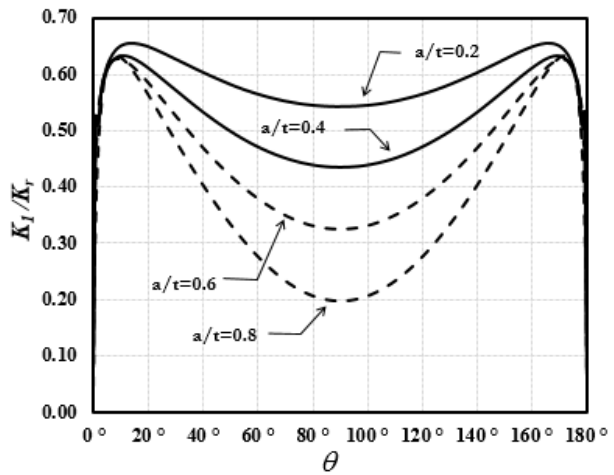
Şekil 3.2.94. Sabit a/t için normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a) a/t=0.2, b) a/t=0.4, c) a/t=0.6, d) a/t=0.8



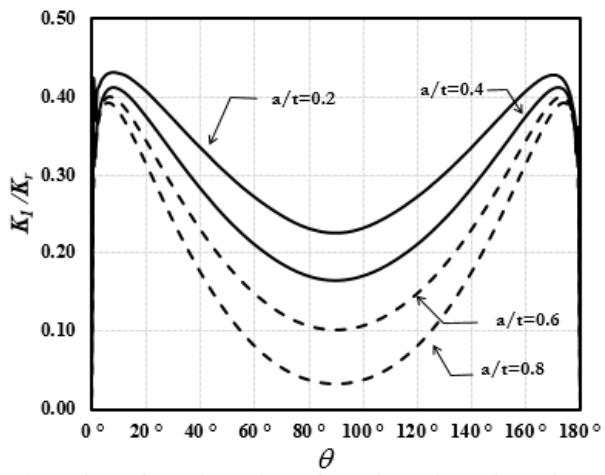
a)



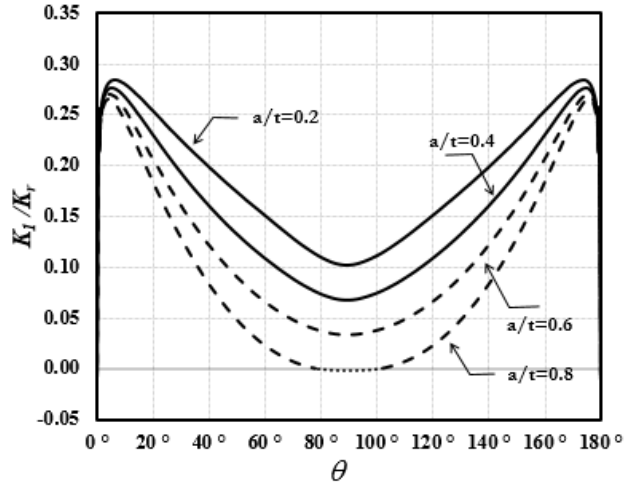
b)



c)

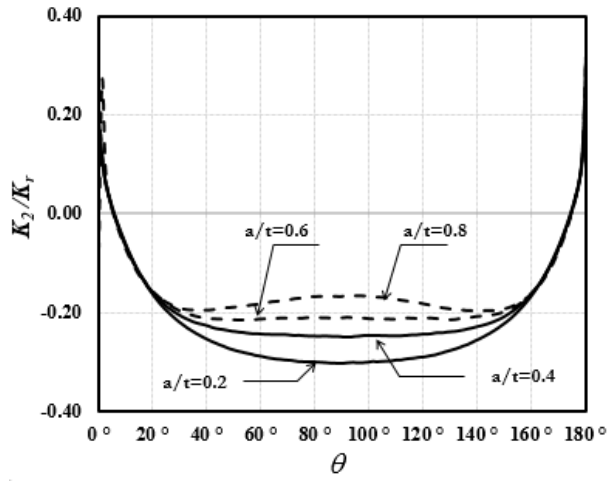


d)

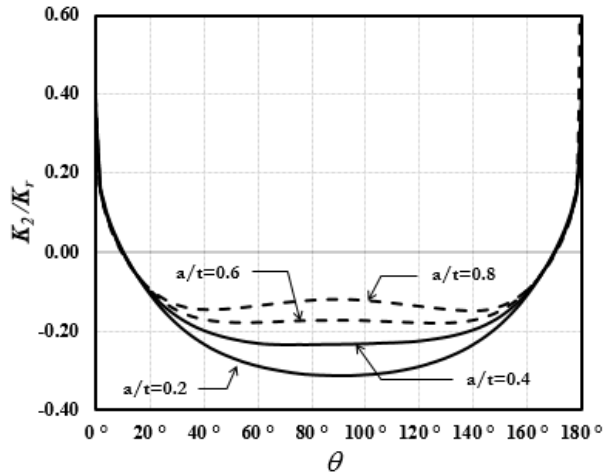


e)

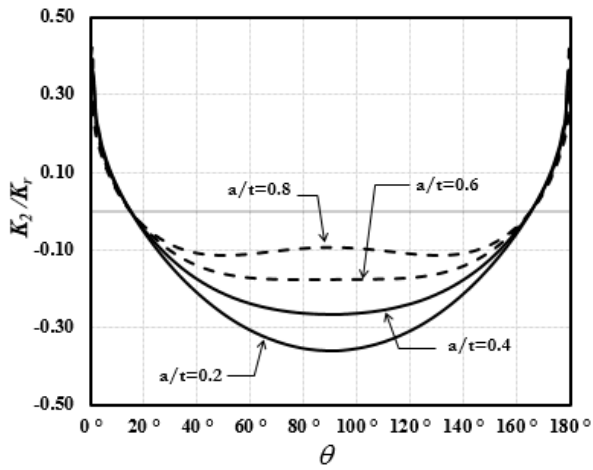
Şekil 3.2.95. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_1$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$



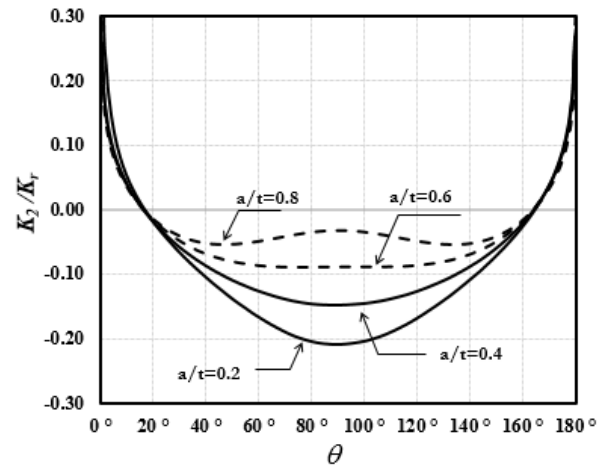
a)



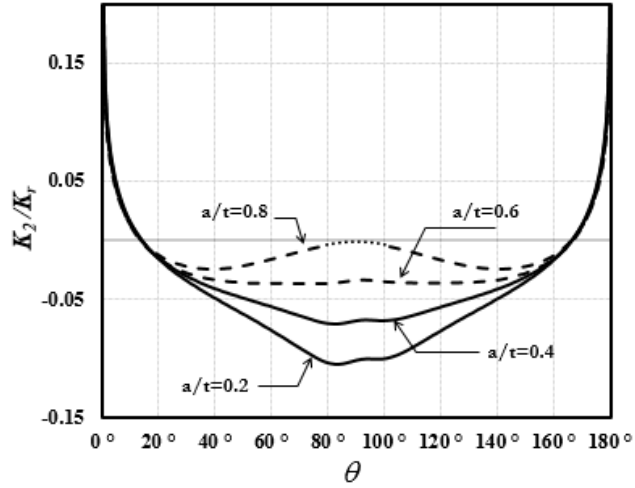
b)



c)

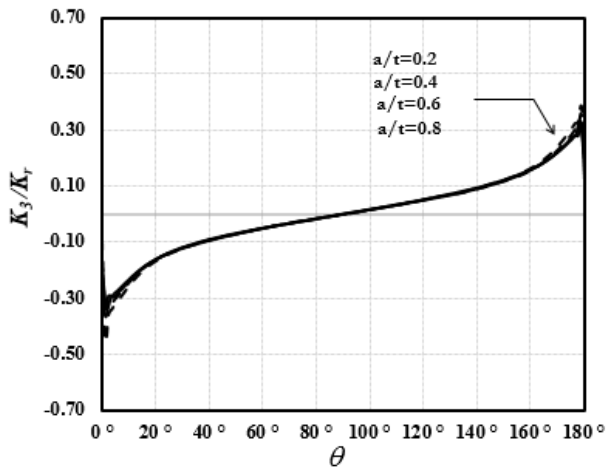


d)

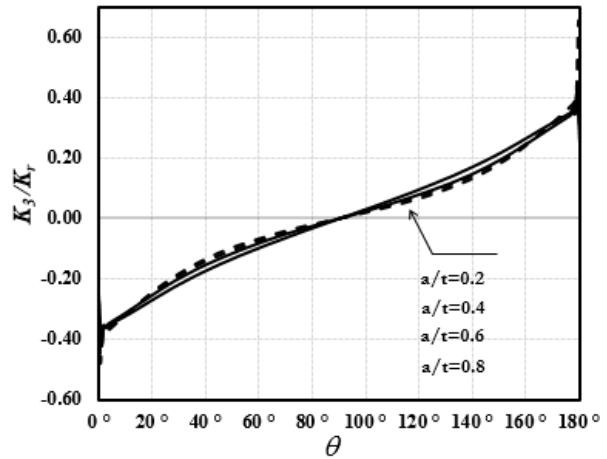


e)

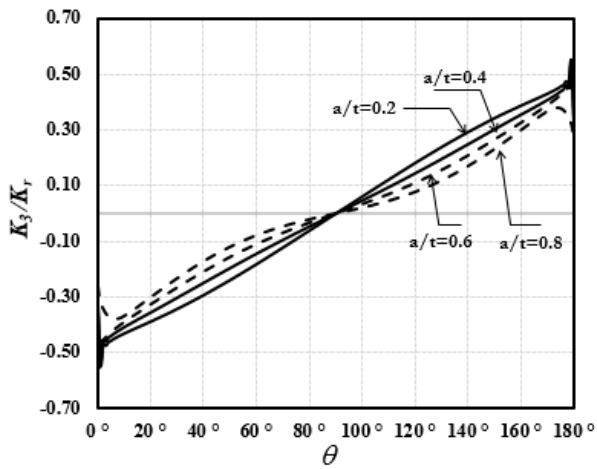
Şekil 3.2.96. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_{II}$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$



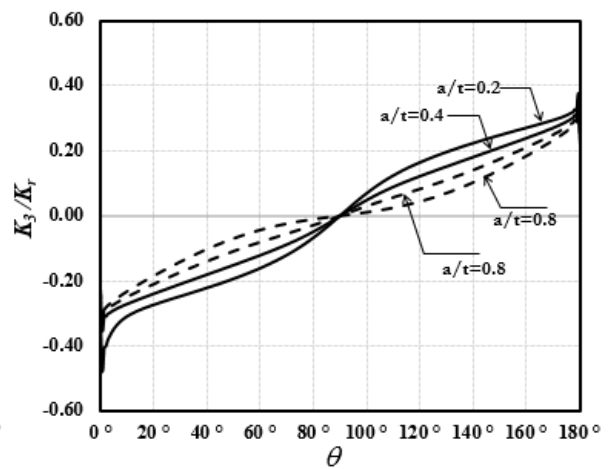
a)



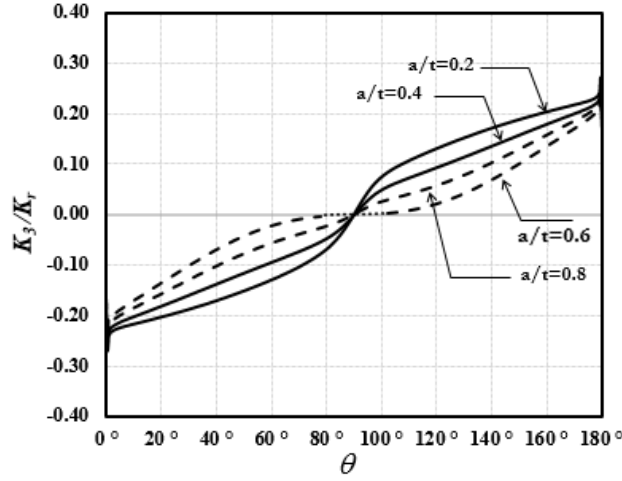
b)



c)



d)



e)

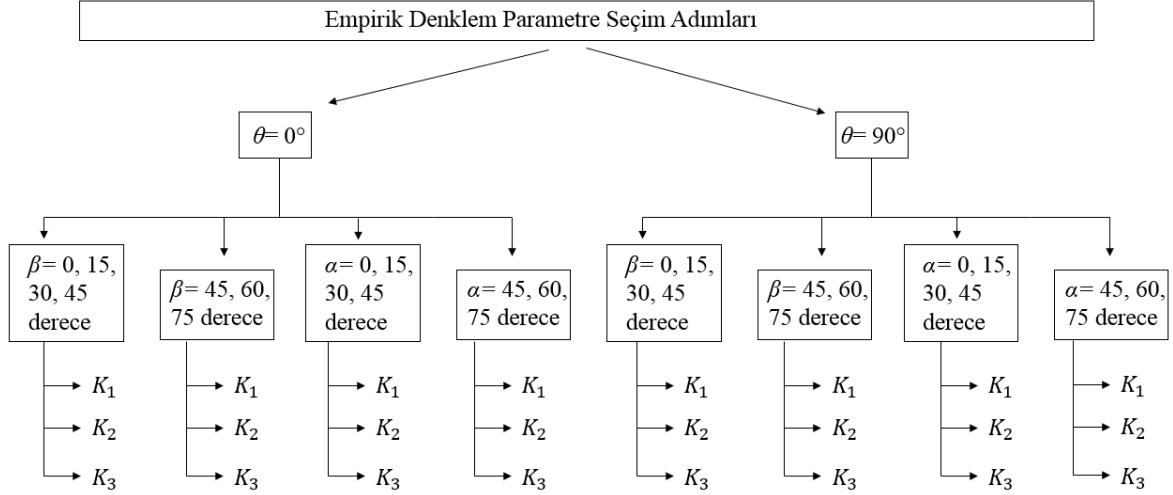
Şekil 3.2.97. Sabit  $a/c$  için normalize edilmiş  $K_{III}$  GŞF dağılımı,  $\alpha=45^\circ$ , a)  $a/c=0.25$ , b)  $a/c=0.5$ , c)  $a/c=1$ , d)  $a/c=2$ , e)  $a/c=4$

### 3.2.5 Karışık Mod Gerilme Şiddet Faktörleri için Empirik Denklemlerin Geliştirilmesi

Önceki bölümlerde, probleme etkiyen tüm parametrelerin geniş aralıklarında belirlenen değerleri için geçerli olan karışık mod Gerilme Şiddet Faktörleri (GŞF) çatlak önü boyunca verilmişti. Yüzlerce farklı durum için verilen grafiksel çözümler oldukça faydalı olmakla beraber, hem analizi yapılan parametre değerlerinde hem de özellikle ara değerlerde GŞF tahmini gerektiğinde, grafikten okumak veya interpolasyon yapmak yerine, hazır halde bulunan denklemlerin kullanılması oldukça istenen bir durumdur. Bu amaçla, bu bölümde, daha önce verilen tüm çözümlerin çatlak serbest yüzey ve derinlik noktalarındaki değerleri kullanılarak empirik karışık mod GŞF denklemleri geliştirilerek bu bölümde sunulmuştur.

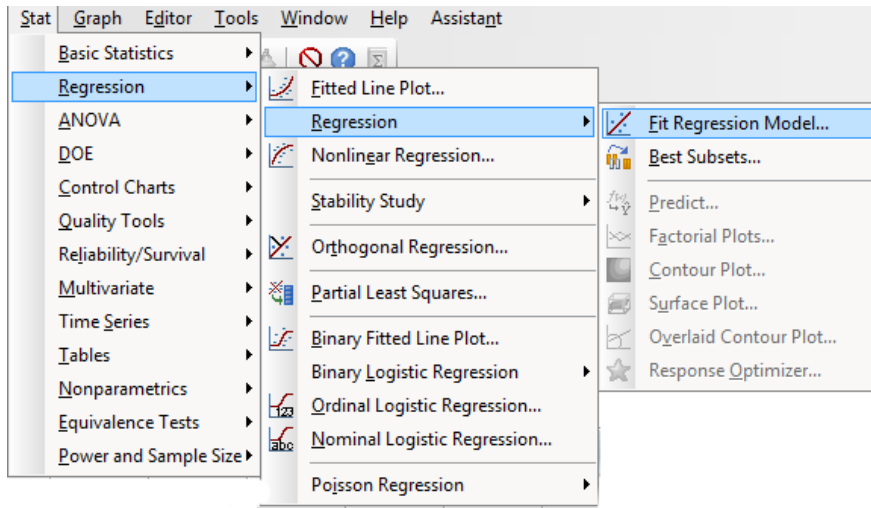
Denklemler oluşturulurken seçilen parametreler  $a/c$ ,  $a/t$  ve çatlakın yatayda yaptığı açı ( $\beta$  veya  $\alpha$ ) ve  $\theta$  çatlak önü açısı olarak belirlenmiştir. Çatlak derinliği/çatlak uzunluğu için 5 adet (0.25, 0.5, 1, 2, 4), çatlak derinliği/levha et kalınlığı için 4 adet (0.2, 0.4, 0.6, 0.8), çatlakın yatayla yaptığı açı için 6 adet (0, 15, 30, 45, 60, 75) ve çatlak önündeki açı için de 2 adet (0 ve 90 derece) parametre değerleri alınmıştır. Oluşturulmak istenen denklemlerdeki parametre sayılarının çok olması analitik çözümü imkânsız hale getirmektedir. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlakın mod-I GŞF değerleri kullanılarak ilk denklemin nasıl elde edildiği aşağıda detaylarıyla anlatılmaktadır. Bu denklem, önce çatlakın yatay eksenle yaptığı açıya göre 0-45 derece ve 45-75 derece olarak iki kısma ayrılmıştır. Böylece 0'dan 75 dereceye kadar çatlak eğiklik açı değerleri tamamen kapsamaktadır. Çatlak ucu serbest yüzeyi ( $c$  noktası) ve derinlik ( $a$  noktası) noktaları olmak üzere iki farklı konum için parametreler sınırlandırılarak

tanımlanmıştır. Şekil 3.2.98.'de, bu çalışma kapsamında geliştirilen empirik GŞF denklemlerinin çatlak ucu derinlik noktası ve serbest yüzey noktası bazında kademeli şekilde ikiye bölünmesine dair şema gösterilmektedir. Ayrıca şekilden görüldüğü üzere, eğiklik veya dönme açısının  $0-45^\circ$  ve  $45-75^\circ$  aralıkları için de iki farklı bölge tanımlanmaktadır. Sonra Minitab (2014) programına geçilir. Minitab programına ilgili veriler girdi olarak girilir. Daha sonra "Stat" kısmından "Regresyon" analizi kısmına tıklanır.



Şekil 3.2.98. Denklem parametrelerinin belirlenmesinde analiz sonuçlarındaki verilerin seçimi

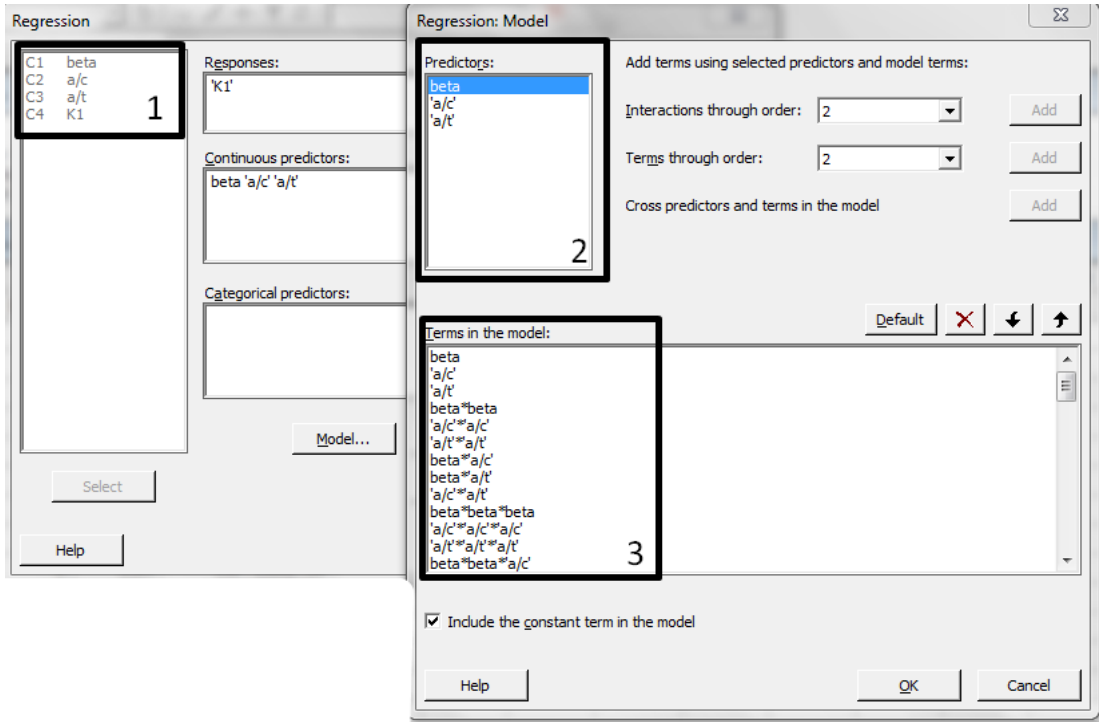
Şekil 3.2.99'da Minitab programında, regresyon analiz kısmı açılarak denklem kısmına geçilmesi gösterilmektedir. Regresyon analiz sayfası açıldığında Şekil 3.2.100'de gösterilen adımlar yapılarak ilgili denklem terimleri tanımlanır.



Şekil 3.2.99. Minitab programında regresyon analizi kısmının açılması (Minitab, 2014)

Model kısmına tıklanarak regresyon denklemi oluşturulur. Oluşturulan denklemdeki katsayı sayısı arttıkça denklemin doğruluk derecesi artacaktır. Çatlağın yatayla yaptığı açı  $45$

dereceden küçük açılarda  $4(\text{beta}) * 4(\text{a/t}) * 5(\text{a/c}) = 80$  adet denklem olmalıdır. Doğal olarak da 80 adet parametre olması gerekmektedir. Denklem sistemi çok uzun olduğu için “önemsiz” terimler elimine edilerek terim sayısı 70’e indirgenmiştir. Çatlağın yatayla yaptığı açı 45 dereceden büyük açılarda  $3(\text{beta}) * 4(\text{a/t}) * 5(\text{a/c}) = 60$  adet denklem olmalıdır. İki farklı nokta için oluşturulan denklemler sisteminde, analiz sonuçları ile denklemlerin tahmin ettiği değerler arasındaki fark en fazla %5’tir. Tablo 3.2.3’te empirik denklemlerle ilgili indirgenmiş katsayı adetleri görülmektedir. Adı geçen tablodaki bazı değerlerde, GŞF değerleri sıfır olduğundan denklem oluşturulmamıştır. Tablo 3.2.4 ile Tablo 3.2.43 arasında verilecek olan denklem katsayılarıyla GŞF değerlerini bulmak için, denklem katsayılarıyla ilgili parametreler çarpılarak ve ilgili tabloda verilen sabit değerle toplanarak  $K_1$ ,  $K_2$  ve  $K_3$  GŞF değerleri bulunur.



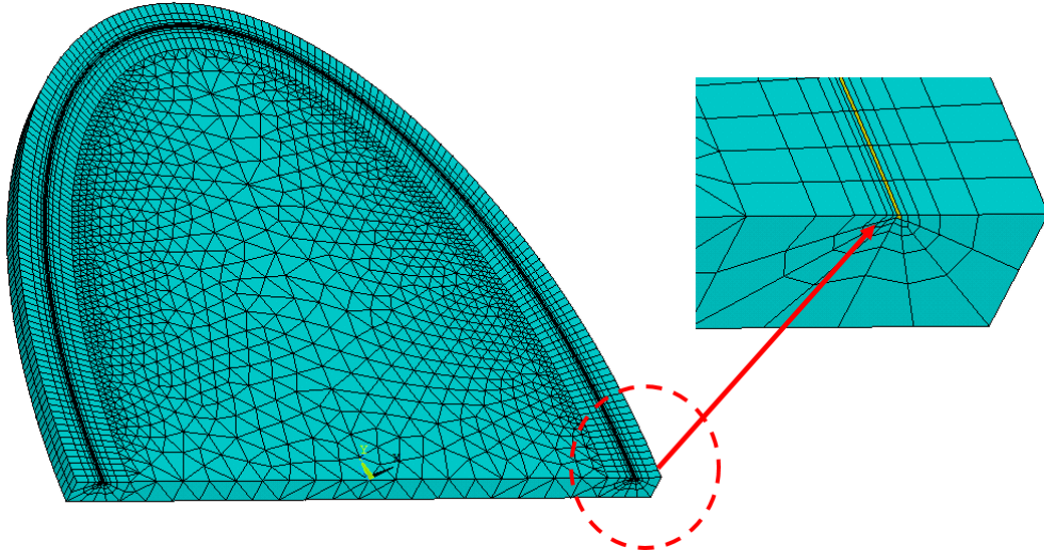
Şekil 3.2.100. Minitab programında regresyon denklemini oluşturma işlemleri (Minitab, 2014)

Tablo 3.2.3. 0-45 derece ve 45-75 derece eğimli/dönmüş karışık mod yüzey çatlakları için geliştirilen empirik denklemlerde indirgenmiş katsayı adetleri

	Modlar	Eksenel gerilme + eğik çatlak		Eksenel gerilme + dönmüş çatlak		
		0 derece	90 derece	0 derece	90 derece	
$\alpha$ ve $\beta= 0-45$ derece arasındaki açılar	mod-I	58	58	58	58	
	mod-II	58	-	58	58	
	mod-III	58	58	58	-	
		Eğilme gerilme + eğik çatlak		Eğilme gerilme + dönmüş çatlak		
	Modlar	0 derece	90 derece	0 derece	90 derece	
	mod-I	58	58	58	70	
	mod-II	58	-	70	70	
	mod-III	70	58	70	-	
	$\alpha$ ve $\beta= 45-75$ derece arasındaki açılar		Eksenel gerilme + eğik çatlak		Eksenel gerilme + dönmüş çatlak	
		Modlar	0 derece	90 derece	0 derece	90 derece
mod-I		58	58	58	58	
mod-II		58	-	58	58	
mod-III		58	58	58	-	
		Eğilme gerilme + eğik çatlak		Eğilme gerilme + dönmüş çatlak		
Modlar		0 derece	90 derece	0 derece	90 derece	
mod-I		58	58	58	58	
mod-II		58	-	58	58	
mod-III		58	58	58	-	

### 3.2.5.1 Çatlak Ucu Serbest Yüzey Noktaları ( $\theta=0^\circ$ )

Karışık mod GŞF empirik denklemleri için önce çatlak ucu serbest yüzey noktaları ele alınmıştır. Serbest yüzey etkisinden dolayı, tam çatlak ucundaki GŞF değerleri net olarak bilinmemekle birlikte Bölüm 3.2'deki analiz grafikleri incelendiğinde çatlak ucu serbest yüzey bölgesindeki GŞF değerlerinin değişken olduğu gözükmektedir. Bu sebepten dolayı çatlak ucu yüzey noktaları için ekstrapolasyon yapılmıştır. Şekil 3.2.101'de çatlak ucu serbest yüzey bölgeleri dönmüş çatlak içeren örnek bir sonlu eleman modeli üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.2.101. Çatlak ucu serbest yüzey bölgesinin sonlu eleman modelinde gösterilmesi

#### 3.2.5.1.1 Aksenal gerilmeye maruz eğik yüzey çatlağı

Bölüm 3.2.1'de verilen aksenal gerilmeye maruz eğik çatlaklar için hesaplanan analiz sonuçları kullanılarak empirik denklemler elde edilmiştir. Çatlak ucu serbest yüzey bölgesindeki karışık mod GŞF değerleri Minitab (2014) programına aktararak, denklemlerin katsayıları hesaplanmıştır. Sırasıyla mod-I, mod-II ve mod-III GŞF denklemlerinin katsayıları çatlağın eğiklik açısının 45 dereceden küçük ve 45 dereceden büyük olması durumları için Tablo 3.2.4-3.2.9'da verilmiştir.



Tablo 3.2.4. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	8.572347E-01	beta*beta*a/c*a/c	9.751186E-04	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.268899E+01
beta	-1.470664E-02	beta*beta*a/c*a/t	1.874999E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	5.711368E-05
a/c	1.434755E+00	beta*beta*a/t*a/t	-1.684434E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	1.636373E-03
a/t	-2.286857E+00	beta*a/c*a/c*a/c	3.373719E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	2.782838E-03
beta*beta	-1.051013E-04	beta*a/c*a/c*a/t	5.700550E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.514408E-03
a/c*a/c	-1.189998E+00	beta*a/c*a/t*a/t	8.395377E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	3.564567E-02
a/t*a/t	6.682115E+00	beta*a/t*a/t*a/t	6.600403E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.124416E-01
beta*a/c	5.741599E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	5.061049E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	6.050681E-01
beta*a/t	8.946223E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	2.252523E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.393406E+00
a/c*a/t	8.715840E+00	a/c*a/t*a/t*a/t	9.028343E+00	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	6.103536E+00
a/c*a/c*a/c	3.534190E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-4.237075E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.392274E-04
a/t*a/t*a/t	-2.333056E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-3.192791E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.844973E-03
beta*beta*a/c	-7.979759E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-8.994200E-05	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.424106E-03
beta*beta*a/t	5.424190E-05	beta*beta*a/t*a/t*a/t	1.645661E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.089522E-02
beta*a/c*a/c	-7.437603E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-4.627854E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.844197E-01
beta*a/c*a/t	-4.385699E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.592006E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-8.634343E-01
beta*a/t*a/t	-1.593291E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.114615E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.960078E-04
a/c*a/c*a/t	-1.112041E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.330094E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.263233E-04
a/c*a/t*a/t	-1.890696E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-6.963191E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.976509E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-3.625586E-02	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.013631E+01		

Tablo 3.2.5. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta = 45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.740615E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c$	2.139278E-05	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	4.910609E+01
$\beta$	-8.456672E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t$	5.729738E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	1.026200E-05
$a/c$	6.615245E+00	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t$	1.728744E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	2.975096E-03
$a/t$	1.219018E+00	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-3.612399E-02	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	7.677920E-03
$\beta^2 \beta^2$	1.180305E-04	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	3.737904E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	2.623926E-04
$a/c^2 a/c$	-6.966970E+00	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	1.991504E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	2.443886E-02
$a/t^2 a/t$	-5.170268E+00	$\beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.831626E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-5.215318E-02
$\beta^2 a/c$	-9.982643E-02	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.109820E+00	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-7.709798E-01
$\beta^2 a/t$	5.978713E-02	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-3.935223E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-2.194268E+00
$a/c^2 a/t$	-2.833679E+00	$a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-4.062464E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-2.077727E+01
$a/c^2 a/c^2 a/c$	2.692186E+00	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-4.988536E-05	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-4.092423E-04
$a/t^2 a/t^2 a/t$	1.090500E+01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-6.720486E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-3.313623E-03
$\beta^2 \beta^2 a/c$	6.801614E-05	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-7.261972E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	1.697168E-04
$\beta^2 \beta^2 a/t$	-1.246851E-03	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	2.104769E-04	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	5.087147E-03
$\beta^2 a/c^2 a/c$	9.986782E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	4.250344E-03	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	3.279485E-01
$\beta^2 a/c^2 a/t$	-3.238547E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.714591E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	2.710260E+00
$\beta^2 a/t^2 a/t$	-2.278773E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	1.189801E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	4.574710E-04
$a/c^2 a/c^2 a/t$	3.515343E+00	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	6.065638E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-6.864822E-05
$a/c^2 a/t^2 a/t$	2.879316E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	9.370836E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-4.234855E-02
$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-3.351851E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	1.693524E+01		

Tablo 3.2.6. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	6.700173E-03	beta*beta*a/c*a/c	4.322968E-04	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.083930E-01
beta	4.648712E-03	beta*beta*a/c*a/t	6.616759E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.320619E-05
a/c	-3.550136E-02	beta*beta*a/t*a/t	1.223660E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.207721E-04
a/t	-6.355442E-02	beta*a/c*a/c*a/c	1.243961E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.290031E-03
beta*beta	-4.531752E-05	beta*a/c*a/c*a/t	-1.539610E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	1.662994E-03
a/c*a/c	4.649219E-02	beta*a/c*a/t*a/t	7.931874E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.411457E-02
a/t*a/t	1.508507E-01	beta*a/t*a/t*a/t	2.937117E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.222951E-01
beta*a/c	5.711896E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	1.113986E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-9.109135E-02
beta*a/t	1.152632E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	4.011915E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.405976E-02
a/c*a/t	2.063718E-01	a/c*a/t*a/t*a/t	2.728321E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.327178E-02
a/c*a/c*a/c	-2.515034E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-1.286919E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	5.842143E-05
a/t*a/t*a/t	-1.018014E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	2.335814E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.438079E-04
beta*beta*a/c	-5.578917E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-2.715236E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-8.315529E-04
beta*beta*a/t	-4.480250E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-7.743166E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.967990E-02
beta*a/c*a/c	-4.396209E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-1.201054E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	6.550170E-02
beta*a/c*a/t	4.382874E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	9.184324E-02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-9.419506E-03
beta*a/t*a/t	-4.190540E-02	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.764817E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.000266E-05
a/c*a/c*a/t	-2.256597E-01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.430634E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.237017E-04
a/c*a/t*a/t	-4.409457E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.693171E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.063494E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	3.931689E-03	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.696529E-01		

Tablo 3.2.7. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta = 45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	6.475531E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c$	7.970122E-04	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-2.738211E+01
$\beta$	-1.572556E-02	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t$	2.768844E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	2.167271E-05
$a/c$	-1.548151E+00	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t$	3.649554E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-2.324055E-04
$a/t$	-7.188004E+00	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	2.801528E-02	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	4.047606E-03
$\beta^2 \beta^2$	9.187610E-05	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	3.289471E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	4.811340E-03
$a/c^2 a/c$	1.390108E+00	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	1.226074E+00	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	6.759733E-03
$a/t^2 a/t$	1.645216E+01	$\beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	3.243667E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	2.822400E-01
$\beta^2 a/c$	1.129499E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	7.735743E+00	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	5.888101E-01
$\beta^2 a/t$	2.176060E-01	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	4.492855E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	2.199719E+00
$a/c^2 a/t$	1.994345E+01	$a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	2.837722E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	1.052789E+01
$a/c^2 a/c^2 a/c$	-5.156716E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-2.255418E-04	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	7.466436E-05
$a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.037652E+01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-8.348086E-04	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-5.628953E-04
$\beta^2 \beta^2 a/c$	-1.049228E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-7.587237E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-2.621392E-03
$\beta^2 \beta^2 a/t$	-1.537976E-03	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-2.330622E-03	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-2.875390E-02
$\beta^2 a/c^2 a/c$	-9.070529E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-2.950039E-03	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.785364E-01
$\beta^2 a/c^2 a/t$	-4.887400E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-8.301130E-02	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.309988E+00
$\beta^2 a/t^2 a/t$	-5.090618E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-9.341902E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.240587E-05
$a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.972335E+01	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-7.736487E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	4.037573E-04
$a/c^2 a/t^2 a/t$	-4.571601E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-9.774814E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	1.823672E-02
$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	6.315313E-02	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.750703E+01		

Tablo 3.2.8. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta = 0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-1.149673E-02	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c$	-1.006145E-05	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-3.681806E-01
$\beta$	-3.972267E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t$	-9.296490E-04	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	9.771948E-06
$a/c$	2.596619E-02	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t$	-1.729563E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	7.085724E-04
$a/t$	1.190517E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-8.875508E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.107231E-03
$\beta^2 \beta^2$	3.988155E-05	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-6.533790E-02	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-3.405191E-03
$a/c^2 a/c$	2.594517E-02	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-3.768519E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	1.218588E-03
$a/t^2 a/t$	-2.685912E-01	$\beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-8.989941E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-8.595461E-02
$\beta^2 a/c$	-2.405158E-02	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	1.983985E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-2.820214E-01
$\beta^2 a/t$	-4.381679E-02	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	4.452821E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	9.070422E-02
$a/c^2 a/t$	-2.577598E-01	$a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-2.708107E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	3.590656E-01
$a/c^2 a/c^2 a/c$	-2.961052E-02	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-4.465430E-05	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.283654E-04
$a/t^2 a/t^2 a/t$	1.775400E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-5.855443E-04	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-4.362731E-04
$\beta^2 \beta^2 a/c$	1.297626E-04	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	3.848161E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	1.948512E-03
$\beta^2 \beta^2 a/t$	6.033688E-04	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	1.318783E-03	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	8.137553E-03
$\beta^2 a/c^2 a/c$	2.570498E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	9.863628E-04	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	9.732511E-02
$\beta^2 a/c^2 a/t$	1.195238E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	4.699884E-03	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-6.354097E-02
$\beta^2 a/t^2 a/t$	1.192543E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	3.001568E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	1.248776E-04
$a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.384061E-01	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	3.078501E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-2.949614E-04
$a/c^2 a/t^2 a/t$	4.869322E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-3.757636E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.115407E-02
$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	5.441687E-03	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-4.985277E-01		

Tablo 3.2.9. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta = 45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-2.154766E+00	beta*beta*a/c*a/c	-1.331723E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.714275E+01
beta	6.623503E-02	beta*beta*a/c*a/t	-9.207633E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-4.170202E-05
a/c	5.588274E+00	beta*beta*a/t*a/t	-8.540558E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-9.123601E-04
a/t	1.501133E+01	beta*a/c*a/c*a/c	-5.573973E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.090911E-02
beta*beta	-4.747408E-04	beta*a/c*a/c*a/t	-8.416179E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.282722E-02
a/c*a/c	-4.201582E+00	beta*a/c*a/t*a/t	-2.672013E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.407380E-02
a/t*a/t	-3.205633E+01	beta*a/t*a/t*a/t	-7.320537E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.592240E-01
beta*a/c	-2.134152E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	-5.532715E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.092853E+00
beta*a/t	-5.208052E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-4.479076E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.136808E-01
a/c*a/t	-3.614325E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	-4.713282E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.628259E+00
a/c*a/c*a/c	1.222632E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	4.049991E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.974968E-05
a/t*a/t*a/t	2.079816E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	5.393852E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.607559E-03
beta*beta*a/c	1.641878E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	1.948864E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.214483E-03
beta*beta*a/t	3.965750E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	5.606094E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.152512E-02
beta*a/c*a/c	1.763591E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	5.981499E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.277651E-01
beta*a/c*a/t	1.270244E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	1.952552E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.181052E-01
beta*a/t*a/t	1.119285E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.692307E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	7.848128E-06
a/c*a/c*a/t	2.370654E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	1.740899E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.086804E-03
a/c*a/t*a/t	7.418771E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	4.090688E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.305893E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-1.223024E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	8.703648E+00		

#### *3.2.5.1.2 Eksenel gerilmeye maruz dönmüş yüzey çatlak*

Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak problemi için analizlerden elde edilen GŞF değerleri kullanılarak empirik denklem katsayıları hesaplanmıştır. Sırasıyla mod-I, mod-II ve mod-III GŞF denklemlerinin katsayıları çatlakın dönme açısının 45 dereceden küçük ve 45 dereceden büyük olması durumları için Tablo 3.2.10-3.2.15'te verilmiştir.

#### *3.2.5.1.3 Eğilme gerilmesine maruz eğik yüzey çatlak*

Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak problemi için de, analizlerden elde edilen ilgili GŞF değerleri kullanılarak empirik denklem katsayıları hesaplanmıştır. Sırasıyla mod-I, mod-II ve mod-III GŞF denklemlerinin katsayıları çatlakın eğiklik açısının 45 dereceden küçük ve 45 dereceden büyük olması durumları için Tablo 3.2.16-3.2.21'de verilmiştir. 45 dereceden küçük mod-III GŞF değerlerinin verdiği 58 katsayılı denklem ile sonlu elemanlar modeli ile elde edilen mod-III GŞF değerleri farkı %10'dur. Bu nedenle, 45 dereceden küçük mod-III GŞF değerleri için 70 katsayılı denklem Tablo 3.2.20'de verilmiştir.

#### *3.2.5.1.4 Eğilme gerilmesine maruz dönmüş yüzey çatlak*

Son olarak, eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak problemi için ilgili analizlerden elde edilen GŞF değerleri kullanılarak empirik denklem katsayıları hesaplanmıştır. Sırasıyla mod-I, mod-II ve mod-III GŞF denklemlerinin katsayıları çatlakın dönme açısının 45 dereceden küçük ve 45 dereceden büyük olması durumları için Tablo 3.2.22-3.2.27'de verilmiştir. 45 dereceden küçük mod-II ve mod-III GŞF değerlerinin verdiği 58 katsayılı denklem ile sonlu elemanlar modeli ile elde edilen mod-II ve mod-III GŞF değerleri farkı %10'dur. Bu nedenle, 70 katsayılı denklem Tablo 3.2.24 ve Tablo 3.2.26'da verilmiştir.

Tablo 3.2.10. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha=0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-7.557112E-01	beta*beta*a/c*a/c	4.334345E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	6.014466E+01
beta	-1.111534E-02	beta*beta*a/c*a/t	1.928736E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	2.176229E-04
a/c	8.593555E+00	beta*beta*a/t*a/t	-3.695180E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	1.081796E-02
a/t	7.961496E+00	beta*a/c*a/c*a/c	1.846248E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	2.912583E-02
beta*beta	2.795215E-04	beta*a/c*a/c*a/t	8.831560E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.003166E-03
a/c*a/c	-1.047969E+01	beta*a/c*a/t*a/t	1.138186E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	3.895089E-02
a/t*a/t	-1.323659E+01	beta*a/t*a/t*a/t	2.892222E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.097842E-01
beta*a/c	6.262151E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	-2.313984E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.357279E-01
beta*a/t	1.425472E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-9.819287E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.323218E+00
a/c*a/t	-3.777197E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	-4.537524E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.764266E+01
a/c*a/c*a/c	4.579666E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-1.739728E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.393267E-03
a/t*a/t*a/t	9.533366E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-2.564408E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.227755E-02
beta*beta*a/c	-3.562324E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.983245E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.329410E-03
beta*beta*a/t	-2.075227E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	2.653822E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.456776E-02
beta*a/c*a/c	-6.265406E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-1.634800E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.905406E-03
beta*a/c*a/t	-7.918485E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.295275E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.821549E+00
beta*a/t*a/t	-2.102532E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.195830E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.556380E-03
a/c*a/c*a/t	5.027213E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.134964E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.646849E-04
a/c*a/t*a/t	7.186683E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	3.200963E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.305634E-03
a/c*a/c*a/c*a/c	-6.174502E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.556709E+01		



Tablo 3.2.11. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-4.556675E-01	beta*beta*a/c*a/c	5.269556E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.132189E+01
beta	-1.794196E-03	beta*beta*a/c*a/t	3.902923E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	2.573786E-04
a/c	-6.410191E+00	beta*beta*a/t*a/t	-1.748943E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	5.744669E-03
a/t	3.029416E+01	beta*a/c*a/c*a/c	2.284010E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	7.933400E-03
beta*beta	2.312158E-04	beta*a/c*a/c*a/t	1.262554E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.890230E-02
a/c*a/c	1.392394E+01	beta*a/c*a/t*a/t	-3.294432E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	7.055112E-02
a/t*a/t	-9.312277E+01	beta*a/t*a/t*a/t	-2.300053E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.792369E-01
beta*a/c	3.271908E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	1.427188E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.775417E+00
beta*a/t	-7.565162E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-2.671467E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.482360E+00
a/c*a/t	-1.713319E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	-1.499283E+02	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.448216E+01
a/c*a/c*a/c	-6.053921E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-2.118641E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-6.900956E-04
a/t*a/t*a/t	7.887814E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-1.345558E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.308974E-03
beta*beta*a/c	-3.573775E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	1.836440E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	9.859130E-03
beta*beta*a/t	4.365446E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	1.636692E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.784781E-02
beta*a/c*a/c	-5.530149E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-2.794343E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.149405E-01
beta*a/c*a/t	8.319651E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.786471E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.084682E+00
beta*a/t*a/t	2.591544E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-9.457355E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	9.077431E-04
a/c*a/c*a/t	-2.598533E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	4.221047E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.051318E-03
a/c*a/t*a/t	1.362770E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.849045E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.067998E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	7.562466E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-5.725208E+00		

Tablo 3.2.12. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-6.657160E-01	beta*beta*a/c*a/c	-7.658479E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	5.621115E+01
beta	-6.767865E-02	beta*beta*a/c*a/t	-2.157153E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-6.032896E-04
a/c	3.639592E+00	beta*beta*a/t*a/t	-1.558525E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.705171E-02
a/t	5.153908E+00	beta*a/c*a/c*a/c	2.861365E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	5.731135E-04
beta*beta	-1.503404E-03	beta*a/c*a/c*a/t	5.782148E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-6.439009E-05
a/c*a/c	-5.424742E+00	beta*a/c*a/t*a/t	1.201526E+01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	3.383273E-01
a/t*a/t	-1.084571E+01	beta*a/t*a/t*a/t	1.131526E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	7.101999E+00
beta*a/c	5.307847E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	-2.018773E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.138800E+01
beta*a/t	5.931553E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-8.655211E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.037532E+00
a/c*a/t	-2.782875E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	-3.771880E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.749858E+01
a/c*a/c*a/c	2.644421E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	4.041728E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	2.605474E-03
a/t*a/t*a/t	7.207356E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	3.132007E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.205877E-03
beta*beta*a/c	4.934647E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	9.811304E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.355992E-03
beta*beta*a/t	9.613608E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	1.307025E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-9.552201E-01
beta*a/c*a/c	-6.712663E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-3.757526E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.077618E+00
beta*a/c*a/t	-4.383522E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.534249E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.922752E+00
beta*a/t*a/t	-1.674296E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.602259E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.043168E-03
a/c*a/c*a/t	4.141160E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-8.444490E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.643054E-03
a/c*a/t*a/t	5.791866E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	2.873475E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	6.851325E-01
a/c*a/c*a/c*a/c	-3.763414E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.233707E+01		

Tablo 3.2.13. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-7.595439E-01	beta*beta*a/c*a/c	-2.185998E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.769033E+01
beta	3.478765E-02	beta*beta*a/c*a/t	-4.892303E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-2.207521E-04
a/c	3.869525E+00	beta*beta*a/t*a/t	-2.803591E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.772929E-03
a/t	3.712500E+00	beta*a/c*a/c*a/c	-1.559379E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.212279E-04
beta*beta	-4.083846E-04	beta*a/c*a/c*a/t	-4.076342E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	1.007394E-03
a/c*a/c	-7.401014E+00	beta*a/c*a/t*a/t	3.036596E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-7.148426E-02
a/t*a/t	-1.875072E+00	beta*a/t*a/t*a/t	-7.734444E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-8.051214E-02
beta*a/c	-1.202552E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	-1.037627E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.426048E-01
beta*a/t	-1.894622E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	2.187119E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.397414E+00
a/c*a/t	-3.113540E+00	a/c*a/t*a/t*a/t	2.070437E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.271160E+00
a/c*a/c*a/c	4.984033E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	1.350683E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	6.594095E-04
a/t*a/t*a/t	3.879160E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t	5.685091E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.095206E-03
beta*beta*a/c	1.294360E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	2.017619E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.294021E-03
beta*beta*a/t	2.213150E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	1.382318E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.457798E-02
beta*a/c*a/c	2.330118E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	2.629263E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.071034E-01
beta*a/c*a/t	3.055501E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	3.698203E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.962151E-01
beta*a/t*a/t	1.882257E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.655865E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-5.119163E-04
a/c*a/c*a/t	7.638513E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.597993E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.525060E-04
a/c*a/t*a/t	-1.997437E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	2.165242E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.239639E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-8.439588E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.295431E+00		

Tablo 3.2.14. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	7.770643E-02	beta*beta*a/c*a/c	4.437848E-04	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.285044E+00
beta	8.034644E-03	beta*beta*a/c*a/t	2.905419E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	5.920005E-05
a/c	-3.956389E-01	beta*beta*a/t*a/t	6.359199E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	3.239219E-03
a/t	-6.970321E-01	beta*a/c*a/c*a/c	-2.622840E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.001807E-02
beta*beta	5.834358E-05	beta*a/c*a/c*a/t	-3.115257E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	1.667650E-03
a/c*a/c	5.268025E-01	beta*a/c*a/t*a/t	-6.473902E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-9.960479E-03
a/t*a/t	1.597239E+00	beta*a/t*a/t*a/t	-1.563048E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.668954E-01
beta*a/c	-9.232644E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	2.198860E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.806209E-01
beta*a/t	-1.419669E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	1.085027E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	6.873894E-01
a/c*a/t	3.582525E+00	a/c*a/t*a/t*a/t	5.511960E+00	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.327277E+00
a/c*a/c*a/c	-2.416585E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-3.521180E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-4.813492E-04
a/t*a/t*a/t	-1.101764E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-5.967107E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.794371E-03
beta*beta*a/c	7.091276E-05	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-6.701665E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.309117E-03
beta*beta*a/t	1.181789E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	1.941793E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.823340E-02
beta*a/c*a/c	8.039799E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	2.902087E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.376678E-01
beta*a/c*a/t	3.949549E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	9.489959E-02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.576353E-01
beta*a/t*a/t	2.208469E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	5.262734E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	6.725464E-04
a/c*a/c*a/t	-4.787151E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	4.275091E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.244977E-04
a/c*a/t*a/t	-8.125616E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.033447E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.678002E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	3.332117E-02	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.983194E+00		

Tablo 3.2.15.Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	2.790336E+00	beta*beta*a/c*a/c	-2.773277E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.583150E+02
beta	-3.368943E-02	beta*beta*a/c*a/t	-9.602345E-05	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-1.249144E-04
a/c	-1.101437E+01	beta*beta*a/t*a/t	5.358996E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.687833E-03
a/t	-2.897224E+01	beta*a/c*a/c*a/c	2.144661E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	6.046912E-03
beta*beta	-3.909368E-04	beta*a/c*a/c*a/t	1.739035E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	2.516174E-02
a/c*a/c	1.117800E+01	beta*a/c*a/t*a/t	6.027774E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	9.774929E-02
a/t*a/t	7.648767E+01	beta*a/t*a/t*a/t	1.604477E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.591694E+00
beta*a/c	5.728760E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	4.562773E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.631099E+00
beta*a/t	4.764167E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	2.418839E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.099752E+01
a/c*a/t	1.133486E+02	a/c*a/t*a/t*a/t	2.055918E+02	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.927152E+01
a/c*a/c*a/c	-4.923588E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	1.068735E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.748746E-04
a/t*a/t*a/t	-6.271771E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	3.809485E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.189122E-05
beta*beta*a/c	2.217583E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.919383E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.205328E-02
beta*beta*a/t	6.211703E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-8.107876E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.944968E-01
beta*a/c*a/c	-2.708563E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-4.671650E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.026635E+00
beta*a/c*a/t	-1.985478E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-7.049947E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.427527E+00
beta*a/t*a/t	-1.684158E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.689369E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-9.332326E-05
a/c*a/c*a/t	-1.116421E+02	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.187120E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.528398E-03
a/c*a/t*a/t	-2.755285E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-6.117832E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.057420E-01
a/c*a/c*a/c*a/c	6.986369E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-8.819191E+01		

Tablo 3.2.16. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta = 0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.038638E+00	beta*beta*a/c*a/c	3.259456E-04	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.591205E+01
beta	1.889001E-03	beta*beta*a/c*a/t	-8.028442E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	7.800932E-05
a/c	9.693862E-03	beta*beta*a/t*a/t	-8.777004E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	2.416920E-03
a/t	-2.401393E+00	beta*a/c*a/c*a/c	4.623199E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.069669E-02
beta*beta	-4.945386E-04	beta*a/c*a/c*a/t	4.698914E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.260696E-02
a/c*a/c	1.079605E+00	beta*a/c*a/t*a/t	-3.259744E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	5.512005E-02
a/t*a/t	7.700189E+00	beta*a/t*a/t*a/t	-1.691417E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.967962E-01
beta*a/c	7.810478E-03	a/c*a/c*a/c*a/t	9.623145E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.015876E-01
beta*a/t	-5.257571E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	4.935870E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	3.391073E+00
a/c*a/t	1.208875E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	2.409499E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.747861E+01
a/c*a/c*a/c	-7.599451E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-4.247953E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.150082E-04
a/t*a/t*a/t	-5.139950E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	3.883730E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.199776E-03
beta*beta*a/c	5.791982E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	2.630410E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.365046E-02
beta*beta*a/t	2.991925E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	6.933474E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.022061E-01
beta*a/c*a/c	-6.881619E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-7.391971E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.875798E-01
beta*a/c*a/t	1.128600E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.378578E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.481245E+00
beta*a/t*a/t	1.837776E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.819744E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.930050E-04
a/c*a/c*a/t	-1.932696E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	4.221059E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.111606E-03
a/c*a/t*a/t	-3.361295E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.377560E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	5.337099E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	1.218384E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.392592E+01		

Tablo 3.2.17. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta= 45\text{-}75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	4.292051E-01	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c$	-6.157489E-04	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-2.038870E+01
$\beta$	-2.825236E-03	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/t$	9.493636E-04	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-3.079878E-05
$a/c$	4.659734E+00	$\beta^2\beta^2 a/t^2 a/t$	-9.451660E-05	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	7.099751E-04
$a/t$	1.097063E+00	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-3.732831E-02	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	2.752282E-03
$\beta^2\beta^2$	-1.044657E-05	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	2.236690E-01	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.234305E-04
$a/c^2 a/c$	-3.922687E+00	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	2.747550E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	1.613973E-02
$a/t^2 a/t$	8.539083E-02	$\beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-8.003570E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	2.433676E-01
$\beta^2 a/c$	-1.130775E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	5.985451E+00	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	2.396239E-01
$\beta^2 a/t$	-2.381930E-02	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	3.145342E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	2.133045E+00
$a/c^2 a/t$	4.082430E+00	$a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	1.003335E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	1.004751E+01
$a/c^2 a/c^2 a/c$	1.299205E+00	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	2.403245E-04	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-9.268604E-05
$a/t^2 a/t^2 a/t$	1.551247E+00	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.602415E-03	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.081192E-03
$\beta^2\beta^2 a/c$	6.286226E-04	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.739642E-03	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-4.483766E-04
$\beta^2\beta^2 a/t$	-3.285356E-05	$\beta^2\beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	5.666227E-04	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-3.262197E-02
$\beta^2 a/c^2 a/c$	1.030269E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	4.547603E-03	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.144063E-01
$\beta^2 a/c^2 a/t$	-8.513122E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.143854E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.406946E+00
$\beta^2 a/t^2 a/t$	3.258412E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-5.261305E-01	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	1.275707E-04
$a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.113430E+01	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-6.541142E-02	$\beta^2\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	1.053930E-04
$a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.764025E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-8.725577E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	1.514890E-02
$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-1.478872E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.525963E+01		

Tablo 3.2.18. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta= 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	4.317128E-02	beta*beta*a/c*a/c	5.057601E-04	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.613800E+00
beta	4.079567E-03	beta*beta*a/c*a/t	1.767488E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	2.298098E-05
a/c	-2.302320E-01	beta*beta*a/t*a/t	1.343160E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	6.137892E-04
a/t	-3.865767E-01	beta*a/c*a/c*a/c	2.608761E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	2.895443E-03
beta*beta	-5.604512E-05	beta*a/c*a/c*a/t	1.363862E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	1.438980E-03
a/c*a/c	3.021095E-01	beta*a/c*a/t*a/t	2.316168E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	6.885468E-03
a/t*a/t	8.734059E-01	beta*a/t*a/t*a/t	4.351928E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	8.065386E-02
beta*a/c	6.509232E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	1.154928E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	8.282631E-02
beta*a/t	3.591293E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	5.609668E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	3.455945E-01
a/c*a/t	1.955102E+00	a/c*a/t*a/t*a/t	2.824496E+00	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.619326E+00
a/c*a/c*a/c	-1.387018E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-1.870613E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-7.542162E-05
a/t*a/t*a/t	-5.715669E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-1.644679E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-9.795644E-04
beta*beta*a/c	-5.330791E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-3.468549E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.603843E-04
beta*beta*a/t	-5.781552E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-7.190119E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-9.822301E-03
beta*a/c*a/c	-6.692641E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-3.303733E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.487475E-02
beta*a/c*a/t	-1.326837E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.400836E-02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.208920E-01
beta*a/t*a/t	-7.900742E-02	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.178212E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.116797E-04
a/c*a/c*a/t	-2.544083E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.084151E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.151449E-04
a/c*a/t*a/t	-4.355407E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.588225E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.534687E-03
a/c*a/c*a/c*a/c	1.922656E-02	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.525947E+00		



Tablo 3.2.19. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta = 45\text{-}75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.354473E+00	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c$	1.019179E-03	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.926329E+01
$\beta$	-4.220695E-02	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t$	6.179656E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	2.694598E-05
$a/c$	-2.072998E+00	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t$	6.756829E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	6.618851E-04
$a/t$	-1.144862E+01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	2.533666E-02	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	7.310373E-03
$\beta^2 \beta^2$	3.186556E-04	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	4.866445E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	7.280885E-03
$a/c^2 a/c$	6.182222E-01	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	1.677804E+00	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	6.540060E-03
$a/t^2 a/t$	2.473263E+01	$\beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	5.202867E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	2.478179E-01
$\beta^2 a/c$	1.467977E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	2.956691E+00	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	5.866053E-01
$\beta^2 a/t$	4.001203E-01	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	3.310526E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	7.250887E-01
$a/c^2 a/t$	2.231667E+01	$a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	2.982157E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	4.839171E+00
$a/c^2 a/c^2 a/c$	1.531475E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-2.838152E-04	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-2.525691E-05
$a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.518135E+01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-3.567269E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.392397E-03
$\beta^2 \beta^2 a/c$	-1.396990E-03	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.266037E-02	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-3.829091E-03
$\beta^2 \beta^2 a/t$	-3.184968E-03	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-4.101808E-03	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.819298E-02
$\beta^2 a/c^2 a/c$	-9.991051E-02	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-2.138347E-03	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.263744E-01
$\beta^2 a/c^2 a/t$	-7.952422E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.050261E-01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-4.035225E-01
$\beta^2 a/t^2 a/t$	-8.536140E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-1.059595E+00	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	5.919573E-05
$a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.359831E+01	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-9.809778E-01	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	5.762335E-04
$a/c^2 a/t^2 a/t$	-4.996896E+01	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-1.886980E-01	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	7.924954E-03
$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-5.001833E-02	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-8.489976E+00		

Tablo 3.2.20. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	6.716627E-02	beta*beta*a/c*a/t	6.854350E-03	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/t	7.159475E-07
beta	-1.408086E-02	beta*beta*a/t*a/t	-5.095199E-03	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t	-3.828813E-05
a/c	-4.194961E-01	beta*a/c*a/c*a/c	2.380950E-02	beta*beta*beta*a/t*a/t*a/t	-1.012805E-04
a/t	-5.912180E-01	beta*a/c*a/c*a/t	5.079819E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	4.297577E-05
beta*beta	-3.075827E-04	beta*a/c*a/t*a/t	1.054183E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	2.682814E-03
a/c*a/c	6.282319E-01	beta*a/t*a/t*a/t	7.058755E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.768198E-02
a/t*a/t	1.329771E+00	a/c*a/c*a/c*a/t	2.582968E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	1.108196E-02
beta*a/c	5.534399E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	1.203177E+01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	2.737494E-02
beta*a/t	4.588556E-02	a/c*a/t*a/t*a/t	5.267472E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.028647E-01
a/c*a/t	3.621707E+00	beta*beta*beta*a/c*a/c	4.200067E-06	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	8.539016E-01
beta*beta*beta	1.015212E-05	beta*beta*beta*a/c*a/t	1.255543E-05	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	8.138583E-01
a/c*a/c*a/c	-3.011816E-01	beta*beta*beta*a/t*a/t	1.484848E-04	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.792472E+00
a/t*a/t*a/t	-8.691987E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-3.051691E-04	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	2.704160E-05
beta*beta*a/c	-5.652332E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-7.306425E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.288301E-04
beta*beta*a/t	2.138806E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.585407E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.618662E-03
beta*a/c*a/c	-5.861487E-02	beta*beta*a/t*a/t*a/t	3.398312E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.258730E-02
beta*a/c*a/t	-4.496853E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-3.111899E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.607889E-02
beta*a/t*a/t	-1.012552E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.092173E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.588477E-01
a/c*a/c*a/t	-5.388274E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.210564E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.348793E-01
a/c*a/t*a/t	-8.077631E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.319870E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	8.172120E-04
a/c*a/c*a/c*a/c	4.232330E-02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.632634E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.777110E-03
beta*beta*beta*a/c	-7.438695E-06	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-5.779179E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.748541E-02
beta*beta*beta*a/t	-6.252041E-05	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.874826E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.950513E-04
beta*beta*a/c*a/c	6.895064E-04	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/c	-7.189911E-07		

Tablo 3.2.21. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta=45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	2.614897E+00	beta*beta*a/c*a/c	1.887162E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.366430E+01
beta	-1.027694E-01	beta*beta*a/c*a/t	9.503053E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	7.750708E-05
a/c	-7.612506E+00	beta*beta*a/t*a/t	8.225535E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	1.459287E-03
a/t	-1.471650E+01	beta*a/c*a/c*a/c	8.996577E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.015277E-02
beta*beta	8.411775E-04	beta*a/c*a/c*a/t	8.837180E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	1.251191E-02
a/c*a/c	6.902824E+00	beta*a/c*a/t*a/t	2.527619E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	2.032529E-02
a/t*a/t	3.148573E+01	beta*a/t*a/t*a/t	7.322881E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.992152E-01
beta*a/c	2.758552E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	4.876188E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.022833E+00
beta*a/t	5.140864E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	3.595847E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.854736E-01
a/c*a/t	3.459088E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	4.615679E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.612128E+00
a/c*a/c*a/c	-2.473108E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-6.607414E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.089217E-04
a/t*a/t*a/t	-2.137702E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-6.218349E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.487433E-03
beta*beta*a/c	-2.138010E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.861652E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-6.836370E-03
beta*beta*a/t	-3.944901E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-5.520468E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.483763E-02
beta*a/c*a/c	-2.504746E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-1.075393E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.000584E-01
beta*a/c*a/t	-1.269859E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.310525E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.892314E-01
beta*a/t*a/t	-1.085402E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.522024E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.802266E-06
a/c*a/c*a/t	-2.198310E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.703492E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.015529E-03
a/c*a/t*a/t	-6.855741E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.271853E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	9.786027E-03
a/c*a/c*a/c*a/c	2.951048E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.461357E+00		

Tablo 3.2.22. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	5.548241E-01	beta*beta*a/c*a/c	2.188567E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.244604E+00
beta	-1.431092E-02	beta*beta*a/c*a/t	8.024183E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.150907E-04
a/c	3.264997E+00	beta*beta*a/t*a/t	-7.439480E-05	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	4.254249E-03
a/t	-8.321575E-01	beta*a/c*a/c*a/c	6.204377E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.284536E-02
beta*beta	-2.567644E-05	beta*a/c*a/c*a/t	1.230620E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	3.198686E-03
a/c*a/c	-3.865565E+00	beta*a/c*a/t*a/t	1.786900E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	8.197256E-02
a/t*a/t	4.394949E+00	beta*a/t*a/t*a/t	1.947806E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.181218E+00
beta*a/c	8.455159E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	-2.950828E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.459915E+00
beta*a/t	1.542834E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-5.039900E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.735559E-01
a/c*a/t	-2.802593E+00	a/c*a/t*a/t*a/t	2.097032E+00	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.005977E+00
a/c*a/c*a/c	1.611134E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-9.018798E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.396428E-04
a/t*a/t*a/t	-2.783310E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-1.032665E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.704302E-03
beta*beta*a/c	-1.745664E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.077853E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.966062E-03
beta*beta*a/t	-5.520181E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	6.095991E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.663487E-01
beta*a/c*a/c	-1.277133E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-8.796039E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.020472E-01
beta*a/c*a/t	-8.741787E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.834441E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.506936E-01
beta*a/t*a/t	-3.305206E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.487962E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.383114E-04
a/c*a/c*a/t	5.940138E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.033309E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	5.424631E-04
a/c*a/t*a/t	-1.711562E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	4.119974E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	9.958488E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-2.105771E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	3.199998E+00		

Tablo 3.2.23. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	2.942408E+00	beta*beta*a/c*a/c	2.030666E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.711792E+01
beta	-1.117366E-01	beta*beta*a/c*a/t	2.235437E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-7.338863E-05
a/c	-4.643819E+00	beta*beta*a/t*a/t	1.809674E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.843006E-03
a/t	-1.132070E+01	beta*a/c*a/c*a/c	-5.495661E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	4.107284E-02
beta*beta	1.042012E-03	beta*a/c*a/c*a/t	9.772249E-02	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	5.074902E-02
a/c*a/c	-2.703365E+00	beta*a/c*a/t*a/t	6.548119E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.763296E-01
a/t*a/t	3.897556E+01	beta*a/t*a/t*a/t	1.385916E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.492594E-01
beta*a/c	3.242961E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	-4.532513E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.931872E+00
beta*a/t	6.302321E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-2.018503E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.450557E+01
a/c*a/t	2.661428E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	1.042112E+02	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.342112E+01
a/c*a/c*a/c	4.474963E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-5.662626E-06	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	9.310080E-04
a/t*a/t*a/t	-3.045462E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-8.605509E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.321974E-03
beta*beta*a/c	-3.610627E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-6.656496E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.617463E-02
beta*beta*a/t	-6.618790E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-1.334215E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.452944E-01
beta*a/c*a/c	-1.184662E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.649113E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.667596E-02
beta*a/c*a/t	-2.003102E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	7.932428E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.958921E+00
beta*a/t*a/t	-1.843416E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.818280E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.825235E-04
a/c*a/c*a/t	4.243849E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.148927E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	6.126010E-03
a/c*a/t*a/t	-1.216471E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	8.329899E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.029766E-01
a/c*a/c*a/c*a/c	-8.855622E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	6.982784E+01		

Tablo 3.2.24. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	6.935553E-02	beta*beta*a/c*a/t	2.237173E-02	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/t	3.644038E-06
beta	-2.632873E-02	beta*beta*a/t*a/t	6.925584E-03	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t	-3.614991E-05
a/c	-2.984426E-01	beta*a/c*a/c*a/c	1.900675E-02	beta*beta*beta*a/t*a/t*a/t	-5.231656E-05
a/t	-4.495578E-01	beta*a/c*a/c*a/t	5.971931E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	3.789894E-05
beta*beta	8.463680E-04	beta*a/c*a/t*a/t	1.685095E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	6.966051E-03
a/c*a/c	3.878164E-01	beta*a/t*a/t*a/t	2.514992E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	4.897931E-02
a/t*a/t	8.330429E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	1.046770E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	3.210874E-02
beta*a/c	1.371466E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	3.822347E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.112122E-02
beta*a/t	1.567916E-01	a/c*a/t*a/t*a/t	1.647307E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	3.569054E-01
a/c*a/t	1.849365E+00	beta*beta*beta*a/c*a/c	-1.368173E-05	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	8.579886E-01
beta*beta*beta	-2.607947E-06	beta*beta*beta*a/c*a/t	3.102057E-06	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.269707E-01
a/c*a/c*a/c	-1.777433E-01	beta*beta*beta*a/t*a/t	1.044519E-04	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.770759E-01
a/t*a/t*a/t	-4.674440E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-6.205194E-04	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	2.067644E-05
beta*beta*a/c	-4.150578E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-2.112762E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-7.648271E-04
beta*beta*a/t	-2.693196E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-4.830339E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.723593E-02
beta*a/c*a/c	-9.409918E-02	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-5.620344E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.276831E-02
beta*a/c*a/t	-7.692916E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-9.063440E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.927288E-02
beta*a/t*a/t	-3.612634E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.477639E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.143185E-01
a/c*a/c*a/t	-2.325828E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.361815E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.035189E-01
a/c*a/t*a/t	-3.196129E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.091964E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.986968E-03
a/c*a/c*a/c*a/c	2.464073E-02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.438421E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.173916E-02
beta*beta*beta*a/c	2.480326E-05	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.673368E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.621161E-02
beta*beta*beta*a/t	-5.414298E-05	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.844338E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.375112E-03
beta*beta*a/c*a/c	2.871118E-03	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/c	1.865946E-06		

Tablo 3.2.25. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	7.607417	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c$	0.005754	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-29.2262
$\beta$	-0.25135	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t$	0.005317	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	0.000287
$a/c$	-19.528	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t$	0.004087	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	0.002276
$a/t$	-20.1641	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	0.28457	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-0.00267
$\beta^2 \beta^2$	0.001981	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	1.062721	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-0.011
$a/c^2 a/c$	20.97908	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	0.031042	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	0.059461
$a/t^2 a/t$	29.29797	$\beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	0.164354	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	0.544824
$\beta^2 a/c$	0.681014	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	23.11875	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-0.2506
$\beta^2 a/t$	0.550234	$a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	68.35885	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	6.195427
$a/c^2 a/t$	39.90685	$a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-1.19852	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	24.51292
$a/c^2 a/c^2 a/c$	-8.45084	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-0.00228	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-0.00028
$a/t^2 a/t^2 a/t$	-11.3386	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-0.00567	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-0.00054
$\beta^2 \beta^2 a/c$	-0.00549	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	0.004918	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	0.008204
$\beta^2 \beta^2 a/t$	-0.00391	$\beta^2 \beta^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-0.00027	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-0.09254
$\beta^2 a/c^2 a/c$	-0.71668	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	-0.03594	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-0.21227
$\beta^2 a/c^2 a/t$	-0.8924	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-0.45823	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-4.21469
$\beta^2 a/t^2 a/t$	-0.67964	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-0.64614	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	0.0002
$a/c^2 a/c^2 a/t$	-51.186	$\beta^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	0.860618	$\beta^2 \beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	-0.00133
$a/c^2 a/t^2 a/t$	-34.0583	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t$	-3.11174	$\beta^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t^2 a/t$	0.053829
$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/c$	1.07561	$a/c^2 a/c^2 a/c^2 a/t^2 a/t$	-40.3309		

Tablo 3.2.26. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 0-45^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-3.184882E-02	beta*beta*a/c*a/t	-1.174862E-02	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/t	-5.140093E-06
beta	-9.592689E-03	beta*beta*a/t*a/t	-3.165298E-03	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t	-5.337436E-06
a/c	1.671046E-01	beta*a/c*a/c*a/c	-3.193031E-02	beta*beta*beta*a/t*a/t*a/t	6.094476E-06
a/t	1.677129E-01	beta*a/c*a/c*a/t	-6.772744E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-5.327890E-05
beta*beta	3.372802E-04	beta*a/c*a/t*a/t	-1.330995E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.154064E-03
a/c*a/c	-2.232377E-01	beta*a/t*a/t*a/t	-1.272709E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.908059E-02
a/t*a/t	-4.290381E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	-4.298470E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.129821E-02
beta*a/c	-7.060819E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	-2.585365E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.198669E-02
beta*a/t	-9.550866E-02	a/c*a/t*a/t*a/t	-1.502228E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.246970E-01
a/c*a/t	-8.419831E-01	beta*beta*beta*a/c*a/c	-1.571400E-05	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.267342E+00
beta*beta*beta	-6.713672E-06	beta*beta*beta*a/c*a/t	2.480781E-05	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.395317E-01
a/c*a/c*a/c	1.002057E-01	beta*beta*beta*a/t*a/t	-9.424967E-06	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.814124E-01
a/t*a/t*a/t	3.027788E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	3.480438E-04	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	3.271683E-06
beta*beta*a/c	1.556775E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/t	1.336189E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	6.245686E-04
beta*beta*a/t	1.942753E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	2.726624E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.734338E-02
beta*a/c*a/c	8.249594E-02	beta*beta*a/t*a/t*a/t	2.515997E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.244805E-02
beta*a/c*a/t	5.899810E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	3.913131E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	9.323800E-02
beta*a/t*a/t	1.805503E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	2.622834E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	5.525604E-01
a/c*a/c*a/t	1.032658E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.724859E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.020737E-01
a/c*a/t*a/t	2.119072E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	9.367728E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.295065E-03
a/c*a/c*a/c*a/c	-1.361799E-02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	5.565160E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.516171E-02
beta*beta*beta*a/c	2.036805E-05	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.076695E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.291794E-02
beta*beta*beta*a/t	-5.515439E-06	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.854679E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.077622E-03
beta*beta*a/c*a/c	-5.960254E-04	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/c	2.786942E-06		

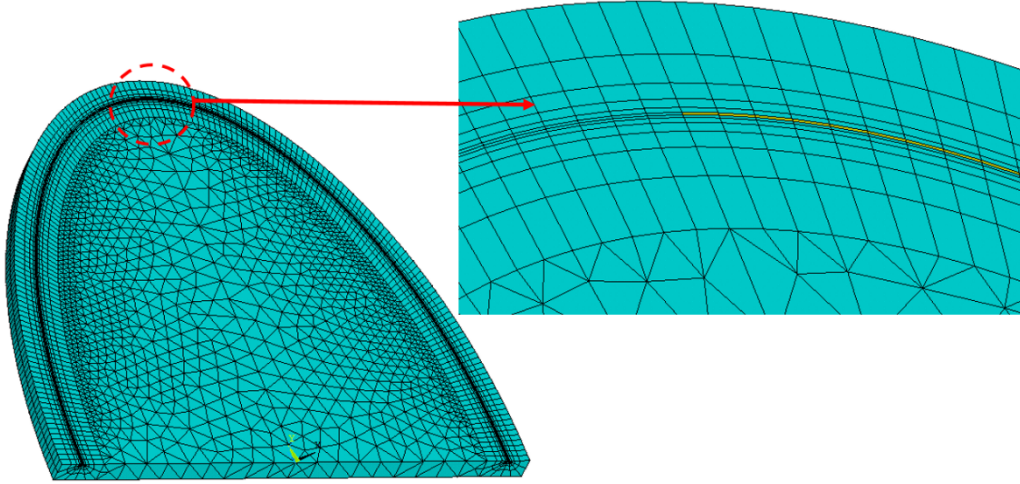


Tablo 3.2.27. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, serbest yüzey noktasında ( $\theta=0^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-4.015864E+00	beta*beta*a/c*a/c	-4.430207E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.351800E+00
beta	1.338491E-01	beta*beta*a/c*a/t	8.172282E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-1.619862E-04
a/c	1.161638E+01	beta*beta*a/t*a/t	1.819466E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	6.987606E-03
a/t	-6.490122E+00	beta*a/c*a/c*a/c	-1.600043E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.831754E-02
beta*beta	-1.154763E-03	beta*a/c*a/c*a/t	1.795150E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	9.003836E-03
a/c*a/c	-1.149899E+01	beta*a/c*a/t*a/t	2.414737E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.482217E-01
a/t*a/t	1.249630E+01	beta*a/t*a/t*a/t	2.344914E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.047885E+00
beta*a/c	-4.833152E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	3.197013E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.302324E-02
beta*a/t	1.312694E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	7.103218E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.251187E+00
a/c*a/t	5.069636E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	3.309583E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.234241E+01
a/c*a/c*a/c	3.575598E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	1.500081E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.106725E-03
a/t*a/t*a/t	-7.718625E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-1.228600E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-9.062579E-03
beta*beta*a/c	4.437083E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.718464E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.081825E-03
beta*beta*a/t	-3.369810E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-1.701767E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.558678E-01
beta*a/c*a/c	4.834578E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.670986E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.825294E-01
beta*a/c*a/t	-1.336538E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-9.593733E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.127045E+00
beta*a/t*a/t	-3.222892E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.288560E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.385074E-03
a/c*a/c*a/t	-6.293217E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.093139E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.261397E-04
a/c*a/t*a/t	-8.338083E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-4.833669E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.371240E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-3.396827E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.967554E+01		

### 3.2.5.2 Çatlak Ucu Derinlik Noktaları ( $\theta=90^\circ$ )

Karışık mod GŞF empirik denklemleri için çatlak ucu serbest yüzey noktaları incelendikten sonra çatlak ucu derinlik yüzey noktası da ele alınmıştır. Şekil 3.2.102'de çatlak ucu derinlik noktası, örnek bir sonlu elemanlar modeli üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.2.102. Çatlak ucu derinlik noktasını sonlu elemanlar modeli üzerinde gösterimi

#### 3.2.5.2.1 Eksenel gerilmeye maruz eğik yüzey çatlağı

Bölüm 3.2.1'de verilen, eksenel gerilmeye maruz eğik çatlaklar için analiz sonuçları kullanılarak empirik denklemler elde edilmiştir. Çatlak ucu derinlik noktasındaki karışık mod GŞF değerleri Minitab (2014) programına aktarılarak, denklemlerin katsayıları hesaplanmıştır. Sırasıyla mod-I ve mod-III GŞF denklemlerinin katsayıları çatlağın eğiklik açısının 45 dereceden küçük ve 45 dereceden büyük olması durumları için Tablo 3.2.28-3.2.31'de verilmiştir. Eksenel gerilmeye maruz eğik yüzey çatlağı probleminde, çatlak ucu derinlik noktasındaki mod-II GŞF değerleri 0 olduğundan dolayı denklem oluşturulmamıştır.

Tablo 3.2.28. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta = 0-45^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta = 90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	3.473212E+00	beta*beta*a/c*a/c	1.595216E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-9.237996E+01
beta	-2.551718E-02	beta*beta*a/c*a/t	2.462541E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.303283E-04
a/c	-6.551095E+00	beta*beta*a/t*a/t	-7.829415E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	3.872458E-03
a/t	-1.173193E+01	beta*a/c*a/c*a/c	8.146412E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.069747E-03
beta*beta	-4.382116E-04	beta*a/c*a/c*a/t	1.066875E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.375353E-02
a/c*a/c	6.785518E+00	beta*a/c*a/t*a/t	1.123088E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	7.408442E-02
a/t*a/t	3.415870E+01	beta*a/t*a/t*a/t	3.399145E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	9.471126E-01
beta*a/c	1.204853E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	2.346053E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	9.857284E-01
beta*a/t	1.067651E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	1.409804E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	8.093768E+00
a/c*a/t	4.507002E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	7.969449E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.972249E+01
a/c*a/c*a/c	-2.854299E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-8.795742E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-6.119303E-04
a/t*a/t*a/t	-2.268136E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-5.858904E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.836875E-03
beta*beta*a/c	-5.654872E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	1.378301E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.437472E-03
beta*beta*a/t	1.655711E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	6.405488E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.363801E-01
beta*a/c*a/c	-1.715704E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-1.142394E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.178495E-01
beta*a/c*a/t	-6.919276E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.215627E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.311994E+00
beta*a/t*a/t	-1.371976E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.878147E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.658779E-04
a/c*a/c*a/t	-5.388255E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.204819E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.098650E-03
a/c*a/t*a/t	-1.215614E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.154593E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.584052E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	3.797918E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.056648E+01		

Tablo 3.2.29. Aksel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta=45-75^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	5.756271E+00	beta*beta*a/c*a/c	1.726610E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-6.185107E+01
beta	-1.363924E-01	beta*beta*a/c*a/t	1.004030E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	7.895687E-05
a/c	-9.590598E+00	beta*beta*a/t*a/t	6.718014E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	3.171873E-03
a/t	-1.675140E+01	beta*a/c*a/c*a/c	8.671265E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.265056E-02
beta*beta	8.518541E-04	beta*a/c*a/c*a/t	1.284776E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	7.154140E-03
a/c*a/c	8.462427E+00	beta*a/c*a/t*a/t	2.727394E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	5.650200E-02
a/t*a/t	4.365379E+01	beta*a/t*a/t*a/t	5.719987E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	7.833477E-01
beta*a/c	2.595542E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	1.961275E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.009859E+00
beta*a/t	4.668324E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	1.154603E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.254874E+00
a/c*a/t	5.187379E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	6.911961E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.220185E+01
a/c*a/c*a/c	-3.191141E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-6.429202E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.719996E-04
a/t*a/t*a/t	-2.603462E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-9.003194E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.761801E-03
beta*beta*a/c	-1.880438E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.664981E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.914777E-03
beta*beta*a/t	-3.507232E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-3.417437E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-8.925518E-02
beta*a/c*a/c	-2.324905E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-1.069963E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.964616E-01
beta*a/c*a/t	-1.377865E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-4.691983E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.649591E+00
beta*a/t*a/t	-1.036701E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.313838E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	3.798595E-04
a/c*a/c*a/t	-5.120430E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.356908E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	5.962603E-04
a/c*a/t*a/t	-1.230224E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.440636E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.957849E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	3.981624E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.295275E+01		

Tablo 3.2.30. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta=0-45^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.109890E-02	beta*beta*a/c*a/c	-2.994988E-05	a/c*a/c*a/t*a/t	-3.323098E-01
beta	-3.656087E-02	beta*beta*a/c*a/t	-9.017159E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-3.829310E-06
a/c	-2.985599E-02	beta*beta*a/t*a/t	-4.986886E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-3.573209E-04
a/t	-4.595118E-02	beta*a/c*a/c*a/c	4.536319E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-8.812493E-04
beta*beta	3.457107E-04	beta*a/c*a/c*a/t	3.355533E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-9.402551E-04
a/c*a/c	4.505427E-02	beta*a/c*a/t*a/t	-2.825694E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.424482E-03
a/t*a/t	1.155523E-01	beta*a/t*a/t*a/t	-5.417048E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	3.207738E-02
beta*a/c	2.311939E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	1.390238E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.554620E-02
beta*a/t	-1.862853E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	5.943775E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.265977E-02
a/c*a/t	1.701550E-01	a/c*a/t*a/t*a/t	2.265325E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.639390E-01
a/c*a/c*a/c	-2.260262E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c	2.606676E-05	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	4.512227E-05
a/t*a/t*a/t	-7.267222E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t	9.151237E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.624807E-04
beta*beta*a/c	-1.160236E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	1.167970E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.723886E-04
beta*beta*a/t	2.973872E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	5.292473E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-5.303855E-03
beta*a/c*a/c	-1.269304E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-5.929800E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-8.074099E-03
beta*a/c*a/t	2.109639E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-7.620391E-03	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.356191E-02
beta*a/t*a/t	3.979850E-02	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.831579E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.708355E-05
a/c*a/c*a/t	-2.729773E-01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	7.385642E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-6.667653E-05
a/c*a/t*a/t	-3.943710E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.021741E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.021819E-03
a/c*a/c*a/c*a/c	3.263024E-03	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.958740E-01		

Tablo 3.2.31. Eksenel gerilmeye maruz eğik çatlak ve  $\beta=45-75^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-8.692147E-01	beta*beta*a/c*a/c	-3.316637E-04	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.065648E+00
beta	-8.824837E-03	beta*beta*a/c*a/t	-4.636621E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-4.877845E-06
a/c	2.078744E+00	beta*beta*a/t*a/t	-4.028945E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.517709E-04
a/t	5.714173E+00	beta*a/c*a/c*a/c	-8.861458E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.589988E-03
beta*beta	1.829173E-04	beta*a/c*a/c*a/t	-2.855789E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.499867E-03
a/c*a/c	-1.417217E+00	beta*a/c*a/t*a/t	-8.054012E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.125380E-03
a/t*a/t	-9.703932E+00	beta*a/t*a/t*a/t	-2.833559E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.560892E-02
beta*a/c	-5.061209E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	-1.003503E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.502961E-01
beta*a/t	-2.361679E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-5.102230E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.182138E-01
a/c*a/t	-1.241837E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	-9.516908E+00	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.347563E+00
a/c*a/c*a/c	3.484943E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	7.768679E-05	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	2.686546E-05
a/t*a/t*a/t	5.327251E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	2.782965E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.138849E-04
beta*beta*a/c	3.873602E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	7.793416E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.936476E-03
beta*beta*a/t	2.157878E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	2.762367E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.308458E-02
beta*a/c*a/c	3.935167E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	5.248584E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.597131E-02
beta*a/c*a/t	5.016093E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	4.881745E-02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.455149E-01
beta*a/t*a/t	4.299737E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	3.159291E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	6.761124E-05
a/c*a/c*a/t	6.834907E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	5.447356E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.409482E-04
a/c*a/t*a/t	1.784348E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-9.346470E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.476132E-03
a/c*a/c*a/c*a/c	-2.707387E-02	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.716682E+00		

#### *3.2.5.2.2 Eksenel gerilmeye maruz dönmüş yüzey çatlakları*

Bölüm 3.2.2'de verilen, eksenel gerilmeye maruz dönmüş yüzey çatlakları için elde edilen analiz sonuçları kullanılarak empirik denklemler elde edilmiştir. Çatlak ucu derinlik noktasındaki karışık mod GŞF değerleri Minitab (2014) programına aktarılarak, denklemlerin katsayıları hesaplanmıştır. Sırasıyla mod-I ve mod-II GŞF denklemlerinin katsayıları çatlak ucu derinlik noktasındaki mod-III GŞF değerleri 0 olduğundan dolayı denklem oluşturulmamıştır.

#### *3.2.5.2.3 Eğilme gerilmesine maruz eğik yüzey çatlakları*

Bölüm 3.2.3'te verilen, eğilme gerilmesine maruz eğik çatlaklar için analiz sonuçları kullanılarak empirik denklemler elde edilmiştir. Çatlak ucu derinlik noktasındaki karışık mod GŞF değerleri Minitab (2014) programına aktarılarak, denklemlerin katsayıları hesaplanmıştır. Sırasıyla mod-I ve mod-III GŞF denklemlerinin katsayıları çatlak ucu derinlik noktasındaki mod-II GŞF değerleri 0 olduğundan dolayı denklem oluşturulmamıştır.

#### *3.2.5.2.4 Eğilme gerilmesine maruz dönmüş yüzey çatlakları*

Bölüm 3.2.4'te verilen, eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlaklar için hesaplanan analiz sonuçları kullanılarak empirik denklemler elde edilmiştir. Çatlak ucu derinlik noktasındaki karışık mod GŞF değerleri Minitab (2014) programına aktarılarak, denklemlerin katsayıları hesaplanmıştır. Sırasıyla mod-I ve mod-II GŞF denklemlerinin katsayıları çatlak ucu derinlik noktasındaki mod-III GŞF değerleri 0 olduğundan denklem oluşturulmamıştır. 45 dereceden küçük mod-I ve mod-II GŞF değerlerinin verdiği 58 katsayılı denklem ile sonlu elemanlar modeli ile elde edilen mod-II ve mod-III GŞF değerleri farkı %10'dur. Bu nedenle, 70 katsayılı denklem Tablo 3.2.40 ve Tablo 3.2.42'de verilmiştir.

Tablo 3.2.32. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 0-45^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	3.525743E+00	beta*beta*a/c*a/c	1.022455E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.130654E+02
beta	-5.882773E-02	beta*beta*a/c*a/t	1.360232E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	4.108763E-05
a/c	-6.105468E+00	beta*beta*a/t*a/t	-1.306424E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	6.507581E-03
a/t	-1.339994E+01	beta*a/c*a/c*a/c	1.583296E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.991078E-02
beta*beta	-3.733365E-04	beta*a/c*a/c*a/t	3.377225E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	4.901561E-03
a/c*a/c	5.690269E+00	beta*a/c*a/t*a/t	6.008521E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.933000E-01
a/t*a/t	4.053938E+01	beta*a/t*a/t*a/t	7.846626E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	3.167185E+00
beta*a/c	2.994633E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	2.202401E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.716009E+00
beta*a/t	5.346758E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	1.581153E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	8.687525E+00
a/c*a/t	4.756830E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	9.986640E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.759798E+01
a/c*a/c*a/c	-2.228353E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-3.694043E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-8.047309E-04
a/t*a/t*a/t	-2.823434E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-1.648791E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.079227E-03
beta*beta*a/c	-7.399468E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.645272E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.096434E-03
beta*beta*a/t	-1.013488E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	2.068137E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.198566E-01
beta*a/c*a/c	-3.692467E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-2.095501E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.011443E+00
beta*a/c*a/t	-2.734228E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.455020E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-6.283841E+00
beta*a/t*a/t	-1.191279E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.378473E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	7.870720E-04
a/c*a/c*a/t	-5.299278E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.878158E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	9.367193E-04
a/c*a/t*a/t	-1.414115E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.884966E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.656407E-01
a/c*a/c*a/c*a/c	2.847962E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.607154E+01		



Tablo 3.2.33. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-3.854011E-01	beta*beta*a/c*a/c	-1.320513E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	9.347968E+01
beta	4.229064E-02	beta*beta*a/c*a/t	-1.349726E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-5.283726E-05
a/c	1.172266E+01	beta*beta*a/t*a/t	-4.933508E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.173671E-03
a/t	2.113229E+01	beta*a/c*a/c*a/c	-1.051505E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.311909E-02
beta*beta	-4.861905E-04	beta*a/c*a/c*a/t	-2.240440E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.777408E-03
a/c*a/c	-1.512419E+01	beta*a/c*a/t*a/t	-2.482453E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.170682E-01
a/t*a/t	-2.519146E+01	beta*a/t*a/t*a/t	-3.718297E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-9.382235E-01
beta*a/c	-2.460402E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	-4.975452E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.142375E+00
beta*a/t	-5.292749E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-1.639177E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-9.322962E+00
a/c*a/t	-9.578822E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	-8.178797E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.873349E+01
a/c*a/c*a/c	6.610924E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	4.560479E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	6.403663E-04
a/t*a/t*a/t	1.685922E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	1.350018E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.117939E-03
beta*beta*a/c	1.544740E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	1.599485E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.455051E-03
beta*beta*a/t	3.898671E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	2.791523E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.141956E-01
beta*a/c*a/c	2.628221E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.340957E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.702998E-01
beta*a/c*a/t	2.054422E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	9.106482E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	5.027762E+00
beta*a/t*a/t	6.093342E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	2.487753E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.296140E-04
a/c*a/c*a/t	1.154041E+02	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	1.343452E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.000891E-04
a/c*a/t*a/t	1.347396E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	6.622876E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.983808E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-8.841107E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	7.039098E+01		

Tablo 3.2.34. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 0-45^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-9.052809E-02	beta*beta*a/c*a/c	-1.210204E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	5.163660E+00
beta	-2.489688E-02	beta*beta*a/c*a/t	-2.280311E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-8.575636E-05
a/c	5.016389E-01	beta*beta*a/t*a/t	5.108627E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.289004E-03
a/t	5.187451E-01	beta*a/c*a/c*a/c	-4.333673E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.619118E-03
beta*beta	3.060960E-04	beta*a/c*a/c*a/t	-5.128628E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	5.805210E-03
a/c*a/c	-6.870168E-01	beta*a/c*a/t*a/t	-7.505746E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.700985E-02
a/t*a/t	-9.574346E-01	beta*a/t*a/t*a/t	1.924001E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.086077E-01
beta*a/c	-4.874235E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	-2.038873E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.467678E-02
beta*a/t	4.375987E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	-8.679225E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-5.746874E-01
a/c*a/t	-3.075163E+00	a/c*a/t*a/t*a/t	-3.513450E+00	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.465952E+00
a/c*a/c*a/c	3.179711E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	6.048263E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	4.768154E-04
a/t*a/t*a/t	5.300391E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	6.154782E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	3.319431E-03
beta*beta*a/c	6.113346E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-2.429305E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.414837E-03
beta*beta*a/t	-1.403466E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-4.248797E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.598216E-02
beta*a/c*a/c	8.899100E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	6.086676E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	5.932261E-02
beta*a/c*a/t	2.622870E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	2.595067E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.460165E-01
beta*a/t*a/t	-2.314125E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	5.285941E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-5.183936E-04
a/c*a/c*a/t	4.344843E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.828710E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.924794E-04
a/c*a/t*a/t	6.016992E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	2.838690E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.039303E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-4.399735E-02	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.110584E+00		

Tablo 3.2.35. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.843646E+00	beta*beta*a/c*a/c	-3.645106E-04	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.518469E+01
beta	-9.643699E-02	beta*beta*a/c*a/t	1.176277E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-8.424400E-05
a/c	-1.508787E+00	beta*beta*a/t*a/t	1.621953E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	1.575003E-04
a/t	-1.832447E+01	beta*a/c*a/c*a/c	-6.849540E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	2.035826E-02
beta*beta	9.483689E-04	beta*a/c*a/c*a/t	3.841949E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	2.318375E-02
a/c*a/c	-1.719630E+00	beta*a/c*a/t*a/t	3.080145E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.329960E-02
a/t*a/t	4.235568E+01	beta*a/t*a/t*a/t	1.183544E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	6.172672E-03
beta*a/c	5.470678E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	-9.962989E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	9.123426E-01
beta*a/t	6.840709E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	3.274027E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.587527E+00
a/c*a/t	3.222438E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	4.804447E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.827042E+00
a/c*a/c*a/c	1.663886E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	4.600992E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.527879E-04
a/t*a/t*a/t	-2.979480E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-5.606707E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.469162E-03
beta*beta*a/c	-7.318803E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-3.313297E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.424282E-02
beta*beta*a/t	-6.396638E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-1.137101E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.771008E-02
beta*a/c*a/c	7.710660E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.180777E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	6.460502E-02
beta*a/c*a/t	-1.137048E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	9.730506E-02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.763522E+00
beta*a/t*a/t	-1.688245E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.455199E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.037414E-05
a/c*a/c*a/t	-1.357232E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.090764E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.281832E-03
a/c*a/t*a/t	-7.526661E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	6.663187E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.488153E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-2.926275E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.232303E+00		

Tablo 3.2.36. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta = 0-45^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta = 90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	2.834309E+00	beta*beta*a/c*a/c	1.047391E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.229883E+01
beta	-2.180804E-02	beta*beta*a/c*a/t	1.984264E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	7.536130E-05
a/c	-3.939263E+00	beta*beta*a/t*a/t	-2.708338E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	2.335959E-03
a/t	-8.734752E+00	beta*a/c*a/c*a/c	4.791016E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	7.680865E-04
beta*beta	-3.216027E-04	beta*a/c*a/c*a/t	6.557909E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.981160E-03
a/c*a/c	3.589989E+00	beta*a/c*a/t*a/t	8.742759E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	4.178256E-02
a/t*a/t	2.019476E+01	beta*a/t*a/t*a/t	9.572428E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.613301E-01
beta*a/c	8.262416E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	1.168685E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	6.797907E-01
beta*a/t	1.064045E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	7.503819E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.213729E+00
a/c*a/t	2.396783E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	4.748396E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.195286E+01
a/c*a/c*a/c	-1.448788E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-5.287196E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.421622E-04
a/t*a/t*a/t	-1.508850E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-4.393340E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.387836E-03
beta*beta*a/c	-4.953384E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	3.353251E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.549172E-03
beta*beta*a/t	5.949175E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	2.655250E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.802910E-02
beta*a/c*a/c	-1.058229E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-6.570267E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.204019E-01
beta*a/c*a/t	-4.881391E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-3.022424E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.902082E+00
beta*a/t*a/t	-1.783723E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.204194E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.574779E-04
a/c*a/c*a/t	-2.722649E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.819387E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.689579E-04
a/c*a/t*a/t	-6.682495E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.563113E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.477309E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	1.899404E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.175649E+01		

Tablo 3.2.37. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta = 45-75^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta = 90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	5.038574E+00	beta*beta*a/c*a/c	1.189129E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.030122E+01
beta	-1.188463E-01	beta*beta*a/c*a/t	7.634019E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	4.832847E-05
a/c	-6.706839E+00	beta*beta*a/t*a/t	5.956502E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	1.910715E-03
a/t	-1.551543E+01	beta*a/c*a/c*a/c	5.054878E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	9.425416E-03
beta*beta	7.355407E-04	beta*a/c*a/c*a/t	7.646704E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	7.327087E-03
a/c*a/c	5.013285E+00	beta*a/c*a/t*a/t	1.985177E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	2.634654E-02
a/t*a/t	3.216137E+01	beta*a/t*a/t*a/t	5.490709E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.187526E-01
beta*a/c	1.893900E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	9.068932E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.558491E-01
beta*a/t	4.319032E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	6.552666E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.428652E+00
a/c*a/t	3.273905E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	5.206675E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.261273E+01
a/c*a/c*a/c	-1.695537E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-4.119078E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.054940E-04
a/t*a/t*a/t	-2.260185E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-6.077206E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.407264E-03
beta*beta*a/c	-1.423951E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.376022E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.965253E-03
beta*beta*a/t	-3.207708E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-3.615783E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.131406E-02
beta*a/c*a/c	-1.489055E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-5.883878E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.799597E-01
beta*a/c*a/t	-9.621202E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.425774E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.362320E+00
beta*a/t*a/t	-8.413532E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.459783E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.055258E-04
a/c*a/c*a/t	-2.705954E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.169725E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	5.869391E-04
a/c*a/t*a/t	-7.986720E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.033451E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.397245E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	1.985831E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.159187E+01		

Tablo 3.2.38. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta= 0-45^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.198806E-02	beta*beta*a/c*a/c	1.531209E-05	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.310187E-01
beta	-3.870982E-02	beta*beta*a/c*a/t	-7.113149E-05	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-3.528674E-06
a/c	-3.737887E-02	beta*beta*a/t*a/t	1.431041E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.532751E-04
a/t	-6.049617E-02	beta*a/c*a/c*a/c	4.095096E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.011500E-04
beta*beta	3.748827E-04	beta*a/c*a/c*a/t	2.380121E-02	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	3.183575E-04
a/c*a/c	5.128799E-02	beta*a/c*a/t*a/t	5.608775E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.238633E-03
a/t*a/t	1.374334E-01	beta*a/t*a/t*a/t	9.545302E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.435783E-02
beta*a/c	2.655696E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	1.637834E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.950257E-02
beta*a/t	4.926180E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	7.898009E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.187318E-02
a/c*a/t	2.442138E-01	a/c*a/t*a/t*a/t	3.979978E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.467811E-01
a/c*a/c*a/c	-2.442234E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c	1.784095E-05	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	3.748042E-05
a/t*a/t*a/t	-9.703822E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t	4.472347E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.337175E-04
beta*beta*a/c	-1.916005E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.378190E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.560188E-04
beta*beta*a/t	-4.327815E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-1.316466E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.229470E-03
beta*a/c*a/c	-1.340537E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-4.848293E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.740541E-02
beta*a/c*a/t	-3.322730E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-9.337425E-03	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.432900E-02
beta*a/t*a/t	-1.703122E-02	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-5.866187E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.799972E-05
a/c*a/c*a/t	-3.433836E-01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.444559E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.116682E-05
a/c*a/t*a/t	-5.782516E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.304473E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.381505E-03
a/c*a/c*a/c*a/c	3.435063E-03	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.711002E-01		

Tablo 3.2.39. Eğilme gerilmesine maruz eğik çatlak ve  $\beta = 45-75^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-III GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-6.771518E-01	beta*beta*a/c*a/c	-3.926843E-04	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.383250E+00
beta	-1.866833E-02	beta*beta*a/c*a/t	-3.262387E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-1.931636E-05
a/c	1.929904E+00	beta*beta*a/t*a/t	-2.170847E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.028258E-03
a/t	4.232133E+00	beta*a/c*a/c*a/c	-1.955403E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-3.652186E-03
beta*beta	2.783888E-04	beta*a/c*a/c*a/t	-3.351025E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.202105E-03
a/c*a/c	-1.862321E+00	beta*a/c*a/t*a/t	-5.380430E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.364200E-02
a/t*a/t	-6.670638E+00	beta*a/t*a/t*a/t	-1.220683E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.041465E-01
beta*a/c	-3.939521E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	-3.545451E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-9.240112E-02
beta*a/t	-1.021844E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-1.019406E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.671664E-01
a/c*a/t	-1.109336E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	-4.898754E+00	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.090610E-01
a/c*a/c*a/c	7.075917E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	1.564914E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.198519E-04
a/t*a/t*a/t	3.115763E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	2.945758E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.055465E-03
beta*beta*a/c	2.645384E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	4.972994E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.182530E-03
beta*beta*a/t	7.617913E-04	beta*beta*a/t*a/t*a/t	1.129973E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	9.734168E-03
beta*a/c*a/c	4.988574E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	2.415019E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.827039E-03
beta*a/c*a/t	3.751823E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	1.169192E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.254918E-01
beta*a/t*a/t	2.434293E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	3.791008E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.043128E-04
a/c*a/c*a/t	9.906115E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	2.167152E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.768811E-04
a/c*a/t*a/t	1.448315E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	4.230086E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.446858E-03
a/c*a/c*a/c*a/c	-8.786410E-02	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.824215E+00		

Tablo 3.2.40. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 0-45^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	3.041583E+00	beta*beta*a/c*a/t	5.637154E-02	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/t	-3.533891E-07
beta	-8.300454E-02	beta*beta*a/t*a/t	1.512734E-02	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t	-2.560676E-05
a/c	-4.516860E+00	beta*a/c*a/c*a/c	2.693403E-01	beta*beta*beta*a/t*a/t*a/t	-6.090854E-05
a/t	-1.115712E+01	beta*a/c*a/c*a/t	5.000715E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	5.698575E-04
beta*beta	5.176988E-04	beta*a/c*a/t*a/t	8.320050E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	3.579331E-02
a/c*a/c	4.103734E+00	beta*a/t*a/t*a/t	1.011192E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.644633E-01
a/t*a/t	2.706633E+01	a/c*a/c*a/c*a/t	1.524323E+01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	7.295965E-02
beta*a/c	4.468250E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	1.057142E+02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	3.107037E-01
beta*a/t	7.026603E-01	a/c*a/t*a/t*a/t	6.900018E+01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	4.993540E+00
a/c*a/t	3.222617E+01	beta*beta*beta*a/c*a/c	-4.949002E-07	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	7.142143E+00
beta*beta*beta	4.110431E-06	beta*beta*beta*a/c*a/t	1.184768E-05	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.932471E+00
a/c*a/c*a/c	-1.625804E+00	beta*beta*beta*a/t*a/t	7.773387E-05	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.304901E+01
a/t*a/t*a/t	-2.030680E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-4.132317E-03	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	2.054197E-05
beta*beta*a/c	-6.374107E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-7.796902E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-4.929385E-03
beta*beta*a/t	-6.981960E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-1.181130E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.570919E-02
beta*a/c*a/c	-5.936171E-01	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-8.142367E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.027574E-01
beta*a/c*a/t	-3.771610E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-3.689335E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.839978E-01
beta*a/t*a/t	-1.553262E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.268090E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.234787E+00
a/c*a/c*a/t	-3.604281E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.101527E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-4.384619E+00
a/c*a/t*a/t	-9.338050E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.405783E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.044244E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	2.103545E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-2.020962E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.743208E-02
beta*beta*beta*a/c	-1.471826E-08	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.474731E+01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.429401E-01
beta*beta*beta*a/t	-3.858734E-05	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-7.801636E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-6.550365E-03
beta*beta*a/c*a/c	8.965427E-03	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/c	6.961017E-08		



Tablo 3.2.41. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-I GŞF denklemi

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	3.328733E-01	beta*beta*a/c*a/c	-1.177339E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.749752E+01
beta	2.614270E-02	beta*beta*a/c*a/t	-1.106017E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-5.525308E-05
a/c	8.539621E+00	beta*beta*a/t*a/t	-3.590995E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.078382E-03
a/t	1.143356E+01	beta*a/c*a/c*a/c	-8.743604E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.326978E-02
beta*beta	-3.905758E-04	beta*a/c*a/c*a/t	-1.836038E+00	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.836754E-03
a/c*a/c	-1.164235E+01	beta*a/c*a/t*a/t	-1.717159E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.031081E-01
a/t*a/t	-1.475275E+01	beta*a/t*a/t*a/t	-5.870778E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-8.097312E-01
beta*a/c	-1.856978E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	-3.932572E+01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.781234E-01
beta*a/t	-3.079692E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	-1.171584E+02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.080765E+00
a/c*a/t	-7.002577E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	-3.572928E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.109555E+01
a/c*a/c*a/c	5.209509E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	4.450335E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	6.589757E-04
a/t*a/t*a/t	3.849464E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/t	1.231002E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.134958E-03
beta*beta*a/c	1.264235E-03	beta*beta*a/c*a/t*a/t	1.300342E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.729048E-03
beta*beta*a/t	2.580836E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	8.174472E-04	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.047110E-01
beta*a/c*a/c	2.097101E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.144896E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.276674E-01
beta*a/c*a/t	1.557288E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	7.809741E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.833431E+00
beta*a/t*a/t	3.815947E-01	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.956203E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-6.369104E-04
a/c*a/c*a/t	8.898242E+01	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	4.003141E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.850142E-04
a/c*a/t*a/t	8.949904E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	5.303297E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.378432E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-7.052684E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.234071E+01		

Tablo 3.2.42. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 0-45^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

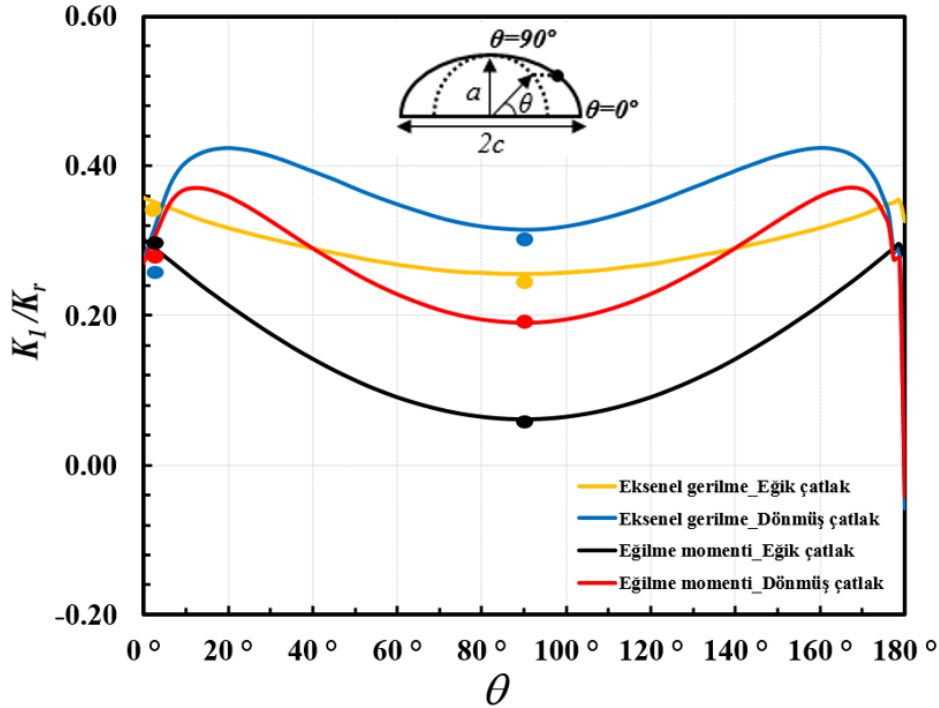
Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-6.151916E-02	beta*beta*a/c*a/t	1.999298E-03	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/t	1.596115E-07
beta	-2.068368E-02	beta*beta*a/t*a/t	8.785129E-05	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t	-9.812675E-06
a/c	2.631155E-01	beta*a/c*a/c*a/c	-1.450924E-02	beta*beta*beta*a/t*a/t*a/t	-3.455658E-05
a/t	3.555628E-01	beta*a/c*a/c*a/t	-1.588373E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	5.209229E-06
beta*beta	6.566895E-07	beta*a/c*a/t*a/t	1.263081E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	1.016684E-03
a/c*a/c	-3.237088E-01	beta*a/t*a/t*a/t	1.038319E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	9.894620E-03
a/t*a/t	-7.112318E-01	a/c*a/c*a/c*a/t	-8.148215E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	8.076545E-03
beta*a/c	-1.385725E-02	a/c*a/c*a/t*a/t	-3.836704E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.042159E-02
beta*a/t	3.881902E-02	a/c*a/t*a/t*a/t	-1.970733E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.353853E-02
a/c*a/t	-1.527712E+00	beta*beta*beta*a/c*a/c	-1.917684E-06	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.723512E-01
beta*beta*beta	5.011400E-06	beta*beta*beta*a/c*a/t	5.575655E-06	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.250220E-01
a/c*a/c*a/c	1.414890E-01	beta*beta*beta*a/t*a/t	6.161361E-05	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.073757E+00
a/t*a/t*a/t	4.470677E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c	-5.052635E-05	beta*beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	4.208603E-06
beta*beta*a/c	-2.824516E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/t	-2.278645E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.434295E-04
beta*beta*a/t	4.411140E-04	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-8.649731E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.334491E-03
beta*a/c*a/c	3.034403E-02	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-1.037305E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-9.140071E-03
beta*a/c*a/t	7.893063E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.998638E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	2.460426E-03
beta*a/t*a/t	-1.032063E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	7.600887E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-6.427435E-02
a/c*a/c*a/t	1.872778E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-9.359722E-03	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.444457E-01
a/c*a/t*a/t	3.104979E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-2.197399E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	5.950610E-04
a/c*a/c*a/c*a/c	-1.900557E-02	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.091079E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	3.987536E-03
beta*beta*beta*a/c	2.286964E-06	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	1.676400E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	8.269209E-03
beta*beta*beta*a/t	-3.468362E-05	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	2.448955E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.436912E-04
beta*beta*a/c*a/c	1.881250E-04	beta*beta*beta*a/c*a/c*a/c	2.861373E-07		

Tablo 3.2.43: Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak ve  $\alpha = 45-75^\circ$  için, derinlik noktasında ( $\theta=90^\circ$ ) mod-II GŞF denklemi

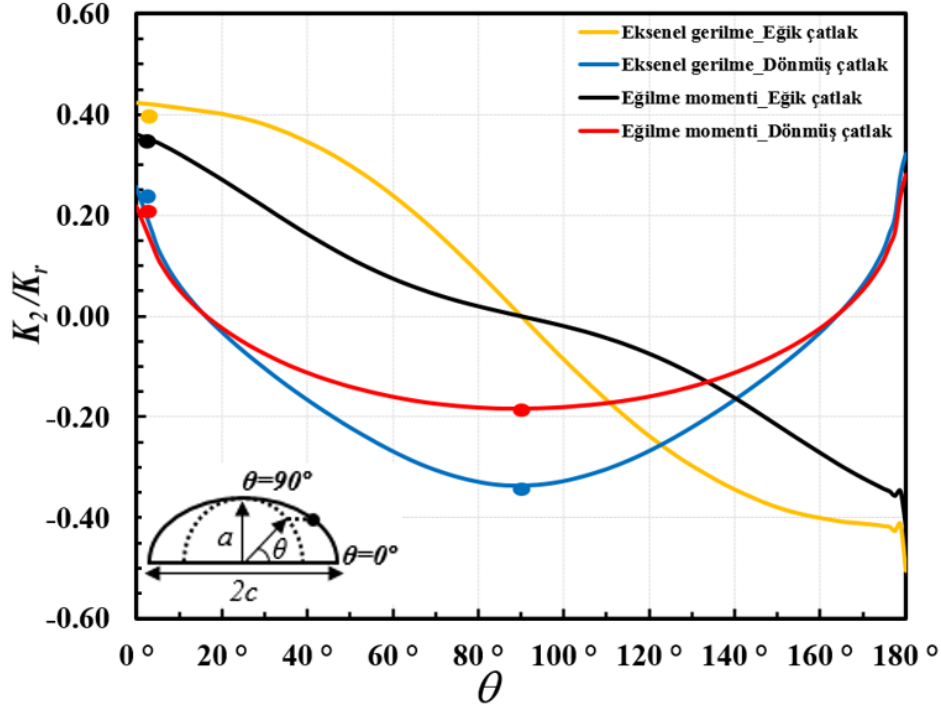
Terim	Katsayı	Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	8.913436E-01	beta*beta*a/c*a/c	-1.118222E-03	a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.256588E+00
beta	-6.256260E-02	beta*beta*a/c*a/t	5.115016E-03	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c	-1.129267E-04
a/c	1.057647E+00	beta*beta*a/t*a/t	1.118798E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t	-1.935296E-03
a/t	-9.461633E+00	beta*a/c*a/c*a/c	-9.716147E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t	1.009044E-02
beta*beta	6.573469E-04	beta*a/c*a/c*a/t	-3.042820E-01	beta*beta*a/c*a/t*a/t*a/t	1.571800E-02
a/c*a/c	-4.138258E+00	beta*a/c*a/t*a/t	1.753798E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	-5.683005E-02
a/t*a/t	2.712972E+01	beta*a/t*a/t*a/t	7.887375E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-2.371589E-01
beta*a/c	-3.635584E-02	a/c*a/c*a/c*a/t	-6.996857E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	4.272812E-01
beta*a/t	3.998776E-01	a/c*a/c*a/t*a/t	8.438872E+00	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.735078E+00
a/c*a/t	1.168837E+01	a/c*a/t*a/t*a/t	2.841809E+01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-5.249848E+00
a/c*a/c*a/c	2.486229E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c	7.180757E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	3.793352E-04
a/t*a/t*a/t	-1.882288E+01	beta*beta*a/c*a/c*a/t	6.594761E-04	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-7.087687E-04
beta*beta*a/c	6.456896E-05	beta*beta*a/c*a/t*a/t	-2.074214E-02	beta*beta*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-8.982075E-03
beta*beta*a/t	-4.080494E-03	beta*beta*a/t*a/t*a/t	-7.956041E-03	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	6.272276E-02
beta*a/c*a/c	1.622066E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/c	1.494550E-02	beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.053433E-01
beta*a/c*a/t	-3.888890E-01	beta*a/c*a/c*a/c*a/t	3.210033E-01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.268280E+00
beta*a/t*a/t	-1.118894E+00	beta*a/c*a/c*a/t*a/t	-4.226906E-01	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	-1.735692E-04
a/c*a/c*a/t	5.051972E+00	beta*a/c*a/t*a/t*a/t	-1.302074E+00	beta*beta*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	1.386007E-03
a/c*a/t*a/t	-4.185235E+01	a/c*a/c*a/c*a/c*a/t	1.292161E+00	beta*a/c*a/c*a/c*a/c*a/t*a/t*a/t	-3.572246E-02
a/c*a/c*a/c*a/c	-3.834535E-01	a/c*a/c*a/c*a/t*a/t	7.020755E+00		

### 3.2.6 Empirik Denklem Doğrulama Çalışması

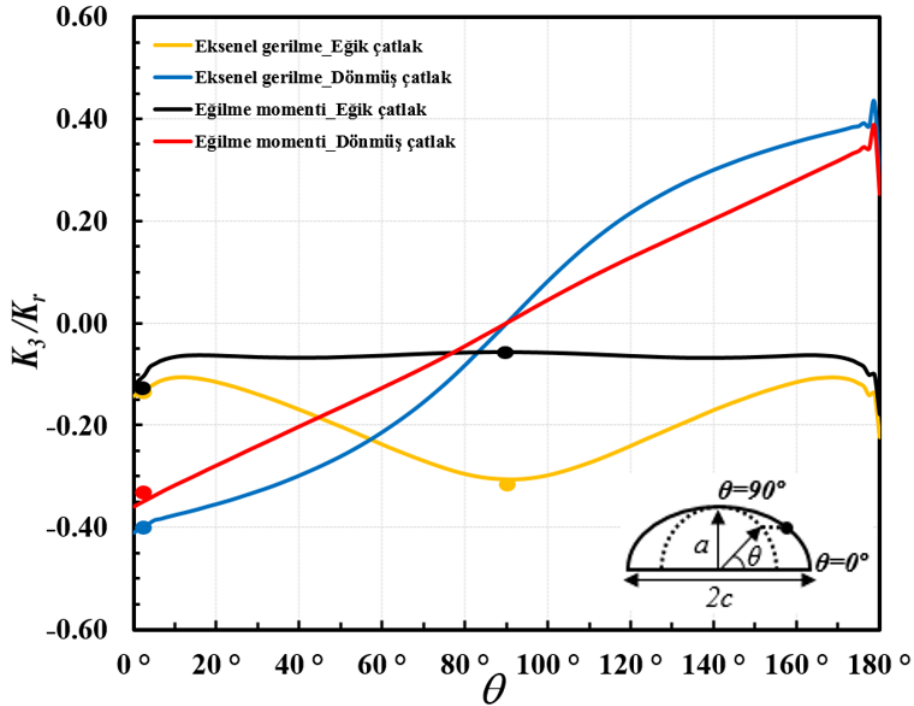
Çatlak ucu serbest yüzey ve derinlik noktası için oluşturulan empirik denklemler önceki bölümde verilmişti. Eksenel gerilme ve eğilme momentine maruz eğik ve dönmüş çatlaklar için verilen empirik denklem sonuçlarının, analiz kütüphanesinde olmayan  $a/c=1.5$ ,  $a/t=0.5$ , çatlakın yatay eksenle yaptığı açı ( $\alpha$  ve  $\beta=54^\circ$ ) ara değerleri uygulanarak elde edilen mod-I, mod-II ve mod-III GŞF değerlerinin karışık mod analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 3.2.103-3.2.105'te verilmektedir. Çatlak ucu serbest yüzey noktası  $\theta=0^\circ$  ve derinlik noktası  $\theta=90^\circ$  noktaları için mod-I, mod-II ve mod-III sonuçları arasındaki farkın %5'in altında olduğu görülmektedir. Böylece, geliştirilen denklemlerin doğruluğu, denklemlerin geliştirilmesinde yer almayan ve ara değerler içeren farklı bir durum için ispatlanmış bulunmaktadır.



Şekil 3.2.103. Normalize edilmiş mod-I gerilme şiddet faktörlerinin çatlak ucu boyunca dağılımları ve serbest yüzey ve derinlik noktalarında empirik denklem sonuçları ile karşılaştırmaları;  $a/c=1.5$ ,  $a/t=0.5$ ,  $\beta$  ve  $\alpha=54^\circ$



Şekil 3.2.104: Normalized mod-II gerilme şiddet faktörlerinin çatlak ucu boyunca dağılımları ve serbest yüzey ve derinlik noktalarında empirik denklem sonuçları ile karşılaştırmaları;  $a/c=1.5$ ,  $a/t=0.5$ ,  $\beta$  ve  $\alpha=54^\circ$



Şekil 3.2.105: Normalized mod-III gerilme şiddet faktörlerinin çatlak ucu boyunca dağılımları ve serbest yüzey ve derinlik noktalarında empirik denklem sonuçları ile karşılaştırmaları;  $a/c=1.5$ ,  $a/t=0.5$ ,  $\beta$  ve  $\alpha=54^\circ$

Pratikte sıklıkla görülen farklı yükler altında bulunan ve çatlak içeren levha türü yapılar ile karşılaşılmaktadır. Birçok problem lokal olarak levha problemine indirgenebilmektedir. Böylece bu çalışma kapsamında, aksenal gerilmeye veya eğilme momentine maruz levhalardaki eğik ve dönmüş yüzey çatlaklarına ait üç boyutlu karışık modlu gerilme şiddet faktörleri hesaplamaları sonlu elemanlar yazılımı FCPAS ile hesaplanarak geniş bir karışık mod gerilme şiddet faktör kütüphanesi oluşturulmuştur. Oluşturulan kütüphanede çatlak derinliği/levha et kalınlığı ( $a/t$ ), çatlak derinliği/çatlak genişliği ( $a/c$ ), eğik ve dönmüş eliptik çatlağın yatay eksenle yaptığı açı gibi parametrelerin değişiminin gerilme şiddet faktörlerine etkileri incelenmiştir. Bu parametre değişimlerinin gerilme şiddet faktörlerinin etkilerine ek olarak, çatlak şekil oranı (sabit  $a/c$  değeri için  $a/t$  değerlerinin değişimi) ve derinlik oranı (sabit  $a/t$  değeri için  $a/c$  değerlerinin değişimi) için bağımsız grafiklerle karşılaştırmaları verilmiştir.

Yüzlerce farklı durum için verilen grafiksel çözümler oldukça faydalı olmakla beraber, hem analizi yapılan parametre değerlerinde hem de özellikle verilen bir problemi tanımlayan parametrelerin ara değerlerinde GŞF tahmini gerektiğinde, grafikten okumak veya interpolasyon yapmak yerine, hazır halde bulunan denklemlerin kullanılması oldukça istenen bir durumdur. Bu amaçla, bu çalışma kapsamında elde edilen çözümlerin pratikte daha yaygın kullanılabilmesi amacıyla, yapılan detaylı analizler sonucu elde edilen gerilme şiddet faktörleri için, probleme etki eden parametrelere bağlı olarak empirik denklemler de geliştirilmiştir.

Bölüm 3.2'de gerçekleştirilen analizler kapsamında, aksenal ve eğilme gerilmesine maruz levhalardaki eğik ve dönmüş çatlaklar için 120'şer adet olmak üzere toplam 480 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Grafiklerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

1. Aksenal gerilmeye veya eğilme momentine maruz levhalarda eğik veya dönmüş yüzey çatlaklarında,  $a/c$  oranı sabit tutulduğunda  $a/t$  oranı arttıkça, mod-I GŞF değeri artmaktadır. Mod-I gerilme değerinin en yüksek olduğu açı 0 derecedir. Eğiklik açısı  $\beta$  veya dönme açısı  $\alpha$  arttıkça, çatlak önü boyunca mod-I GŞF değerleri azalmaktadır.
2. Aksenal gerilmeye veya eğilme momentine maruz levhalarda eğik ve dönmüş yüzey çatlaklarında, çatlağın yatay eksenle yaptığı  $\beta$  ve  $\alpha$  dereceleri 0 olduğunda,  $K_2$  ve  $K_3$  değeri 0'dır. Aksenal gerilmeye ya da eğilme momentine maruz levhalarda eğik yüzey çatlaklarında, birbirlerini 90 dereceye tamamlayan 15 ve 75 ile 30 ve 60 derece eğik açılı düzlemlerdeki yüzey çatlaklarının mod-II ve mod-III değerleri aynıdır.
3. Özellikle eğilme gerilmesine maruz levhalarda bulunan ve normalize edilmiş çatlak derinliği büyük olan dönmüş ve eğik yüzey çatlaklarının derinlik bölgelerinde çatlak yüzeyleri

teması oluşmakta ve temas mekaniğinin modellenmediği bu bölgeler için mod-I gerilme şiddet faktörleri negatif değerler olarak hesaplanmaktadır.

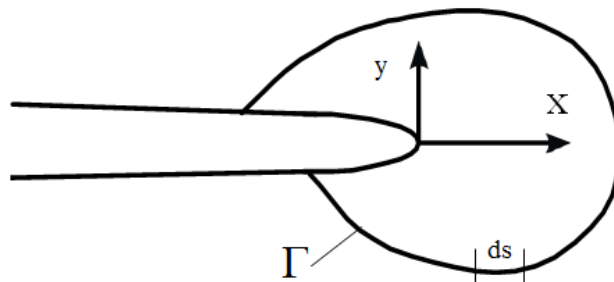
İki farklı nokta için oluşturulan denklem sisteminde, analiz sonuçları ile denklemler kullanılarak tahmin edilen değerler arasındaki fark en fazla %5'tir.

Bu bölümde (Bölüm 3.2) verilen, dört farklı yükleme ve karışık mod yüzey çatlak problemini temsil eden oldukça geniş kapsamlı çözümler literatürde bulunmamaktadır. Bu çalışmalar kapsamında bir adet yüksek lisans tezi tamamlanmış (Şahin, 2020) olup, raporun bu bölümünde verilen çözümler ilgili yüksek lisans tezinden sunulmuştur (Şahin, 2020). İlgili çözümlerin literatürde makale olarak yayınlanması da planlanmaktadır.

### 3.3 J-İntegral ve Sanal Çatlak Kapatma Yöntemi ile Üç-Boyutlu Kırılma Analizleri

Bu bölümde, proje kapsamında elastik malzemeler için yapılan karışık mod kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin bir devamı niteliğindeki konu olan elastik-plastik malzemelerin mod-I ve karışık mod kırılma davranışlarının üç-boyutlu olarak incelenebilmesi için başlanan araştırma ve geliştirmelerden elde edilen öncül sonuçlar sunulmaktadır. Daha önce belirtildiği üzere, bu kısımda sunulan çalışmalar, proje önergesinde vaat edilmiş bir çalışma olmayıp, 3.1 ve 3.2 nolu kısımlarda sunulan karışık mod çatlak ilerleme ve kırılma analizlerinin zamanlı bir şekilde tamamlanabilmesi ve 3.1 nolu bölümdeki çatlak ilerleme analizlerini gerçekleştirmiş olan doktora öğrencisinin tez konusuna temel teşkil etmesi sebebiyle bu projenin kapsamını ilerletecek bu çalışmalara mümkün mertebe devam edilmiş ve sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

Çatlak ucu bölgesindeki plastik bölgenin doğrusal elastik kırılma mekaniği sınırlarını aştığı elastik plastik deformasyon davranışı gösteren malzemelerin kırılma kararsızlığını ya da çatlak ilerlemesini karakterize etmek için genellikle Rice tarafından ortaya konulmuş olan J-integral metodu kullanılmaktadır (Rice, 1968). Şekil 3.3.1'de çatlak ucu bölgesini kapsayan bir J-integral sınır eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.3.1. J-integral sınır eğrisi

Rice'in teorisine göre integrasyon çizgisi ( $\Gamma$ ) tarafından çevrelenmiş olan bir alandaki dış kuvvetin yaptığı iş ile iç potansiyel enerji arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde yazılabilir.

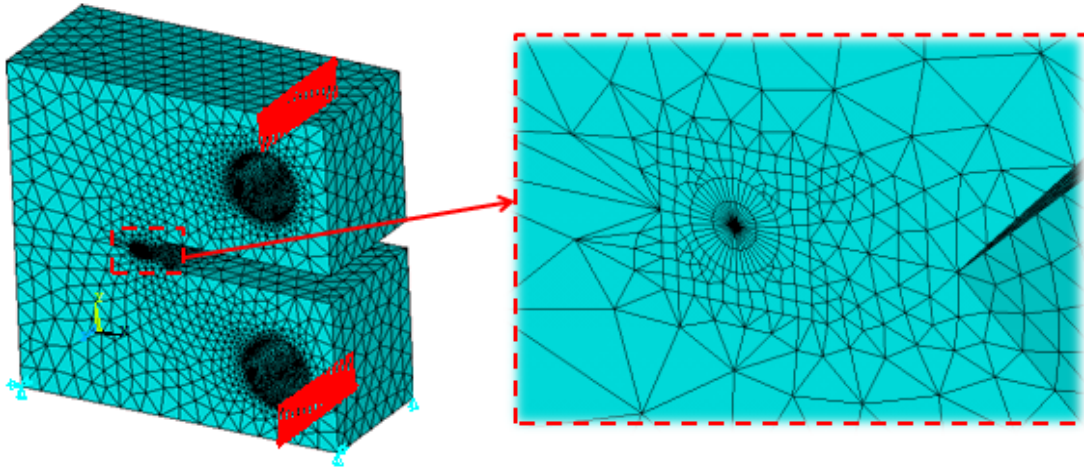
$$J = \int_{\Gamma} w dy - T \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) ds \quad (3.3.1)$$

Denklem (3.3.1)'de,  $\Gamma$  çatlak ucunu saran ve integral alınacak olan bölgenin sınırını temsil etmekte olup, çatlak alt yüzeyinden üst yüzeye uzanmaktadır.  $w$  birim hacimde harcanan şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu,  $T$  ise  $\Gamma$  boyunca  $n$  normali doğrultusunda oluşan çekme (traksiyon) vektörü,  $u$  şekil değişimi vektörü,  $s$  eğri boyu ve  $ds$  ise  $\Gamma$  eğrisi konturu üzerindeki bir diferansiyel eğri elemanı olarak tanımlanmıştır. J-integralinin değeri çatlak birim şekil değiştirme enerjisi salıverme oranına ( $G$ ) karşılık gelmektedir.

### 3.3.1 J-İntegral Yöntemi ile Enerji Salıverme Oranı ( $G$ ) Hesaplanması

ANSYS sonlu elemanlar yazılım programında yer alan 'CINT' komutu kullanılarak J-integral uygulamalarını düzlemsel çatlaklar için gerçekleştirmek mümkündür. Aşağıda, mod-I yüklemesine maruz düz çatlaktan başlayarak, karmaşıklık seviyesi sistematik olarak artan bazı örnekler sunulmaktadır.

İlk olarak bir Compact Tension (CT) numunesinde yer alan düz bir çatlakın mod-I yüküne maruz bırakılması durumu ele alınmaktadır. Şekil 3.3.2'de CT numunesinin sonlu eleman ağ yapısı verilmektedir. Sonlu elemanlar modeli Solid 186 eleman tipi kullanılarak oluşturulmuştur.

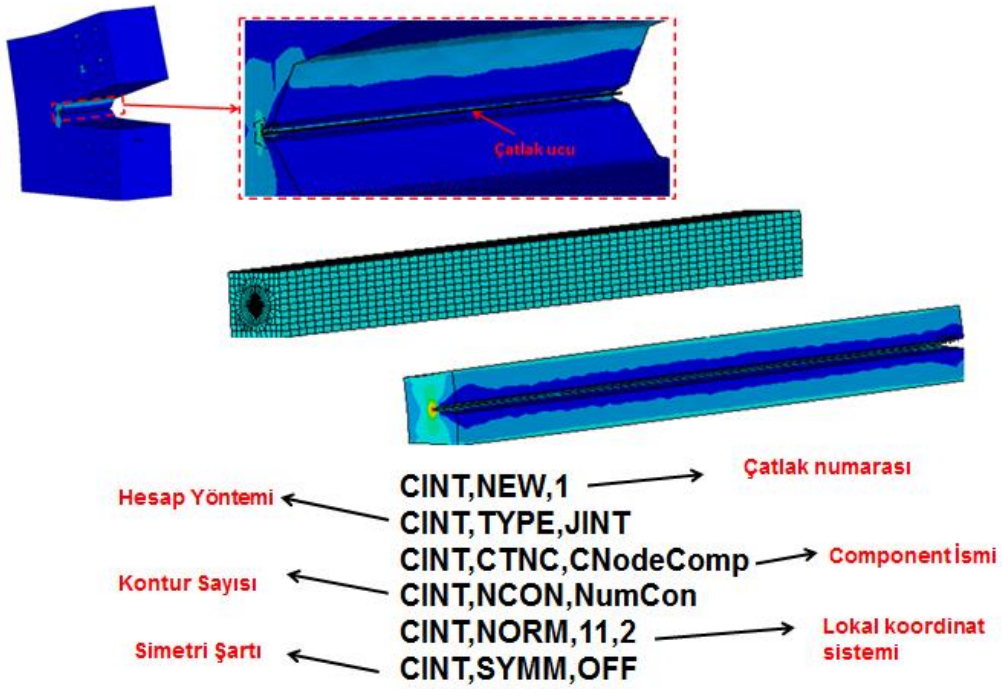


Şekil 3.3.2. CT numunesinde kullanılan sonlu eleman ağının genel ve çatlak bölgesi görünümü

Şekil 3.3.3, yükleme pim delikleri merkez hizasından ölçülecek şekilde 25.4 mm boyunda ve numune kalınlığı yönünde doğrusal çatlak içeren, mod-I yönünde çekme yüküne maruz

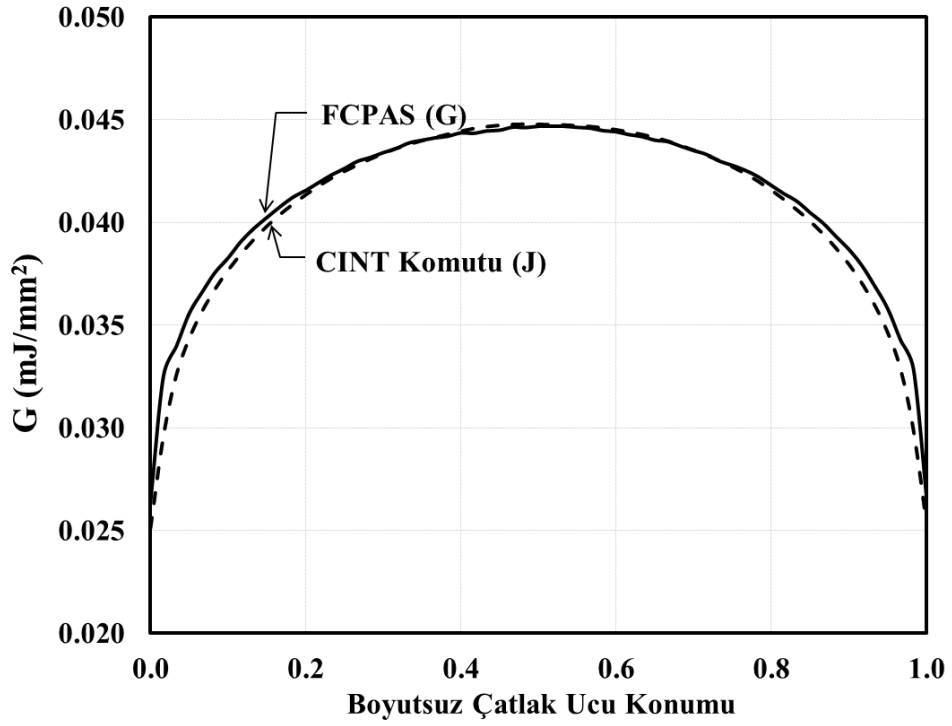


birakılmış bir CT numunesinin analizi sonucunda elde edilen gerilme dağılımlarını ve 'CINT' komutunun kullanım aşamalarını göstermektedir. Bu komut aşamalarında öncelikle çatlak ucundaki tüm düğüm noktaları seçilmeli ve bileşen olarak kaydedilmelidir. Komutun içerisinde, çözüm metodu belirlenmesi (J-integral, VCCT vs.), daha önce bileşen olarak kaydedilen çatlak ucu düğüm noktalarının çağrılması, hesaplama yapılacak eksen takımı, modelin simetrik veya tam model olması durumları için seçenekler bulunmaktadır. Model bilgilerinin her bir çatlak ucu düğüm noktası için tanımlanması gerekmektedir.



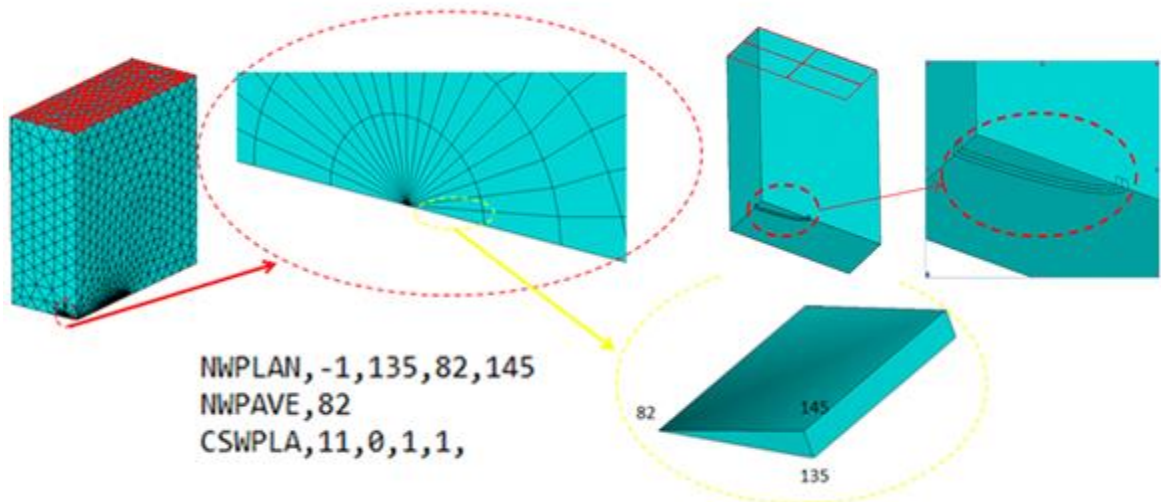
Şekil 3.3.3. CT numunesi analiz sonrası elde edilen gerilme dağılımı ve işlem aşamaları

Şekil 3.3.3'te, 1 kN çekme yüküne maruz ve 25.4 mm düz çatlak içeren CT numunesi için yukarıda açıklanan CINT komutu ile hesaplanan enerji salıverme oranı (G) değerleri ile FCPAS sonlu elemanlar yazılım programından elde edilen sonuçların karşılaştırılması sunulmaktadır. Şekilde kırmızı çizgi ile gösterilen değerler FCPAS ile elde edilmiş olup, siyah renk ile gösterilen değerler ise 'CINT' komutu ile hesaplanmıştır. Değerler arasındaki fark, %1'in altında gözükmemektedir. Sadece mod-I yüke maruz, düzlemsel ve düz çatlak ucuna sahip bir çatlak için 'CINT' komutu bu haliyle kullanılabilir olup, çatlak elemanlarının eksene dik olmadığı eğrisel çatlak ucu problemler için, her bir çatlak ucu elemanına ayrı lokal koordinat sisteminin atanması ve çözümlerin bu eksenlere göre yapılması gerekmektedir.



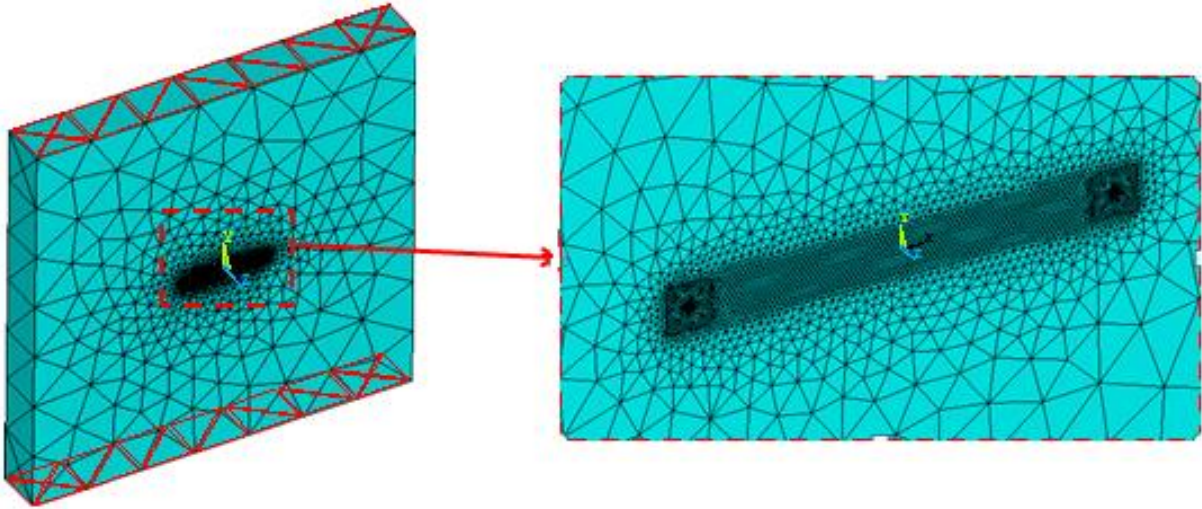
Şekil 3.3.4. CT numunesi için CINT komutu ile hesaplanan J-integral değerlerinin FCPAS ile hesaplanan G değerleri ile karşılaştırılması.

Bu örnekten sonra ele alınan problem eliptik çatlak içeren ve aksenal gerilme yüküne maruz bir levha geometrisidir. Çatlak önünün eliptik şekle sahip olması, çatlak ucundaki her bir düğüm noktasına ayrı bir koordinat sistem atayarak çözüm yapmayı gerektirmektedir. Şekil 3.3.5, eliptik çatlak içeren bir model için lokal koordinat sistemi tanımlanması aşamalarını göstermektedir. Çatlak elemanlarının düğüm noktaları numaraları ile Şekil 3.3.5'te gösterilen komut kullanılarak her bir eleman için lokal koordinat sistemi tanımlanmalı ve ilgili düğüm noktasının enerji salıverme oranı (G) çözümü bu koordinat sisteminde yapılmalıdır.



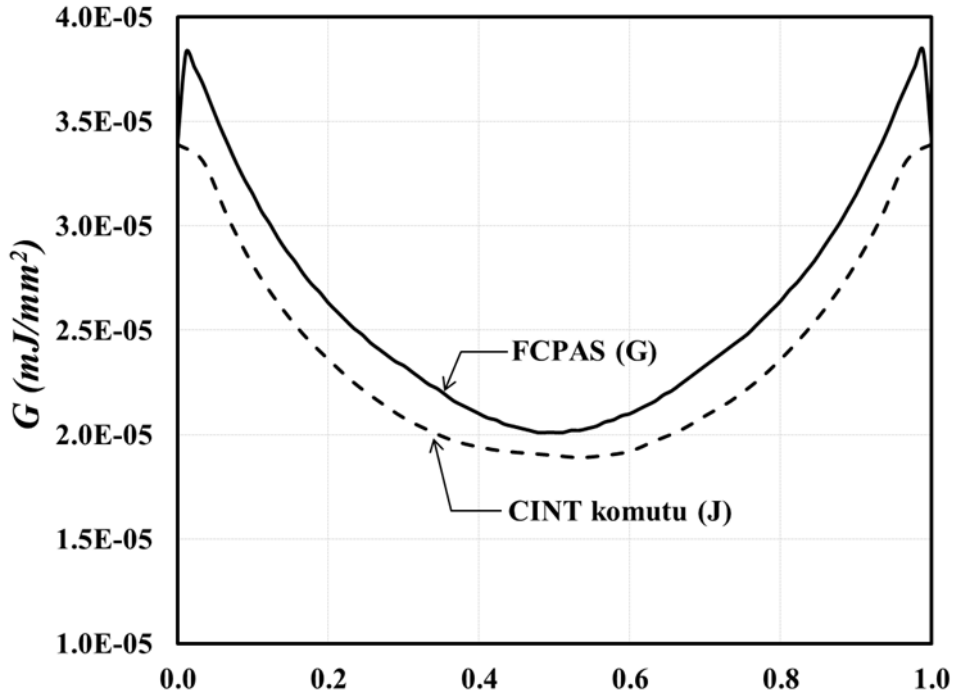
### Şekil 3.3.5. Çatlak ucu düğüm noktalarına lokal koordinat sistemi tanımlanması

Şekil 3.3.6, mod-I yükü uygulanmış bir levha modelini göstermektedir. Levha merkezinde çatlak derinlik/çatlak uzunluk ( $a/c$ ) oranı 0.5 olan bir eliptik çatlak bulunmaktadır. Model Solid-186, 20 düğüm noktalı elemanlar ile bölüntülenmiştir. İlk aşamada çatlak ucu düğüm noktaları bileşen olarak kaydedilmiştir. Daha sonra çatlak ucundaki her bir düğüm noktası için yukarıdaki şekilde belirtildiği gibi lokal koordinat sistemi tanımlanmış ve 'CINT' komutları her bir çatlak ucu düğüm noktası için uygulanarak çatlak ucu boyunca enerji salıverme oranları ( $G$ ) hesaplanmıştır.



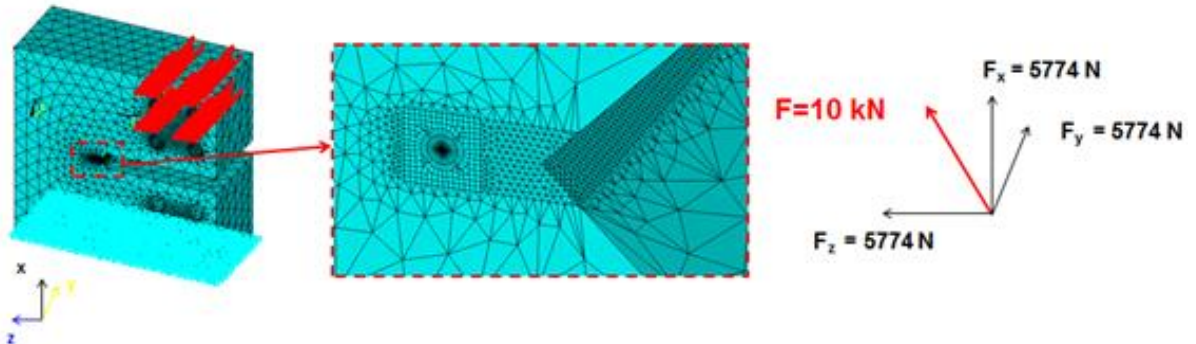
Şekil 3.3.6. Levha sonlu elemanlar modeli (solda) ve çatlak bölgesinin yakın görünümü (sağda)

Şekil 3.3.7'de, eliptik çatlak içeren levha modeli için 'CINT' komutu ile elde edilen çatlak ucu boyunca J-integral değerleri ile FCPAS sonlu elemanlar yazılım programından elde edilen enerji salıverme oranı değerlerinin ( $G$ ) karşılaştırılması sunulmaktadır. Siyah renk ile gösterilen değerler 'CINT' komutu ile elde edilen sonuçları, kırmızı renk ile gösterilen eğri ise FCPAS sonlu elemanlar yazılım programı ile elde edilen sonuçları göstermektedir. Bu uygulama için de birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir.



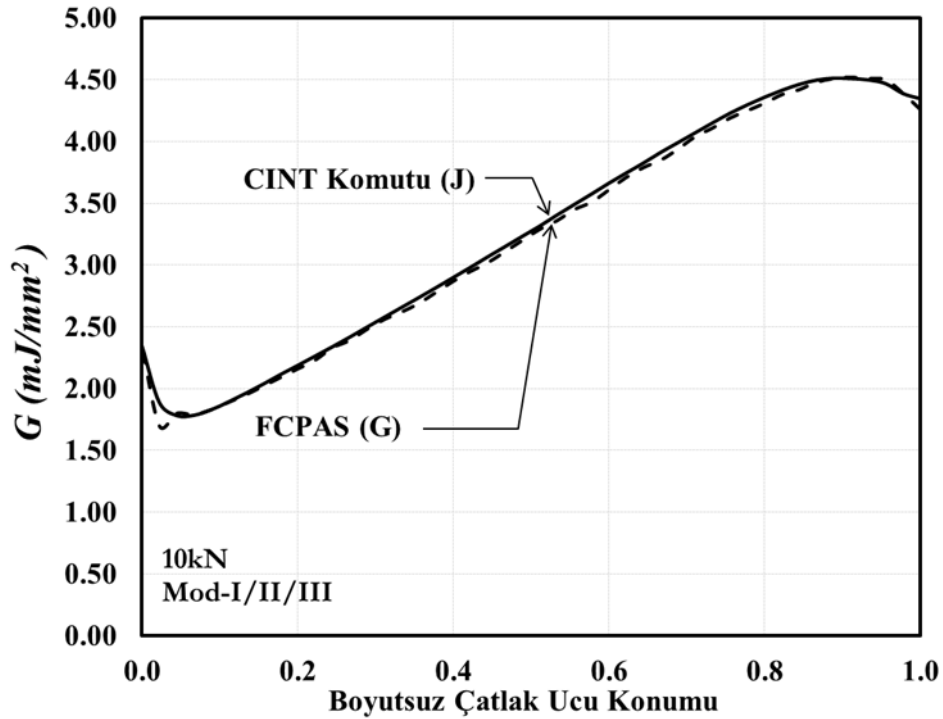
Şekil 3.3.7. Eliptik çatlak içeren levha modeli için CINT komutu ile hesaplanan J-integral değerlerinin FCPAS ile hesaplanan G değerleri ile karşılaştırılması

Yukarıda anlatılan mod-I yüke maruz doğrusal çatlak içeren CT numunesi ve merkezinde eliptik çatlak içeren levha modelleri için J-integrali değerleri 'CINT' komutu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu komut, karışık mod yük altındaki çatlak içeren problemlerin toplam enerji salıverme oranı (G) değerinin hesaplanması için de kullanılabilir. Bu bağlamda, Şekil 3.3.8, karışık mod yüke maruz CTST (Compact Tension Shearing and Tearing) numunesi sonlu elemanlar modelini göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, numunenin alt yatay yüzeyi sabitlenmiş olup, numunenin üst kısmında bulunan yükleme deliklerinden, toplam yük 10 kN olacak şekilde her üç yönde eşit şiddette kuvvet uygulanmakta ve böylece çatlak bölgesinde de mod-I, -II ve -III yükleme durumları aynı anda oluşturulmaktadır.



Şekil 3.3.8. CTST numunesi sonlu elemanlar modeli (solda) ve çatlak bölgesinin yakın görünümü (sağda)

Şekil 3.3.9'da, 10 kN karışık mod yüküne maruz CTST numunesi için 'CINT' komutu ile elde edilen J-integral değerlerinin FCPAS kullanılarak hesaplanan enerji salıverme oranı değerleri ile karşılaştırılması sunulmaktadır. Siyah renk ile gösterilen değerler J-integral değerlerini, kırmızı renk ile gösterilenler ise FCPAS ile hesaplanan enerji salıverme oranı değerlerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, her iki yöntemle hesaplanan toplam enerji salıverme oranı değerleri birbirine oldukça yakındır.

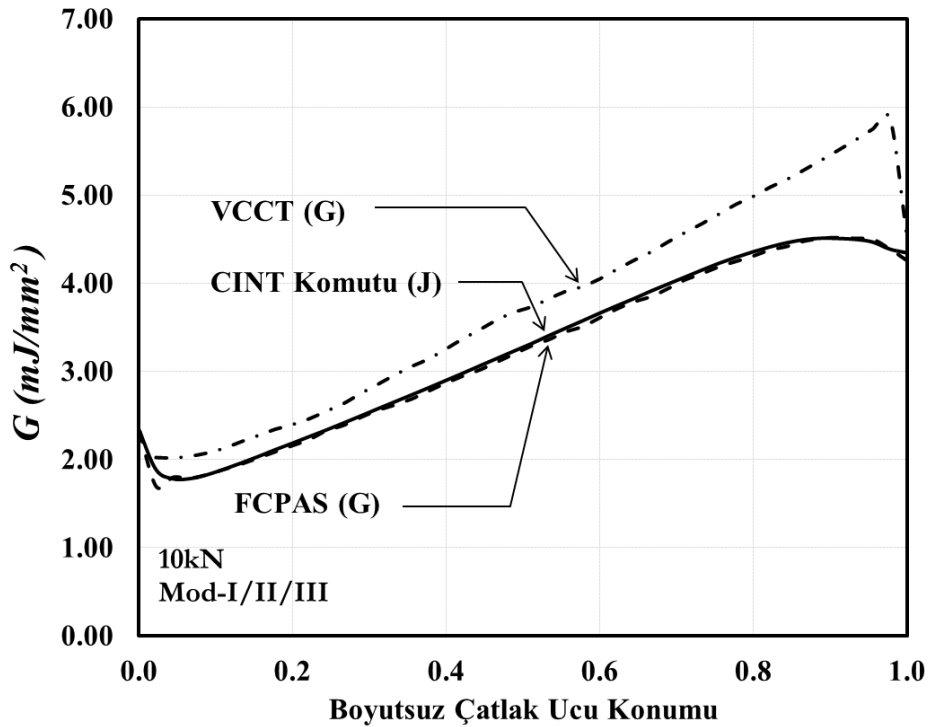


Şekil 3.3.9. Karışık mod yük altında CTST numunesi için toplam G değerlerinin J-integral ve FCPAS (G) çözümleri ile karşılaştırılması

J integral metodu çözüm aşamaları için kullanılan 'CINT' komutu, aksenal yüke maruz düzlemsel çatlaklar için oldukça iyi sonuçlar vermesine rağmen karışık mod yüküne maruz düzlemsel çatlaklar ve aksenal yüke maruz eğik çatlaklar için sadece toplam enerji salıverme oranını ( $G_T$ ) hesaplayabilmektedir. Hesaplanan bu toplam enerji salıverme oranı değerinin kırılma modlarına ayrıştırılması gerekmektedir. Bir başka deyişle, karışık mod kırılma problemlerinde, belirli kriterler kullanarak veya geliştirilerek ani kırılma oluşup oluşmayacağını belirlenebilmesi için toplam G değerinin her bir kırılma moduna başına düşen ayrıştırılmış miktarlarının hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla, aşağıdaki alt bölümde detay ve örnekleriyle anlatılan Sanal Çatlak Kapatma Yöntemi de araştırılmıştır.

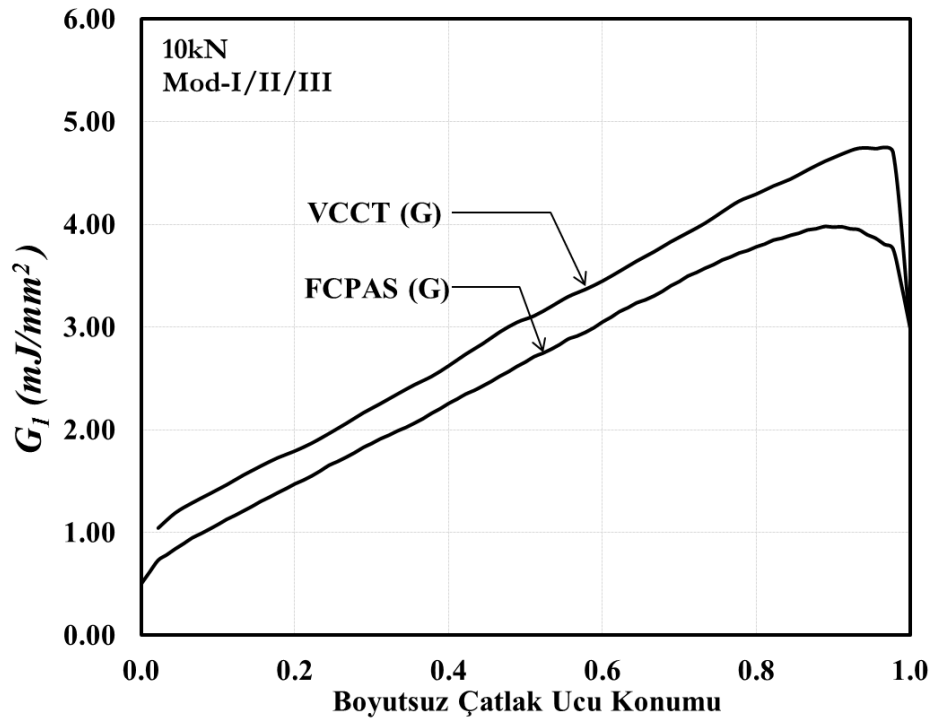
### 3.3.2 Sanal Çatlak Kapatma Yöntemi (VCCT) ile Enerji Saliverme Oranı (G) Hesaplanması

Öncelikle ANSYS sonlu elemanlar yazılım programında 'CINT' komutunun VCCT (Virtual Crack Closure Technique - Sanal Çatlak Kapatma Yöntemi) metodu özelliği kullanılarak, önceki bölümde verilen 10 kN karışık mod yüke maruz CTST numunesi için enerji saliverme oranı (G) hesaplanmıştır. ANSYS, VCCT çözümü için sadece doğrusal elemanların kullanılmasına izin vermektedir. Bu nedenle model bölüntülenmesi aşamasında Solid-185 eleman tipi kullanılmıştır. Şekil 3.3.10, toplam enerji saliverme oranlarını ( $G_T$ ), Şekil 3.3.11 ise her bir kırılma modu için ayrıştırılmış enerji saliverme oranı ( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ) değerlerini sunmaktadır.

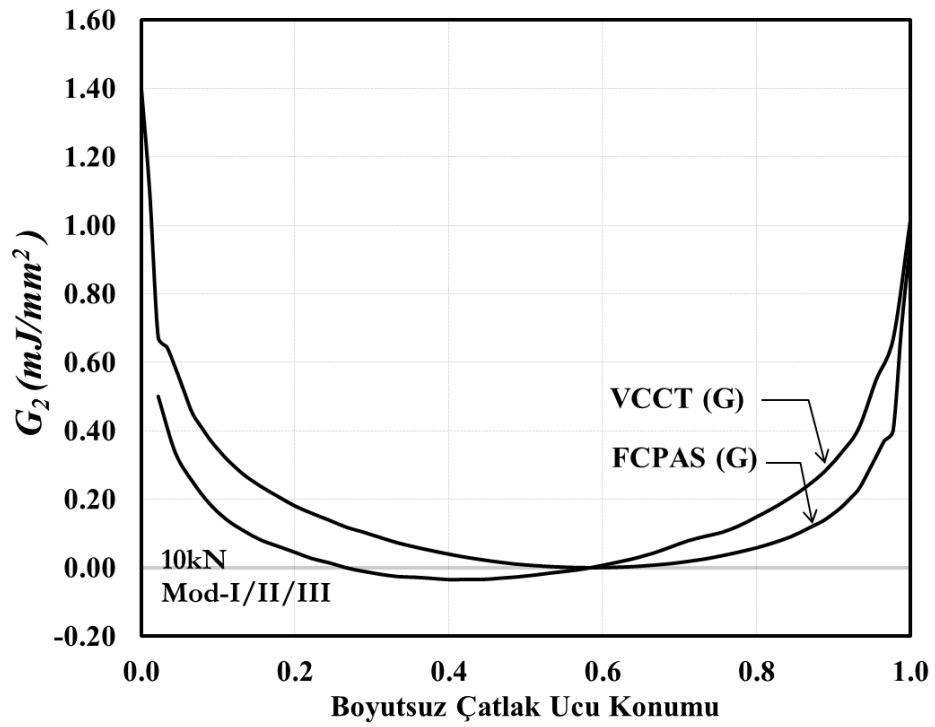


Şekil 3.3.10. ANSYS VCCT ile hesaplanan toplam G değerlerinin J-integral ve FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması

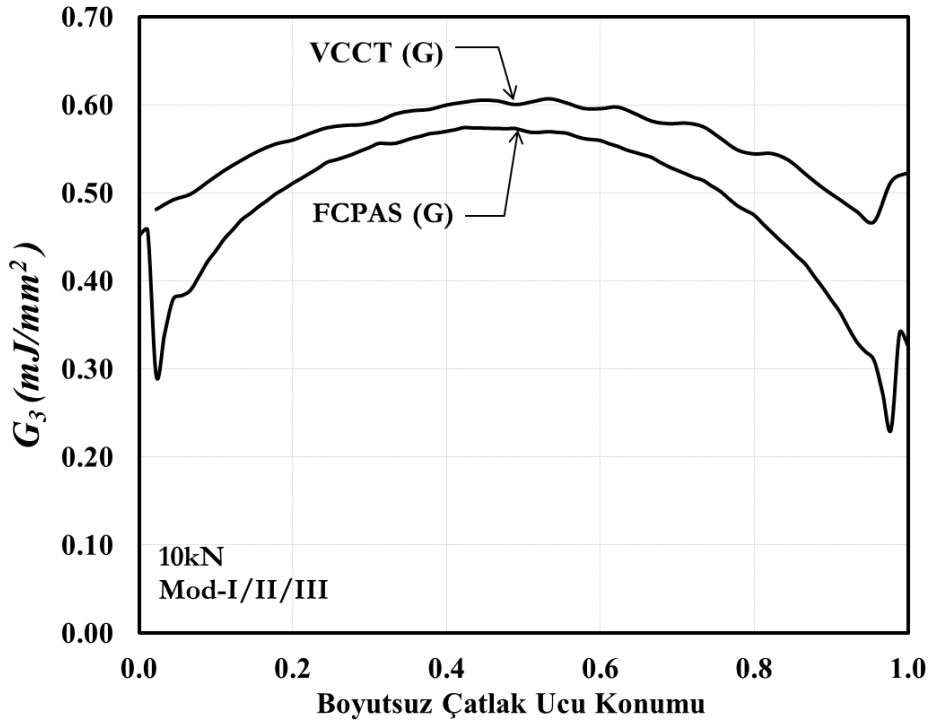
Toplam enerji boşalım oranı ( $G_T$ ) ve karışık mod enerji boşalım oranı değerleri ( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ) arasında bir miktar fark görülmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere, VCCT yöntemi diğer yöntemlerden biraz farklı sonuçlar vermekte olup, bunun VCCT yönteminde doğrusal elemanların kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun sonucu olarak, VCCT yöntemi ile ilgili literatür araştırması yapılmış olup, Krueger'in yaptığı bir çalışma detaylı olarak incelenmiştir (Krueger, 2004).



a)



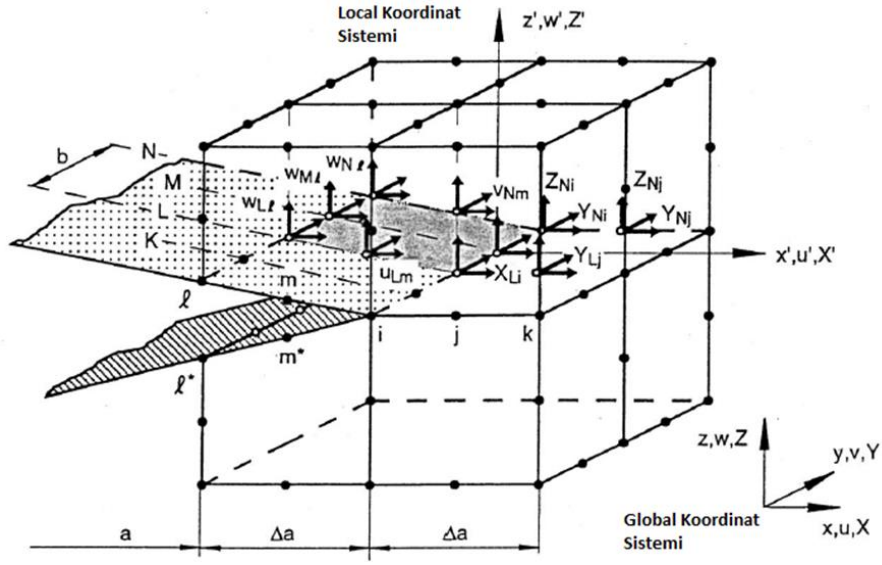
b)



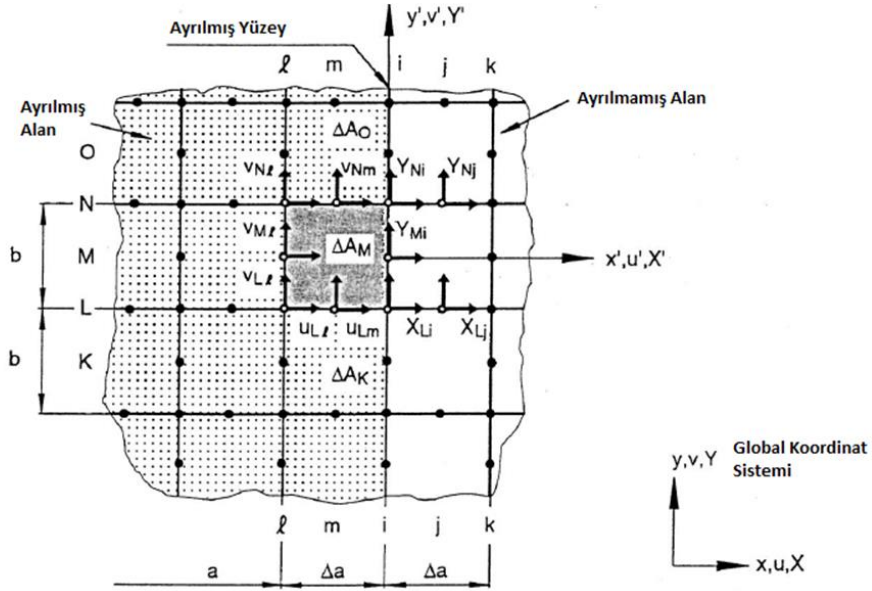
c)

Şekil 3.3.11. VCCT yöntemi ile elde edilen  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  değerlerinin FCPAS ile karşılaştırılması Krueger (2004), çalışmasında VCCT yönteminin temelinde elemanlar arası reaksiyon kuvveti ve yer değiştirme farklarının olduğunu göstermiştir. Şekil 3.3.12, VCCT yöntemi için kullanılan değişkenleri çatlak ucunda bulunan 20-düğüm noktalı üç-boyutlu elemanlar üzerinde göstermektedir. Denklem (3.3.2), (3.3.3) ve (3.3.4) karışık mod enerji boşalım oranı ( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ) formülasyonlarını vermektedir.





(a). 3 Boyutlu Görünüm ( Küçük yüzey kuvvetleri dahil edilmemiştir).



(b). Üst yüzeyin üstten görünüşü (Küçük yüzey ifadeleri dahil edilmemiştir).

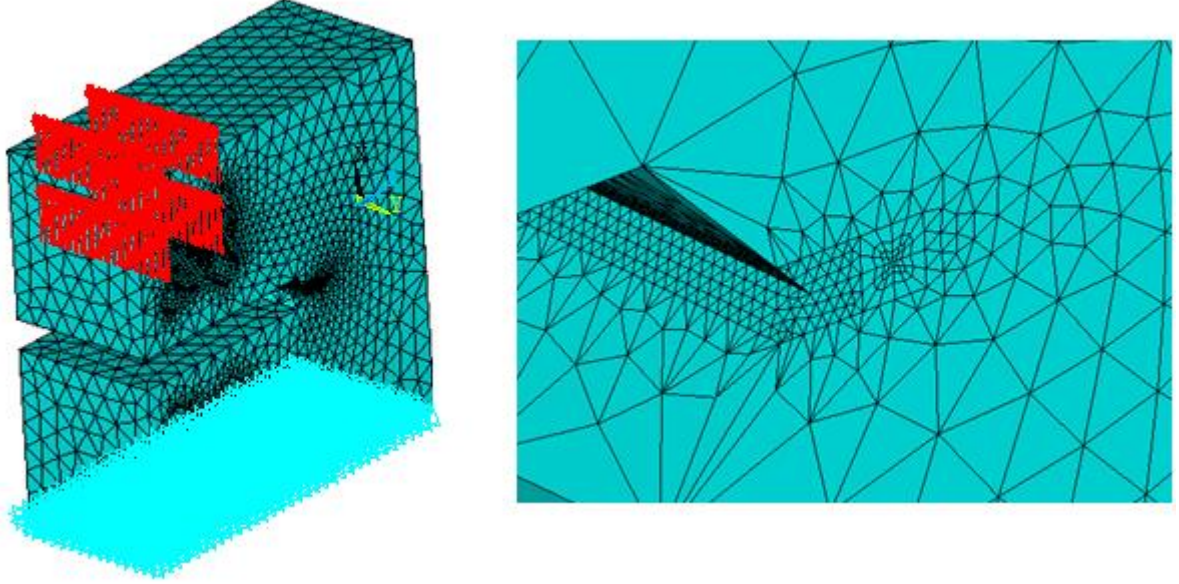
Şekil 3.3.12. 20-düğüm noktalı elemanlar için VCCT yöntemi (Krueger 2004)

$$G_1 = -\frac{1}{2\Delta A_m} [Z_{Li}(w_{Ll} - w_{Ll*}) + Z_{Lj}(w_{Lm} - w_{Lm*}) + Z_{Mi}(w_{Ml} - w_{Ml*}) + Z_{Ni}(w_{Nl} - w_{Nl*}) + Z_{Nj}(w_{Nm} - w_{Nm*})] \quad (3.3.2)$$

$$G_2 = -\frac{1}{2\Delta A_m} [X_{Li}(u_{Ll} - u_{Ll*}) + X_{Lj}(u_{Lm} - u_{Lm*}) + X_{Mi}(u_{Ml} - u_{Ml*}) + X_{Ni}(u_{Nl} - u_{Nl*}) + X_{Nj}(u_{Nm} - u_{Nm*})] \quad (3.3.3)$$

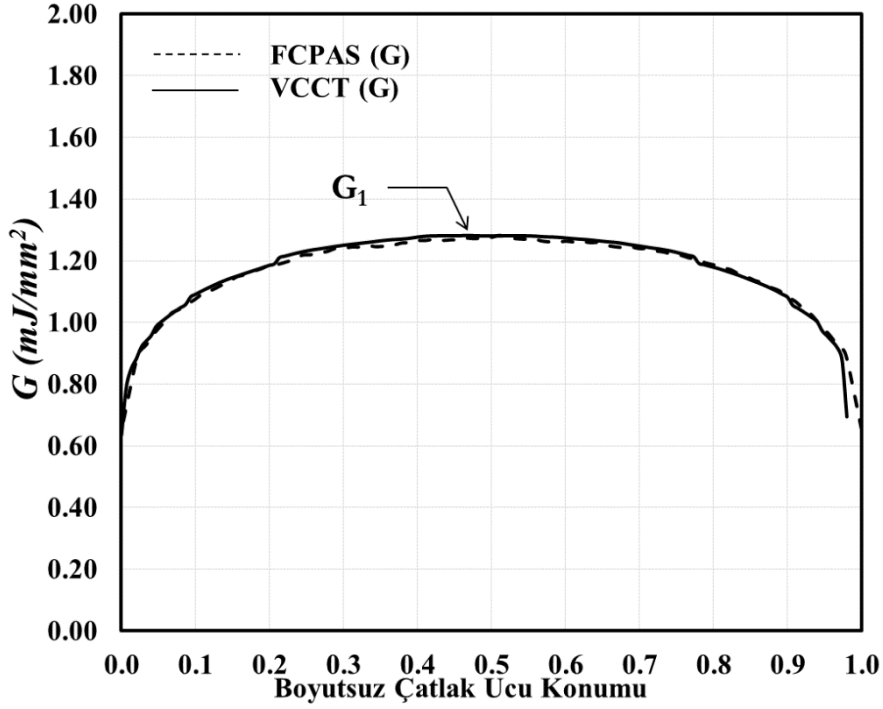
$$G_3 = -\frac{1}{2\Delta A_m} [Y_{Li}(v_{Ll} - v_{Ll*}) + Y_{Lj}(v_{Lm} - v_{Lm*}) + Y_{Mi}(v_{Ml} - v_{Ml*}) + Y_{Ni}(v_{Nl} - v_{Nl*}) + Y_{Nj}(v_{Nm} - v_{Nm*})] \quad (3.3.4)$$

Şekil 3.3.13'te, 5.74 kN mod-I çekme yüküne maruz bir CTST numunesi için çatlak ucu bölgesinde 20-düğüm noktalı elemanlar ile oluşturulan sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir.



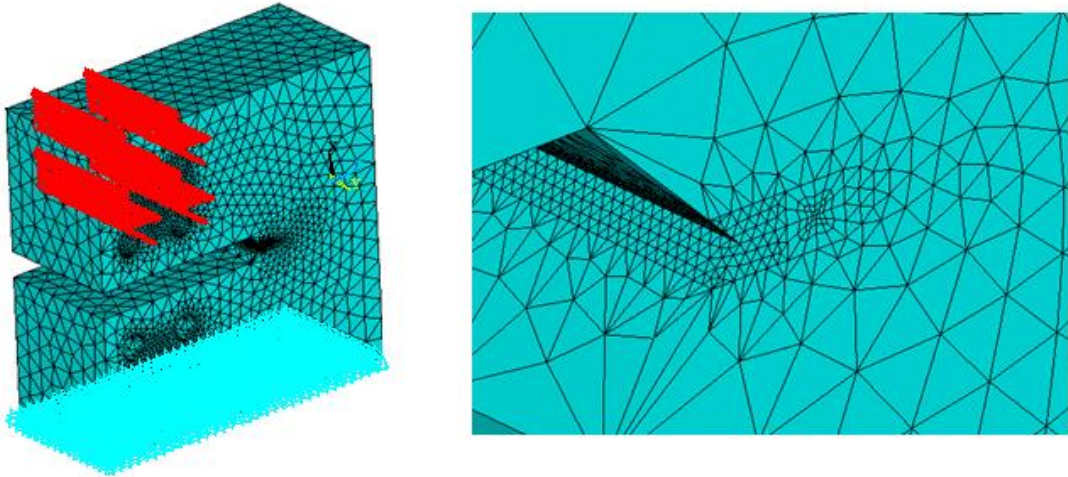
Şekil 3.3.13. 5.74 kN yüke maruz CTST numunesi sonlu elemanlar modeli

Bu model için reaksiyon kuvvetleri ve yer değiştirmeler ANSYS sonlu elemanlar yazılım programı kullanılarak hesaplanmış ve ilgili denklemde yerine koyulmuştur. Şekil 3.3.14'te 5.74 kN mod-I yük uygulanan model için hesaplanan enerji salıverme oranı (G) değerinin FCPAS ile karşılaştırılması sunulmaktadır. VCCT yöntemi ve FCPAS ile elde edilen enerji salıverme oranı dağılımlarının birbiri ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. Burada, sadece mod-I yüklemesinden dolayı  $G_2$  ve  $G_3$  değerleri sıfır olacağı için, sadece  $G_1$  denklemi kullanılmıştır.



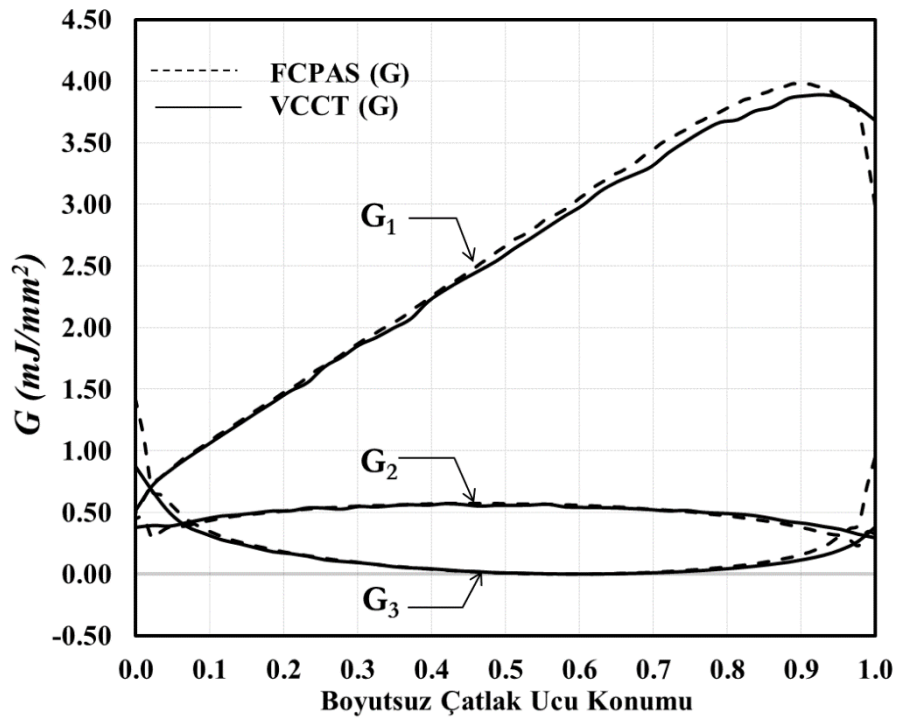
Şekil 3.3.14. VCCT yöntemi ile hesaplanan  $G_1$  değerlerinin FCPAS ile karşılaştırılması

Şekil 3.3.15'te ise 10 kN karışık mod yüke maruz olan ve daha önce J-integral analizi sunulmuş olan CTST numunesinin sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir.



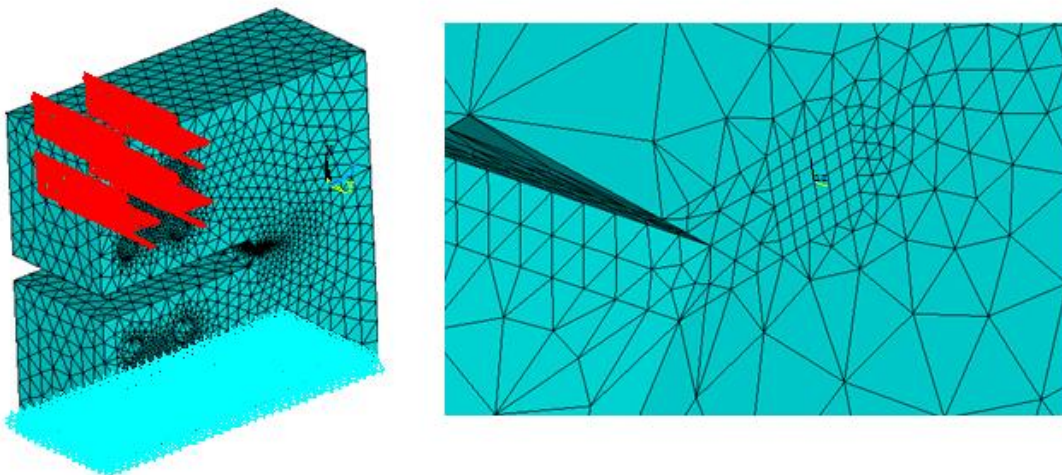
Şekil 3.3.15. 10 kN karışık mod yüke maruz CTST numunesi sonlu eleman modeli

Şekil 3.3.16'da ise VCCT yöntemi kullanılarak hesaplanan  $G_1$ ,  $G_2$  ve  $G_3$  değerlerinin FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması sunulmaktadır. Elde edilen enerji salıverme oranları (G) değerlerinin arasındaki farkın %1'den az olduğu görülmektedir.

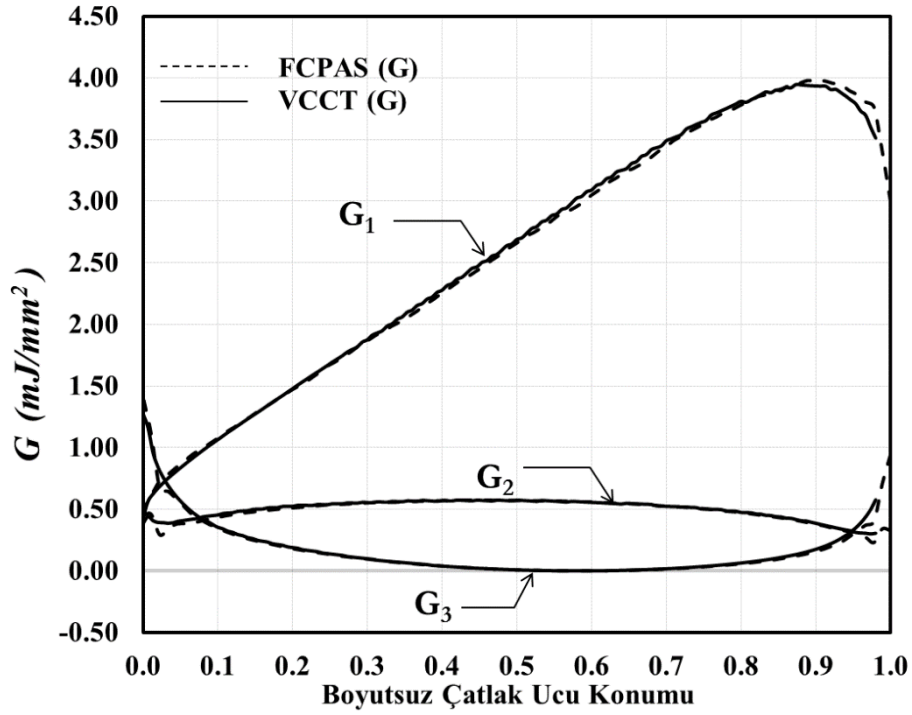


Şekil 3.3.16. VCCT yöntemi ile hesaplanan  $G_1$ ,  $G_2$  ve  $G_3$  değerlerinin FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması

Daha sonra, 10 kN karışık mod yüke maruz olan bu model düzgün yayılı dörtgen (mapped) bölüntü ile modellenmiştir. Şekil 3.3.17’de ilgili sonlu elemanlar modeli, Şekil 3.3.18’de ise elde edilen karışık mod enerji salıverme oranlarının FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması sunulmaktadır.

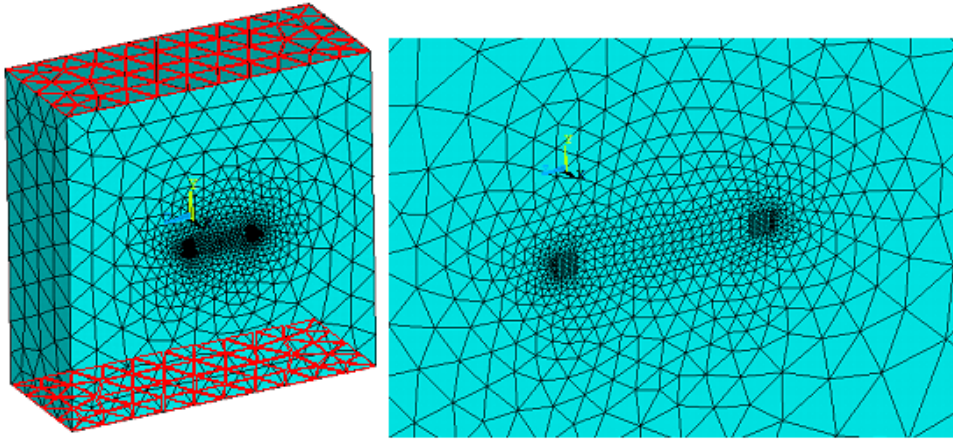


Şekil 3.3.17. 10 kN karışık mod yüke maruz CTST numunesi modeli (çatlak bölgesinde düzgün yayılı dörtgen bölüntü)

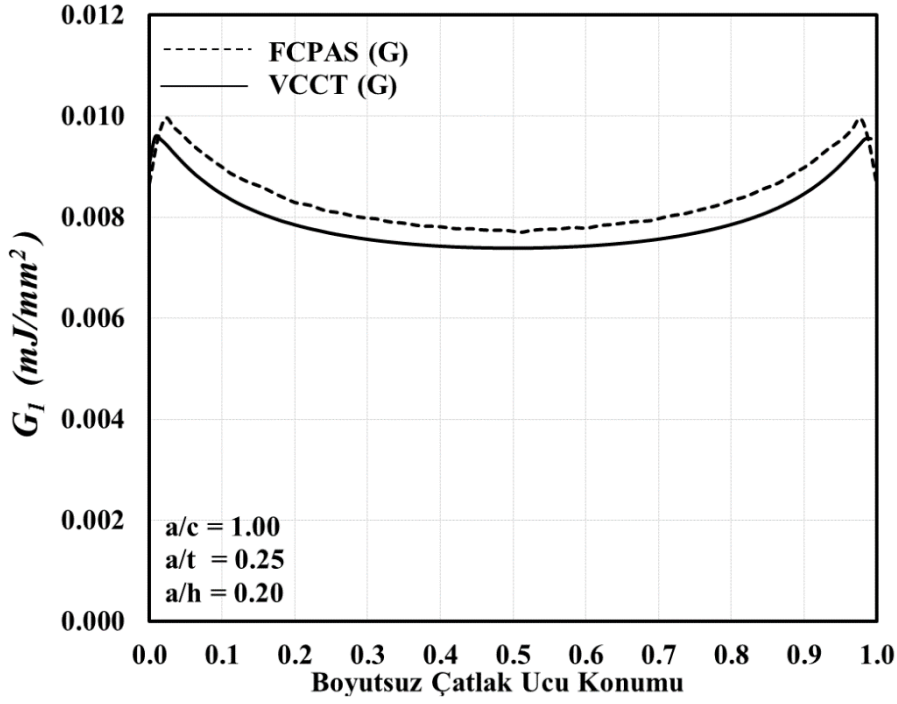


Şekil 3.3.18: VCCT yöntemi ile hesaplanan  $G_1$ ,  $G_2$  ve  $G_3$  değerlerinin FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması (çatlak bölgesinde düzgün yayılı dörtgen bölüntü)

Yukarıda verilen analiz sonuçlarından, doğrusal çatlak içeren CTST numunesi için, VCCT yönteminin aksenal ve karışık mod yükler altında FCPAS sonuçlarına oldukça yakın değerler verdiği görülmektedir. VCCT yöntemi kullanımında çatlak ucunda bulunan elemanların çatlak önü yönündeki eleman uzunlukları (lesize) önemli bir parametredir. Bir başka deyişle, çatlak ucunun kaç elemana bölündüğü sonuçlarda etki etmektedir. En iyi sonuç küp elemanlar ile elde edilmektedir. Yukarıda anlatılan örneklerde düz çatlak uygulamaları ele alınmış olup, çatlak ucundaki elemanların kenarları global koordinat sistemi ile dik olarak kesişmektedir. Çatlak önünün eliptik olması durumunda her bir elemanın reaksiyon kuvvetleri ve yer değiştirme değerlerinin, çatlak önüne dik olan yöne göre konumlandırılmış lokal koordinat sistemlerine göre hesaplanması gerekmektedir. Şekil 3.3.19'da dairesel yüzey çatlağı içeren ve aksenal üniform gerilme altındaki bir levhanın sonlu eleman modeli gösterilmektedir. Şekil 3.3.20'de ise bu problem için VCCT yöntemi ile hesaplanan enerji salıverme oranı ( $G$ ) dağılımının FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmektedir.

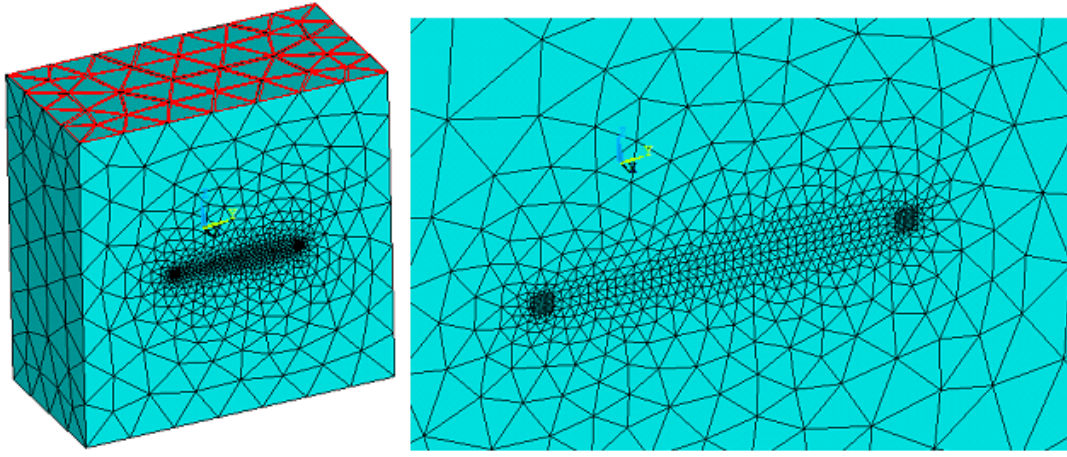


Şekil 3.3.19. Dairesel yüzey çatlaklı içeren levha sonlu elemanlar modeli

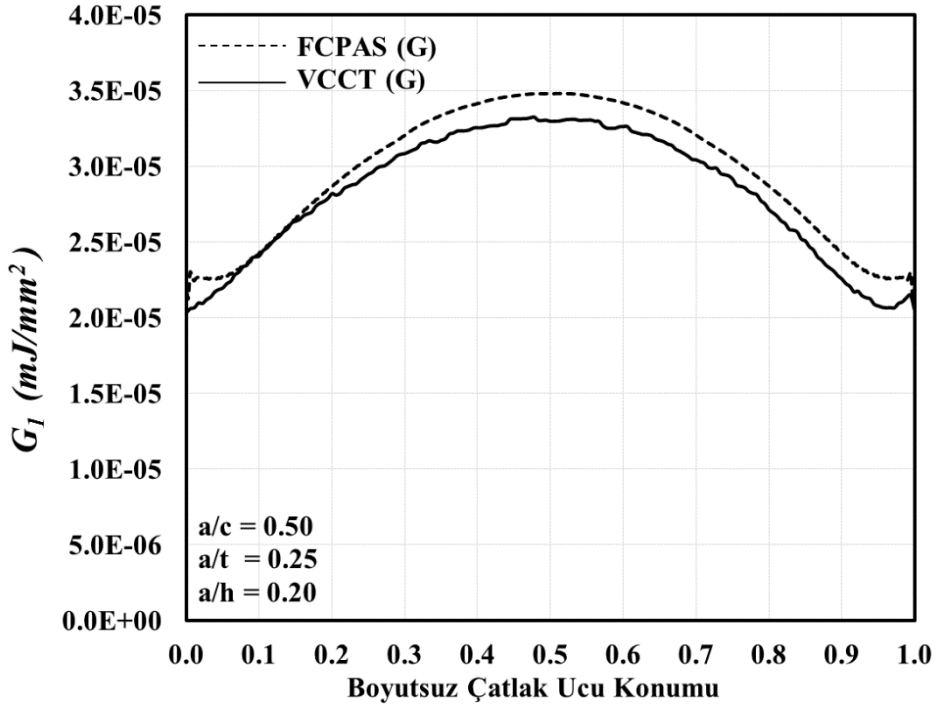


Şekil 3.3.20. Dairesel yüzey çatlaklı içeren levha için VCCT metodu ile hesaplanan enerji salıverme oranı ile FCPAS sonuçlarının karşılaştırılması ( $a = 1$  mm)

Eğrisel çatlak önü durumuna ikinci bir örnek olarak, Şekil 3.3.21 eliptik yüzey çatlaklı ( $a/c=0.5$ ) içeren bir levha modelini göstermektedir ( $a= 1$  mm). Şekil 3.3.22'de ise bu problem için VCCT yöntemi ile elde edilen enerji salıverme oranı (G) değerlerinin FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekil 3.3.20 ve 3.3.22'den görüldüğü üzere, VCCT yöntemi ile hesaplanan enerji salıverme oranı değerleri ile FCPAS sonuçları oldukça yakındır.

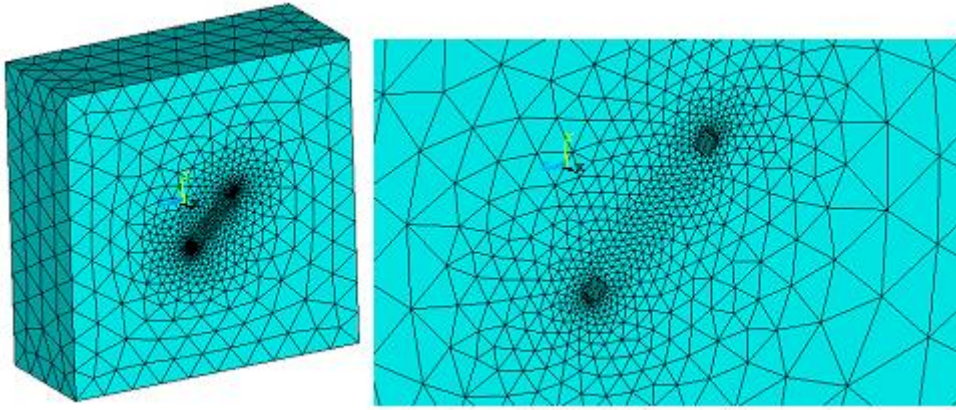


Şekil 3.3.21. Eliptik yüzey çatlaklı ( $a/c=0.5$ ) içeren levha sonlu elemanlar modeli

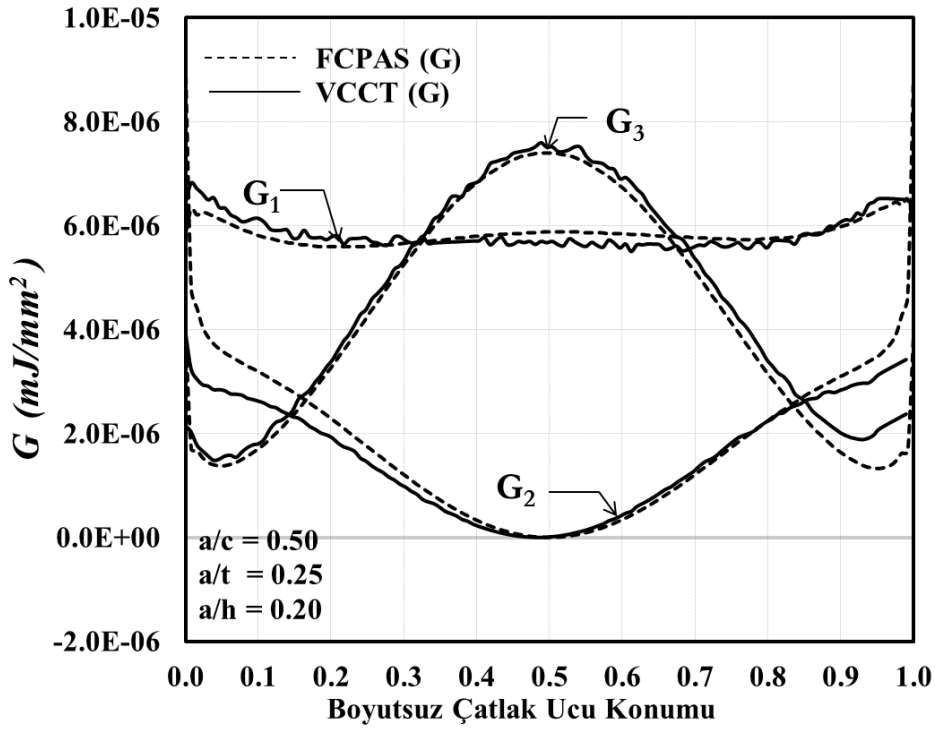


Şekil 3.3.22. Eliptik yüzey çatlaklı ( $a/c=0.5$ ) içeren levha için VCCT yöntemi ile hesaplanan enerji salıverme oranı dağılımının FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması

Yukarıda verilen örneklerde her ne kadar eğrisel çatlak önü olsa da, levhalar üniform aksenal gerilmeye maruz oldukları için mod-I kırılma problemi kategorisindedirler. Karışık mod ve eğrisel çatlak ucu içeren bir problemi analiz etmek üzere, dairesel ve eğik yüzey çatlaklı içeren ve aksenal yüke maruz bir levha problemi ele alınmıştır. Şekil 3.3.23, dairesel eğik yüzey çatlaklı içeren levhanın sonlu eleman modelini göstermektedir. Şekil 3.3.24'te bu problem için VCCT yöntemi ile hesaplanan enerji salıverme oranı (G) değerleri ile FCPAS sonuçlarının karşılaştırılması sunulmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi, her iki analiz sonuçları da birbirlerine oldukça yakındır.



Şekil 3.3.23. Dairesel eğik yüzey çatlaklı içeren levha sonlu elemanlar modeli



Şekil 3.3.24. Dairesel eğik yüzey çatlaklı içeren levha için VCCT yöntemi ile hesaplanan enerji salıverme oranı dağılımının FCPAS sonuçları ile karşılaştırılması

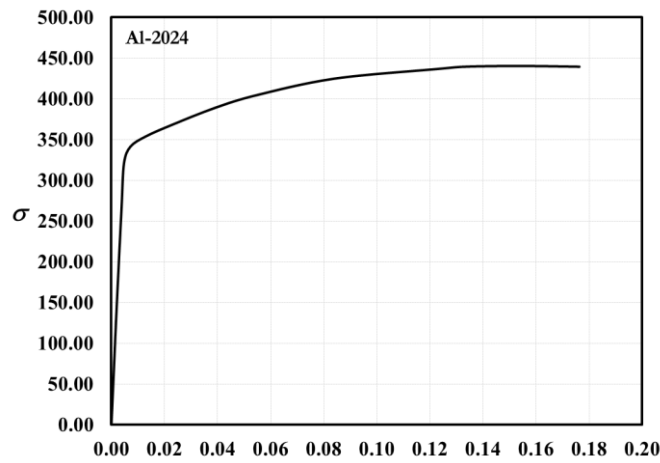
### 3.3.3 Elastik-Plastik malzemeler için VCCT metodunun uygulanması

Daha önce, çatlak ucundaki plastik bölgenin doğrusal elastik kırılma limitlerinin üzerinde olduğu ve doğrusal olmayan deformasyon içeren kırılma problemleri için gerilme şiddet faktörü yerine, elastik enerji salıverme oranı değerinin kullanılması gerektiği belirtilmişti. Bu tür problemler için çatlak ucu açılma yer değiştirme değerleri de kullanılabilir. Elastik enerji



salıverme oranının hesaplanması için yukarıda J-integral ve VCCT yöntemleri açıklanmış ve hesaplanan değerlerin doğruluğunu ispat etmek için elastik problemler üzerinde yapılan analizlerden elde edilen J-integral ve VCCT yöntemleri ile elde edilen enerji salıverme oranları FCPAS/FAC3D sonuçları ile karşılaştırılarak, işleyiş ve hesaplanan değerler açısından yöntemin doğrulamaları yapılmıştır. Elastik problemlerde, yük ve yer değiştirme arasında tamamen doğrusal bir ilişki olduğu için, problemde etki eden nihai yük değerinde tek bir analiz yapılarak ilgili parametrelerin hesaplanması yeterlidir. Ancak, elastik limitin üzerinde bir deformasyon içeren doğrusal olmayan bir problem için, uygulanan toplam yükün artırımlı bir şekilde bölünerek problemde ele alınması ve her bir yük artırımını için ayrı analiz yapılarak tekrarlı çözümler ile sayısal çözümün denge haline gelmesi ve yükün tekrar artırılarak benzer şekilde nihai yük değerine kadar analizlerin devam ettirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, doğrusal olmayan deformasyon içeren bir problemin çözüm zamanı, aynı özelliklerde model içeren elastik bir problemin çözümüne kıyasla onlarca kat daha fazla hesaplama zamanı gerektirebilmektedir. Benzer şekilde, çatlak içeren ve elastik-plastik deformasyon analizi gerektiren problemler için de yukarıda detayları ile sunulmuş olan VCCT yöntemi analizlerinin de, artırımlı şekilde tekrar yapılan ve sonuçlarının birbirleri ile toplandığı müstakil analizler şeklinde yapılması gerekmektedir. Örnek olarak aşağıda verilen düz çatlak içeren CT numunesi analizi sunulmaktadır.

Bu örnekte, elastik-plastik malzeme davranışı gösteren bir malzemeden yapılmış ve 5 kN çekme yüküne maruz CT numunesi ele alınmaktadır. Artırımlı analizler yapılan elastik-plastik analiz sonucuna göre enerji salıverme oranı (G), VCCT yöntemi ve 'CINT' komutu ile ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Şekil 3.3.25'te elastik-plastik malzeme için kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı verilmektedir.



Şekil 3.3.25. Elastik-plastik analiz çözümünde kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı

Düz çatlak içeren CT numunesinin elastik-plastik analizi 12 adımda gerçekleştirilmiştir. 'CINT' komutu otomatik olarak bütün adımlardan elde edilen sonuçları artırımlı şekilde hesaplamaktadır. VCCT yöntemi için ise her adım sonunda oluşan reaksiyon kuvvetleri ve yer değiştirmelerin ilgili çözümden çekilerek enerji salıverme oranı formülü uygulanarak artırımlı şekilde birbirlerine eklenmesi gerekmektedir. İlk adımda, elastik problemler için geçerli olan Denklem 3.3.2 kullanılmıştır. İkinci ve diğer adımlarda ise bir önceki adım sonuçlarını da işleme alarak denklem (3.3.5-3.3.7)'nin kullanılması gerekmektedir.

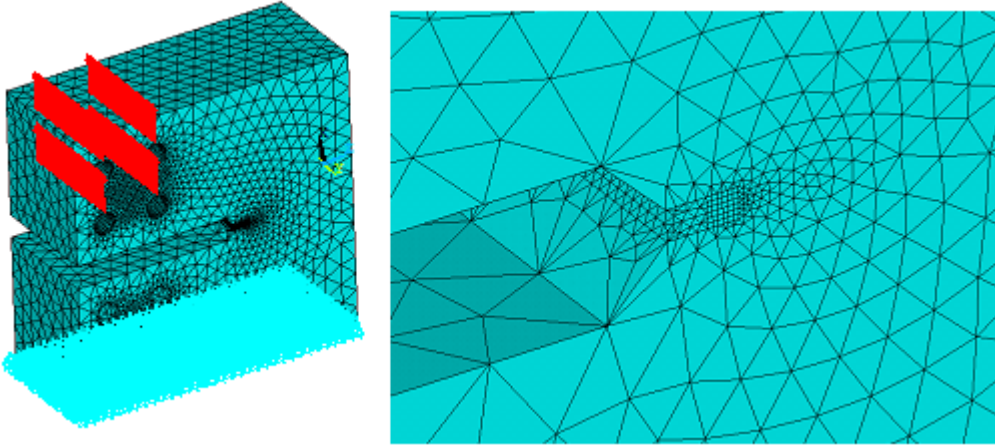
$$G_1^{12} = -\frac{1}{2\Delta A_m} [\{(Z_{Li}^2 + Z_{Li}^1)([w_{Li}^2 - w_{Li*}^2] - [w_{Li}^1 - w_{Li*}^1])\} + \{(Z_{Lj}^2 + Z_{Lj}^1)([w_{Lm}^2 - w_{Lm*}^2] - [w_{Lm}^1 - w_{Lm*}^1])\} + \{(Z_{Mi}^2 + Z_{Mi}^1)([w_{Mi}^2 - w_{Mi*}^2] - [w_{Mi}^1 - w_{Mi*}^1])\} + \{(Z_{Ni}^2 + Z_{Ni}^1)([w_{Ni}^2 - w_{Ni*}^2] - [w_{Ni}^1 - w_{Ni*}^1])\} + \{(Z_{Lj}^2 + Z_{Lj}^1)([w_{Nm}^2 - w_{Nm*}^2] - [w_{Nm}^1 - w_{Nm*}^1])\}] \quad (3.3.5)$$

$$G_2^{12} = -\frac{1}{2\Delta A_m} [\{(X_{Li}^2 + X_{Li}^1)([u_{Li}^2 - u_{Li*}^2] - [u_{Li}^1 - u_{Li*}^1])\} + \{(X_{Lj}^2 + X_{Lj}^1)([u_{Lm}^2 - u_{Lm*}^2] - [u_{Lm}^1 - u_{Lm*}^1])\} + \{(X_{Mi}^2 + X_{Mi}^1)([u_{Mi}^2 - u_{Mi*}^2] - [u_{Mi}^1 - u_{Mi*}^1])\} + \{(X_{Ni}^2 + X_{Ni}^1)([u_{Ni}^2 - u_{Ni*}^2] - [u_{Ni}^1 - u_{Ni*}^1])\} + \{(X_{Lj}^2 + X_{Lj}^1)([u_{Nm}^2 - u_{Nm*}^2] - [u_{Nm}^1 - u_{Nm*}^1])\}] \quad (3.3.6)$$

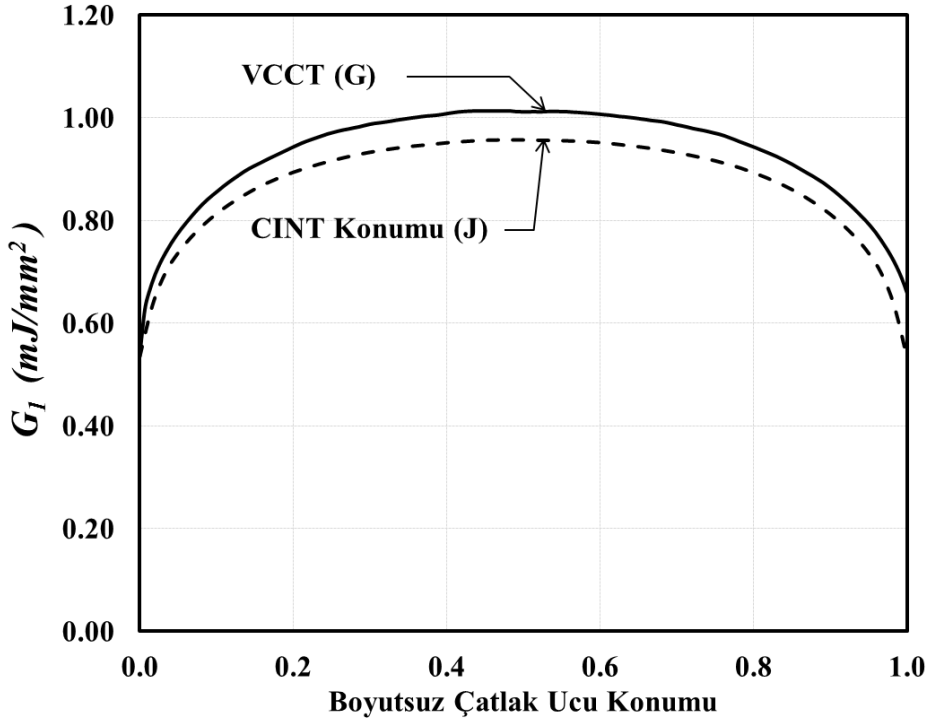
$$G_3^{12} = -\frac{1}{2\Delta A_m} [\{(Y_{Li}^2 + Y_{Li}^1)([v_{Li}^2 - v_{Li*}^2] - [v_{Li}^1 - v_{Li*}^1])\} + \{(Y_{Lj}^2 + Y_{Lj}^1)([v_{Lm}^2 - v_{Lm*}^2] - [v_{Lm}^1 - v_{Lm*}^1])\} + \{(Y_{Mi}^2 + Y_{Mi}^1)([v_{Mi}^2 - v_{Mi*}^2] - [v_{Mi}^1 - v_{Mi*}^1])\} + \{(Y_{Ni}^2 + Y_{Ni}^1)([v_{Ni}^2 - v_{Ni*}^2] - [v_{Ni}^1 - v_{Ni*}^1])\} + \{(Y_{Lj}^2 + Y_{Lj}^1)([v_{Nm}^2 - v_{Nm*}^2] - [v_{Nm}^1 - v_{Nm*}^1])\}] \quad (3.3.7)$$

Bu denklemler ile, herhangi bir analiz adımı sonucunda (denklemden 2. adım) ve önceki analiz adımı sonucunda (denklemden 1. adım) hesaplanan kuvvet ve yer değiştirmeler kullanılarak iki adım arasındaki artırımlı enerji salıverme oranı ayrı modlar halinde hesaplanabilmektedir. Elde edilen tüm artırımlı analiz sonuçları toplanarak elastik-plastik özellik gösteren bir malzeme için VCCT yöntemi ile toplam enerji salıverme oranı hesaplanabilmektedir.

Şekil 3.3.26, elastik-plastik analiz için kullanılan ve 5 kN mod-I çekme yükü altındaki CTST numunesinin sonlu elemanlar modelini göstermektedir (çatlak uzunluğu 25 mm). Şekil 3.3.27'de ise VCCT yöntemi kullanılarak artırımlı analizler ile elde edilen analiz sonuçlarının 'CINT' komutu sonuçları ile karşılaştırılması sunulmaktadır.



Şekil 3.3.26. Elastik-plastik analiz için kullanılan 5 kN çekme yüküne maruz CTST numunesi



Şekil 3.3.27. Elastik-plastik analiz sonucu VCCT yöntemi ile hesaplanan enerji salıverme oranı (G) değerlerinin 'CINT' komutu ile karşılaştırılması

Şekilden görüldüğü üzere, farklı olarak yapılan elastik-plastik analizler sonucunda 'CINT' komutu ve artırılmış olarak uygulanan VCCT yöntemi ile elde edilen sonuçlar birbirlerine yaklaşık olarak %5 yakınlık içerisinde. VCCT yönteminin kullanıldığı analiz adım sayısı artırılarak aradaki farkın değişimi ayrıca ele alınabilir.

Yukarıda detayları ile açıklandığı ve analiz sonuçlarından görüldüğü üzere, VCCT yöntemi gerek elastik gerekse elastik-plastik karışık mod kırılma analizleri için kullanılabilme potansiyeli taşımakta olup, proje önergesinde vaat edilmemiş olan bu alandaki yöntem geliştirme, doğrulama ve ilgili deney çalışmalarının ilgili doktora tezi kapsamında devam ettirilmesi planlanmaktadır.

### **3.4 Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Çalışmaları**

Bu kısımda, olasılık temelli kırılma mekanikliği çalışmalarında kullanılmak üzere aksel çekme, kırılma tokluğu, sabit ve değişken yük altında çatlak ilerlemesi testleri gerçekleştirilmiştir. Aksel çekme, kırılma tokluğu ve sabit genlikli çatlak ilerleme testleri ile malzemeye ait özelliklerdeki değişkenlikler belirlenmiştir. Bu özellikler kullanılarak değişken genlikli yüklemeler altında gerçekleştirilen test sonuçları ile literatürdeki mevcut çatlak ilerleme modelleri karşılaştırılmış ve sonuçlar grafik olarak verilmiştir.

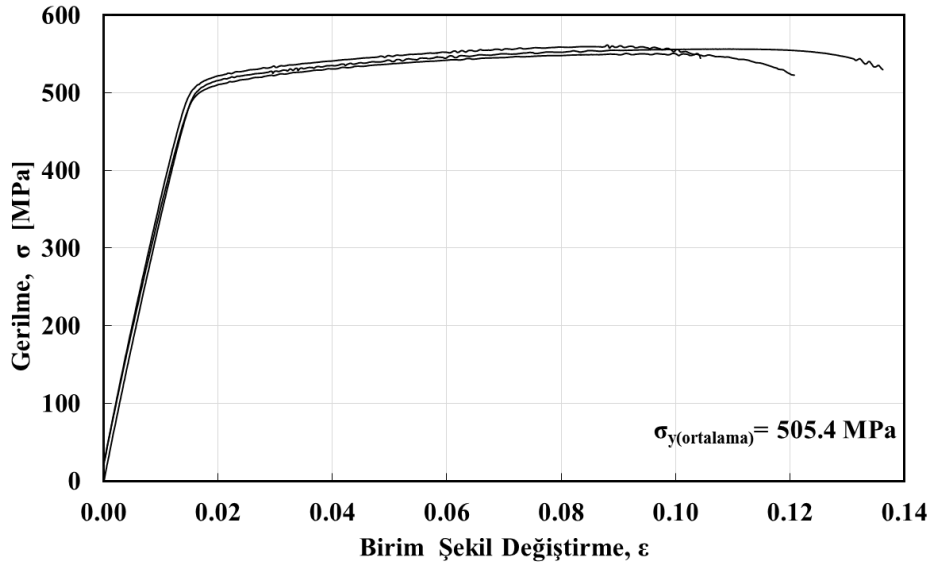
#### **3.4.1 Çatlak İlerleme Malzeme Özellikleri Değişkenliği Testleri**

Bu başlık altındaki çalışmaların ana amacı malzeme özelliklerinden kaynaklanan değişkenliklerin deneysel olarak belirlenmesidir. Projemizde sıcak haddelenmiş Alüminyum 7075-T651 malzemesi kullanılmış olup, yapılan deneyler L-T çatlak yönü durumuna göre gerçekleştirilmiştir. Kullanılan 7075-T651 malzemesi 30 mm kalınlıkta levhalar halinde temin edilmiştir. Aksel çekme ve iki-boyutlu çatlak ilerleme testlerinde kullanılan numuneler Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında CNC freze tezgahıta işlenmiştir. Kırılma ve yorulma çatlak ilerleme testleri ise Sakarya Üniversitesi Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM) bünyesinde bulunan MTS aksel/açılma yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Adı geçen cihaz 100 kN çekme ve 1100 Nm tork kapasitesine sahiptir.

##### **3.4.1.1 Çekme Testi**

Malzemenin mukavemet değerlerinin belirlenmesi için önce çekme testleri gerçekleştirilmiştir. 30 mm kalınlıktaki Alüminyum 7075-T651 levhadan 4 adet çekme numunesi CNC freze ile hazırlanmıştır. Numune kalınlığı 5.5 mm ve kritik kesitin boyu 90 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan numunelerden biri test konfigürasyonu kontrolü için kullanılmış, yeterli veri alınamadığından bu test hesaplamalarda kullanılmamıştır. Deneylerde akma gerilmesi dayanımı 497, 512 ve 507 MPa olarak elde edilmiştir. Gerilme-Birim Şekil Değiştirme eğrileri (ana amaç akma gerilmesi değerini belirlemek olduğundan dolayı, cihazda oluşabilecek

hasar riskine karşı ekstansometre kullanılmamış olup, şekil değiştirme değerleri çene yer değiştirmelerine göre hesaplanmıştır), Şekil 3.4.1’de detaylı olarak incelenebilir.



Şekil 3.4.1. Alüminyum 7075-T651 için elde edilen Gerilme – Birim Şekil Değiştirme eğrileri

Çekme deneylerinden sonra numuneler incelendiğinde, kopma gerçekleşen bölgenin kritik kesitte olduğu ve kırılmanın genel olarak eksene dik yönde gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu gözlemler gevrek malzemeler için çekme deneyinden beklenen kırılma yüzeyleri ile örtüşmektedir. Kırılan numuneler Şekil 3.4.2’de görülmektedir.

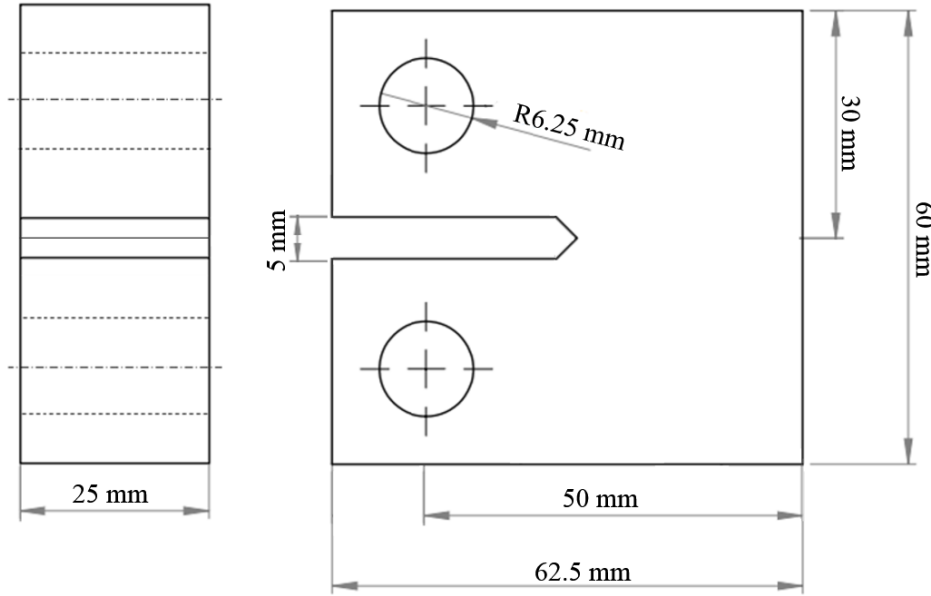


Şekil 3.4.2. Çekme testi sonrasında Alüminyum 7075-T651 malzemenin görüntüsü

### 3.4.1.2 Kırılma Tokluğu Testleri

Kullanılan malzemenin kırılma tokluğu değerindeki değişkenliğin/saçılımının belirlenmesi amacıyla aynı şartlar altında 29 adet kırılma tokluğu deneyi gerçekleştirilmiştir. Mod-I kırılma

tokluğu testleri ASTM E399-12 standardına göre yapılmıştır. Numune tipi olarak Compact Tension (CT) numunesi seçilmiştir. Numunenin yükleme pim deliği ile sırtı arasındaki mesafe (W) 50 mm, numune kalınlığı (B) 25 mm olarak alınmış ve diğer boyutlar ASTM E399-12 standardında belirlenen oranlar kullanılarak elde edilmiştir. Kullanılan CT numunesine ait teknik resim Şekil 3.4.3'de verilmiştir.



Şekil 3.4.3. Kullanılan CT numunesinin boyutları

ASTM E399-12 standardında belirtilen bazı önemli kısıtlar aşağıda özetlenmiştir.

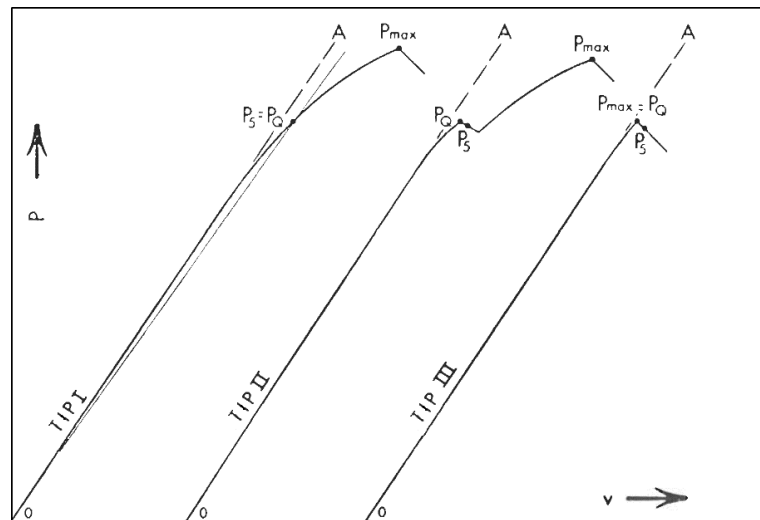
- Numune kalınlığı,  $B \geq 2.5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2$  eşitsizliğini sağlamalıdır. Buna göre Alüminyum 7075 alaşımı için minimum kalınlık değeri 10 mm'nin üzerindedir.
- Numune yükleme pim deliği ile sırt arasındaki mesafe,  $w \geq 5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2$  eşitsizliğini sağlamalıdır. Bu durumda alüminyum 7075 için W değeri 16.5 mm ve üzerinde olmalıdır.
- Numune yükleme pim deliği ile sırt arasındaki mesafe kalınlığın en az 2 en çok 4 katı olmalıdır.
- Ön çatlakla birlikte numune üzerindeki toplam çatlak uzunluğu  $a$ ,  $0.45W - 0.55W$  aralığında olmalıdır.
- Numune üzerinde yorulma ön çatlakları oluşturulurken uygulanacak yük, malzemenin kırılma tokluğu değerinin 0.8 katını geçmemelidir.
- Kırılma tokluğu testi için numuneye uygulanacak yükleme hızı  $0.55 - 2.75 \text{ MPa.m}^{0.5}/\text{s}$  aralığında olmalıdır.

- Kırılma sonrasında yorulma ön çatlak bitimi ile yükleme deliği arasındaki mesafe kalınlık boyunca eşit aralıklarla üç farklı noktadan ölçülmelidir. Üç ölçümün ortalaması ile herhangi bir ölçüm arasındaki fark %10 u aşmamalıdır. Bu şekilde yüklemenin simetri şartlarını büyük oranda sağladığı teyit edilmiş olur.

ASTM E399-12 standardına göre deneydeki kopma yükü ile gerilme şiddet faktörü arasında ilişki Denklem (3.4.1)'de verilen empirik ifade yardımıyla hesaplanmaktadır.

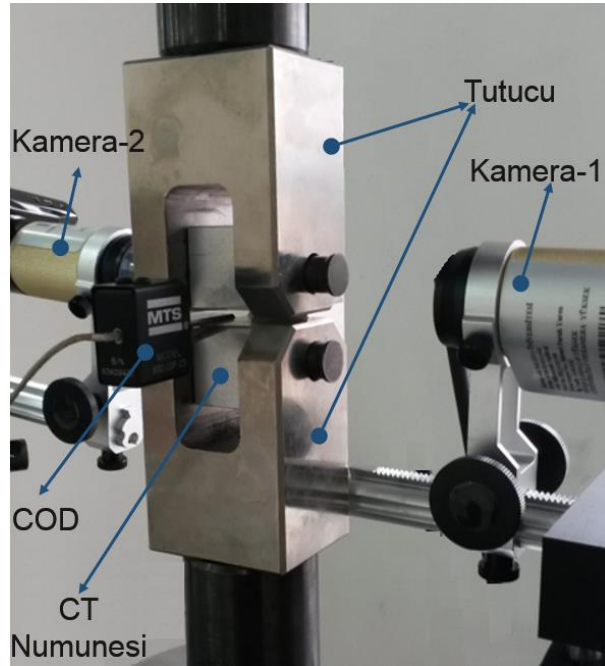
$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} \frac{\left(2 + \frac{a}{w}\right)}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}} \left[0.866 + 4.64 \left(\frac{a}{w}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{w}\right)^4\right] \quad (3.4.1)$$

Bu denklemde  $P_Q$ , deneyde elde edilen kopma kuvveti,  $K_Q$  kopma değerine karşılık gelen gerilme şiddet faktörü yani kırılma tokluğu değeridir. Ancak burada bahsedilen  $P_Q$  değeri her zaman deneyde elde edilen maksimum kopma kuvveti değildir. Deneylerden elde edilen kuvvet-uzama eğrileri Şekil 3.4.4'de gösterildiği gibi başlıca üç farklı tip olarak sınıflandırılmış ve her eğri tipi için ASTM E399-12 standardında  $P_Q$ 'nun nasıl tespit edileceği belirlenmiştir. Deneyde elde edilen eğrinin tip-I olması, yani kopma gerçekleşene kadar eğrinin lineerliğini sürdürmemesi halinde lineer bölgedeki doğruya %95 sekant açısı yapan bir eğrinin deneyden elde edilen eğriyi kestiği nokta  $P_Q$  olarak alınır. Tip-II, kopma gerçekleşmeden önce kısmi ayrılmanın olduğu durumdur. Bu durumda eğrinin sıçrama yaptığı ilk nokta  $P_Q$  olarak alınır. Tip-III eğrisi ise eğrinin kopma gerçekleşene kadar lineerliğini ve sürekliliğini koruduğu durumdur. Tip-III eğrisinde  $P_Q$ , deneyden elde edilen kopma yüküne eşittir.



Şekil 3.4.4: Kırılma deneylerinde elde edilen tipik kuvvet uzama eğrileri (ASTM E399-12)

Yukarıda açıklanan kısıtlar ve standartlar çerçevesinde CT numuneleri L-T çatlak yönüne göre (çatlak yüzeyleri haddeleme yönüne dik) üretilmiş ve deney şartları belirlenmiştir. Literatür bilgileri ve önceki çalışmalardan elde edilen tecrübeler doğrultusunda 7075-T6 malzemesi için kırılma tokluğunun  $29 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$  civarında olması beklenmektedir.  $0.5 K_{IC}$  değerini sağlayacak yük, Denklem (3.4.1) yardımıyla belirlenmiş ve ön çatlak oluşturmak için kullanılmıştır. Ön çatlak yorulma yüklemesi için uygulanan minimum kuvvetin maksimum kuvvete oranı (R) 0.1'dir. Deneylerde yorulma ön çatlak uzunluğunun 25 mm olması hedeflenmiştir. Çatlak uzunluğunun ölçülmesi için numune üzerine yarım milimetrelik kılavuz çizgileri olan ölçekli bir etiket yapıştırılmıştır. Deney sırasında çatlak ön ve arka yüzeyden yüksek yakınlaştırma oranına sahip iki kamera ile izlenmiştir. Milimetrik etikette toplam çatlak uzunluğunun 25 mm olduğu gözlemlendiğinde ön çatlak oluşturma aşaması sonlandırılmıştır. Kamera ile gözlemlenen bu çatlak uzunluğu kırılma tokluğu hesabında kullanılacak olan çatlak uzunluğu olmayıp, nihai uzunluğa yakın bir değerdir. Nihai yorulma ön çatlak boyutu, kırılma yüzeyleri üzerinden alınacak ölçümlerle belirlenmektedir. Şekil 3.4.5'de deney düzeneği detaylı olarak gösterilmektedir.

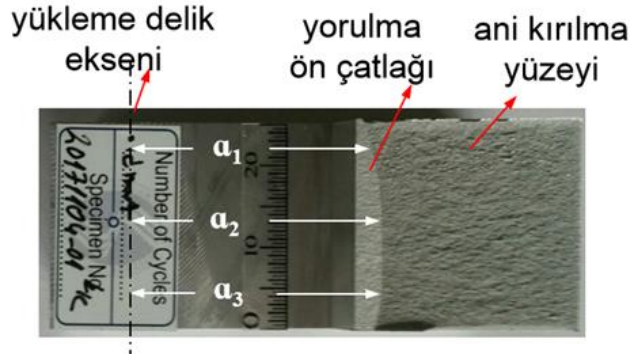


Şekil 3.4.5. Kırılma tokluğu deney düzeneği

Yorulma ön çatlak oluşturulduktan sonra  $0.6 \text{ kN/s}$  yükleme hızında aksel çekme kuvveti uygulanmış ve numuneler kırılmıştır. Deney sırasında kuvvet - şekil değiştirme eğrileri kaydedilmiştir. Daha sonra Şekil 3.4.6'da gösterildiği gibi kırılma yüzeyleri üzerinden görüntü alınmış ve piksel boyutundan yararlanarak Analyzing Digital Images – ADI16 programıyla  $a_1$ ,



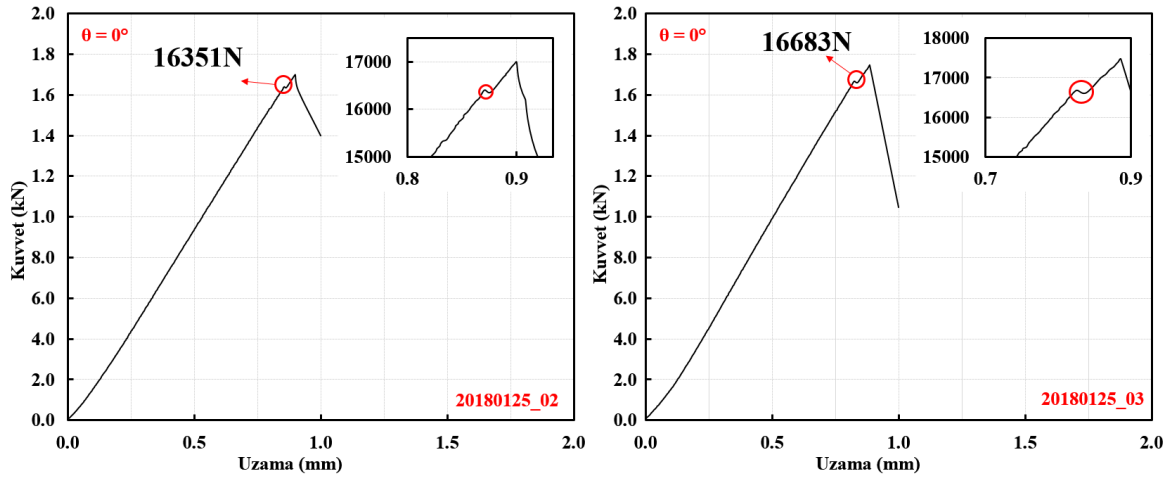
$a_2$  ve  $a_3$  uzunlukları için ölçümler yapılmış (ADI16 programı ticari olmayan kullanımlar için ücretsizdir) ve üç değerın ortalama değeri çatlak uzunluğu olarak değerlendirilmiştir.

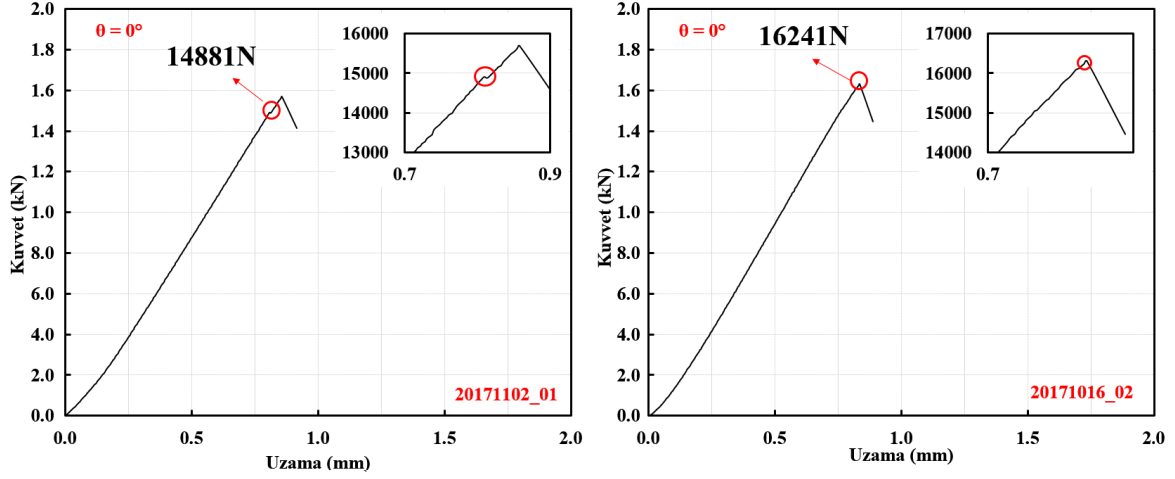


Şekil 3.4.6. Kırılma yüzeyinden yorulma ön çatlığının ölçümü

Kırılma tokluğu deneylerinde elde edilen grafiklerle her bir deney için kırılma yükü ( $P_Q$ ) belirlenmiştir. İlgili numunenin kırılma yüzeyinden ölçülen ortalama çatlak uzunluğu ile Denklem 3.4.1 kullanılarak kırılma tokluğu değeri hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu deneylerinde çizdirilen eğrilere örnek olması için Şekil 3.4.7.'de dört farklı grafik verilmiştir.

Aynı şartlarda gerçekleştirilen 29 farklı kırılma tokluğu deneyine ait veriler Tablo 3.4.1'de görülmektedir. Tablonun son sütunu deneyden elde edilen kırılma tokluğu  $K_{IC}$  değerini göstermektedir. Deneylerin ortalaması  $29.957 \text{ MPa.m}^{0.5}$ , deneylerdeki standart sapma 1.306, sonuçların varyansı 1.705 olarak hesaplanmıştır.



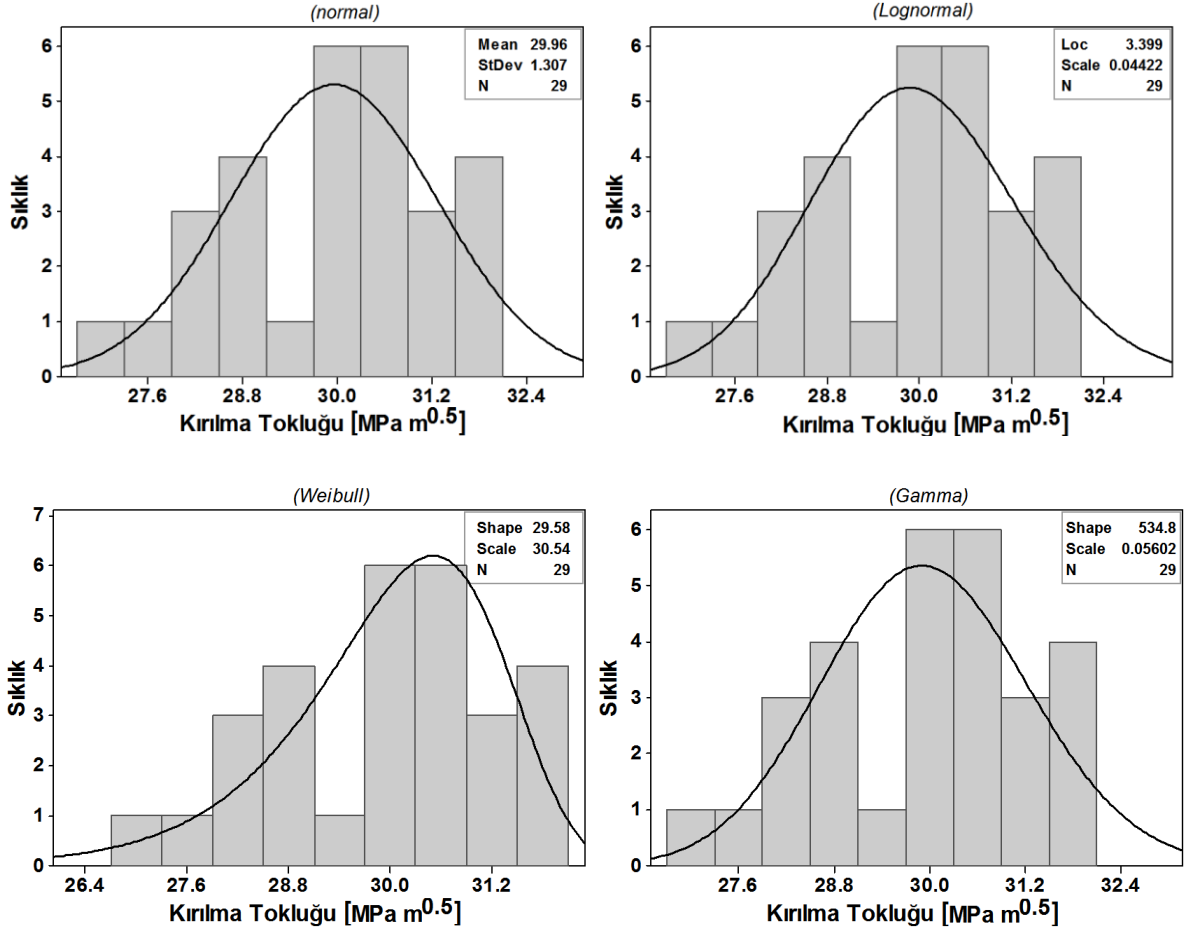


Şekil 3.4.7. Kırılma tokluğu testlerinden bazılarının grafiği ve kırılma kuvvetinin belirlenmesi

Tablo 3.4.1. Gerçekleştirilen tüm kırılma tokluğu deneylerine ait özet tablo

Numune Adı	W (mm)	Kalınlık (mm)	Yükleme Oranı R	Maksimum Ön Çatlak Yüğü (kN)	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>(avg)</sub> (mm)	P <sub>Q</sub> (kN)	K <sub>IC</sub> MPa.m <sup>0.5</sup>
20171011_01	50	25	0.1	7.2	26.080	26.580	26.700	26.453	15.99	30.290
20171011_02	50	25	0.1	7.2	26.540	26.700	26.140	26.460	14.34	27.181
20171012_01	50	25	0.1	7.2	26.720	27.490	27.550	27.253	14.45	28.892
20171016_01	50	25	0.1	7.2	26.170	25.970	25.670	25.937	16.52	30.277
20171016_02	50	25	0.1	7.2	26.710	26.460	26.290	26.487	16.24	30.842
20171027_01	50	25	0.1	5.0	26.590	26.860	26.480	26.643	15.45	29.650
20171102_01	50	25	0.1	6.0	26.550	27.100	26.950	26.867	14.88	28.980
20171104_01	50	25	0.1	5.6	25.960	26.620	26.600	26.393	14.88	28.080
20171123_01	50	25	0.1	5.6	27.700	27.430	26.630	27.253	13.81	27.606
20171127_02	50	25	0.1	6.0	27.300	26.770	26.370	26.813	15.77	30.594
20171207_02	50	25	0.1	6.0	26.030	26.410	26.820	26.420	16.14	30.519
20171212_01	50	25	0.1	6.0	25.970	26.300	26.790	26.353	14.83	27.920
20171212_02	50	25	0.1	5.8	27.610	27.110	26.570	27.097	15.26	30.186
20180110_01	50	25	0.1	6.2	26.630	26.570	26.060	26.420	15.20	28.745
20180117_01	50	25	0.1	6.2	27.060	26.900	26.340	26.767	16.05	31.055
20180124_01	50	25	0.1	6.2	26.740	26.450	26.740	26.643	16.49	31.636
20180124_02	50	25	0.1	6.2	26.410	26.350	26.660	26.473	16.61	31.521
20180124_04	50	25	0.1	6.2	25.910	26.180	26.350	26.147	16.85	31.291
20180125_02	50	25	0.1	6.4	25.670	26.050	26.610	26.110	16.35	30.299
20180125_03	50	25	0.1	6.4	26.270	25.800	25.870	25.980	16.68	30.657
20180125_04	50	25	0.1	6.4	25.580	25.550	26.080	25.737	17.08	30.894
20180212_01	50	25	0.1	7.0	26.500	26.440	26.630	26.523	16.71	31.810
20180212_02	50	25	0.1	7.0	26.600	27.320	26.870	26.930	15.52	30.349
20180213_01	50	25	0.1	7.0	26.530	27.250	27.320	27.033	14.55	28.652
20180213_02	50	25	0.1	7.0	26.950	27.270	26.770	26.997	15.32	30.090
20180213_03	50	25	0.1	7.0	25.670	25.840	26.250	25.920	16.90	30.935
20180214_01	50	25	0.1	7.0	26.600	27.040	26.930	26.857	14.51	28.244
20180214_02	50	25	0.1	7.0	26.080	25.700	26.100	25.960	16.38	30.063
20180502_01	50	25	0.1	7.0	26.110	26.040	26.670	26.273	16.85	31.550

Tablo 3.1.1'deki kırılma tokluğu değerleri dört farklı dağılım türüne göre Şekil 3.4.8'de histogram grafiği olarak çizdirilmiştir. Histogram grafikleri MINITAB istatistik yazılımı ile üretilmiştir. Görüldüğü üzere, kırılma tokluğu değerleri 30-31 MPa.m<sup>0.5</sup> civarında yoğunlaşmaktadır. Sıklığı düşük de olsa 27 MPa.m<sup>0.5</sup> ve 33 MPa.m<sup>0.5</sup> değerleri civarında da sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.4.8. Kırılma tokluğu değerleri dağılımları (histogram), a) Normal dağılım, b) Lognormal dağılım, c) Weibull dağılımı, d) Gamma dağılımı

Kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan numunelerin kırılma yüzeylerinin üst görünüşleri de Şekil 3.4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.4.9. Kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan numunelerin üstten görünüşleri

### 3.4.1.3 Sabit Genlikli Yük Altında Çatlak İlerleme Testleri

Çatlak ilerlemesine ait malzeme özelliklerinin belirlenmesi için sabit genlik altında yorulma çatlak ilerleme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde 7075-T651 alüminyum malzemeden L-T hadde yönünde ve Şekil 3.4.3’de verilen ölçülerde üretilen CT numuneleri kullanılmıştır. Testler ASTM E647-15 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

ASTM E647-15 standardında belirtilen bazı önemli kısıtlar aşağıda özetlenmiştir.

- Mod-I yüklemesi altında yorulma çatlak ilerlemesinin düzlemsel olması beklenmektedir, deney sırasında yorulma çatlağı düzlemle 10 dereceden fazla yönlenmemelidir.
- Yorulma ön çatlak uzunluğu kalınlığın 1/10 undan büyük olmalıdır.
- Yorulma ön çatlağı oluşturma aşamasında uygulanan gerilme şiddet faktörü değeri yorulma çatlak ilerlemesi testi başlangıcındaki gerilme şiddet faktörü değerinden küçük olmalıdır.
- Yorulma çatlağı ön ve arka yüzeyden ölçülmeli ve hesaplamalarda ön ve arka yüzeyden ölçülen çatlak uzunluğunun ortalaması alınmalıdır. İki ölçüm arasındaki fark kalınlığın  $\frac{1}{4}$  ünü geçmemelidir.
- Maksimum yük %2 hassasiyetle ölçülmelidir.

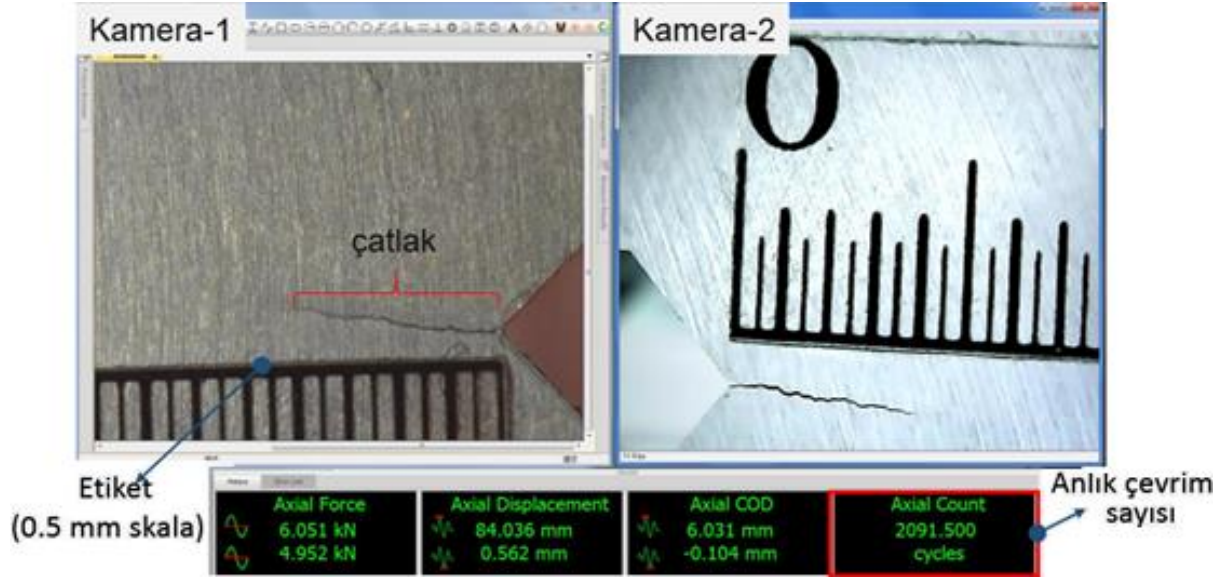
- $a/W$  değerinin 0.2'den küçük olmaması şartıyla Denklem 3.4.1, gerilme şiddet faktörü hesabı için kullanılabilir.

Sabit genlikli yorulma çatlak ilerleme testleri için gerçekleştirilen test sayıları Tablo 3.4.2.'de verilmiştir. Test matrisinden görüleceği üzere dört farklı gerilme oranı ( $R$ ) için testler planlanmıştır. Her gerilme oranı için proje önerisinde belirtilen 10 test tamamlanmıştır. Olasılık çalışmalarında daha fazla örneklem sağlanması açısından  $R = 0.1$  ve  $0.5$  için test sayısı artırılmıştır. Verilen bir  $\Delta K$  seviyesi için,  $R = 0.7$  ve  $0.8$  testlerinde çatlak ilerleme ömrü planlanan diğer gerilme oranlarına göre daha kısa olduğu için bu gerilme oranında test sayısı artırılmamıştır. Çatlak ilerleme testlerinde çatlak boyu ölçümleri hem numune yüzeylerinden yüksek yakınlaştırma özelliği olan kameralar ile hem de Çatlak Açılma Ölçümü Sensörü (COD) ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.4.2. Sabit genlikli yorulma çatlak ilerleme test matrisi

Test	Planlanan	Gerçekleşen	Numune Türü
Sabit genlikli yük altında çatlak ilerleme testi – $R = 0.1$	10	21	CT
Sabit genlikli yük altında çatlak ilerleme testi – $R = 0.5$	10	20	CT
Sabit genlikli yük altında çatlak ilerleme testi – $R = 0.7$	10	10	CT
Sabit genlikli yük altında çatlak ilerleme testi – $R = 0.8$	10	10	CT

Deneyler sırasında ön/arka yüzeylerden alınan görüntüler ve çevrim sayısı bilgisayar ekranından izlenmektedir. Laboratuvarımızda hazırlanan bir yazılım kullanılarak belirli aralıklarla ekran görüntüsü kaydedilmiştir. Alınan ekran görüntüleri üzerinden çevrim başına düşen ilerleme miktarı piksel boyutu ile ölçülmüş ve çatlak ilerleme eğrisi elde edilmiştir. Numune üzerindeki milimetrik ölçekli etiket ile her ölçümden önce uzunluk kalibrasyonu yapılmaktadır. Şekil 3.4.10'da test sırasında alınan örnek bir ekran görüntüsü verilmiştir.

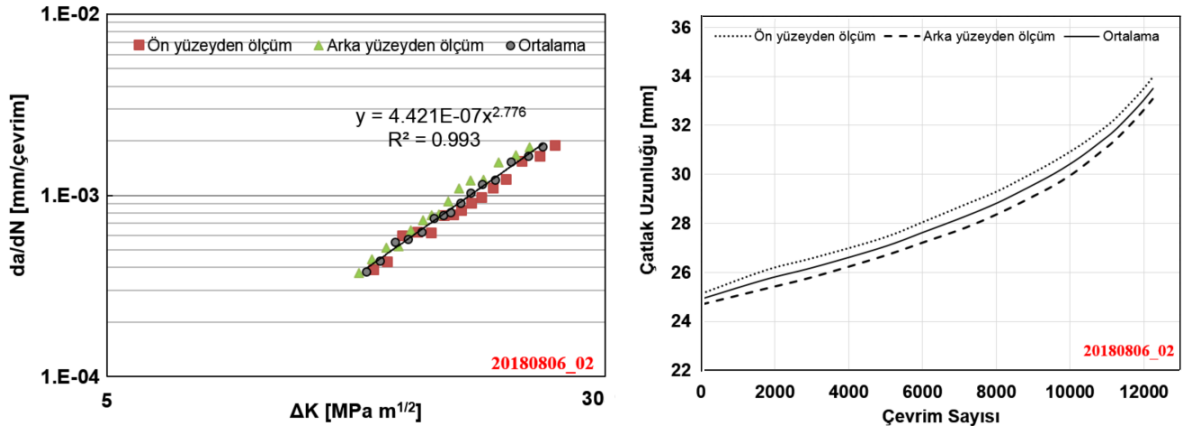


Şekil 3.4.10. Ön ve arka yüzeylerden alınan çatlak kamera görüntüleri ve çevrim sayısını gösteren ekran görüntüsü

#### *R = 0.1 Gerilme Oranında Yapılan Sabit Genlikli Çatlak İlerleme Testleri*

Bu gerilme oranı için yapılan 21 adet testten elde edilen verilerle  $da/dN - \Delta K$  grafikleri log-log eksenler kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerde eğrinin lineer olduğu bölge tespit edilerek ve bu bölgedeki veriler için Excel programı içerisinde bulunan Eğilim Çizgisi Belirleme işlemi yapılarak eğim çizgisinin denklemi vasıtası ile Denklem (3.4.2)'de verilen Paris Erdoğan katsayıları (C-n) belirlenmektedir. Örnek olarak, bu gerilme oranında çizdirilen grafiklerden biri Şekil 3.4.11'de verilmiştir. Diğer deneylere ait detaylar Tablo 3.4.3'ten görülebilir. Şekil 3.4.11'de ön ve arka yüzeyden yapılan  $da/dN - \Delta K$  ölçümleri, sırasıyla, üçgen ve kare simgelerle görülmektedir. Ortalama değerler ise daire şeklinde gösterilmiştir. Yine aynı grafikte eğim çizgisi ve eğim çizgisinin denklemi de görülmektedir. Eğim çizgisinin denklemi Paris-Erdoğan bağıntısındaki katsayıları vermektedir. Şekil 3.4.11'de çevrim sayısına karşılık çatlak uzunluğu da görülmektedir.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (3.4.2)$$



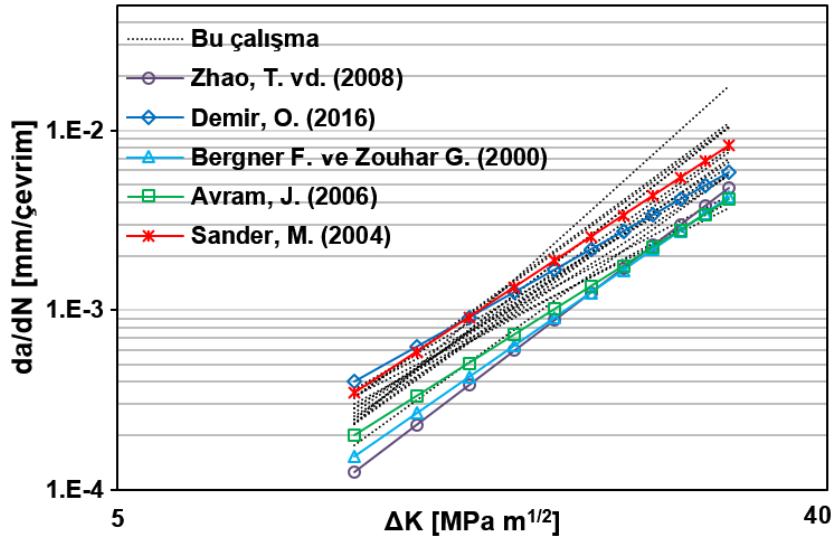
Şekil 3.4.11. Çatlak ilerleme grafikleri, R=0.1

Tablo 3.4.3'te R = 0.1 gerilme oranı için yapılan deneylerin detayları ve elde edilen Paris Erdoğan denklem katsayıları görülmektedir. Tablodaki ilk iki testten alınan veriler çok saçılımlı olduğu için eğim çizgisinin denklemi de uygun çıkmamıştır (ortalamadan oldukça uzak uyumsuz – outlier- veri). Bu veriler Tablo 3.4.3'te kırmızı ile yazılmış ve sonraki aşamalarda kullanılmamıştır.

Tablo 3.4.3. R = 0.1 gerilme oranında gerçekleştirilen sabit genlikli çatlak ilerleme test detayları

Numune Adı	Ön Çatlak Bilgileri					da/dN Bilgileri				
	Ön Çatlak Yük Oranı R	Maksimum Ön Çatlak Yükü (kN)	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>(avg)</sub> (mm)	da/dN Yük Oranı R	Maksimum da/dN Yükü (kN)	Çevrim Sayısı	C	n
20171017_01	0.1	7.0	27.050	27.040	26.445	0.1	9.0	4641	5.785E-21	13.822
20171019_01	0.1	5.0	26.420	26.120	25.670	0.1	6.5	15278	1.347E-14	2.368
20171020_01	0.1	5.0	27.400	26.500	26.350	0.1	6.5	12767	9.678E-08	3.406
20171023_01	0.1	5.6	26.230	25.400	25.215	0.1	6.5	10925	2.150E-07	3.177
20171108_01	0.1	5.6	27.050	25.720	25.785	0.1	6.2	15787	7.421E-07	2.569
20171122_01	0.1	5.6	25.520	25.530	24.925	0.1	6.2	21429	9.993E-07	2.432
20171128_01	0.1	5.6	25.480	25.950	25.115	0.1	6.2	12900	2.061E-07	3.202
20171208_01	0.1	5.8	25.750	25.740	25.745	0.1	6.2	21264	1.227E-07	3.161
20171213_01	0.1	5.8	25.750	25.740	25.745	0.1	6.2	13515	1.340E-06	2.349
20171215_01	0.1	6.0	26.190	25.340	25.765	0.1	6.2	13325	1.120E-06	2.511
20180108_01	0.1	6.0	25.380	25.500	25.440	0.1	6.5	15022	1.633E-07	3.159
20180109_01	0.1	6.0	25.830	25.850	25.840	0.1	6.5	12615	1.859E-06	2.279
20180424_01	0.1	6.2	25.850	25.050	25.450	0.1	7.0	14576	4.039E-07	2.805
20180425_01	0.1	6.4	24.870	25.600	25.235	0.1	7.0	14545	2.141E-06	2.192
20180425_02	0.1	6.6	25.790	25.630	25.710	0.1	7.0	9217	2.611E-08	3.948
20180719_01	0.1	6.4	25.960	25.770	25.865	0.1	7.0	13028	5.041E-07	2.728
20180720_01	0.1	6.4	25.770	26.090	25.930	0.1	7.0	12239	1.828E-07	3.103
20180724_01	0.1	6.4	25.770	25.760	25.765	0.1	7.0	11749	4.353E-07	2.815
20180724_02	0.1	6.4	26.050	25.550	25.800	0.1	7.0	11416	2.211E-07	3.082
20180730_01	0.1	6.4	26.460	25.025	25.743	0.1	7.0	11274	3.841E-07	2.869
20180806_02	0.1	6.4	25.750	25.310	25.530	0.1	7.0	13079	4.421E-07	2.776

Deneylemlerden elde edilen Paris-Erdoğan katsayılarının doğruluğunu kontrol etmek için literatürdeki değerler ile karşılaştırma yapılmıştır. 7075-T6 malzemesi ve  $R=0.1$  için literatürden 5 farklı  $C - n$  değerleri bulunmuştur.  $\Delta K=10 - 30 \text{ MPa.m}^{0.5}$  aralığında Denklem 3.4.2 ile çevrim başına çatlak ilerleme miktarı hesaplanmış ve ilgili çatlak ilerleme oranları grafik edilmiştir. Karşılaştırmalı grafik Şekil 3.4.12’de verilmiştir. Şekil 3.4.12’de, Tablo 3.4.3’te verilen  $C-n$  değerleri ile hesaplanan  $da/dN$  sonuçları siyah kesikli çizgiler ile, literatürden elde edilen katsayılarla yapılan hesaplamalar ise renkli sürekli çizgiler ile verilmiştir. Görüldüğü ğere deneylemlerden elde edilen  $C-n$  değerleri literatür ile ortalama değerler açısından uyum içerisinde ve literatür verilerinden elde edilen veri değişkenliklerini oldukça yakın Şekilde temsil etmektedir.

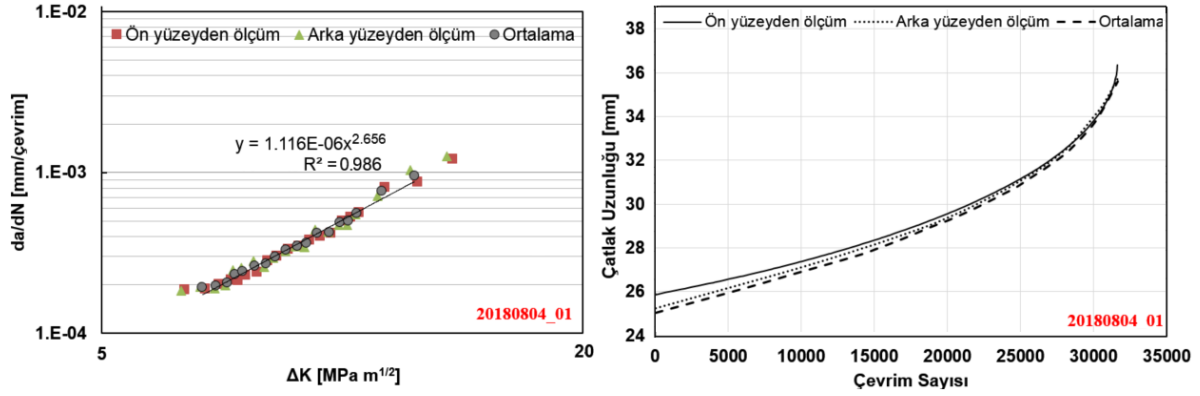


Şekil 3.4.12. Deneysel  $C-n$  katsayılarının literatür verileri ile karşılaştırması,  $R=0.1$

#### $R = 0.5$ Gerilme Oranında Yapılan Sabit Genlikli atlak İlerleme Testleri

$R = 0.5$  gerilme oranında sabit genlik altında 20 adet test gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde de  $R = 0.1$  testleri için uygulanan prosedürün aynısı kullanılmıştır. Beklendiği gibi, aynı maksimum yorulma yüklemesi ( $P_{maks} = 7\text{kN}$ ) altında,  $R=0.5$  durumunda değişken yükleme Şiddeti daha düşük olduğundan, çatlak ilerleme mr,  $R = 0.1$ ’e göre daha yüksektir. Bu gerilme durumundaki testlere örnek olarak Şekil 3.4.13’te bir deney için  $da/dN - \Delta K$  ve çatlak uzunluğu-çevrim sayısı grafikleri verilmiştir





Şekil 3.4.13. Çatlak İlerleme grafikleri, R=0.5

R = 0.5 gerilme oranı için yapılan tüm testlerin detayları ve testlerden elde edilen C– n değerleri Tablo 3.4.4'te görülmektedir.

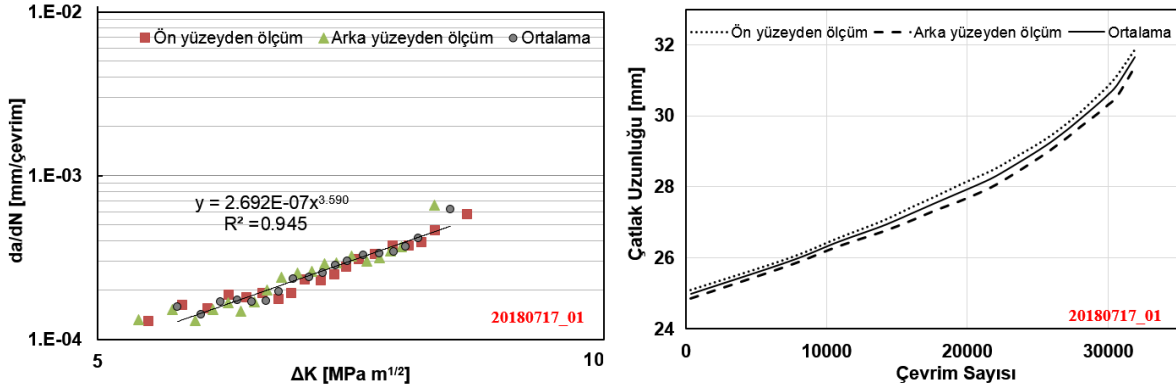
Tablo 3.4.4. R = 0.5 gerilme oranında gerçekleştirilen sabit genlikli çatlak ilerleme test detayları

Numune Adı	Ön Çatlak Bilgileri					da/dN Bilgileri				
	Ön Çatlak Yük Oranı R	Maksimum Ön Çatlak Yüğü (kN)	$a_1$ (mm)	$a_3$ (mm)	$a_{(avg)}$ (mm)	da/dN Yük Oranı R	Maksimum da/dN Yüğü (kN)	Çevrim Sayısı	C	n
20180430_01	0.1	6.4	25.600	25.320	25.460	0.5	7.0	28947	1.132E-06	2.690
20180503_01	0.1	6.4	25.120	26.290	25.705	0.5	7.0	29352	9.334E-07	2.783
20180511_01	0.1	6.4	25.680	24.981	25.331	0.5	7.0	29147	3.466E-06	2.164
20180507_01	0.1	6.4	25.213	26.330	25.772	0.5	7.0	26031	7.139E-07	2.942
20180514_01	0.1	6.4	24.941	25.560	25.251	0.5	7.0	37341	1.146E-06	2.654
20180515_01	0.1	6.4	25.600	26.040	25.820	0.5	7.0	32804	2.135E-07	3.437
20180515_02	0.1	6.4	25.550	25.139	25.345	0.5	7.0	33061	8.331E-07	2.775
20180516_01	0.1	6.4	25.570	25.119	25.345	0.5	7.0	32390	1.074E-06	2.728
20180517_01	0.1	6.4	24.800	25.960	25.380	0.5	7.0	29452	1.513E-06	2.600
20180521_01	0.1	6.4	25.790	24.967	25.379	0.5	7.0	29868	6.015E-07	3.050
20180731_01	0.1	6.4	26.020	24.858	25.439	0.5	7.0	30055	6.721E-07	2.946
20180731_02	0.1	6.4	26.280	26.950	26.615	0.5	7.0	24606	3.067E-07	3.306
20180801_01	0.1	6.4	25.890	25.810	25.850	0.5	7.0	27094	6.004E-07	3.026
20180804_01	0.1	6.4	25.840	25.640	25.740	0.5	7.0	31630	1.116E-06	2.656
20180804_02	0.1	6.4	25.370	25.720	25.545	0.5	7.0	23423	2.426E-07	3.532
20180805_01	0.1	6.4	25.690	25.930	25.810	0.5	7.0	33592	8.701E-07	2.764
20180805_02	0.1	6.4	26.010	25.283	25.647	0.5	7.0	33650	9.762E-07	2.732
20180806_01	0.1	6.4	25.910	26.230	26.070	0.5	7.0	30112	6.754E-07	2.918
20180806_03	0.1	6.4	25.028	27.280	26.154	0.5	7.0	26971	8.078E-07	2.834
20180806_04	0.1	6.4	25.089	27.050	26.070	0.5	7.0	28651	2.116E-06	2.383

### R = 0.7 Gerilme Oranında Yapılan Sabit Genlikli Çatlak İlerleme Testleri

R = 0.7 gerilme oranında sabit genlik altında 10 adet test gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde R = 0.1 testleri için uygulanan prosedürün aynısı kullanılmıştır. Beklendiği gibi, aynı maksimum

yorulma yüklemesi ( $P_{maks} = 7$  kN) altında,  $R = 0.7$  durumunda değişken yüklemeye şiddeti daha düşük olduğundan, çatlak ilerleme ömrü,  $R = 0.1$  ve  $0.5$ 'e göre daha yüksektir.  $R = 0.7$  gerilme oranında 7 kN yorulma yükü altında deneyler uzun sürdüğünden yorulma yükü değeri 10 kN'a çıkarılmıştır. Bu gerilme durumundaki testlere örnek olarak Şekil 3.4.14'de  $da/dN - \Delta K$  ve Çatlak uzunluğu-çevrim sayısı grafikleri bir deney için verilmiştir.



Şekil 3.4.14. Çatlak İlerleme grafikleri,  $R=0.7$

$R = 0.7$  gerilme oranı için yapılan tüm testlerin detayları ve testlerden elde edilen  $C - n$  değerleri Tablo 3.4.5'te görülmektedir.

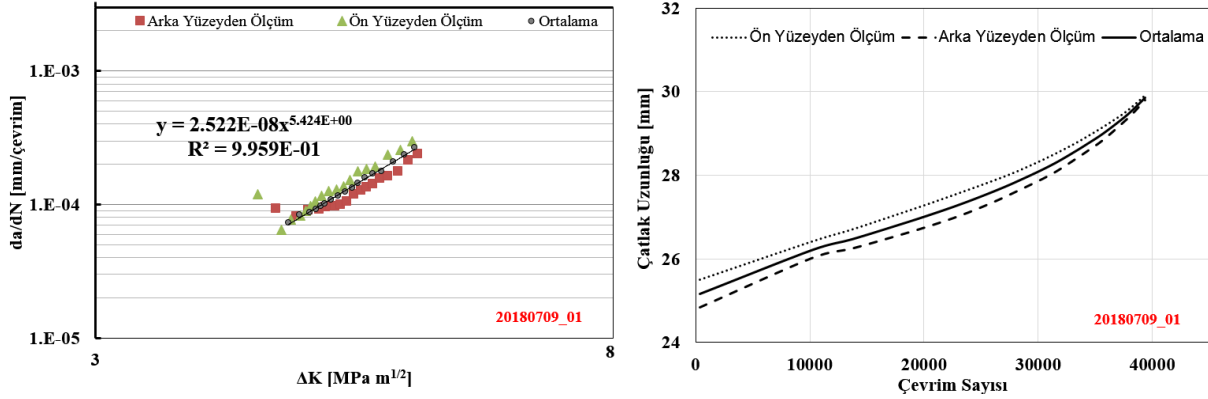
Tablo 3.4.5.  $R = 0.7$  gerilme oranında gerçekleştirilen sabit genlikli çatlak ilerleme test detayları

Numune Adı	Ön Çatlak Bilgileri					da/dN Bilgileri				
	Ön Çatlak Yük Oranı R	Maksimum Ön Çatlak Yükü (kN)	$a_1$ (mm)	$a_3$ (mm)	$a_{(avg)}$ (mm)	da/dN Yük Oranı R	Maksimum da/dN Yükü (kN)	Çevrim Sayısı	C	n
20180604_01	0.1	6.4	26.200	25.430	25.815	0.7	7.0	111151	3.329E-07	3.437
20180605_01	0.1	6.4	25.700	26.490	26.095	0.7	7.0	91726	9.635E-07	2.927
20180607_01	0.1	6.4	26.060	25.132	25.596	0.7	7.0	119324	5.146E-07	3.245
20180613_01	0.1	6.4	25.140	26.080	25.610	0.7	10.0	31985	1.595E-06	2.639
20180710_01	0.1	6.4	25.510	25.710	25.610	0.7	10.0	26274	9.292E-08	4.250
20180716_01	0.1	6.4	25.750	26.290	26.020	0.7	10.0	24130	1.140E-07	4.097
20180717_01	0.1	6.4	25.700	25.470	25.585	0.7	10.0	31901	2.692E-07	3.590
20180718_01	0.1	6.4	25.620	25.710	25.665	0.7	10.0	29900	7.891E-07	3.044
20180719_02	0.1	6.4	25.840	26.110	25.975	0.7	10.0	31273	1.719E-07	3.770
20180903_01	0.1	6.4	27.300	25.300	26.300	0.7	10.0	21983	3.312E-07	3.503

### R = 0.8 Gerilme Oranında Yapılan Sabit Genlikli Çatlak İlerleme Testleri

Sabit genlik altında yapılması planlanan son deney seti  $R = 0.8$  gerilme oranı içindir. Bu gerilme oranında yorulma yükünün alt ve üst noktası birbirine çok yakındır. Dolayısıyla yorulma çatlak ilerlemesinin yavaş olması beklenmektedir. Bu nedenle 10 kN yük değeri ile testlere başlanması uygun görülmüştür. Sonraki aşamalarda, daha makul ömür değerlerinde testi

bitirebilmek için yük değeri kademeli olarak 11.5 kN'a kadar çıkarılmıştır. Beklendiği gibi, aynı maksimum yorulma yüklemesi altında,  $R = 0.8$  durumunda değişken yükleme şiddeti daha düşük olduğundan, çatlak ilerleme ömrü,  $R = 0.7$ 'ye göre daha yüksektir. Bu gerilme durumundaki testlere örnek olarak Şekil 3.4.15'te  $da/dN - \Delta K$  ve Çatlak uzunluğu-çevrim sayısı grafikleri bir deney için verilmiştir



Şekil 3.4.15. Çatlak İlerleme grafikleri,  $R=0.8$

$R = 0.8$  gerilme oranı için yapılan tüm testlerin detayları ve testlerden elde edilen  $C - n$  değerleri Tablo 3.4.6'da görülmektedir.

Tablo 3.4.6.  $R = 0.8$  gerilme oranında gerçekleştirilen sabit genlikli çatlak ilerleme test detayları

Numune Adı	Ön Çatlak Bilgileri					da/dN Bilgileri				
	Ön Çatlak Yük Oranı R	Maksimum Ön Çatlak Yükü (kN)	$a_1$ (mm)	$a_3$ (mm)	$a_{(avg)}$ (mm)	da/dN Yük Oranı R	Maksimum da/dN Yükü (kN)	Çevrim Sayısı	C	n
20180619_01	0.1	6.4	24.837	26.360	25.599	0.8	10.0	68327	9.985E-07	3.174
20180620_01	0.1	6.4	24.750	27.310	26.030	0.8	12.0	24481	2.725E-09	6.873
20180622_01	0.1	6.4	25.184	26.490	25.837	0.8	11.0	51953	5.826E-07	3.526
20180626_01	0.1	7.0	25.000	27.310	26.155	0.8	11.5	31503	1.292E-09	7.446
20180628_01	0.1	6.4	26.540	25.480	26.010	0.8	11.5	28114	3.837E-07	3.847
20180629_01	0.1	7.0	27.690	25.184	26.437	0.8	11.5	33542	6.236E-08	4.882
20180702_01	0.1	6.4	25.402	26.590	25.996	0.8	11.5	41972	1.332E-07	4.326
20180704_01	0.1	6.4	25.157	25.940	25.549	0.8	11.5	32035	2.887E-08	5.589
20180709_01	0.1	6.4	26.100	25.430	25.765	0.8	11.5	39372	2.522E-08	5.424
20180709_02	0.1	6.4	26.400	25.137	25.769	0.8	11.5	40772	3.316E-08	5.313

### 3.4.1.4 Sabit Genlikli Yük Altında Gerçekleştirilen Test Sonuçlarındaki Saçılımın İncelenmesi

3.4.3 – 3.4.6 nolu tablolarda görüldüğü üzere, her bir testten farklı  $C-n$  değerleri elde edilmiştir. Doğal olarak  $C - n$  değerlerindeki bu dağılım Denklem (3.4.2) ile elde edilecek olan ömürde de saçılıma sebep olacaktır. Deneylerden elde edilen  $C-n$  değerleri ile çevrim başına düşen

çatlak ilerleme miktarı ( $da/dN$ ) hesaplanmıştır. Deney süresince gerilme şiddet faktörlerinin başlangıç, orta ve son değerleri alınarak çatlak ilerleme oranı  $da/dN$ 'deki saçılım belirlenmeye çalışılmıştır.

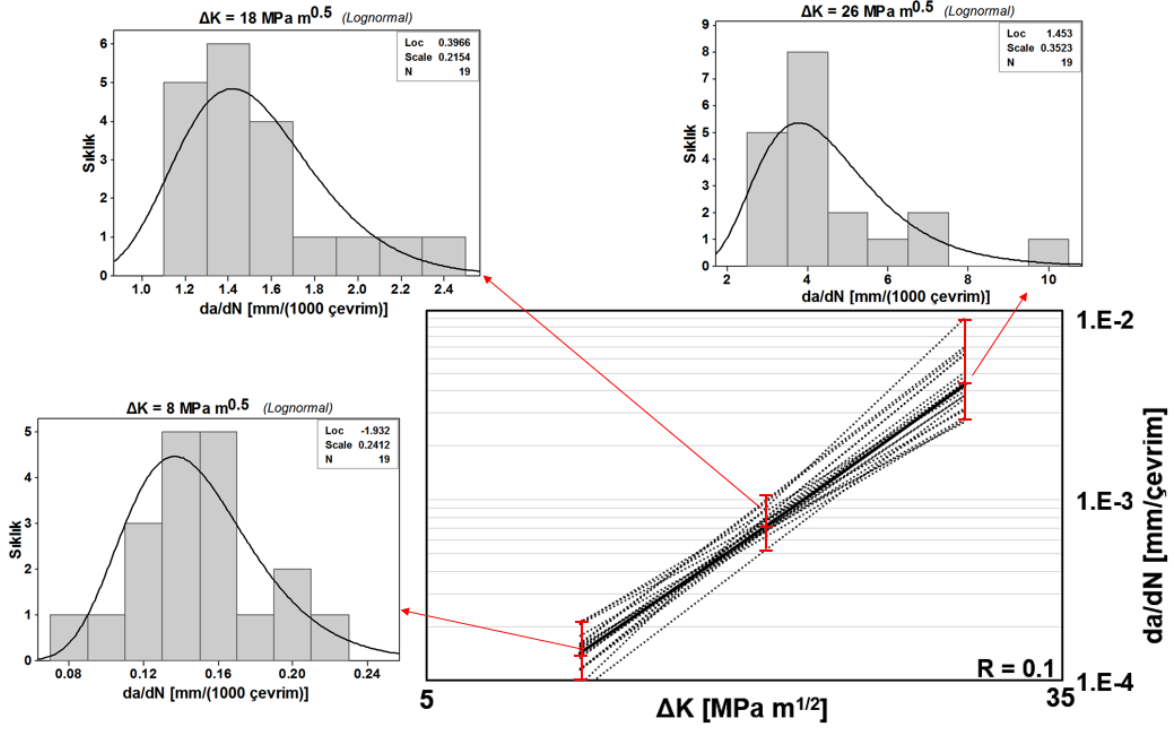
Dağılım grafiklerine bakıldığında birçok dağılım türü (weibull, normal, lognormal vb) deneylerde elde edilen saçılımı tanımlayabilmektedir. Bir dağılım türünün seçilmesi ve bundan sonraki aşamalarda onun üzerinden gidilmesi için elde edilen verileri en iyi ifade eden dağılım türü araştırılmıştır. MINITAB yazılımı ile 12 farklı dağılım türü incelenmiş ve sonuçlar Tablo 3.4.7'de verilmiştir. 6 dağılım türü anlamlı sonuç vermiştir. Tabloda "AD" kısaltması Anderson-Darling değerini ifade etmektedir. Bu değer düşük olması istenen bir durumdur. "P" değeri ise bir diğer önemli parametredir. "P" değerinin 0.05'ten düşük olması o dağılım modelinin doğru sonuç vermediği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla sonuçlarda yüksek "P" değeri arzu edilen bir durumdur. "LRT-P daha çok üç parametrelili dağılım modelleri için "P" değerine ek kriter olarak kullanılmaktadır.

Birden fazla dağılım türü arasında kıyaslama yapılırken Düşük "AD", yüksek "P" değeri elde edilmesi hedeflenmiştir. Tablo 3.4.7'deki tüm durumlar için en yüksek "P" değeri yeşil ile yazılmış, geçersiz "P" değerleri kırmızı ile yazılmıştır. Tüm durumlar incelenmiş ve açıklanan kriterlere göre Lognormal dağılımın elde edilen veriler için en uygun model olduğu sonucuna varılmıştır.

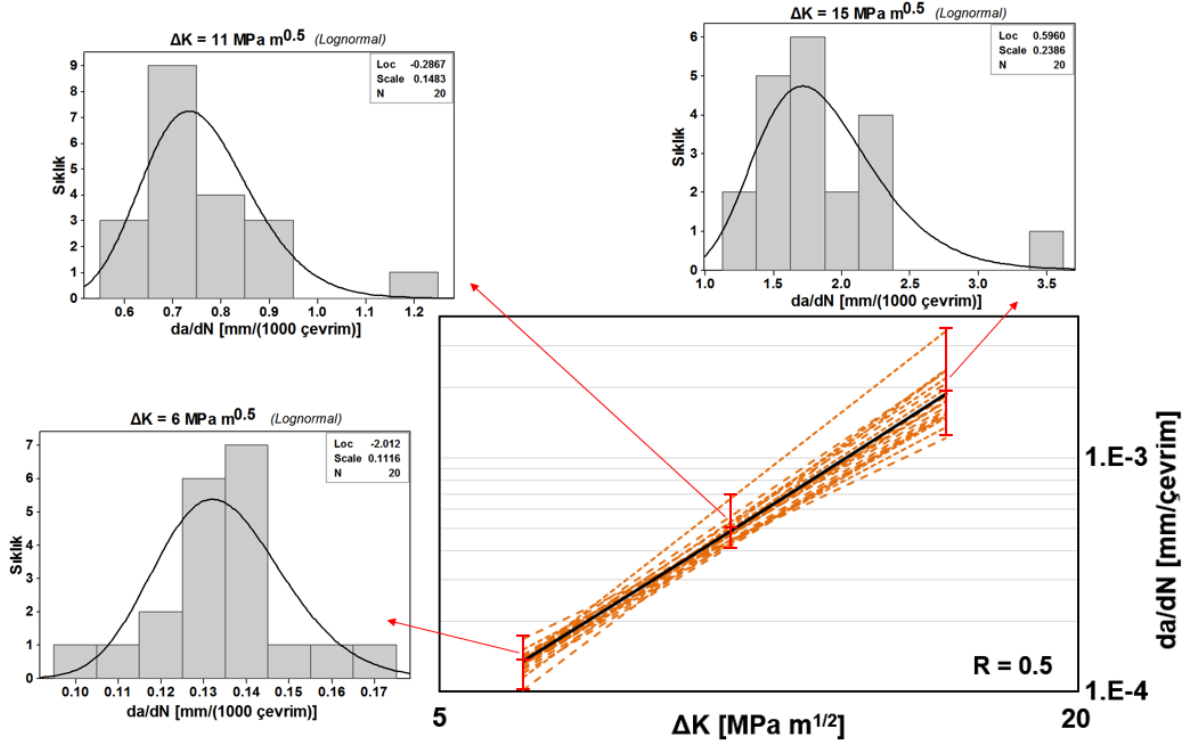
Tablo 3.4.7. Çatlak ilerleme oranları için en uygun dağılım modelinin seçilmesi

R = 0.1									
Dağılım Türü	ΔK Başlangıç Değeri			ΔK Orta Değeri			ΔK Son Değeri		
	AD	P	LRT P	AD	P	LRT P	AD	P	LRT P
Normal	0.359	0.413		0.881	0.019		1.041	0.007	
Lognormal	0.343	0.452		0.523	0.16		0.417	0.298	
Exponential	5.298	<0.003		5.565	<0.003		3.949	<0.003	
2-Parameter Exponent	1.84	<0.010	0	0.286	>0.250	0	0.227	>0.250	0
Weibull	0.448	>0.250		1.008	<0.010		0.918	0.017	
Gamma	0.33	>0.250		0.649	0.092		0.595	0.136	
R = 0.5									
Dağılım Türü	ΔK Başlangıç Değeri			ΔK Orta Değeri			ΔK Son Değeri		
	AD	P	LRT P	AD	P	LRT P	AD	P	LRT P
Normal	0.357	0.42		0.782	0.035		0.873	0.02	
Lognormal	0.365	0.403		0.477	0.211		0.414	0.305	
Exponential	7.433	<0.003		6.882	<0.003		5.616	<0.003	
2-Parameter Exponent	3.379	<0.010	0	0.462	>0.250	0	1.233	0.03	0
Weibull	0.619	0.096		1.307	<0.010		1.089	<0.010	
Gamma	0.337	>0.250		0.553	0.173		0.531	0.193	
R = 0.7									
Dağılım Türü	ΔK Başlangıç Değeri			ΔK Orta Değeri			ΔK Son Değeri		
	AD	P	LRT P	AD	P	LRT P	AD	P	LRT P
Normal	0.31	0.497		0.765	0.031		0.66	0.059	
Lognormal	0.327	0.45		0.616	0.078		0.431	0.243	
Exponential	3.846	<0.003		3.541	<0.003		2.903	<0.003	
2-Parameter Exponent	1.33	0.012	0	0.497	>0.250	0	0.597	0.185	0
Weibull	0.382	>0.250		0.904	0.017		0.719	0.049	
Gamma	0.343	>0.250		0.689	0.076		0.521	0.203	
R = 0.8									
Dağılım Türü	ΔK Başlangıç Değeri			ΔK Orta Değeri			ΔK Son Değeri		
	AD	P	LRT P	AD	P	LRT P	AD	P	LRT P
Normal	0.398	0.297		0.581	0.096		0.539	0.123	
Lognormal	0.33	0.443		0.433	0.24		0.337	0.426	
Exponential	2.53	<0.003		3.278	<0.003		2.19	0.004	
2-Parameter Exponent	0.501	>0.250	0	0.617	0.169	0	0.185	>0.250	0
Weibull	0.453	0.243		0.697	0.057		0.508	0.189	
Gamma	0.392	>0.250		0.509	0.214		0.431	>0.250	

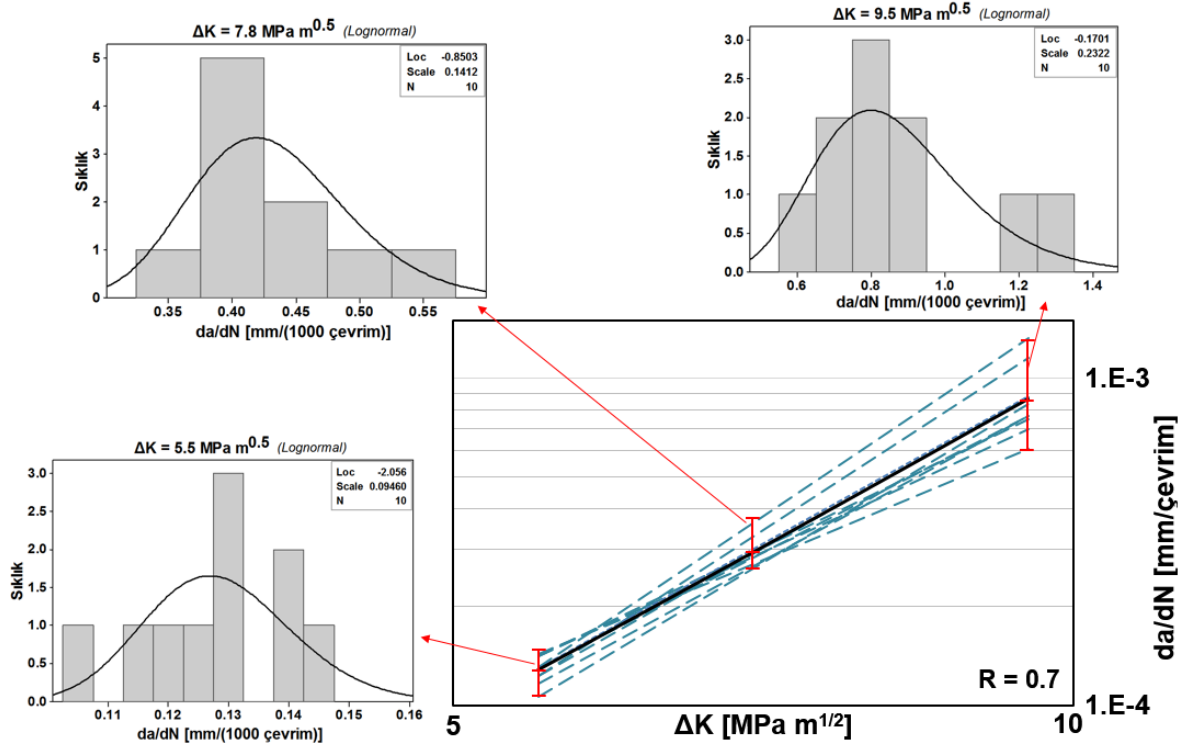
Lognormal dağılımda sırasıyla R = 0.1, 0.5, 0.7, 0.8 gerilme oranları için farklı C-n değerleri ile da/dN hesabı yapılmış ve aynı gerilme şiddet faktörü değeri için hesaplanan da/dN değerlerinin histogram grafikleri MINITAB kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3.4.16 – 19'da, da/dN eğrilerinin baş, orta ve son kısımları için 1000 çevrim başına elde edilen histogram grafikleri gerilme oranlarına göre verilmiştir.



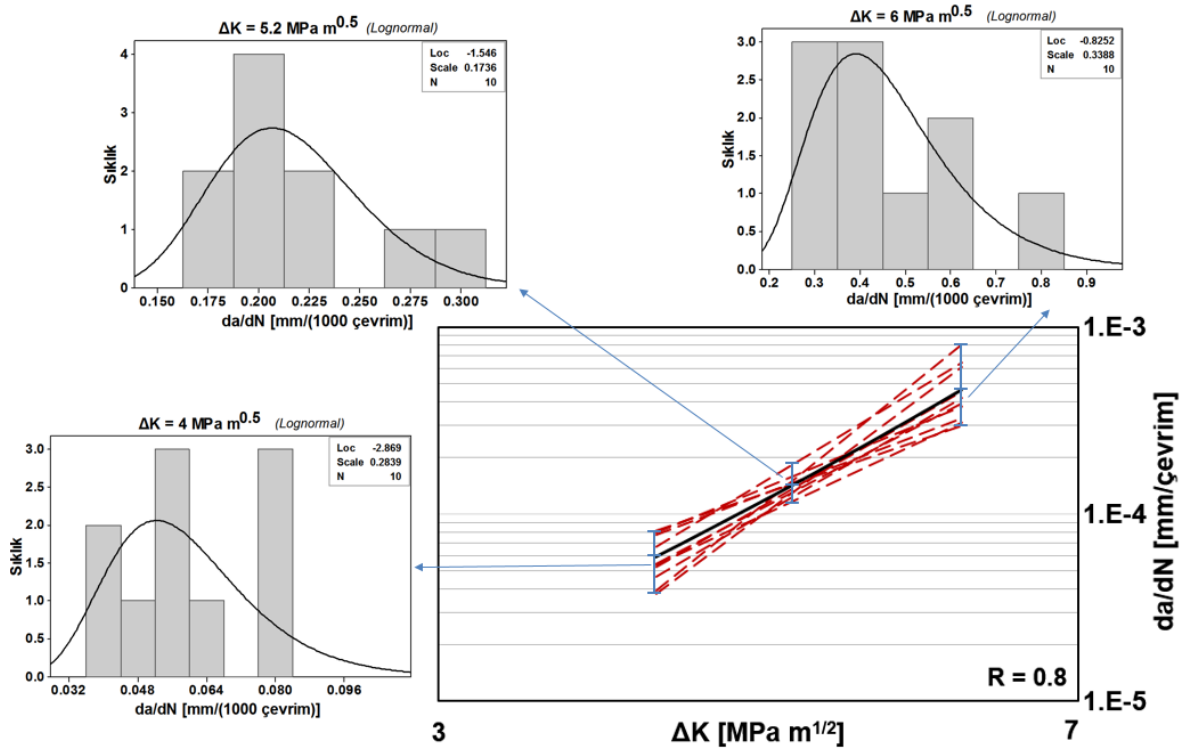
Şekil 3.4.16. Sabit genlikli yükleme durumunda da/dN dağılımı (R = 0.1)



Şekil 3.4.17. Sabit genlikli yükleme durumunda da/dN dağılımı (R = 0.5)



Şekil 3.4.18. Sabit genlikli yükleme durumunda  $da/dN$  dağılımı ( $R = 0.7$ )



Şekil 3.4.19. Sabit genlikli yükleme durumunda  $da/dN$  dağılımı ( $R = 0.8$ )

### 3.4.2 Değişken Genlikli Yük Altında Çatlak İlerleme Testleri

Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde, yükün spektrumdaki tek bir nokta için aniden değişmesi veya aynı testte bloklar halinde farklı yüklerin uygulanması ya da karışık genlikli yükleme yapılması ile oluşan farklı test kombinasyonları bu başlık altında incelenmiştir. Literatürde değişken genlikli yükleme altında çatlak ilerleme testleri için standart bir yöntem ve numune bulunmamaktadır. Dolayısıyla, bu deneylerde de Şekil 3.4.3'te verilen ölçülerde üretilen CT numuneleri kullanılmıştır. Tablo 3.4.8'de, bu başlık altında gerçekleştirilen değişken genlikli çatlak ilerleme testleri ve ilgili sayıları görülmektedir.

Tablo 3.4.8. Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi test matrisi

Test	Planlanan	Gerçekleşen	Numune Türü
Tekil Aşırı Yük Uygulanması (Single Overload)	5	9	CT
Tekil Aşırı Düşük Uygulanması (Single Underload)	5	5	CT
Blok Halinde Aşırı Yük Uygulanması	5	14	CT
Blok Halinde Aşırı Düşük Uygulanması	5	3	CT
Karışık Genlikli Yükleme Durumu (Yapay Spektrum)	5	11	CT
Karışık Genlikli Yükleme Durumu (Kısmî FALSTAFF)		13	CT

#### 3.4.2.1 Tekil Aşırı Yük Uygulanması Durumunda Yorulma Çatlak İlerlemesi

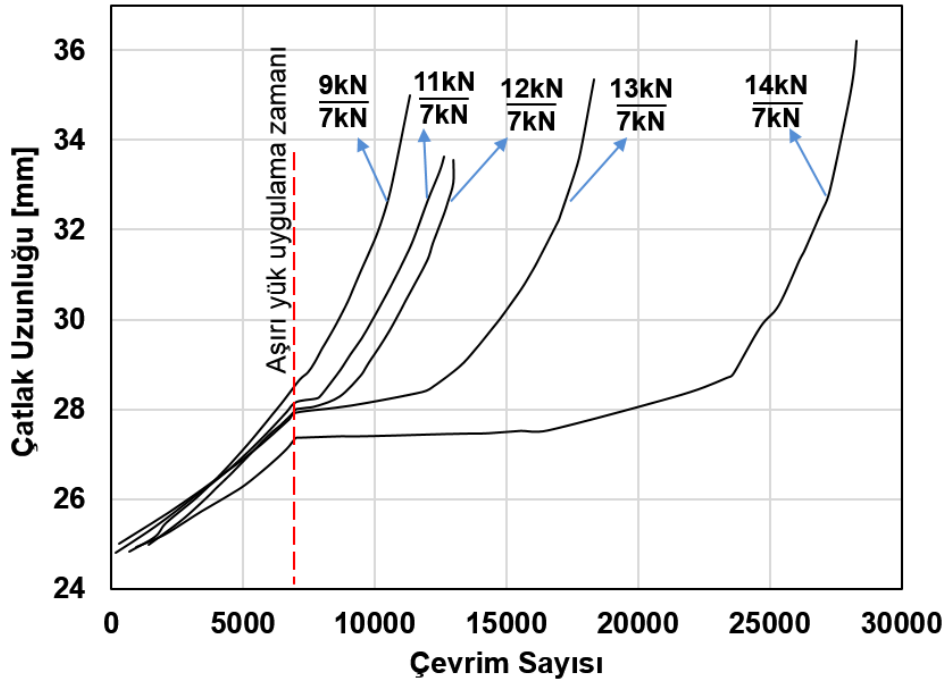
Yorulma ön çatlağı oluşturulmuş CT numuneleri kullanılarak  $R=0.1$  gerilme oranında, 7 kN yorulma yüklemesi ile çatlak ilerleme testleri başlatılmıştır. Deney devam ederken başlangıçtan 7000 çevrim sonra tekil aşırı yük uygulanmıştır. Deneylere ait bilgiler ve tekil aşırı yük miktarı Tablo 3.4.9'da verilmiştir. Deneyler sırasında çatlak uzunluğu ön ve arka yüzeyden kameralar ile görüntülenmiştir. Daha sonra kamera görüntüleri ve çevrim sayısı kullanılarak deney sonuçları grafik edilmiştir. Deneylerde tekil aşırı yük miktarı 9 kN ile başlanmış ancak deney sonuçlarında beklenen gecikme etkisi görülemeyince tekil aşırı yük kademeli olarak artırılmıştır.



Tablo 3.4.9. Tekil aşırı yük uygulanan deneyler

Tekil Aşırı Yük	Ön Çatlak Bilgileri					da/dN Bilgileri			
	Numune Adı	Ön Çatlak Yük Oranı R	Maksimum Ön Çatlak Yükü (kN)	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>(avg)</sub> (mm)	da/dN Yük Oranı R	Maksimum da/dN Yükü (kN)	F <sub>OL</sub> /F <sub>da/dN</sub>
20181031_01	0.1	6.4	25.120	24.740	24.930	0.1	7.0	2.00	28294
20181101_01	0.1	6.4	24.350	25.680	25.015	0.1	7.0	1.71	15649
20181005_01	0.1	6.4	25.660	24.310	24.985	0.1	7.0	1.71	13898
20181007_01	0.1	6.4	24.440	25.160	24.800	0.1	7.0	1.57	13239
20181012_01	0.1	6.4	25.250	24.324	24.787	0.1	7.0	1.29	11529
20181013_01	0.1	6.4	24.500	25.220	24.860	0.1	7.0	1.29	12654
20181013_02	0.1	6.4	24.780	24.830	24.805	0.1	7.0	1.86	18401
20181014_01	0.1	6.4	24.142	24.780	24.461	0.1	7.0	1.86	17902
20181014_02	0.1	6.4	24.265	24.990	24.628	0.1	7.0	1.57	16488

Farklı tekil aşırı yük (overload - OL) miktarının deneylerde kullanılması ile çatlak ilerleme ömründe oluşan etki ortaya konulmuştur. Şekil 3.4.20'de tekil aşırı yük miktarının artmasıyla çatlak ilerlemesinin daha fazla geciktiği deneysel olarak ortaya konulmuştur. Ayrıca çok düşük miktarda uygulanan aşırı yükün (9 kN/7 kN) çatlak ilerleme ömrünü kayda değer şekilde etkilemediği görülmektedir.

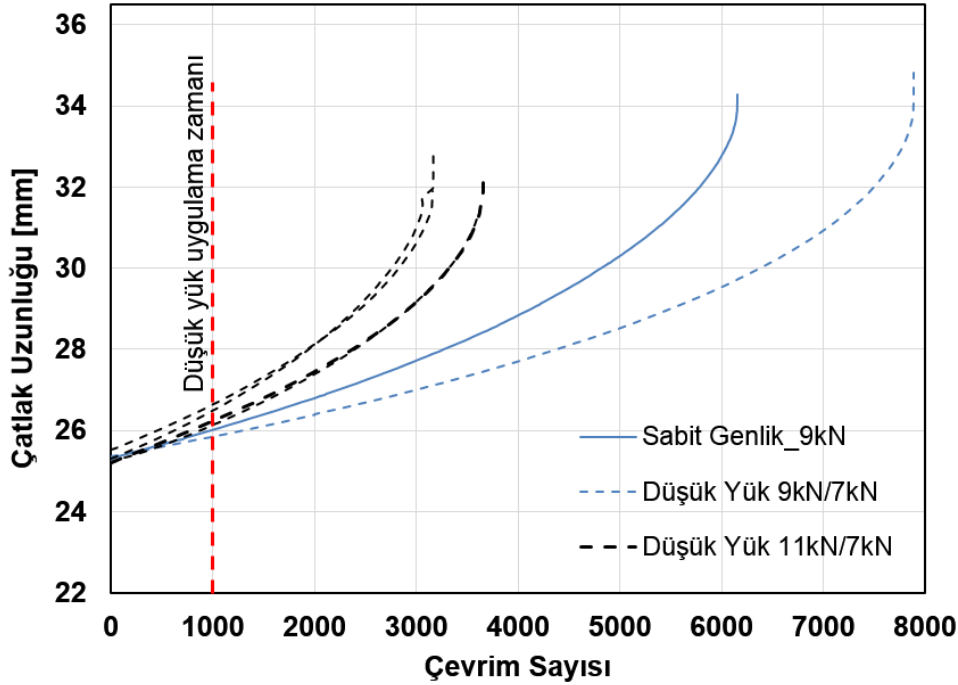


Şekil 3.4.20. Tekil aşırı yük oranının yorulma çatlak ilerleme ömrüne etkisi

### 3.4.2.2 Tekil Düşük Yük Uygulanması Durumunda Yorulma Çatlak İlerlemesi

Literatür taramaları ve deneysel tecrübelerimiz tekil düşük yük uygulanması (underload) etkisinin çatlak ilerleme ömrüne etkisi olmayacağı yönündedir. Burada bahsedilen düşük yük; numunenin çekme etkisi altında olduğu ve çatlak yüzeylerinin birbirine baskı oluşturmadığı durumdur. Yorulma yükünün negatife düşmesi (compression) etkisi bu projede araştırılmamıştır.

Çatlak ucu akma bölgesi yaklaşımına göre düşük yük etkisi altında çatlak ucunda oluşacak plastik bölge mevcut plastik bölgeden daha küçük olacaktır. Buna dayanarak çatlak ilerleme davranışında yeni bir etki oluşturmayacağı düşünülmektedir. Bu durumu deneysel olarak incelemek amacıyla proje önergisinde 5 adet test olarak planlanmıştır.



Şekil 3.4.21. Tekil düşük yükleme durumunun çatlak ilerleme ömrüne etkisinin araştırılması

Şekil 3.4.21'de mavi renkli sürekli eğri 9 kN sabit genlikli yorulma yükündeki bir deneye aittir. Farklı bir numune ile 9 kN yorulma yükünde devam eden deneyde 1000 çevrim sonunda 7 kN düşük yük uygulanmış ve sonrasında yine 9 kN ile deneye devam edilmiştir. Düşük yük uygulanan testler kesikli çizgi ile gösterilmektedir. Mavi eğriler arasındaki fark düşük yükün ömre etkisi olduğu şeklinde yorumlamaya açıktır ancak sonucun malzeme özelliği, deney şartları vb. etkilerden kaynaklanmadığını netleştirmek için tekrarlı testlere ihtiyaç duyulmuştur. Bunun üzerine 11 kN'da devam eden bir deneye 1000 çevrim sonunda 7 kN düşük yük uygulanmış ve sonrasında deney 11 kN yük altında tamamlanmıştır. Aynı deney dört kere tekrarlanmış ve sonuçlardaki saçılımın düşük yük etkisinden değil, deney ve malzeme

belirsizliklerinden oluşabileceği kanaatine varılmıştır. Tüm deneylerde, tekil düşük yük uygulanmasının hemen ardından çatlak ilerleme eğrilerinde herhangi bir eğim/ilerleme hızı değişimi olmadığı açıkça görülmektedir. Bu da, tekil düşük yük uygulanmasının, daha sonraki aşamalarda çatlak ilerlemesine herhangi bir geciktirme veya hızlandırma etkisinin olmadığını göstermiştir. Bu durum gelecek bölümlerde açıklanacak olan karışık genlikli yorulma yükü altında çatlak ilerleme modellerinin uygulanmasında pozitif  $\Delta K$  değerlerinin kullanılması yaklaşımını da desteklemektedir.

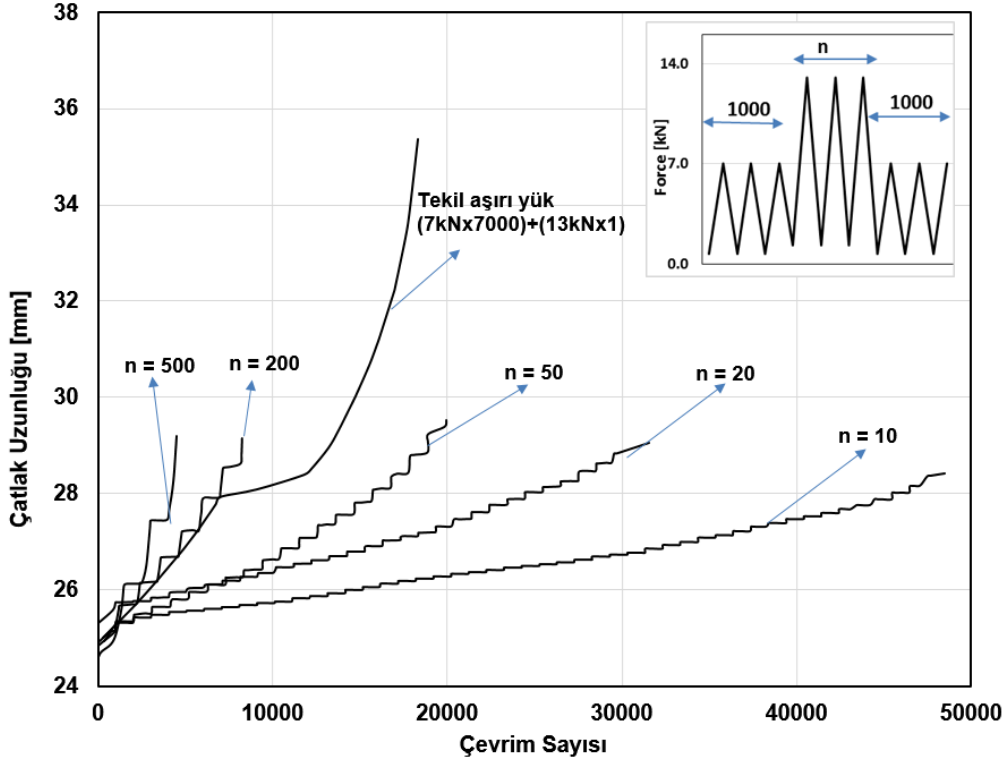
### 3.4.2.3 Bloklar Halinde Aşırı Yük Uygulanması Durumunda Yorulma Çatlak İlerlemesi

Tekil aşırı ve düşük yük deneylerinin ardından blok halinde aşırı yük uygulanan deneyler gerçekleştirilmiştir. Ön çatlak oluşturulmuş numuneler üzerine farklı çevrim sayılarında ve farklı yük miktarlarında aşırı yükler uygulanan deneylere ait özet bilgiler Tablo 3.4.10'da verilmiştir. Tabloda görülen ilk 4 deney, aşırı yük sıklığının ve şiddetinin belirlenmesi için yapılmış ön deneyler olarak düşünülebilir. Sonrasında aşırı yük şiddeti sabit tutulmuş ve blok aşırı yük çevrim sayısının çatlak ilerleme ömrüne etkisi incelenmiştir.

Tablo 3.4.10. Blok halinde aşırı yük uygulanan deneyler

Blok Aşırı Yük	Ön Çatlak Bilgileri			da/dN Bilgileri				
	Ön Çatlak Yük Oranı R	Maksimum Ön Çatlak Yükü (kN)	$a_{(avg)}$ (mm)	da/dN Yük Oranı R	Maksimum da/dN Yükü (kN)	$F_{BOL}/F_{da/dN}$	Çevrim Sayısı	Blok Yükleme Karakteristiği
20181206_01	0.1	6.4	24.774	0.1	7.0	1.57	28294	2000x7kN + 2000x11kN + ...
20181212_01	0.1	6.4	24.523	0.1	7.0	1.43	15649	1000x7kN + 1000x10kN + ...
20181219_02	0.1	6.4	24.880	0.1	7.0	2.00	13898	100x7kN + 100x14kN + ...
20181219_03	0.1	6.4	24.765	0.1	7.0	2.00	13239	200x7kN + 50x14kN + ...
20181225_01	0.1	6.4	24.976	0.1	7.0	1.86	11529	1000x7kN + 50x13kN + ...
20181225_02	0.1	6.4	25.065	0.1	7.0	1.86	12654	1000x7kN + 100x13kN + ...
20181226_01	0.1	6.4	24.945	0.1	7.0	1.86	18401	1000x7kN + 50x13kN + ...
20181227_01	0.1	6.4	24.829	0.1	7.0	1.86	17902	1000x7kN + 200x13kN + ...
20181227_02	0.1	6.4	24.612	0.1	7.0	1.86	16488	1000x7kN + 500x13kN + ...
20181228_01	0.1	6.4	25.320	0.1	7.0	1.86	18401	1000x7kN + 20x13kN + ...
20190103_01	0.1	6.4	24.925	0.1	7.0	1.86	17902	1000x7kN + 10x13kN + ...

Şekil 3.4.22'de aşırı yük blok genişliğinin (çevrim sayısının) yorulma çatlak ilerlemesine etkisi deneysel olarak ortaya konmuştur. Şekil 3.4.22'de verilen tüm deneyler, 1000'er çevrimlik 7 kN sabit yorulma yükü altında ilerlerken "n" çevrim sayısı uzunluğunda bloklar halinde 13 kN aşırı yük uygulanmıştır. Deneyler sırasında kamera ile iki yüzeyden görüntü alınmış ve bu görüntüler yardımıyla grafikler oluşturulmuştur.



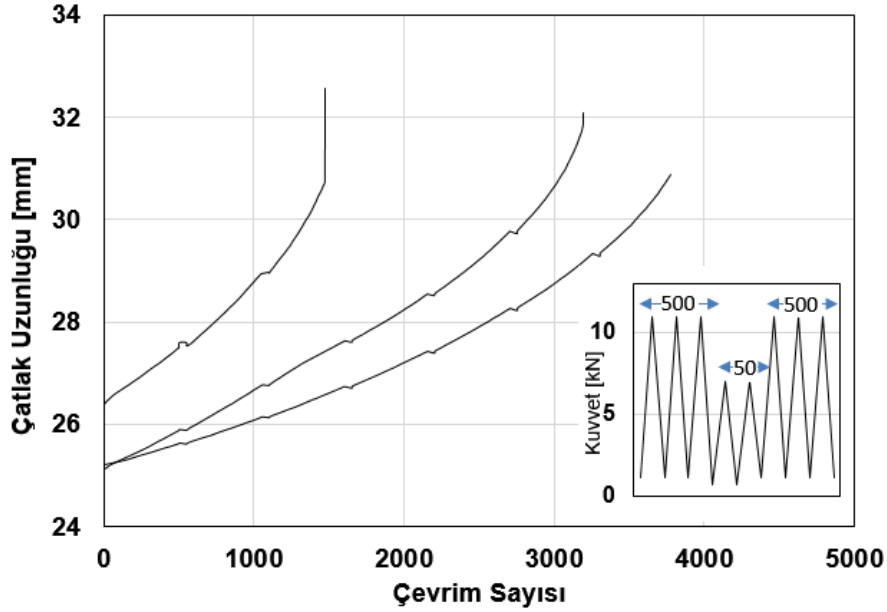
Şekil 3.4.22. Aşırı yüklemde blok genişliğinin yorulma çatlak ilerleme ömrüne etkisi

Şekil 3.4.22'de görüldüğü gibi, aşırı yük blok genişliği çatlak ilerleme ömründe önemli bir etkiye sahiptir. Aşırı yük blok genişliği (çevrim sayısı) çok uzun tutulduğunda (n=500 ve 200) aşırı yük nedeniyle oluşan plastik bölgede çatlak ilerlemeye devam etmektedir. Ancak aşırı blok yük uzunluğu (çevrim sayısı) azaltıldığında, çatlak ucunda nominal sabit yorulma yükü altında ilerleyen çatlak, aşırı yüklem nedeniyle genişlemiş plastik bölgeyi geçene kadar yavaş ilerleyeceğinden dolayı, toplam çevrim sayısında önemli bir artış gözlenmektedir. Bu artış, grafikten görüleceği üzere, azalan aşırı yük blok genişliği (n) ile daha da artmaktadır. Bunun nedeni ise, çevrim sayısı düşük olmakla beraber daha sıklıkla aşırı yüklerin uygulanması ve her defasında, kendisi üzerinden çatlak ucunun yavaşlayarak geçeceği genişlemiş yeni plastik bölgelerin oluşturulmasıdır.

#### 3.4.2.4 Bloklar Halinde Düşük Yük Uygulanması Durumunda Yorulma Çatlak İlerlemesi

Tekil düşük yük uygulanması durumunda çatlak ömründe önemli bir değişiklik görülmemiştir. Yapılan ek deneylerle bloklar halinde daha düşük yük uygulanmasının da ilave kayda değer bir etkisi olmadığı, 11 kN ve 7 kN büyüklüklerinde kuvvetlerin uygulandığı, Şekil 3.4.23'te sonuçları verilen deneylerden görülebilmektedir. Bir başka ifade ile bu tür yüklem durumundaki çatlak ilerleme davranışı, Kısım 3.4.2.3'de açıklandığı gibi bloklar halinde daha yüksek/aşırı yüklem durumlarına benzerlik göstermektedir (yüksek ve düşük blok yüklerinin

başlangıçtaki sıralamalarının değiştiği düşünülebilir). Dolayısıyla, ilave testlere ihtiyaç duyulmamıştır.



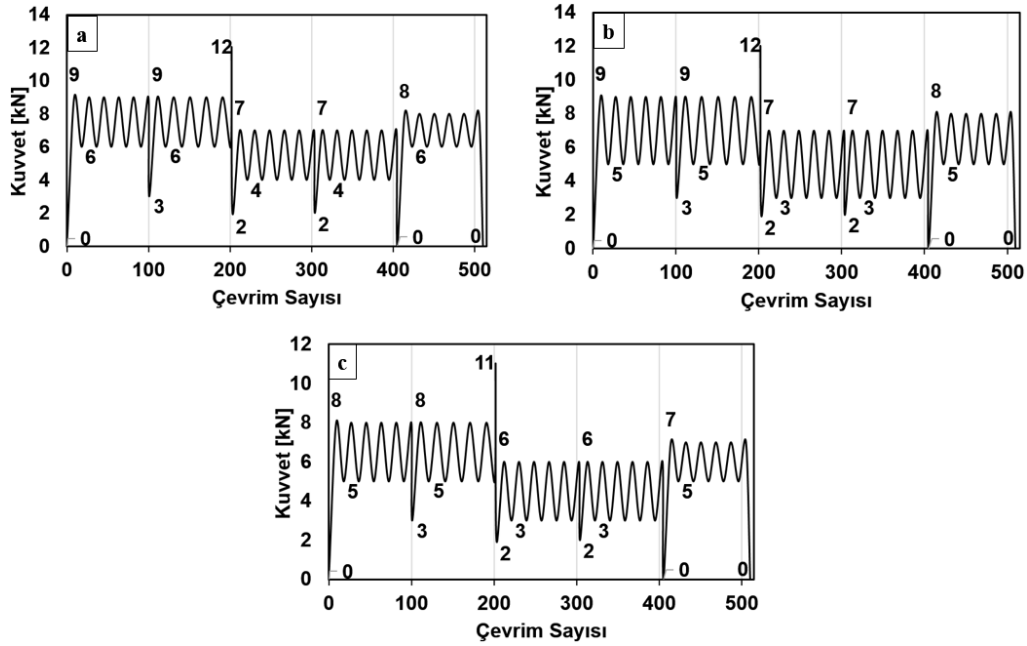
Şekil 3.4.23. Blok halinde düşük yükleme durumunun çatlak ilerleme ömrüne etkisi

### 3.4.2.5 Karışık Genlikli Spektrum Yükleme Altında Yorulma Çatlak İlerlemesi

CT numuneleri ile gerçekleştirilen karışık genlikli yorulma çatlak ilerlemesi deneylerinde numune kopana kadar birbiri ardına tekrar eden iki farklı yük kullanılmıştır. Bunlardan birincisi tarafımızdan hazırlanan ve yük profilleri arasındaki ilişki çok zor olmayan bir spektrumdur. Bu spektrum bundan sonra Spektrum-1 (SP1) olarak adlandırılacaktır. Diğeri ise yük profilleri arasındaki ilişkinin oldukça karmaşık olduğu ve kurum ziyaretinde TUSAŞ (TAI) tarafından tarafımıza önerilen ve iletilen, literatürde de yaygın şekilde kullanılmış olan FALSTAFF spektrumundan elde edilmiş kısmi bir spektrumdur. FALSTAFF'dan elde edilen kısmi spektrum ise Spektrum-2 (SP2) olarak adlandırılmıştır. Deney sayılarına ait detaylar daha önce Tablo 3.4.8'de verilmiştir.

Karışık genlikli yorulma çatlak ilerlemesindeki zorlukları biraz daha basit bir spektrum ile incelemek amacı ile SP1 spektrumu oluşturulmuştur. İlk olarak düşük frekansta (2-3 Hz) ve en fazla 3-4 saat içerisinde tamamlanabilecek deneyler için optimum yük değerlerinin SP1 üzerinden belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, karışık genlikli yüklemeye kullanılacak profillerin nihai yük değerlerinin belirlenmesi için deneyler yapılmış ve Şekil 3.4.24.a'da görülen yükleme profili üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Şekil 3.4.24.a'daki

spektrumun kronolojik değişimi sırasıyla a-b-c olarak verilmiştir. Şekil 3.4.24.c'de verilen profil, SP1 yükleme spektrumunun son halidir.

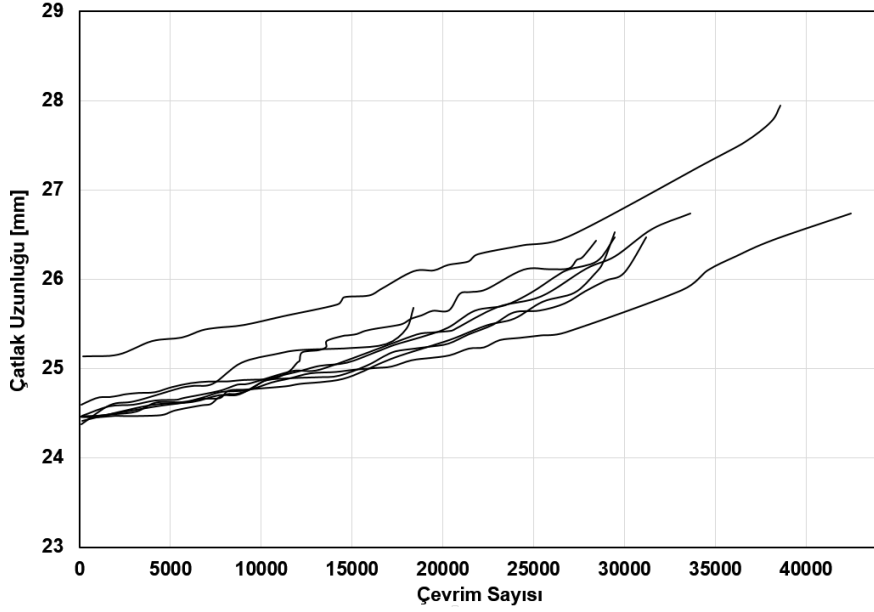


Şekil 3.4.24. Karışık genlikli spektrum 1 (SP1) yük spektrumu

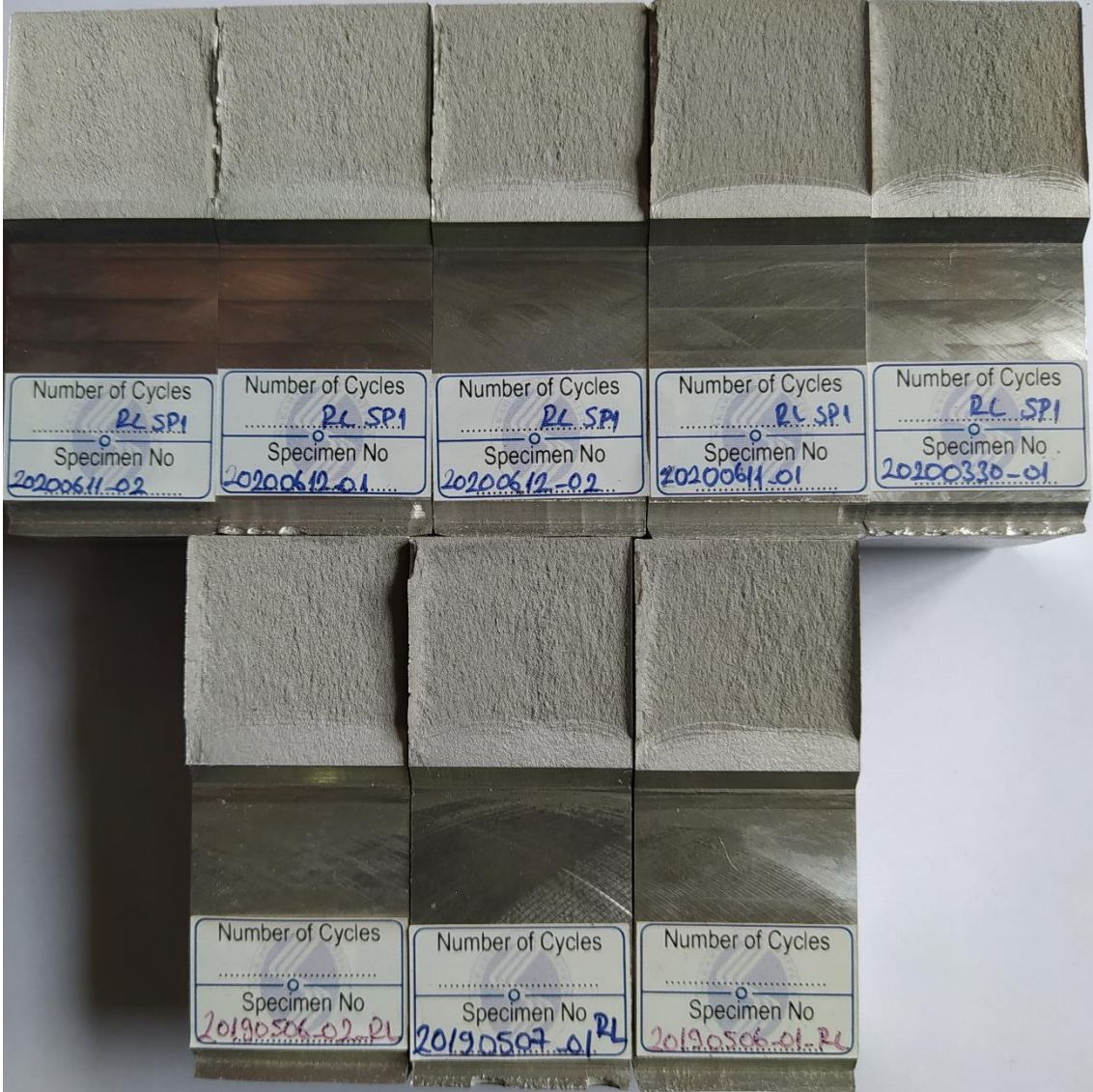
Tablo 3.4.11. Değişken genlikli (SP1) yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları

Spektrum -1		Ön Çatlak Bilgileri					da/dN Bilgileri	
Numune Adı	Numune Tipi	Ön Çatlak Yük Oranı	Maks. Ön Çatlak Yüğü	$a_1$ (mm)	$a_3$ (mm)	$a_{(avg)}$ (mm)	Spektrum	Çevrim Sayısı
20190502_01	CT	0.1	6.4	24.720	24.840	24.780	Spektrum 1/a+b	38616
20190503_01	CT	0.1	6.4	24.220	24.300	24.260	Spektrum 1/b	1195
20190503_02	CT	0.1	6.4	24.870	24.335	24.603	Spektrum 1/b	6223
20190506_01	CT	0.1	6.4	25.010	24.170	24.590	Spektrum 1/c	31221
20190506_02	CT	0.1	6.4	24.087	24.830	24.459	Spektrum 1/c	42706
20190507_01	CT	0.1	6.4	24.566	24.356	24.461	Spektrum 1/c	28459
20200330_01	CT	0.1	6.4	25.140	24.356	24.748	Spektrum 1/c	38601
20200611_01	CT	0.1	6.4	24.034	24.720	24.377	Spektrum 1/c	18381
20200611_02	CT	0.1	6.4	24.207	24.720	24.464	Spektrum 1/c	29468
20200612_01	CT	0.1	6.4	24.228	24.603	24.416	Spektrum 1/c	29485
20200612_02	CT	0.1	6.4	24.360	24.580	24.470	Spektrum 1/c	33654

Şekil 3.4.24-a, b ve c yükleme spektrumu durumları için elde edilen ömür değerleri Tablo 3.4.11'de görülmektedir. Tablo 3.4.11'deki ömür değerleri incelendiğinde Şekil 3.4.24.a spektrumu ile gerçekleştirilen deneyin oldukça uzun, Şekil 3.4.24.b spektrumu ile gerçekleştirilen deneyin ise çok kısa sürdüğü görülmektedir. Şekil 3.4.24-c spektrumu kullanılarak gerçekleştirilen testlere ait çatlak uzunluğu-çevrim sayısı grafiği ekran görüntüleri kullanılarak oluşturulmuş ve Şekil 3.4.25'te verilmiştir.



Şekil 3.4.25. Karışık genlikli SP1 spektrum yüklemesi çatlak ilerleme eğrileri

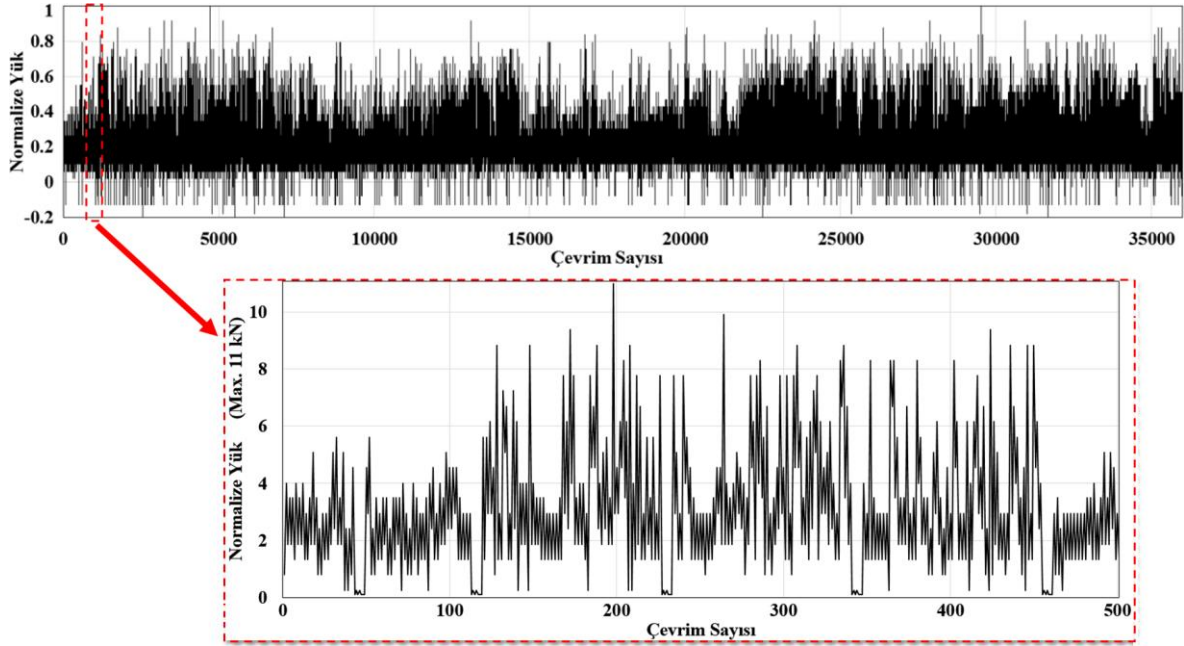


Şekil 3.4.26. Spektum 1/c yükleme profilleri ile gerçekleştirilen deney sonrası kırılma yüzeyleri

Karışık genlikli yorulma çatlak ilerleme deneyleri için diğer bir spektrum ise bir hava aracı üzerinden alınmış gerçek yükleme koşullarını içermektedir. Bu spektrum, proje kapsamında gerçekleştirilen endüstri ziyaretleri sırasında TUSAŞ tarafından akademik kullanım için tarafımıza iletilmiştir ve literatürde de bulunmaktadır. FALSTAFF spektrum profilinin tamamı 35,000 çevrim içerdiğinden ve aynı şartlar altında defalarca yapılacak olan deneylerin daha kısa sürede tamamlanması gerektiğinden, bu spektrum üzerinden şekil olarak spektrumun tamamına benzeyen bir bölge seçilmiş ve CT numunesine uygulanması gereken maksimum yük ve spektrumun diğer yükleri adı geçen kısmi FALSTAFF spektrumu (SP2) üzerinden uyarlanmıştır. Daha önceki deneylerde elde edilen tecrübelerden yararlanılarak FALSTAFF profilinde maksimum yük 11 kN olarak belirlenmiştir. Spektrum ve üzerinden alınmış olan kısım detaylı olarak Şekil 3.4.27’de görülmektedir. Basma yüklemelerinden dolayı çatlak yüzeylerinin



birbirine teması sonrası oluşacak kalıntı gerilmeleri önlemek için FALSTAFF profilindeki negatif yükler yaklaşık sıfır olacak şekilde revize edilmiştir.



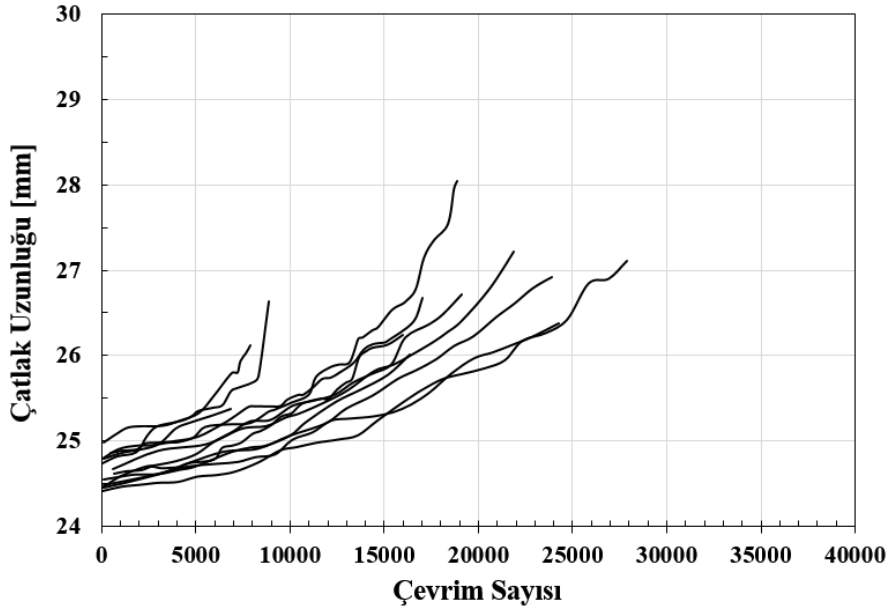
Şekil 3.4.27. FALSTAFF ve kısmi FALSTAFF (Spektrum 2 – SP2) yükleme profilleri

Tablo 3.4.12. Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları (Falstaff)

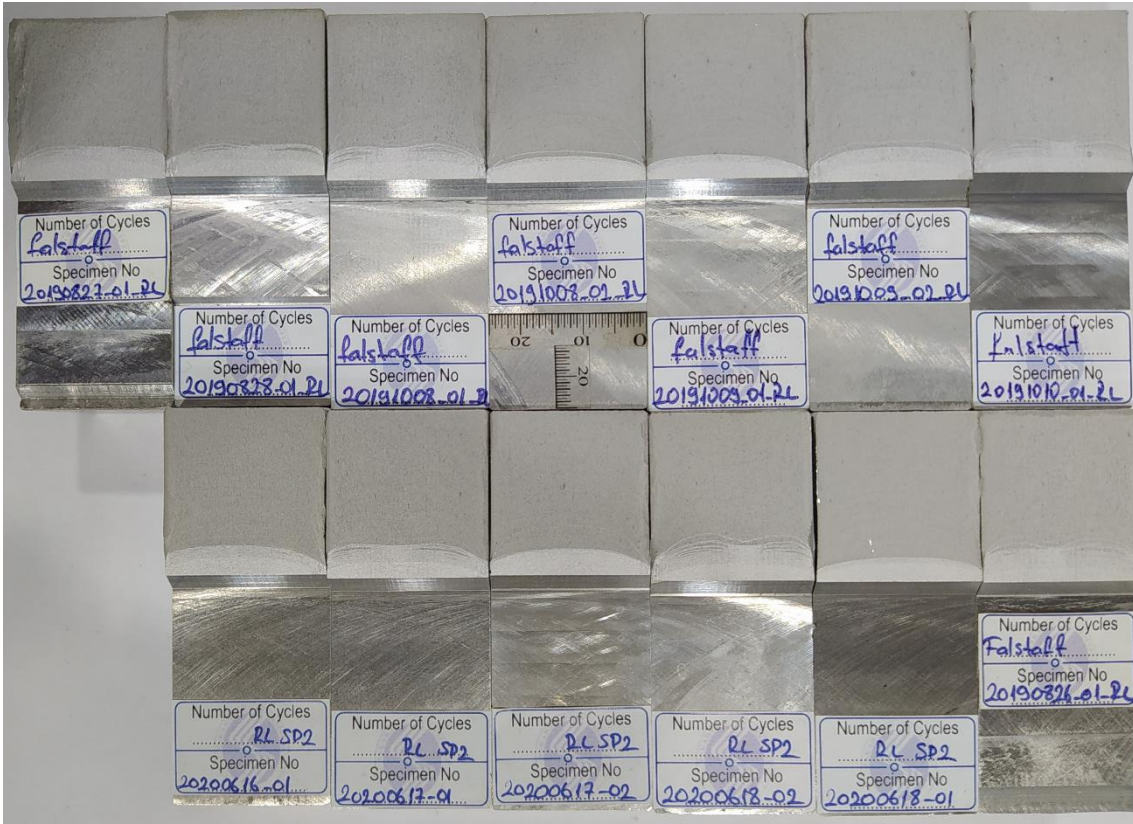
FALSTAFF		Ön Çatlak Bilgileri					da/dN Bilgileri	
Numune Adı	Numune Tipi	Ön Çatlak Yük Oranı	Maks. Ön Çatlak Yükü	$a_1$ (mm)	$a_3$ (mm)	$a_{(avg)}$ (mm)	Spektrum	Çevrim Sayısı
20190827_01	CT	0.1	6.4	24.516	25.210	24.863	Spektrum-2	17002
20190828_01	CT	0.1	6.4	24.130	25.090	24.610	Spektrum-2	15964
20191008_01	CT	0.1	6.4	25.060	24.528	24.794	Spektrum-2	18880
20191008_02	CT	0.1	6.4	24.970	25.000	24.985	Spektrum-2	7861
20191009_01	CT	0.1	6.4	24.740	24.700	24.720	Spektrum-2	8889
20191009_02	CT	0.1	6.4	24.830	24.090	24.460	Spektrum-2	24274
20191010_01	CT	0.1	6.4	24.039	24.820	24.430	Spektrum-2	19118
20190826_01	CT	0.1	6.4	24.048	24.760	24.404	Spektrum-2	27885
20200616_01	CT	0.1	6.4	24.045	25.050	24.548	Spektrum-2	16344
20200617_01	CT	0.1	6.4	25.120	24.215	24.668	Spektrum-2	21892
20200617_02	CT	0.1	6.4	25.620	24.970	25.295	Spektrum-2	1594
20200618_01	CT	0.1	6.4	24.860	24.710	24.785	Spektrum-2	6843
20200618_02	CT	0.1	6.4	24.196	24.750	24.473	Spektrum-2	23899

Kısmî FALSTAFF yüklemesi (Spektrum 2-SP2) ile yapılan testlere ait detaylar Tablo 3.4.12'de verilmiştir. Tablo 3.4.12'deki tüm deneyler aynı şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Buna rağmen yaklaşık aynı başlangıç çatlak boyutu için her bir deneyden farklı ömür sonucu elde edilmiştir.

Ayrıca Tablo 3.4.12’de verilen deneyler için çatlak uzunluğu-ömür (çevrim sayısı) grafiği Şekil 3.4.28’de, kırılma yüzleri ise Şekil 3.4.29’da verilmiştir.



Şekil 3.4.28. Spektrum 2 (SP2) yüklemesi için çatlak ilerleme eğrileri



Şekil 3.4.29. Spektrum 2 (SP2) kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonrası kırılma yüzeyleri

### 3.4.3 Değişken Genlikli Yük Altında Çatlak İlerleme Modelleri

Değişken genlikli yükleme koşullarında çatlak ilerlemesi modelleri genellikle sabit genlikli yük altında çatlak ilerleme modellerini temel alarak oluşturulmuştur. Bu nedenle, aşağıdaki alt bölümlerde önce sabit genlik altında çatlak ilerleme modelleri açıklanmış daha sonra değişken genlikli yük altında çatlak ilerleme modelleri verilmiştir. Değişken genlikli yüklemelerde çatlak ilerleme karakteristiklerini (yavaşlama/hızlanma) hesaba katan modeller açıklanmıştır.

#### 3.4.3.1 Sabit Genlikli Yorulma Yükleme Altında Çatlak İlerleme Modelleri

Paris-Erdoğan Çatlak İlerleme Modeli (Paris, P., Erdoğan, F. 1963): Bu model literatürde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.  $da/dN - \Delta K$  grafiğinin doğrusal olduğu bölgede (2. bölge) geçerlidir. Denklem (3.4.2)'de verilen eşitlik yardımıyla çevrim başına çatlak ilerlemesi hesaplanmaktadır. Denklemden de görüldüğü üzere Paris-Erdoğan denkleminde gerilme oranının (R) etkisi hesaba katılmamaktadır.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (3.4.2)$$

Denklem 3.4.2'deki C ve n katsayılarının elde edilişi bu raporun 3.4.1.c kısmında açıklanmış, elde edilen katsayılar tablo olarak verilmiştir.

Walker Çatlak İlerleme Modeli (Walker, K. 1970): Bu model, yine  $da/dN - \Delta K$  grafiğinin doğrusal olduğu bölgede (2. bölge) geçerlidir. Denklem (2.3.2) de görüldüğü üzere gerilme oranı (R) hesaba katılmaktadır.

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma_w}} \right]^n \quad (3.4.3)$$

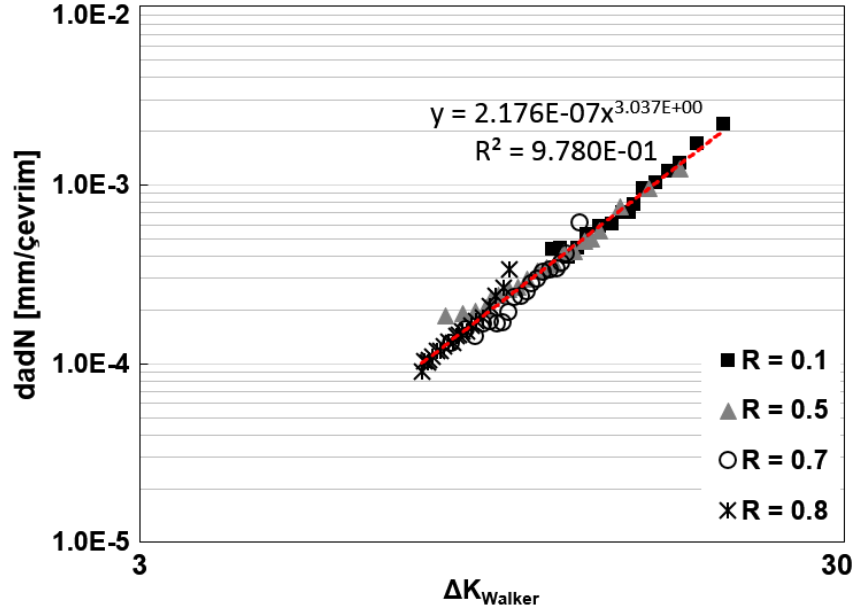
Bu modelinin uygulanabilmesi için empirik bir değer olan  $\gamma_w$  katsayısının elde edilmesi gereklidir.  $\gamma_w$  katsayısının elde edilmesi için  $\Delta K_{walker}$  eşitliği Denklem (3.4.4)'te verilmiştir.

$$\Delta K_{walker} = K_{max}(1-R)^{\gamma_w} \quad (3.4.4)$$

$$K_{max} = \frac{\Delta K}{(1 - R)} \quad (3.4.5)$$

Farklı gerilme oranları (R) için elde edilmiş deney verileri kullanılarak  $da/dN - \Delta K_{Walker}$  grafiği logaritmik eksenlerde çizdirilir. Farklı gerilme oranları (R) ile elde edilmiş eğrilerin bir arada ve lineer bir çizgi oluşturacağı  $\gamma_w$  katsayısı Walker modelinde kullanılacak doğru katsayıdır. Literatürdeki bilgilere göre deneme yanılma yöntemiyle elde edilen bu katsayının bulunması zor, hatta bazı durumlar için bulunması matematiksel olarak mümkün değildir.

Tablo 3.4.3 – 6’da verilen farklı gerilme oranlarında (R) yapılmış olan deneylerin çevrim başına ilerleme miktarı Walker çatlak ilerleme modeli ile de hesaplanmıştır. Bunun için yukarıda açıklandığı gibi  $\Delta K_{Walker}$  hesaplanmış,  $da/dN - \Delta K_{Walker}$  eğrileri kullanılarak  $\gamma_w$  elde edilmiştir.  $\gamma_w$  katsayısının elde edilmesinde farklı gerilme oranlarında aynı seviyelerdeki  $\Delta K$  değeri için Walker modeline göre  $(da/dN)_{Walker}$  hesabı yapılmış,  $\gamma_w$  değişken olarak tanımlanmıştır. Farklı gerilme oranlarında aynı seviyelerdeki ortak  $\Delta K$  değerleri için elde edilen  $(da/dN)_{Walker}$  tahminleri arasındaki farkın sıfıra en yakın olduğu  $\gamma_w$  değeri Microsoft Excel çözücü yardımıyla 0.631 olarak bulunmuştur.  $\gamma_w = 0.631$  değeri için farklı gerilme oranlarında çizilmiş eğrilerin bir arada lineer eğilim gösterdiği Şekil 3.4.30’da görülmektedir.



Şekil 3.4.30. Walker  $\gamma_w$  katsayısının bulunması

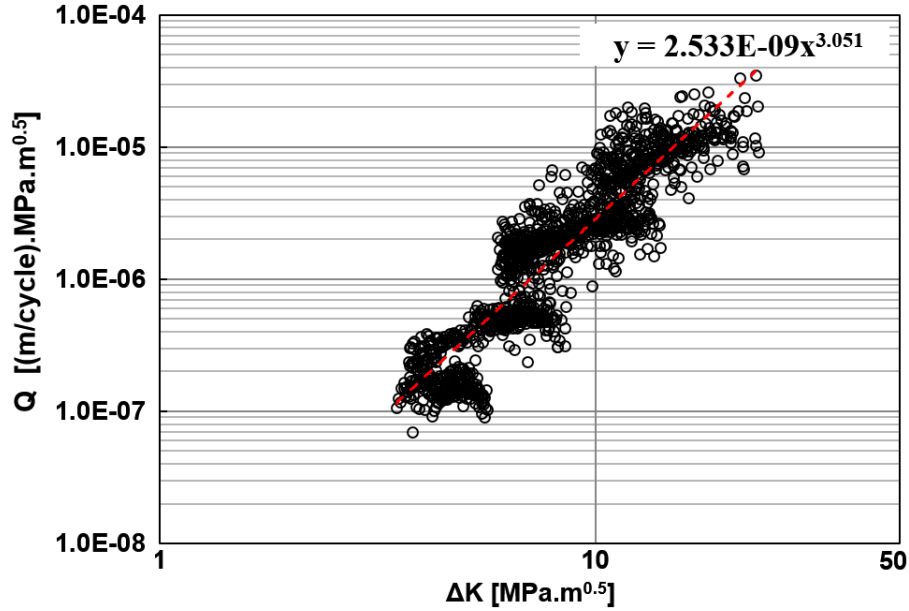
Şekil 3.4.30’da farklı gerilme oranlarındaki deney verileri bir araya getirilmiş ve lineer bir eğim elde edilmiştir. Eğim çizgisinin denklemi Walker denklemindeki  $C$  ve  $n$  katsayılarını vermektedir.  $R = 0$  durumu için  $C$  ve  $n$  katsayıları Denklem (3.4.2)’deki Paris-Doğan katsayıları ile eşit olmalıdır. Deneylerden elde edilen katsayılar incelendiğinde çok yakın katsayıların bulunduğu görülmektedir.

Forman Çatlak İlerleme Modeli (Forman, R.G. 1972): Gerilme oranı (R) ve kırılma tokluğu (K<sub>IC</sub>) değerlerini kullanarak geliştirilen çatlak ilerleme modeli ikinci ve üçüncü bölgeyi modelleyebilmektedir. Forman çatlak ilerleme modeli Denklem (3.4.6)'da verilmiştir.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_F(\Delta K)^m}{(1-R)^n K_{IC} - \Delta K} = \frac{C_F(\Delta K)^m}{(1-R)K_{IC} - K_{max}} \quad (3.4.6)$$

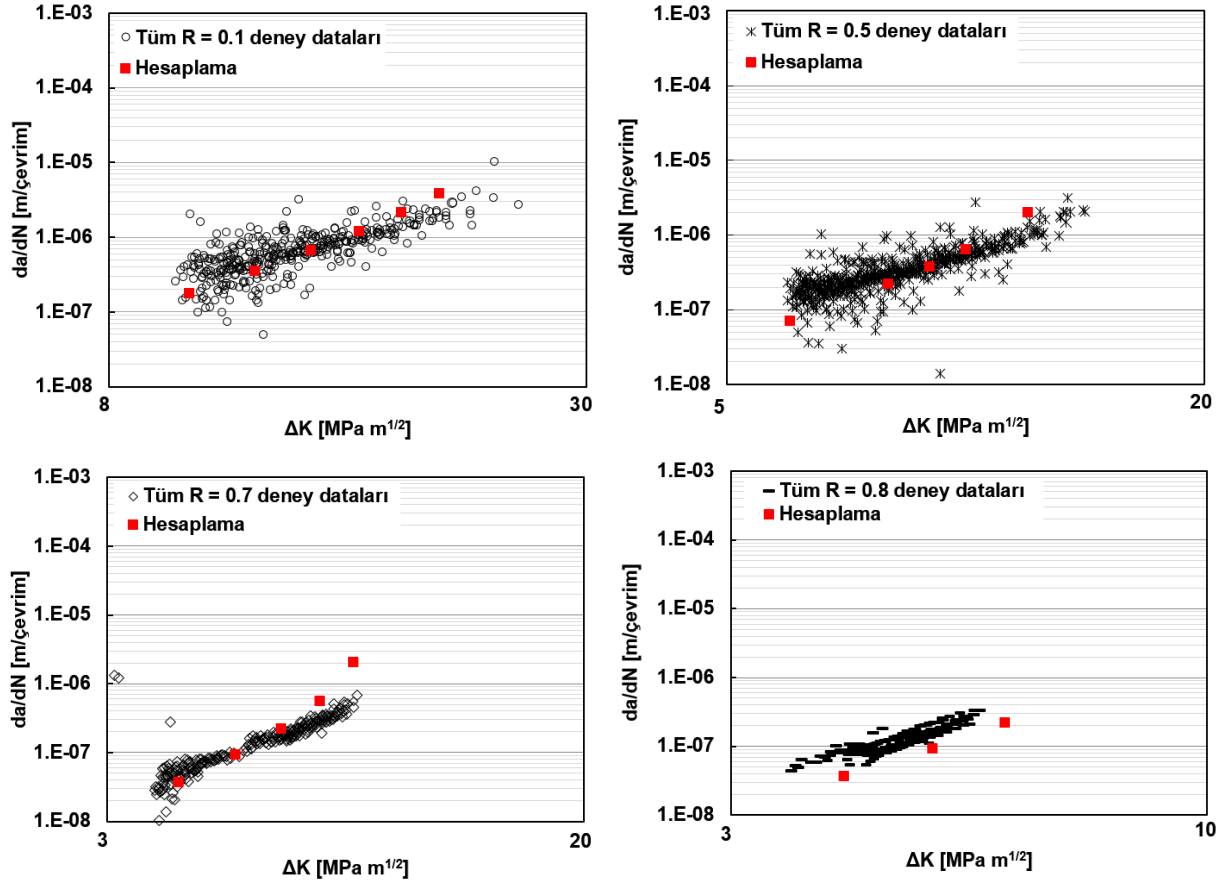
Denklem 3.4.6'da verilen  $C_F$  ve  $m$  Forman modeli için gerekli katsayılarıdır. Forman modelinin kullanılabilmesi için Denklem (3.4.7) kullanılarak bir Q değeri hesaplanması gereklidir.

$$Q = \frac{da}{dN} [(1-R)K_{IC} - \Delta K] = C_F(\Delta K)^m \quad (3.4.7)$$



Şekil 3.4.31. Forman modelinin uygunluğunun araştırılması ve katsayılarının elde edilmesi

Farklı gerilme oranları için hesaplanan Q değeri ile ΔK grafiği logaritmik eksenlerle çizildiğinde lineer bir çizgi elde ediliyorsa Forman modeli kullanılabilir. Tablo 3.4.3 – 6'da verilen farklı gerilme oranlarında (R) yapılmış olan deneylerden elde edilen da/dN verileri ile Q hesaplanmış ve grafik edilmiştir. Daha sonra her iki eksen logaritmik olacak şekilde grafik çizilmiş ve Forman katsayıları elde edilmiştir. Şekil 3.4.31'de verilen grafikte Forman modelinin deneylerimiz için kullanılabilirliği incelenmiştir. Elde edilen C ve n katsayıları ile çevrim başına çatlak ilerleme miktarı (da/dN) Denklem 3.4.6. kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 3.4.32'de bulunan değerlerin deneylerle karşılaştırılması gösterilmiştir.



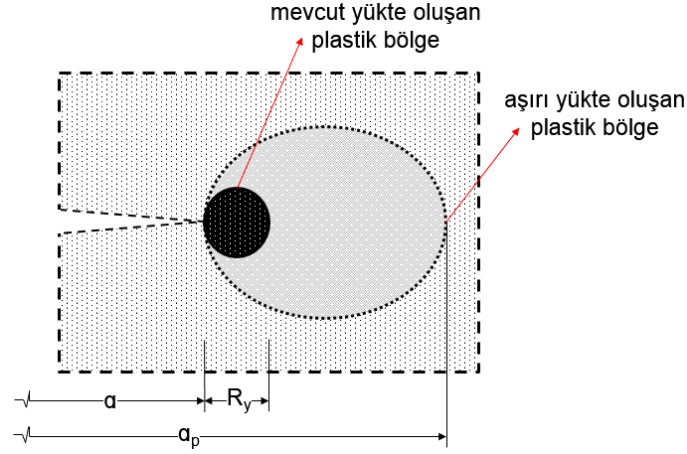
Şekil 3.4.32. Forman denklemi ile hesaplanan değerlerin deneylerle karşılaştırılması

Ayrıca Forman modelinin basitleştirilmiş bir hali de Denklem 3.4.8'de verilmektedir.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{1 - \frac{\Delta K}{(1-R)K_{IC}}} \quad (3.4.8)$$

### 3.4.3.2. Değişken Genlikli Yorulma Yükleme Altında Çatlak İlerleme Modelleri

Wheeler Modeli (Wheeler O.E., 1972): Tekil veya periyodik aşırı yüklenme altında çatlak ilerlemesinin modellenmesi için uygun bir modeldir. Wheeler modeli temel olarak çatlak ucunda oluşan akma bölgesinin büyüklüğüne dayanarak çatlak gecikmesi olup olmadığına karar verir. Şekil 3.4.33'te Wheeler modelinde kullanılan plastik bölge ve çatlak uzunluğu gösterilmiştir. Koyu siyah ile gösterilen plastik bölgenin çapı, çatlak ilerleme analizleri boyunca sürekli olarak aşırı yükte uygulanan plastik bölgenin uzunluğu ile karşılaştırılır. Çatlak ucunda mevcut yük altında oluşan plastik bölgenin daha önce uygulanan aşırı yük altında oluşan plastik bölgenin gerisinde olması halinde Paris-Erdoğan denklemi bir yavaşlatma parametresi ile çarpılır, diğer durumlarda ise Paris-Erdoğan çatlak ilerleme denklemi uygulanır.



Şekil 3.4.33. Wheeler modeli plastik bölge tanımlaması, (Wheeler O.E, 1972)

$$\frac{da}{dN} = \emptyset_R (C \Delta K)^n \quad (3.4.9)$$

$$\emptyset_R = \begin{cases} \left( \frac{R_y}{a_p - a} \right)^y & ; \quad (a + R_y) < a_p \\ 1 & (a + R_y) \geq a_p \end{cases} \quad (3.4.10)$$

$$R_y = \frac{1}{\pi 4\sqrt{2}} \left( \frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad \text{düzlem şekil değiştirme için} \quad (3.4.11)$$

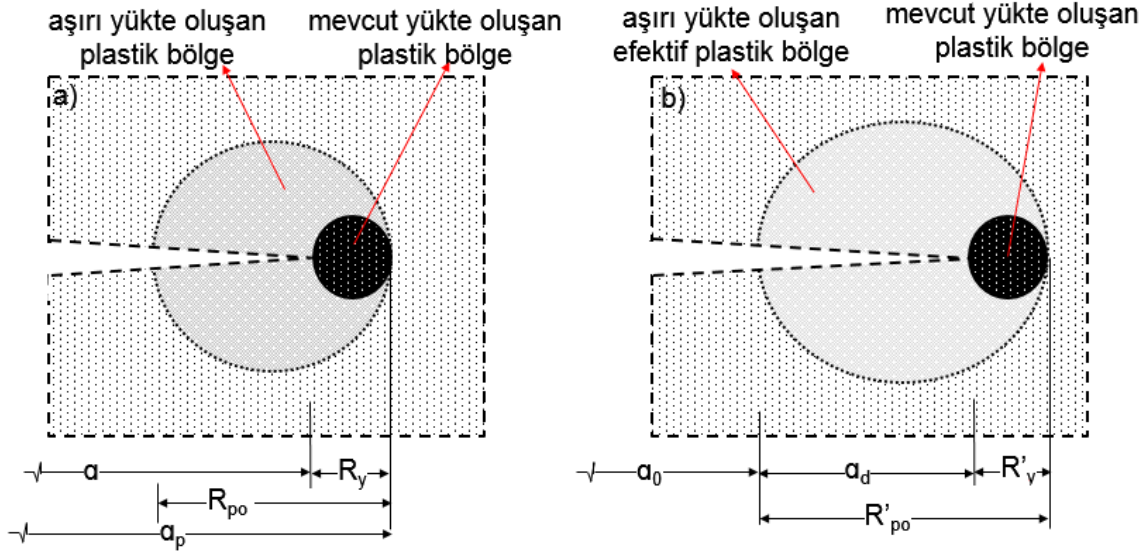
Denklem (3.4.10)'da verilen "y" Wheeler üssünün malzemeye, aşırı yükleme oranına ve aşırı yük uygulama anındaki çatlak uzunluğuna bağlı olduğu literatürde belirtilmiştir (Sheu B.C, vd., 1995).

Wheeler üssünün "y" bulunması için;

- Aşırı yük uygulandıktan sonra, çatlak ilerleme oranı (da/dN) miktarının aşırı yük öncesi değerine ulaşması için gereken toplam çevrim sayısı (Nd)<sub>deneysel</sub> tespit edilir.
- Aşırı yük sonrası her bir adım için plastik bölge yarıçapı Denklem (3.4.11)'e göre hesaplanır.
- $\emptyset_R = 1$  olana kadar gerekli ömür, Denklem (3.4.10-11) kullanılarak tahminî bir "y" üssü ile hesaplanır. Çatlak gecikmesi için ömür (Nd)<sub>hesaplanan</sub> bulunur.
- (Nd)<sub>hesaplanan</sub> = (Nd)<sub>deneysel</sub> eşitliğini sağlayan "y" değeri kabul edilir.

Sheu Modeli (Song, P. vd., 2001): Wheeler modelini esas alan bir modeldir. Wheeler modeline göre yorulma yükü altında çatlak ucu plastik bölge, aşırı yük tarafından oluşturulan plastik

bölgenin sınırlarına eriştiği anda çatlak ilerleme hızı tekrar aşırı yük öncesi değerine ulaşır. Song P vd. (2001), çatlak ilerleme hızındaki yavaşlamanın Wheeler modeline kıyasla bir süre daha devam ettiği tezini ortaya koymuştur. Yavaşlama parametresi hesaplamalarında Şekil 3.4.34'de gösterilen “aşırı yükte oluşan plastik bölge” yerine “efektif aşırı yükte oluşan plastik bölge” terimini kullanmışlardır.



Şekil 3.4.34. Çatlak ilerleme gecikmesi bölgesinin sonunda çatlak ucu plastik bölge tanımları: a) Wheeler modeli, b) Sheu modeli (Song, P.vd. 2001)

$$\phi'_R = \begin{cases} \left( \frac{R_y}{a_0 + R'_{po} - a_i} \right)^y & ; \quad (a_0 + R'_{po}) < a_p \\ 1 & (a_0 + R'_{po}) \geq a_p \end{cases} \quad (3.4.12)$$

Denklem (3.4.12)'de  $a_0$ , aşırı yük uygulama anındaki çatlak uzunluğunu,  $R_{po}$  aşırı yük tarafından oluşturulan plastik bölge yarıçapını (Wheeler modeli),  $R'_{po}$  efektif plastik bölge yarıçapını,  $a_d$  aşırı yük etkisi altında çatlak ilerleme gecikmesi sırasındaki çatlak uzunluğunu ifade etmektedir.

Xiaoping Modeli (Huang, X. vd., 2008): Wheeler modelinin üzerinde değişiklikler öngören bu model, çatlak ilerleme hızındaki yavaşlamanın hesaplanmasında eşdeğer gerilme şiddet faktörü yaklaşımını kullanmaktadır. Denklem (3.4.13)'de verilen  $\Delta K_{eq0}$   $R = 0$  için hesaplanan gerilme şiddet faktörüdür. Farklı gerilme oranlarında yapılan çatlak ilerleme testleri Denklem (3.4.14 – 15) yardımıyla öncelikle  $R = 0$  durumuna dönüştürülür. Böylece, önerilen bu modelle Wheeler modeli, gerilme oranı ile ilişkilendirilmiş olmaktadır.



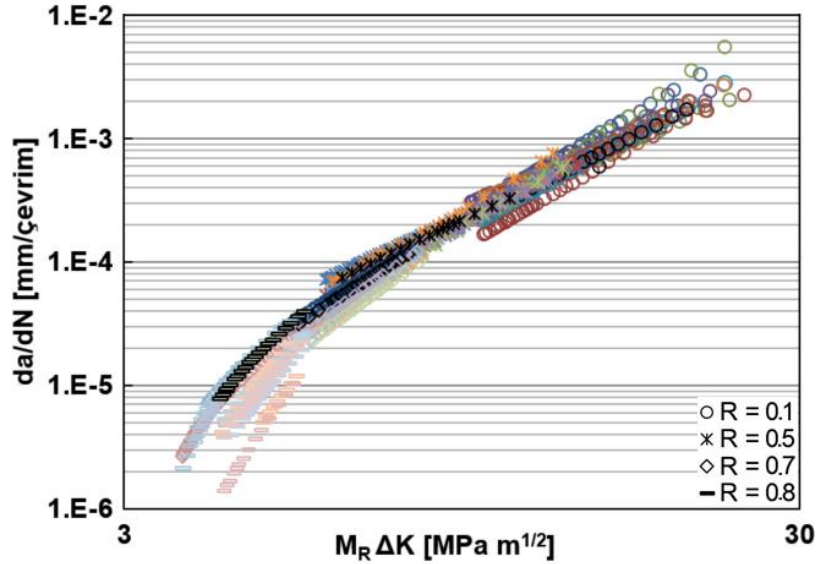
$$\frac{da}{dN} = C[(\Delta K_{eq0})^n - (\Delta K_{th0})^n] \quad (3.4.13)$$

$$\Delta K_{eq0} = M_R M_P \Delta K \quad (3.4.14)$$

$$M_R = \begin{cases} (1 - R)^{-\beta_1} & -5 \leq R < 0 \\ (1 - R)^{-\beta} & 0 \leq R < 0.5 \\ (1.05 - 1.4R + 0.6R^2)^{-\beta} & 0.5 \leq R < 1 \end{cases} \quad (3.4.15)$$

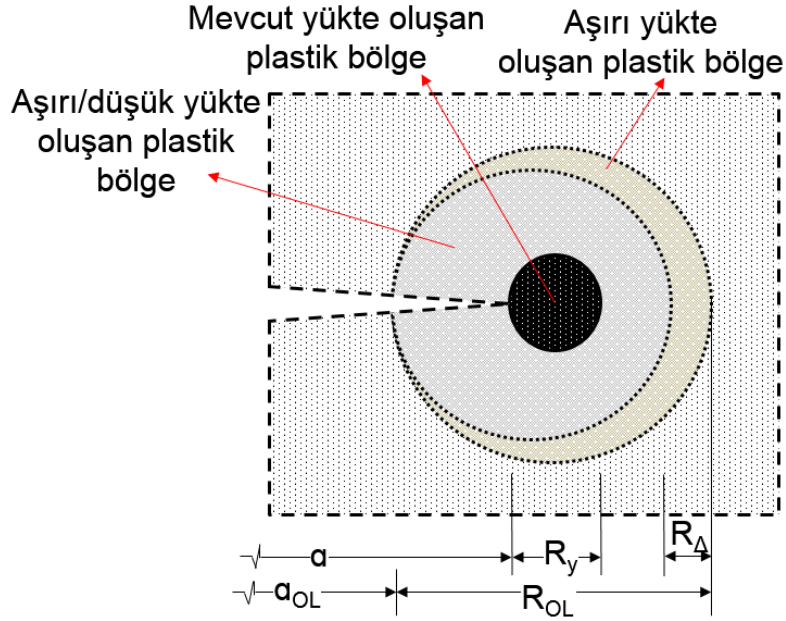
Denklem (3.4.15)'te verilen  $M_R$  farklı gerilme oranlarındaki deney sonuçlarının  $R = 0$ 'a kaydırılması için kullanılan bir katsayıdır.  $M_P$  ise yorulma yüklemeleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir düzeltme katsayısıdır. Denklem (3.4.15)'te kullanılan  $\beta$  ve  $\beta_1$  ifadeleri daha önce Walker çatlak ilerleme modelinde anlatılan yöntemle benzer şekilde bulunur. Öncelikle tüm gerilme oranında yapılmış testleri içeren  $da/dN - M_R \Delta K$  grafiği tahminî bir  $\beta$  değeriyle çizdirilir. Daha sonra tüm eğrileri bir araya toplayacak bir  $\beta$  değeri bulmak için aynı  $\Delta K$  değerine karşılık gelen  $da/dN$  değerlerinin aralarındaki fark sıfıra eşitlenmeye çalışılır. Bu işlem Microsoft Excel çözücü yardımıyla  $\beta$  değeri parametrik tanımlanarak yapılabilir.

Tablo 3.4.3 – 6'da verilen deneyler kullanılarak yukarıda anlatılan prosedüre göre  $\beta$  değeri 0.4 olarak elde edilmiş ve sonuç Şekil 3.4.35'te gösterilmiştir. Deneylerimizde  $R < 0$  şartı uygulanmadığı için  $\beta_1$  değeri üzerinde çalışılmamıştır.



Şekil 3.4.35. Farklı gerilme oranlarındaki deney sonuçları ile  $\beta$  değeri bulunması

Huang, X. vd. (2008) tarafından Wheeler modeline önerilen yeniliklerin daha iyi anlaşılması ve  $M_P$  fonksiyonunun tanımlanması için gerekli geometrik uzunlukları göstermek için Şekil 3.4.36 incelenebilir.



Şekil 3.4.36. Xiaoping Modeli için çatlak ucu plastik bölge tanımları (Huang, X. vd., 2008)

Şekil 3.4.36'da mevcut yük altındaki plastik bölgenin dışında aşırı yük durumu için iki farklı plastik bölge görülmektedir. Bu yaklaşım sayesinde aşırı yük etkisi devam ederken uygulanan ikinci bir aşırı/düşük yükün çatlak ilerleme hızına etkisi incelenebilmektedir. Bu ilişki Denklem (3.4.16 – 18) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$M_P = \begin{cases} \left( \frac{R_y}{a_{OL} + R_{OL} - a - R_{\Delta}} \right)^y & ; \quad a + R_y < a_{OL} + R_{OL} - R_{\Delta} \\ 1 & ; \quad a + R_y \geq a_{OL} + R_{OL} - R_{\Delta} \end{cases} \quad (3.4.16)$$

$$R_{\Delta} = \alpha \left( \frac{\Delta K_U}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (3.4.17)$$

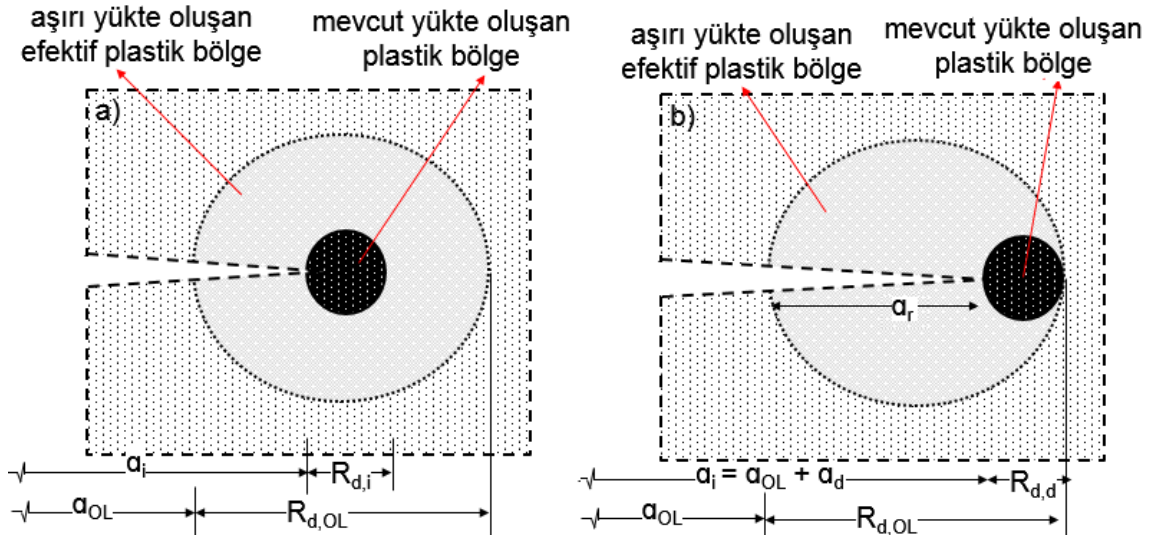
$$\Delta K_U = F\sqrt{\pi a} (\sigma_{min}^{i-1} - \sigma_{min}^i) \quad (3.4.18)$$

Yuen ve Taheri Modeli (Yuen B.K.C., Taheri, F., 2006): Bu model tekil veya birden çok aşırı yüklemenin bir arada uygulandığı çatlak ilerleme deneylerini modellemek için kullanılabilir. Wheeler çatlak ilerleme modeli üzerinde yapılan değişikliklerle aşırı yük sonrasında çok kısa bir süre çatlağın hızının artması, sonrasında çatlak hızının düşmesi, yükleme durumları arasındaki ilişki ve kritik kesitte meydana gelecek akma gibi parametreler hesaba katılmıştır. Bunun için çatlak ilerleme hızını yavaşlatan bir parametre ( $\emptyset_R$ ), çatlak ilerleme hızının yavaşlamasını geciktiren bir parametre ( $\emptyset_D$ ) ve aşırı yüklemeler arasındaki

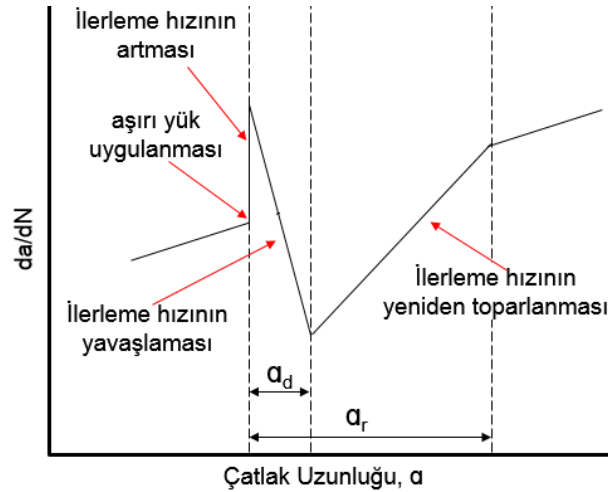
ilişkiyi tanımlamak için bir parametre ( $\phi_I$ ) Wheeler modeline eklenmiştir. Bu model tarafından kullanılan eşitlik Denklem (3.4.19)'da verilmiştir.

$$\frac{da}{dN} = \phi_R \phi_D \phi_I [C(\Delta K_{ac})^n] \quad (3.4.19)$$

$\phi_R$  değerinin hesaplanması Wheeler (Wheeler O.E, 1972) modelinde önerilen ve Denklem (3.4.10)'da verilen eşitlik ile yapılmaktadır.



Şekil 3.4.37. Çatlak ilerleme hızını etkileyen parametrelerin gösterimi (Yuen B.K. & Taheri F. 2006)



Şekil 3.4.38. Aşırı yük uygulanması ve çatlak ilerleme hızı (Yuen B.K. ve Taheri F. 2006)

Şekil 3.4.37a'da aşırı yük sonrası herhangi bir çatlak uzunluğu durumu, Şekil 3.4.37b'de ise çatlak ilerleme hızının aşırı yük öncesi duruma erişmeden hemen önceki pozisyonu verilmiştir.

Çatlak ilerleme hızının yavaşladığı süre içerisinde kat edilen çatlak uzunluğu ( $a_d$ ) ayrıca Şekil 3.4.38'de da şematik olarak verilmiştir.

$$\phi_D = \begin{cases} \left( \frac{a_{OL} + R_{d,OL} - a_i}{R_{D,i}} \right)^{y_{mod}} & ; \quad (a_i + R_{d,i}) < (a_{OL} + R_{d,OL}) \\ 1 & (a_{OL} + R_{d,OL}) \leq (a_i + R_{d,i}) \end{cases} \quad (3.4.20)$$

$$a_d = r_{d,OL} - r_{d,d} = \beta \left[ \left( \frac{K_{OL}}{\sigma_y} \right)^2 - \left( \frac{K_d}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (3.4.21)$$

Denklem (3.4.21)'de verilen efektif plastik bölge katsayısı  $\beta$ , Şekil 3.4.37-38 yardımıyla elde edilebilir.  $\phi_D$  Şekil 3.4.38'de gösterilen "çatlak ilerleme hızının yavaşlaması" kısmını modelleme imkânı sağlamaktadır.

$$\Delta K_{ac} = \begin{cases} \Delta K_i + (\Delta K_{OL} - \Delta K_i) \cdot \left( 1 - \frac{R_{d,i}}{a_{OL} + R_{d,OL} - a_i} \right)^{y_{mod}} & ; \quad (a_i + R_{d,i}) < (a_{OL} + R_{d,OL}) \\ \Delta K_i & (a_{OL} + R_{d,OL}) \leq (a_i + R_{d,i}) \end{cases} \quad (3.4.22)$$

Denklem (3.4.19)'daki  $\Delta K_{ac}$ , hesaplanması için Denklem (3.4.22) kullanılır. Denklem (3.4.22)'de kullanılan  $K_{OL}$  aşırı yük uygulandığı anda  $K_i$  ise mevcut durumdaki gerilme şiddet faktörünü göstermektedir.

Arka arkaya yapılan aşırı yüklemelerin etkilerini hesaplayabilmek için  $\phi_i$  terimi Wheeler modeline eklenmiştir. İki aşırı yükleme arasındaki ilişki üç farklı şekilde olabilir. Bunun için Denklem 3.4.23'de üç farklı durumu temsil eden parçalı fonksiyon verilmiştir.

$$\phi_i = \begin{cases} 1 - (1 - \phi_{min,i}) \cdot \left( 1 - \frac{R_{p,i}}{a_{OL} + R_{p,OL} - a_i} \frac{a_{OL} + R_{p,OL} - a_i}{R_{d,i}} \right)^{y_{mod}} & a_i + R_{d,i} < a_{OL} + R_{d,OL} \\ 1 - (1 - \phi_{min,i}) \cdot \left( 1 - \frac{R_{p,i}}{a_{OL} + R_{p,OL} - a_i} \frac{a_{OL} + R_{p,OL} - a_i}{R_{d,i}} \right)^{y_{mod}} & a_{OL} + R_{d,OL} \leq a_i + R_{d,i} \\ 1 & a_i + R_{d,i} < a_{OL} + R_{p,OL} \\ & (a_{OL} + R_{p,OL}) \leq (a_i + R_{p,i}) \end{cases} \quad (3.4.23)$$

Willenborg Modeli (Willenborg, J., 1971): Bu modelde çatlak ilerleme hızının yavaşlaması gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bundan dolayı çatlak ucunda plastik bölge boyutu hesabı ve malzemenin akma gerilmesi dışında empirik parametreler

gerekli değildir. Willenborg modelinde çatlak ilerlemesi için efektif gerilme şiddet faktörü yaklaşımıyla Kısım 3.4.3.1'de açıklanan Forman R.G. (1972) çatlak ilerleme modeli kullanılmaktadır. Forman modelinin kullanılması çatlak ilerleme hızının gerilme oranına bağlı olarak ifade edilmesini mümkün kılmaktadır.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_F(\Delta K_{eff})^m}{(1 - R_{eff})K_C - \Delta K_{eff}} \quad (3.4.24)$$

$$R_{eff} = \frac{K_{min\,eff}}{K_{max\,eff}} \quad (3.4.25)$$

$$K_{min\,eff} = K_{min} - K_r \quad ; \quad K_{max\,eff} = K_{max} - K_r \quad (3.4.26)$$

$$K_r = (K_{max})_{OL} \left\{ 1 - \frac{\Delta a}{Z_{OL}} \right\}^{0.5} - K_{max} \quad (3.4.27)$$

$$Z_{OL} = \frac{1}{\beta\pi} \left[ \frac{(K_{max})_{OL}}{\sigma_y} \right]^2 \quad (3.4.28)$$

$$\Delta K_{eff,i} = \begin{cases} \Delta K_i & ; & K_{max,eff,i} \text{ ve } K_{min,eff,i} > 0 \\ K_{max,eff,i} & & K_{min,eff,i} \leq 0 \\ 0 & & K_{max,eff,i} \leq 0 \end{cases} \quad (3.4.29)$$

Denklem (3.4.24 – 29) eşitlikleri yardımıyla çatlak ilerleme hızı hesaplanabilir.  $C_F$  ve  $m$ , Forman denklemi için malzemeye bağlı çatlak ilerleme katsayılarıdır.  $R_{eff}$  efektif gerilme oranı,  $K_{max,eff}$ ,  $K_{min,eff}$  ise Denklem (3.4.26)'ya göre hesaplanan efektif gerilme şiddet faktörüdür ve Denklem (2.3.26)'nın sonucunun negatif çıkması durumunda sıfır olarak alınır.  $K_r$  kalıntı gerilme şiddet faktörü olarak adlandırılır. Mevcut yükleme durumu için geçerli gerilme şiddet faktörü ile hesaplanan plastik bölge sınırının daha önce uygulanan aşırı yük tarafından oluşturulan plastik bölge sınırına erişmesi durumunda ise  $K_r$  sıfıra eşittir.  $(K_{max})_{OL}$  aşırı yük durumunda uygulanan maksimum gerilme şiddet faktörüdür.  $\Delta a$  aşırı yük etkisindeki çatlak ilerleme miktarıdır. Aşırı yük oranının iki kat veya daha fazla olması durumunda Denklem (3.4.27)'deki matematiksel işlem hatası nedeniyle modelleme yapılamamaktadır.

**Genelleştirilmiş Willenborg Modeli (Gallagher J.P. 1974):** Bu model Willenborg çatlak ilerleme modeline yapılan bir güncellemedir. Denklem 3.4.27'de önerilen kalıntı gerilme şiddet faktörü  $K_r$  nin bir  $\emptyset$  parametresi ile çarpılarak elde edilmesi dışında Willenborg modelindeki denklemler aynı şekilde kullanılır.  $\emptyset$  parametresinin eklenmesiyle aşırı yükün iki kat fazla olması durumu modellenabilmektedir.

$$\emptyset = \frac{1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K}}{(R_{So} - 1)} \quad (3.4.30)$$

Denklem (3.4.30)'da kullanılan  $R_{So}$  kapatma (shut-off) oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer 7075-T651 için 3.0 olarak literatürden elde edilmiştir (Sander M. Richard H, 2006). Aynı kaynakta bu değer 2.5 ile 3.5 arasındaki değişiminin sadece %3'lük bir etki yaptığı ifade edilmiştir.

Genelleştirilmiş Willenborg modeli aşırı düşük yük altında çatlak ilerleme hızını hesaplayamamaktadır. Modele bu kabiliyetin kazandırılması NASGRO'ya (NASA, 2000) yapılan bir ekleme ile mümkün olmuştur. Bu ekleme sonrası Modifiye Genelleştirilmiş Willenborg Modeli olarak adlandırılmaktadır. Düşük yük altında modelin çalışması için Denklem (3.4.31)'den faydalanılabilir (Sander M. Richard H, 2006). Denklem (3.4.31)'de ifade edilen  $\emptyset_0$ ,  $R_{UL} = 0$  durumundaki  $\emptyset$  değeridir.  $K_{UL}$  ise düşük yük altındaki gerilme şiddet faktörüdür.

$$\emptyset = \begin{cases} \frac{2.523\emptyset_0}{[1 + 3.5(0.25 - R_{UL})^{0.6}]} & ; \quad R_{UL} = K_{UL}/K_{OL} < 0.25 \\ 1 & R_{UL} = K_{UL}/K_{OL} > 0.25 \end{cases} \quad (3.4.31)$$

*Karekök Ortalama (RMS) Yaklaşımıyla Ömür Tahmini (Manjunatha C. M., 2006):* Çatlak ucu plastik bölge boyutuna göre çatlak ilerleme davranışını belirleyen yöntemlere göre oldukça farklı olan bu yöntem karışık genlikli yorulma yüklemesi için basit bir yaklaşım sunmaktadır. Yük spektrumu için karekök ortalama (RMS) hesaplanıp daha sonra sabit genlikli yüklemeye altında çatlak ilerlemesi gibi ömür hesabı yapılmaktadır. Bu yöntemde çatlak ilerlemesine sebep olan gerilme şiddet faktörü  $K^*$  Denklem (3.4.32)'ye göre hesaplanır. Denklem (3.4.32)'de gerilme şiddet faktöründeki değişimin pozitif kısmı  $\Delta K^+$  ile işlem yapılmaktadır. Alüminyum alaşımları için  $\alpha = 0.5$  değerini almaktadır.

$$K^* = [(\Delta K^+)^{\alpha} (K_{max})^{1-\alpha}] \quad (3.4.31)$$

$$\sigma_{min}^{rms} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_r} (\sigma_{min})^2 \right]^{0.5}, \quad \sigma_{max}^{rms} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_r} (\sigma_{max})^2 \right]^{0.5} \quad (3.4.32)$$

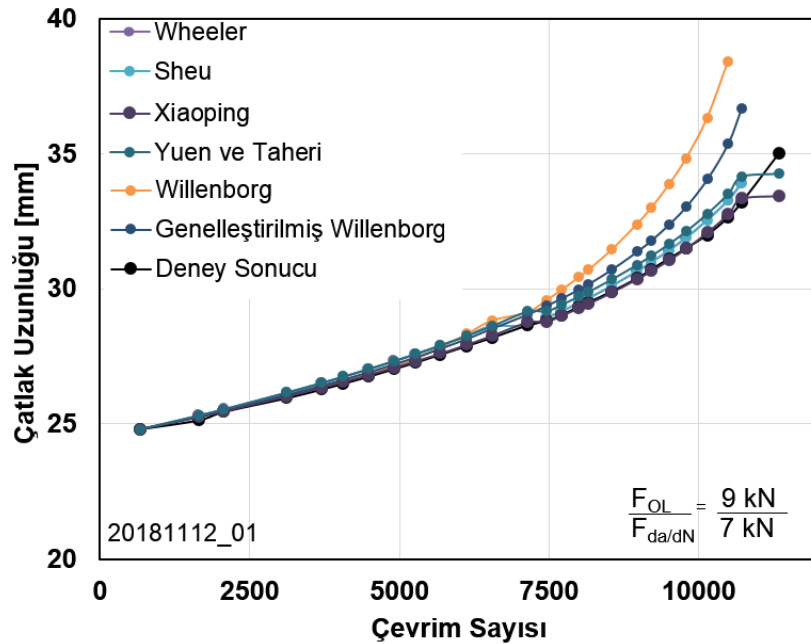
$$\frac{da}{dN} = C_1(\Delta K^*)^{C_2} \frac{[1 - (\Delta K_{th}^*/\Delta K^*)^2]}{[1 - (\Delta K^*/C_3)^2]} \quad (3.4.33)$$

Denklem 3.4.32'den hesaplanan karekök ortalama gerilme değeri kullanılarak her bir çatlak uzunluğu için  $K^*$  hesaplanmaktadır. Hesaplanan  $K^*$  değerleri Denklem (3.4.33)'te kullanılarak bir sonraki çatlak uzunluğu bulunmaktadır. Denklem (3.4.33) deneysel verilerden elde edilen  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ve  $K_{th}$  olmak üzere 4 farklı parametreyi içermektedir. Bu parametrelerin bulunması için  $K_{th}$  ve  $C_3 = K_{ic}$  denklemde yerine yazıldıktan sonra Denklem (3.4.33) ile çizdirilen sinüzoidal eğrinin deney verilerine uyum sağlayacağı  $C_1$  ve  $C_2$  parametreleri bulunur.

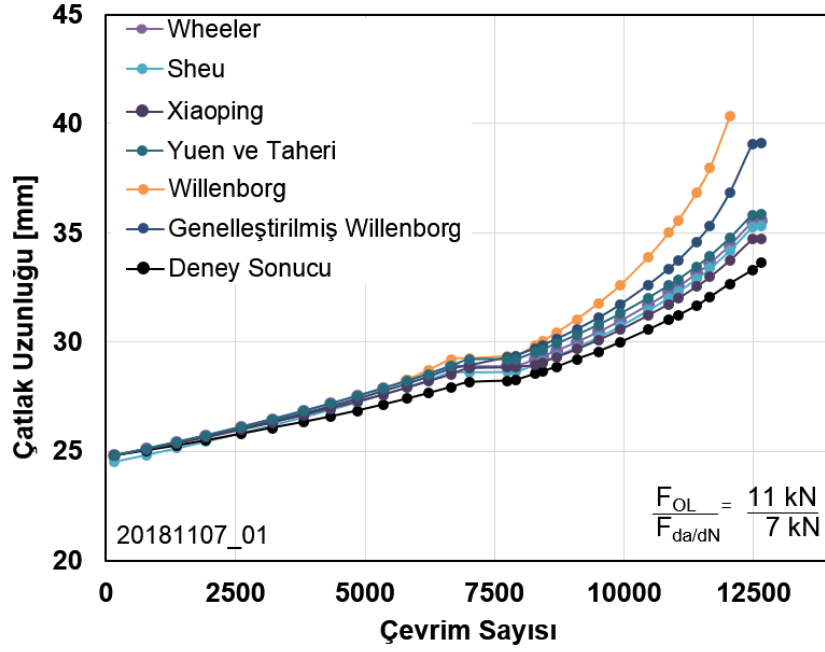
### 3.4.3.3 Değişken Genlikli Yorulma Yükleme Altında Çatlak İlerleme Modellerinin Deneylere Uygulanması

#### 3.4.3.3.1 Tekil Aşırı Yük Uygulanan Deneylerin Modellenmesi

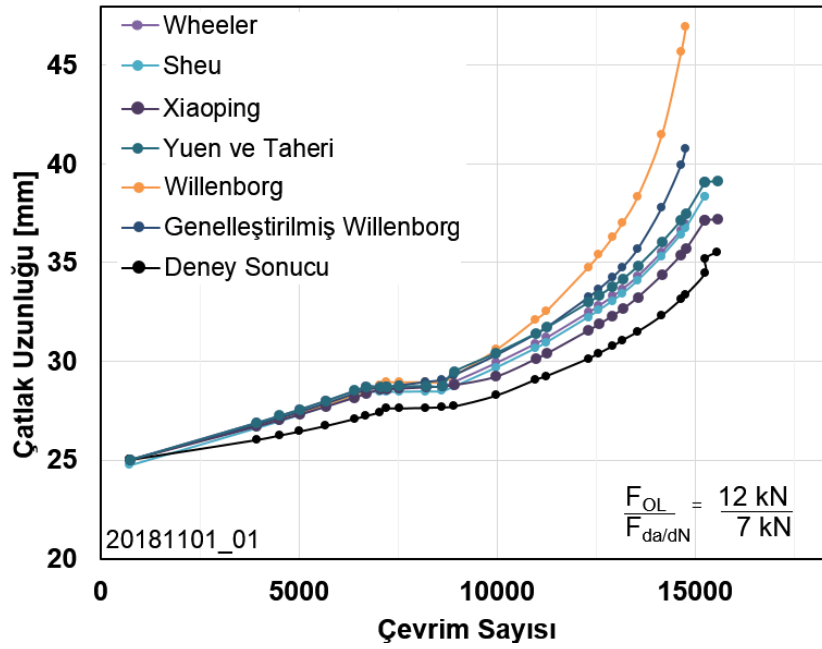
Şekil 3.4.20'de verilen ve 7kN ( $R = 0.1$ ) sabit genlik altında 7000. yük çevriminden sonra aşırı yüklemenin uygulandığı her bir durum için değişken genlikli yorulma çatlak ilerleme modelleri uygulanmış ve ilgili ömür tahminleri yapılmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.4.39.  $F_{OL}/F_{da/dN} = 1.29$  aşırı yüklenme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması

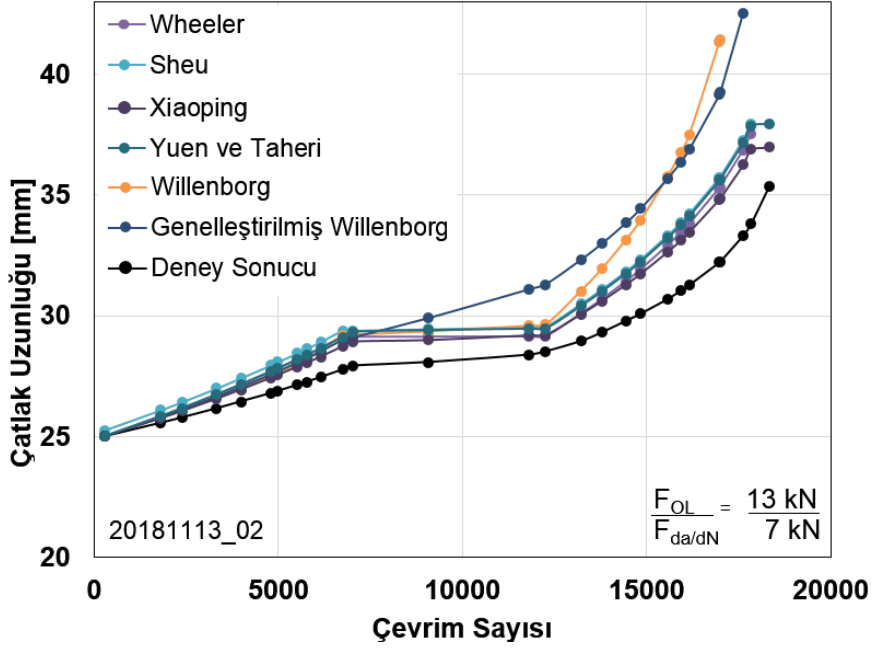


Şekil 3.4.40.  $F_{OL}/F_{da/dN} = 1.57$  aşırı yükleme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması

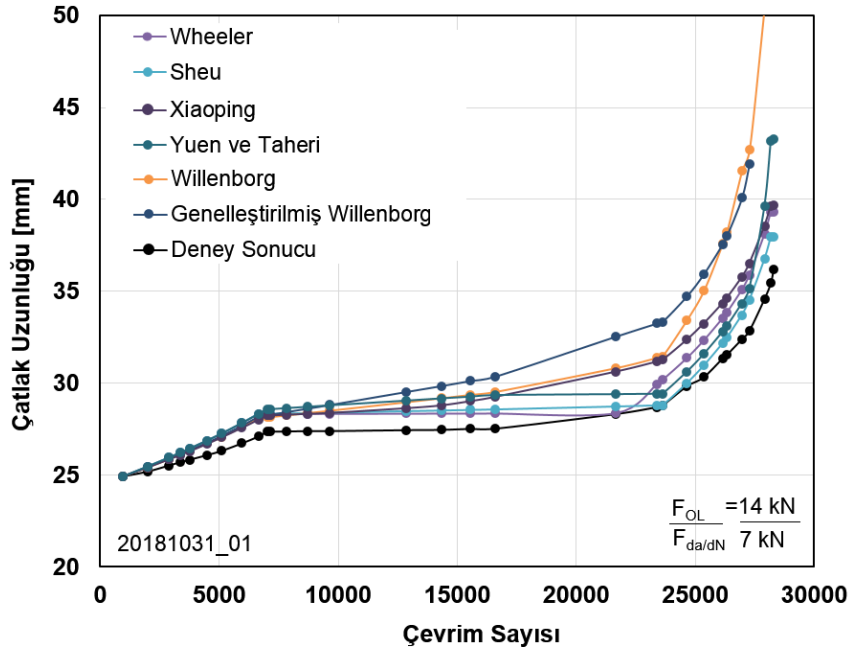


Şekil 3.4.41.  $F_{OL}/F_{da/dN} = 1.71$  aşırı yükleme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması





Şekil 3.4.42.  $F_{OL}/F_{da/dN} = 1.85$  aşırı yükleme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması

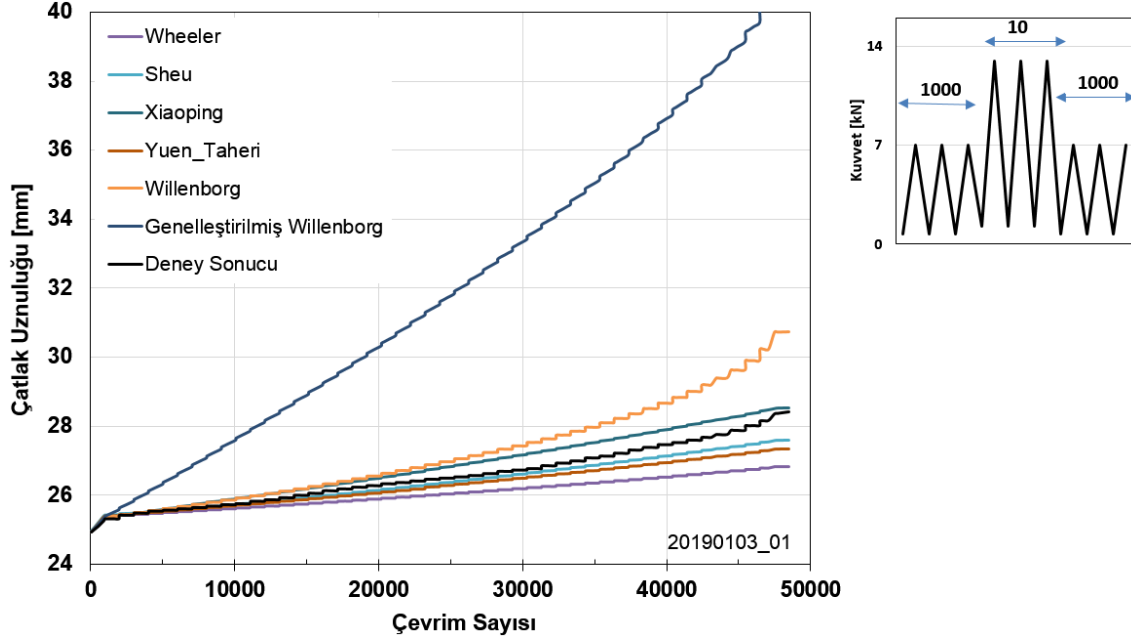


Şekil 3.4.43.  $F_{OL}/F_{da/dN} = 2.0$  aşırı yükleme durumu için değişken genlikli çatlak ilerleme modellerinin karşılaştırılması

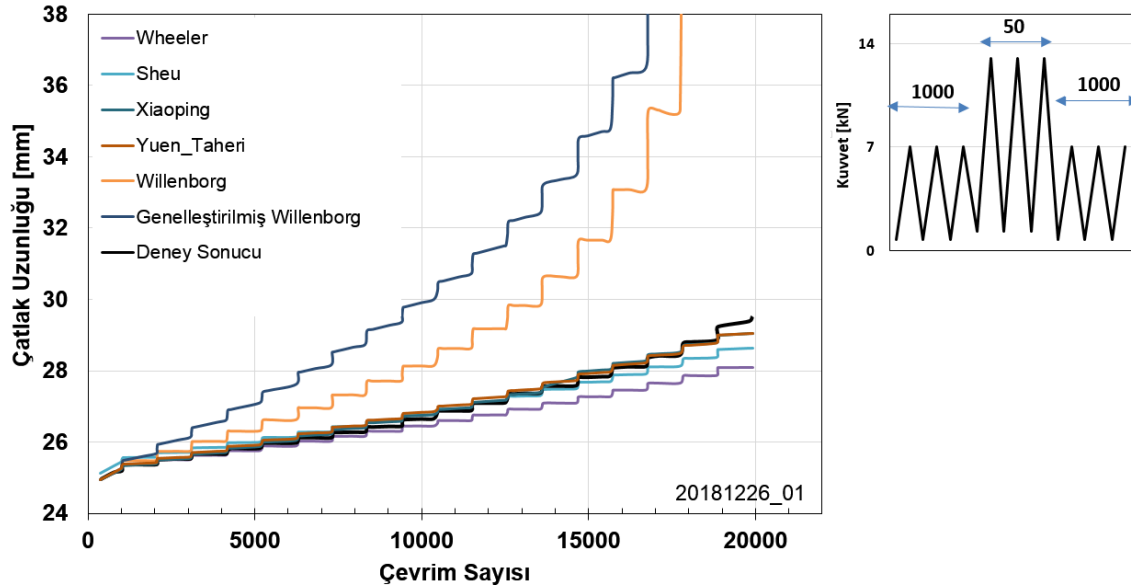
Şekil 3.4.39 – 43’de verilen grafiklerde değişken genlikli çatlak ilerleme modelleri ile tahmin edilen çatlak ilerleme davranışları ve deney sonuçları verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü üzere, Wheeler ve Wheeler üzerinde geliştirme yapmış olan modeller deneylere oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Willenborg modeli ve bu model üzerinden kurgulanan diğer iki model ise deneylerle kısmî yakınlık göstermektedir. Aşırı yük oranının iki kat olduğu durumlarda

Willenborg modeli için doğru sonuç vermediği literatürde belirtilmiştir (Sander, M. ve Richard H.A, 2006), (Khan S.U ve Schijve J., 2007). Bu açığı gidermek için geliştirilen genelleştirilmiş Willenborg modeliyle de deneylerimize çok yakın sonuçlar elde edilmemiştir.

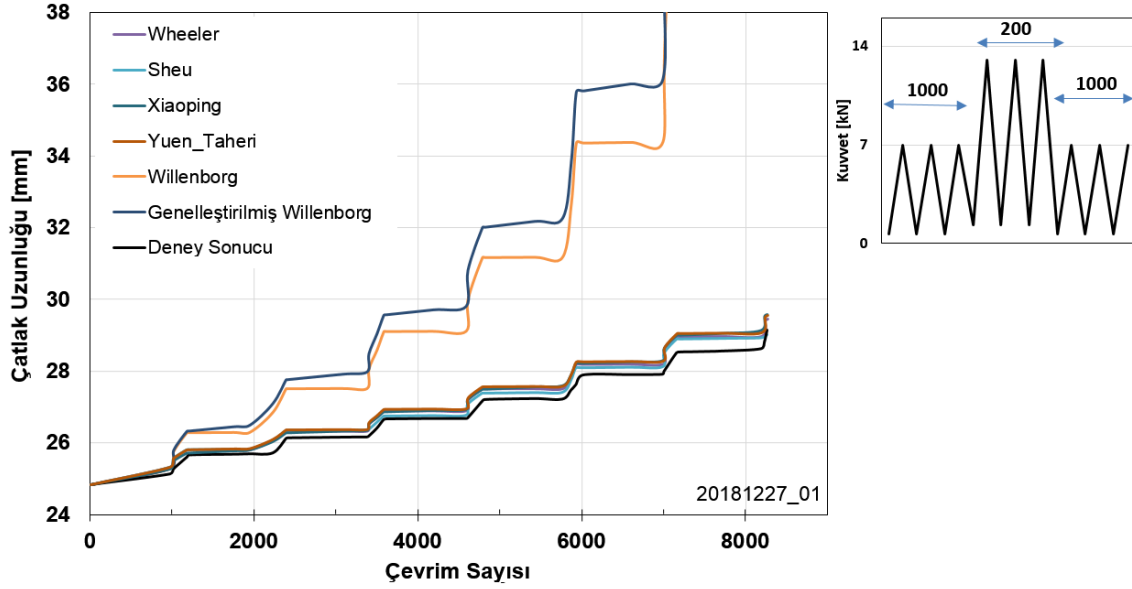
### 3.4.3.3.2 Bloklar Halinde Aşırı Yük Uygulanan Deneylerin Modellenmesi



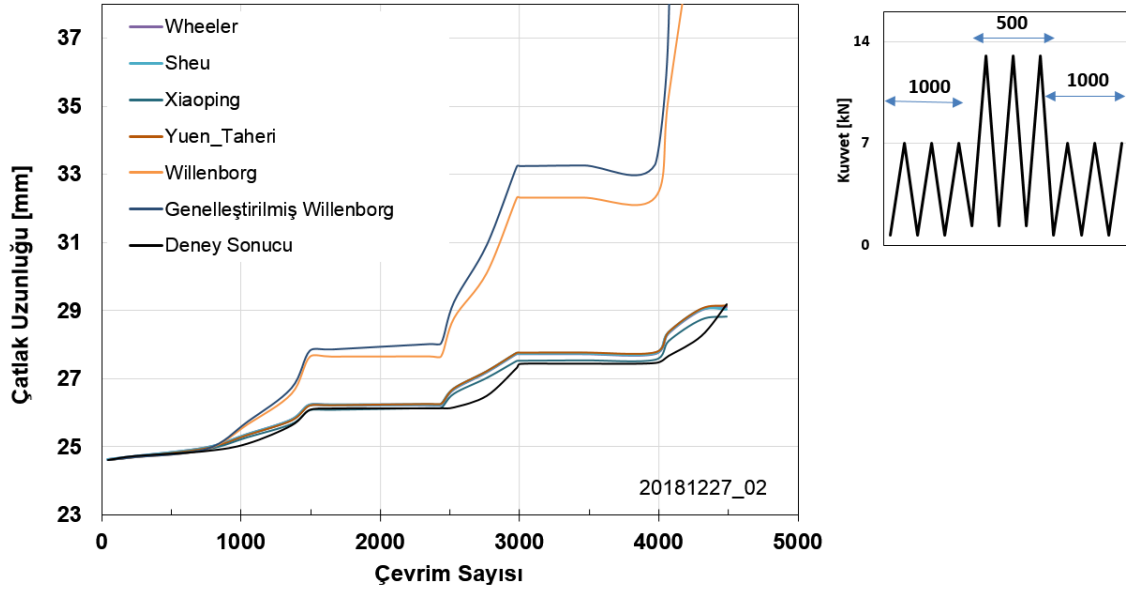
Şekil 3.4.44. Değişken genlikli yükleme çatlak ilerleme modellerinin blok halinde aşırı yük uygulanan deneylere uygulanması,  $n=10$



Şekil 3.4.45. Değişken genlikli yükleme çatlak ilerleme modellerinin blok halinde aşırı yük uygulanan deneylere uygulanması,  $n=50$



Şekil 3.4.46. Değişken genlikli yükleme çatlak ilerleme modellerinin blok halinde aşırı yük uygulanan deneylere uygulanması,  $n=200$

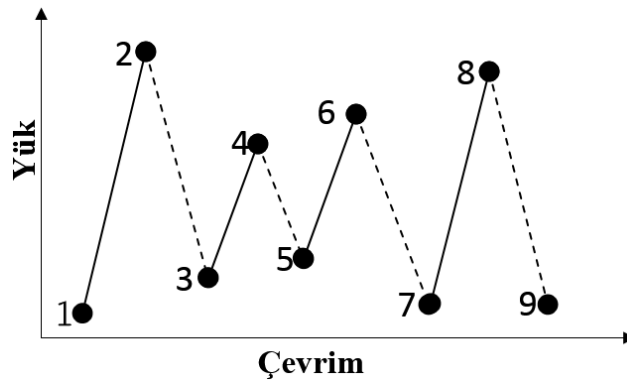


Şekil 3.4.47. Değişken genlikli yükleme çatlak ilerleme modellerinin blok halinde aşırı yük uygulanan deneylere uygulanması,  $n=500$

3.4.44 – 47 numaralı şekillerde verilen grafiklerde görüldüğü üzere Wheeler Modeli ve bu modeli temel alan yaklaşımlar blok halinde aşırı yük uygulanması durumunda da uygun sonuçlar vermektedir. Ancak Willenborg Modeli ve bu modeli temel alan yaklaşımların verdiği ömür tahminleri deney sonuçlarıyla çok fazla sapma göstermektedir.

### 3.4.3.3.3 Karışık Genlikli Yorulma Yüğü Uygulanan Deneylerin Modellenmesi

Karışık genlikli yorulma çatlak ilerleme ömrünü tahmin etmek için her bir yük çevrimi tek tek değerlendirilerek (cycle by cycle) çalışılmıştır. Ancak deneyde gerilme genlik oranının sürekli değişmesi modelleme çalışmalarını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, spektrumdaki mevcut çevrimde yükün arttığı kısım hasar oluşturuvcu yükleme bölgesi olacağı için bu kısım kullanılmış, yükün azaldığı (yük boşaltımı) durumlar hesaplamaya dâhil edilmemiştir. Gerilme şiddet faktöründeki pozitif değişimin çatlağı ilerleteceğı düşünöldüğünde bu yaklaşım fiziksel olarak da uygundur. Bu yaklaşımda kullanılmak üzere bir yük profilinde üç farklı pozisyon belirlenmiş ve bu SPPI (Spectrum Profile Position Index) olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.4.48. Spektrum profil konum tanımlaması

Şekil 3.4.48'de karışık genlikli dört farklı çevrim içeren bir spektrum verilmiştir. Karışık genlikli yük altında çatlak ilerleme ömür tahmini yapılırken çevrimin sayılması için kullanılacak yöntem bu spektrum üzerinden açıklanacaktır. Her bir profilde yükün arttığı durum sürekli çizgiyle, azaldığı durum da kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Şekil 3.4.48'e göre birinci çevrim 1-2-3 numaralı noktalardan oluşmaktadır. Bu noktalar yük profilinin konumunu (Profile Position) belirtmektedir. 1-2-3-4.... rakamları ise Profil Konum İndeksi (Profile Position Index) olarak adlandırılmıştır. İlgili profilin gerilme oranı (R) hesaplanırken yükün artan durumu (sürekli çizgi) kullanılmaktadır. Örnek vermek gerekirse 1-2-3 profil konumlarından oluşan birinci çevrim için 1 numaralı noktanın 2 numaralı noktaya oranı 1. çevrim için gerilme oranını vermektedir. Bu hesaplama yöntemi tüm spektrum için aynı şekilde kullanılmaktadır.

Bölüm 3.4.3'de açıklandığı gibi Wheeler modelinde çatlak ilerleme hesabı Denklem (3.4.2)'de verilen Paris-Erdoğan denklemi ile yapılmaktadır. Wheeler modeli çıkış noktası olarak tekil aşırı yükleri modellemeyi hedeflediğinden bu yaklaşım yeterli olmuştur. Ancak karışık genlikli yüklemede gerilme oranı sürekli değişiklik göstermektedir. Farklı genliklerdeki yorulma yük profillerinde maksimum gerilme aynı olsa bile maksimum gerilme ile minimum gerilme arasındaki fark eşit olmayacaktır. Bu farkın çatlak ilerlemesini doğrudan etkilediğı bilinmektedir. Bu sebeple gerilme oranının hesaba katıldığı bir çatlak ilerleme modelinin karışık genlikli

yüklemelerde kullanılması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu çalışmada karışık genlikli çatlak ilerlemesinin modellenmesi için Wheeler modeli Forman ve Walker çatlak ilerleme modelleri ile kullanılmıştır.

Buna ek olarak farklı bir yaklaşımla orijinal Wheeler modelindeki Paris-Erdoğan Denklemi Walker veya Forman yöntemleriyle elde edilen katsayılarla kullanılması ve böylece farklı genlikteki deney verilerinin kompozit bir şekilde ifadesiyle daha basit bir model için de çalışılmıştır.

Wheeler çatlak ilerleme yaklaşımının dışında Bölüm 3.4.3'te açıklanmış olan Genelleştirilmiş Willenborg, Xiaoping ve Karekök Ortalama (RMS) Yaklaşımıyla da modelleme çalışmaları yapılmıştır.

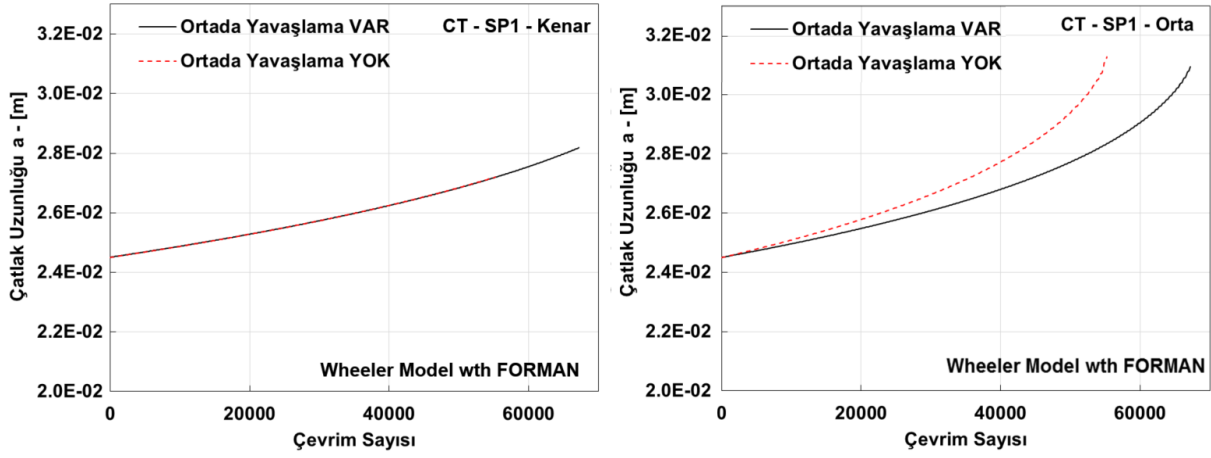
Tablo 3.4.13. Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi model sonuçları karşılaştırması

Model	İlerleme Davranışı	Çatlak İlerleme Denklemi	CT SP1				CT SP2			
			Çevrim Sayısı		K. Çatlak Uzunluğu		Çevrim Sayısı		K. Çatlak Uzunluğu	
			Test	Sim.	Test	Sim.	Test	Sim.	Test	Sim.
Composite C-n	Wheeler	Forman Const wth Paris-Erdoğan	31590	57200	26.8 mm	27.8 mm	21892	30996	27.2 mm	27.5 mm
Composite C-n	Wheeler	Walker Const. wth Paris-Erdoğan		175000		25.6 mm		56677		26.4 mm
Walker	Wheeler	Walker		63500		27.5 mm		38868		27.6 mm
Forman	Wheeler	Forman		82200		27.2 mm		41574		27.4 mm
Xiaoping	Wheeler	Paris-Erdoğan		189000		39.6 mm		52890		27.3 mm
G.Willenborg	GWillenborg	Forman		95700		30.5 mm		52156		29.9 mm
RMS (Manjunatha)	RMS	Newman		26700		31.1 mm		28556		31.0 mm

Tablo 3.4.13'te CT numunesi ile gerçekleştirilen Spektrum-1 ve Spektrum-2 yüklemeleri için yapılan modelleme sonuçları çevrim sayısı ve numune yüzeyindeki çatlak uzunluğu olarak verilmiştir.

Deney sırasında çatlak uzunluğu numune yüzeyinden ölçülmekte, numunenin orta kısmındaki çatlak uzunluğunu gözlemlene imkânı bulunmamaktadır. Karışık genlik altında gerçekleştirilen test numunelerinin kırılma yüzeyleri incelendiğinde çatlağın, numunenin orta ve kenarı arasında farklı uzunlukta olduğu görülmüştür. Daha önce sabit genlik altında gerçekleştirilen testlerde bu durumla karşılaşılmamıştır. Bu durum literatürde çatlağın tünel şeklinde içeriden ilerlemesi (crack tunneling) olarak adlandırılmaktadır. Uygulanan yüklerden dolayı numunenin çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin boyutları kenar ve orta kısımlarda oldukça farklıdır. Bunun sebebi numunenin yüzeye yakın bölgelerinde düzlem gerilme (plane stress), iç kısımlarında ise düzlem şekil değiştirme (plane strain) durumunun olmasıdır. Dolayısıyla, numunenin kenarında çatlak ilerlemesi orta kısmına göre daha fazla zorlaşmaktadır. Bu da deney sırasında numunenin kenarından yapılan ölçümlerin numunenin iç kısmına göre daha kısa olması sonucunu doğurmaktadır. Bu nedenle yapılan karşılaştırmalar sonucunda

modelleme/analiz çalışmalarında numunenin orta kısmında çatlak ilerlemesi yavaşlatılma hesabının yapılmasına gerek olmadığına karar verilmiştir (Şekil 3.4.49).



Şekil 3.4.49. Numunenin ortasında çatlak ilerlemesinin yavaşlaması/yavaşlamaması durumu

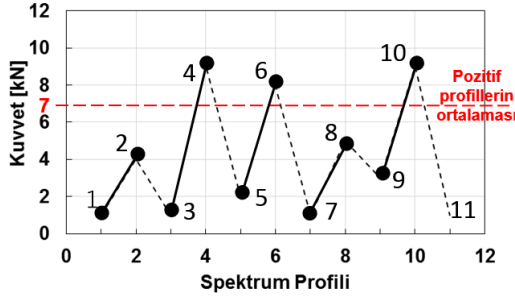
Tablo 3.4.13 incelendiğinde modelleme çalışmalarından elde edilen çevrim sayılarının deneylere göre yüksek olduğu görülmektedir. İki-boyutlu çatlak ilerleme deneyleri ile simülasyon sonuçlarının daha tutarlı olması için model iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

#### 3.4.3.3.4 Karışık Genlikli Yorulma Yükü Altında Çatlak İlerleme Analizi İçin İyileştirilmiş Model Geliştirilmesi

Model iyileştirme çalışmalarında deney sonuçlarından bağımsız, spektrum yükü kullanılarak genel bir çarpan elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla spektrum yükündeki profillerin tek tek incelenmesiyle spektrumun bir indeksi çıkarılmış ve Spektrum Aşırı Yük İndeksi (Spektrum Overload Index) olarak adlandırılmıştır. Spektrum aşırı yük indeksinin belirlenmesi aşağıda maddeler halinde yazılmıştır:

- Spektrum profilindeki tüm yük noktalarının tepe değerleri kullanılarak spektrumdaki maksimum yük ortalaması hesaplanır.
- Spektrum profilindeki her bir tepe noktası için, yukarıda hesaplanan ortalama değerden olan sapma yüzdesi hesaplanır.
- Spektrum Aşırı Yük İndeksi (SOL İndeks), yüzdesel olarak, profildeki tüm tepe noktalarının sayısına kıyasla, kendisi kadar tepe noktası sayısının en az kendisi kadar ortalama yük değerinden yukarıda olduğu değer artı %100'dür. Örneğin, verilen bir spektrum yükleme profilinde, tüm tepe noktalarının %25'i, profil tepe noktaları ortalama değerinin en az %25 üzerinde ise, SOL İndeks=1.25 olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 3.4.50'de, SOL İndeks için örnek bir hesaplama verilmektedir.



Artan profillerin sayısı : 5  
 Artan profillerin ortalaması : 7 kN  
 Ortalamanın üzerinde kalan profil sayısı : 3

4 numaralı profilin şiddeti ile ortalama arasındaki fark : 9 - 7 kN = 2 kN  
 4 numaralı profilin şiddetine eşit veya büyük profil sayısı : 2

$$\frac{4 \text{ numaralı profilin şiddeti ile ortalama arasındaki fark}}{\text{Artan profillerin ortalaması}} = \frac{2}{7} = 0.285$$

$$\frac{4 \text{ numaralı profilin şiddetine eşit veya büyük profil sayısı}}{\text{Ortalamanın üzerinde kalan profil sayısı}} = \frac{2}{3} = 0.666$$

6 numaralı profilin şiddeti ile ortalama arasındaki fark : 8 - 7 kN = 1 kN  
 6 numaralı profilin şiddetine eşit veya büyük profil sayısı : 3

$$\frac{6 \text{ numaralı profilin şiddeti ile ortalama arasındaki fark}}{\text{Artan profillerin ortalaması}} = \frac{1}{7} = 0.143$$

$$\frac{6 \text{ numaralı profilin şiddetine eşit veya büyük profil sayısı}}{\text{Ortalamanın üzerinde kalan profil sayısı}} = \frac{3}{3} = 1.0$$

Şekil 3.4.50. Spektrum Aşırı Yük (SOL) İndeksinin tanımlanması

Şekil 3.4.50 incelendiğinde 4 numaralı profilin ortalama ile arasındaki farkın artan profillerin ortalamasına olan oranının 0.285 olduğu görülecektir. Yine 4 numaralı profil için kendisine eşit veya daha büyük profil sayısının ortalamanın üzerinde kalan profil sayısına oranı 0.666'dır. Bu iki değer 6 numaralı profilde sırasıyla 0.143 ile 1.0 olarak hesaplanmıştır. 0.285 ile 0.666 değerleri 6 numaralı profilden elde edilen değerlere göre birbirine daha yakın olduğundan Spektrum Aşırı Yük İndeksi  $1+0.285=1.285$  olarak belirlenir. 10 numaralı profil için de benzer hesaplamalar yapılabilir ve sonuçların 4 numaralı profil ile aynı olduğu görülebilir.

Spektrum Aşırı Yük (SOL) İndeksi yorulma çatlak ilerleme denklemlerinde  $\Delta K$  terimine çarpan olarak kullanılmaktadır. Denklem (3.4.34-3.4.37)'te Spektrum Aşırı Yük İndeksinin (SOL\_index) farklı modellerle kullanımı gösterilmektedir.

Forman veya Walker katsayıları ile Wheeler Model 
$$\frac{da}{dN} = \phi_R (C \cdot SOL\_index \cdot \Delta K)^n \quad (3.4.34)$$

Forman Modeli ile Wheeler Modeli 
$$\frac{da}{dN} = \phi_R \left[ \frac{C_F (SOL\_index \cdot \Delta K)^m}{(1-R)^n K_{IC} - SOL\_index \cdot \Delta K} \right] \quad (3.4.35)$$

Walker Modeli ile Wheeler Modeli 
$$\frac{da}{dN} = C \left[ \frac{SOL\_index \cdot \Delta K}{(1-R)^{1-\gamma_w}} \right]^n \quad (3.4.36)$$

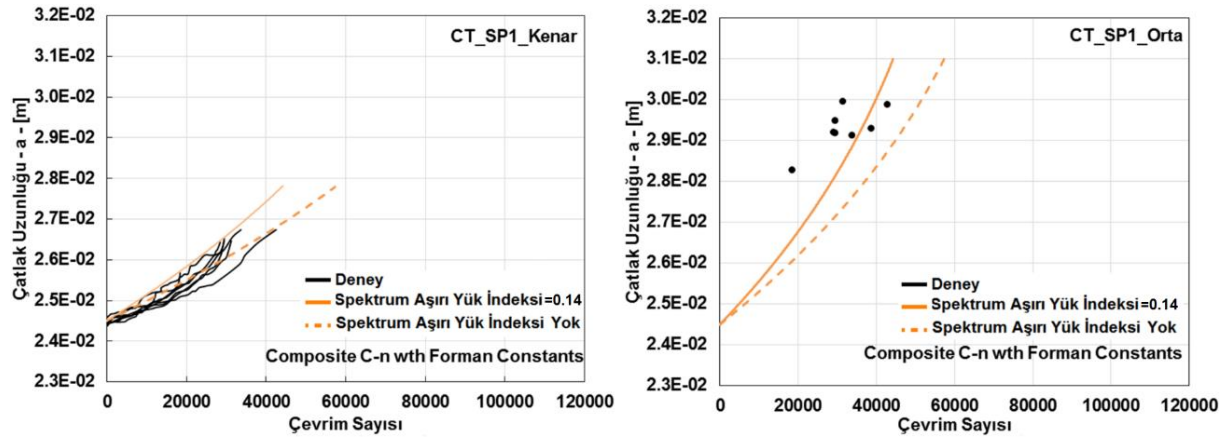
Willenborg Modeli 
$$\frac{da}{dN} = \frac{C_F (SOL\_index \cdot \Delta K_{eff})^m}{(1-R_{eff}) K_C - SOL\_index \cdot \Delta K_{eff}} \quad (3.4.37)$$

Tablo 3.4.14'te, CT numuneleri ile yapılan değişik genlikli çatlak ilerleme deneyleri için daha önce açıklanan farklı modellerin kullanımında, Spektrum Aşırı Yük İndeksi uygulanan ve

uygulanmayan durumlara ait analiz sonuçları ve deneysel veriler ile mukayeseleri verilmiştir. Daha önce detayları verilen Spektrum 1 (SP1) ve Spektrum 2 (SP2) yük profilleri için hesaplanan SOL İndeks değerleri sırasıyla,  $0.14+1=1.14$  ve  $0.24+1=1.24$ 'tür. Tablodan da görüldüğü üzere Spektrum Aşırı Yük İndeksi uygulandığında simülasyon sonuçları deney sonuçları ile daha uyumlu hale gelmiştir. Ayrıca, çatlak ilerleme eğrilerinin daha detaylı incelenebilmesi için Şekil 3.4.51-3.4.63 arasında her bir modele ait grafikler verilmiştir.

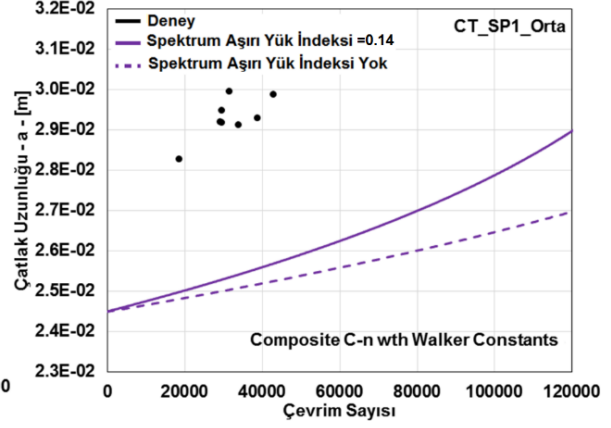
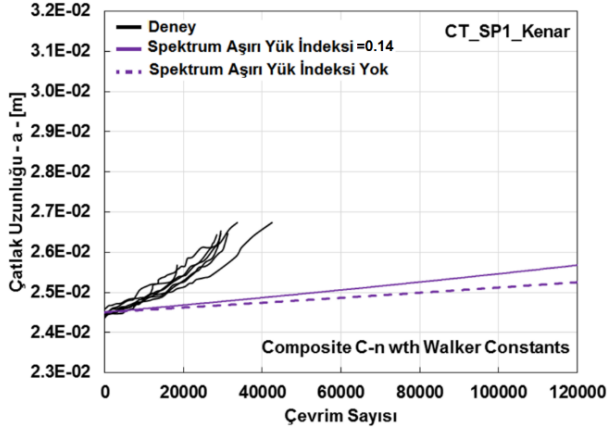
Tablo 3.4.14. Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi problemleri için Spektrum Aşırı Yük İndeksi uygulanmasının değişik modeller üzerinde etkisi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması

Model	İlerleme Davranışı	Çatlak İlerleme Denklemi	SOL index	CT SP1				CT SP2			
				Çevrim Sayısı		K. Çatlak Uzunluğu		Çevrim Sayısı		K. Çatlak Uzunluğu	
				Test	Sim.	Test	Sim.	Test	Sim.	Test	Sim.
Composite C-n	Wheeler	Forman Const wth Paris-Erdoğan	✓		44200		27.8mm		20418		27.6 mm
Composite C-n	Wheeler	Forman Const wth Paris-Erdoğan	✗		57200		27.8 mm		30996		27.5 mm
Composite C-n	Wheeler	Walker	✓		111200		25.6 mm		23124		26.0 mm
Composite C-n	Wheeler	Walker Const. wth Paris-Erdoğan	✗		175000		25.6 mm		56677		26.4 mm
Walker	Wheeler	Walker	✓		43200		27.6 mm		20172		27.7 mm
Walker	Wheeler	Walker	✗		63500		27.5 mm		38868		27.6 mm
Forman	Wheeler	Forman	✓	31590	55200	26.8 mm	27.2 mm	21892	21648	27.2 mm	27.5 mm
Forman	Wheeler	Forman	✗		82200		27.2 mm		41574		27.4 mm
Xiaoping	Wheeler	Paris-Erdoğan	✗		189000		39.6 mm		52890		27.3 mm
GWillenborg	GWillenborg	Forman	✓		63200		27.2 mm		29593		26.4 mm
G.Willenborg	GWillenborg	Forman	✗		95700		30.5 mm		52156		29.9 mm
RMS (Manjunatha) RMS		Newman	✗		26700		31.1 mm		28556		31.0 mm

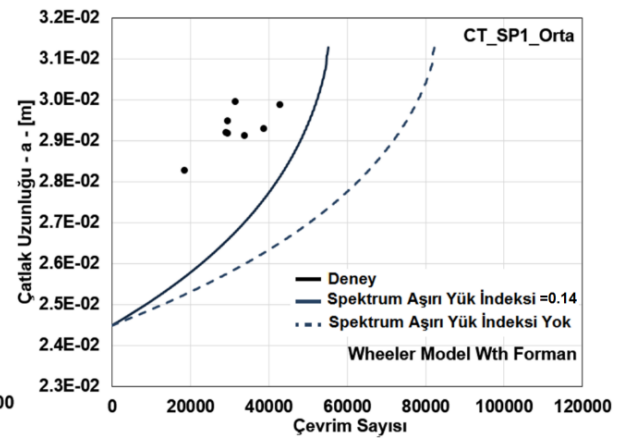
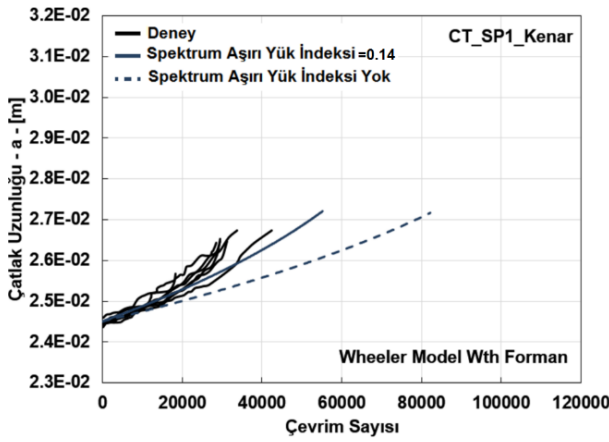


Şekil 3.4.51. Forman katsayıları ile Wheeler modelinin çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1)

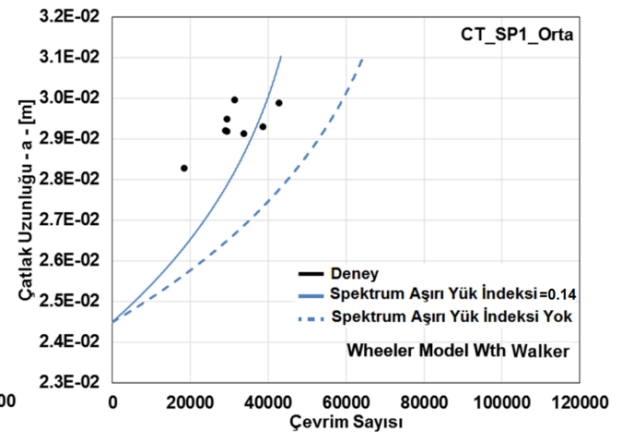
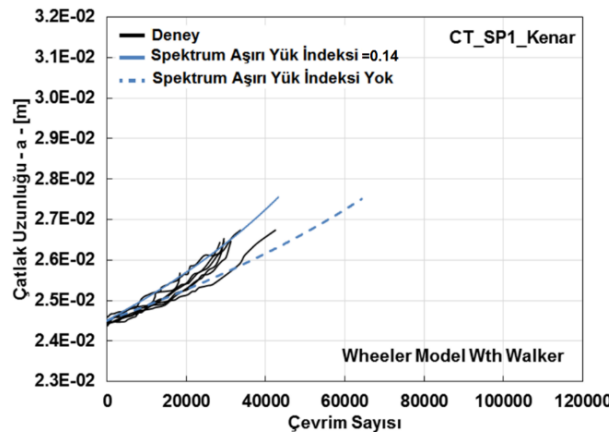




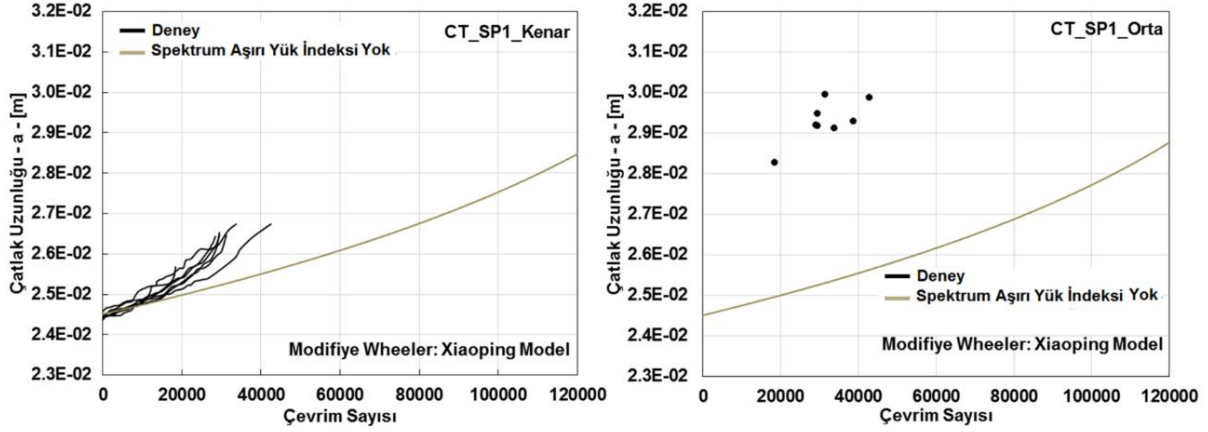
Şekil 3.4.52. Walker katsayıları ile Wheeler modelinin çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1)



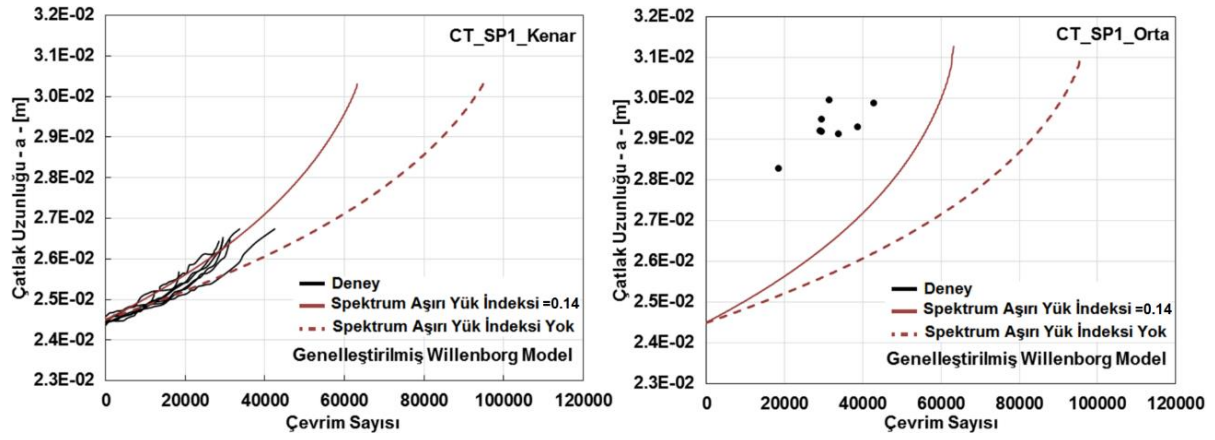
Şekil 3.4.53. Forman modelinin Wheeler modelinde kullanımında çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1)



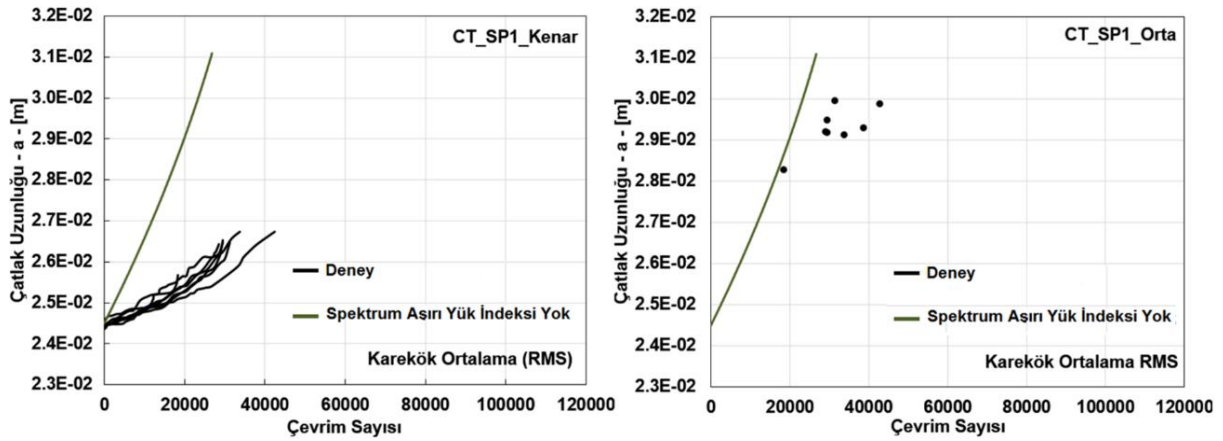
Şekil 3.4.54. Walker modelinin Wheeler modelinde kullanımında çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1)



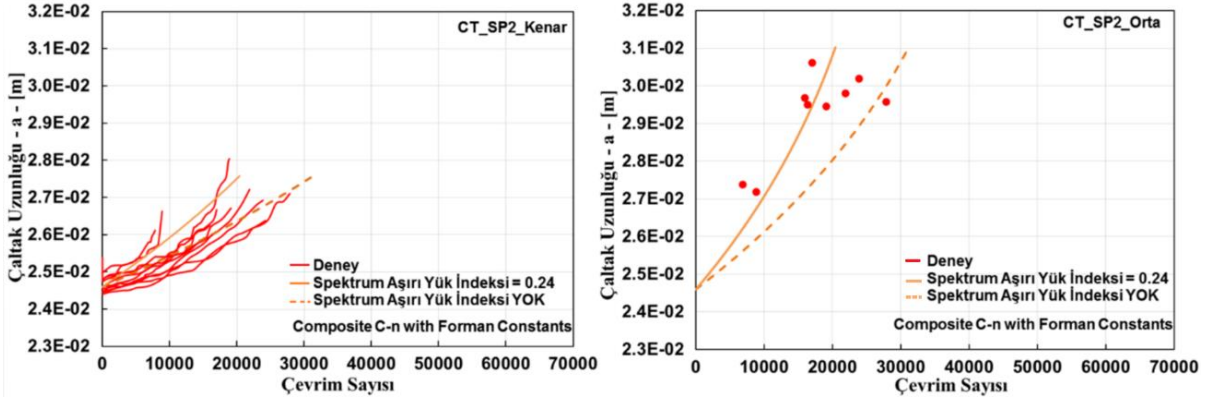
Şekil 3.4.55. Xiaoping çatlak ilerleme denklemi ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1)



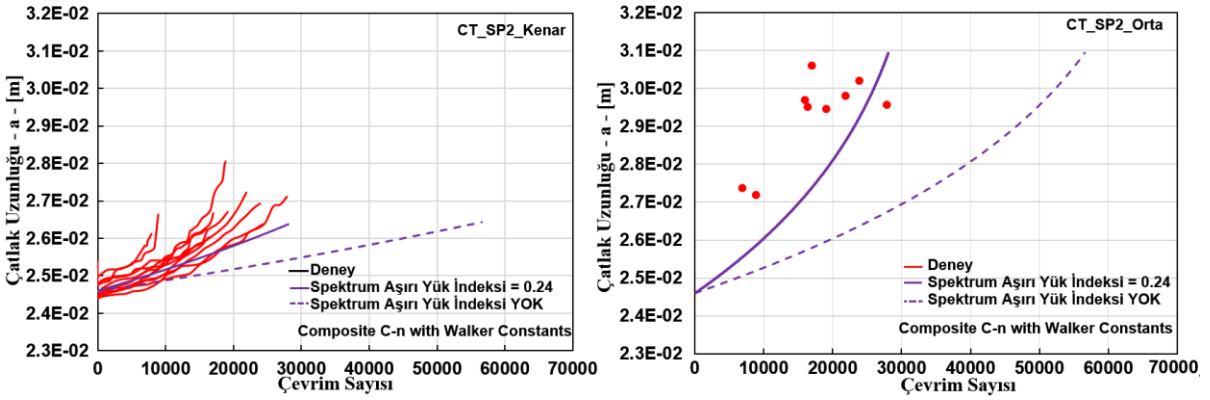
Şekil 3.4.56. Genelleştirilmiş Willenborg çatlak ilerleme denklemi ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1)



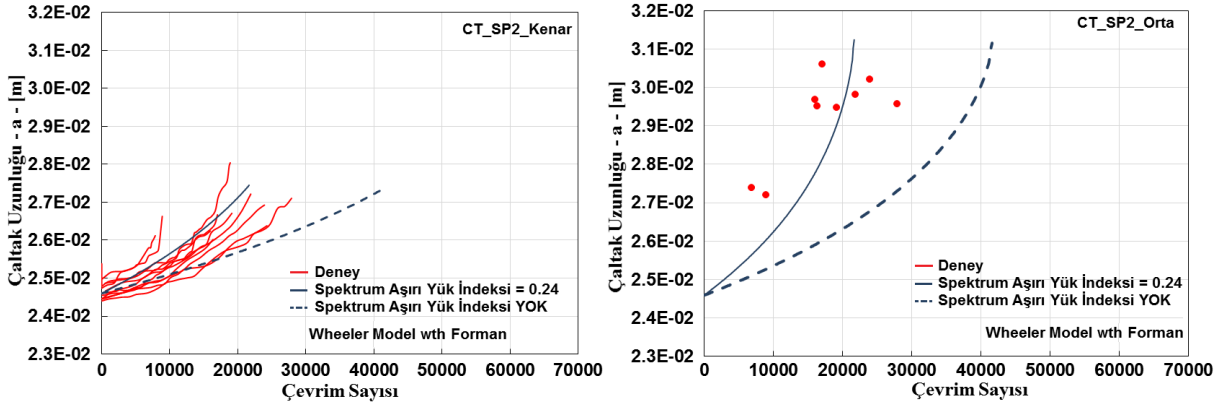
Şekil 3.4.57. Karekök ortalama (RMS) yaklaşımı ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1)



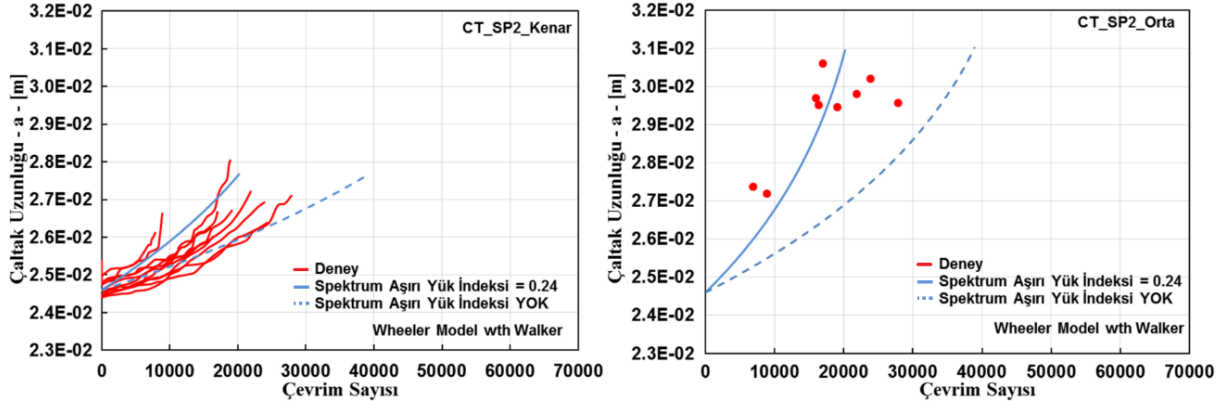
Şekil 3.4.58. Forman katsayıları ile Wheeler modelinin çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2)



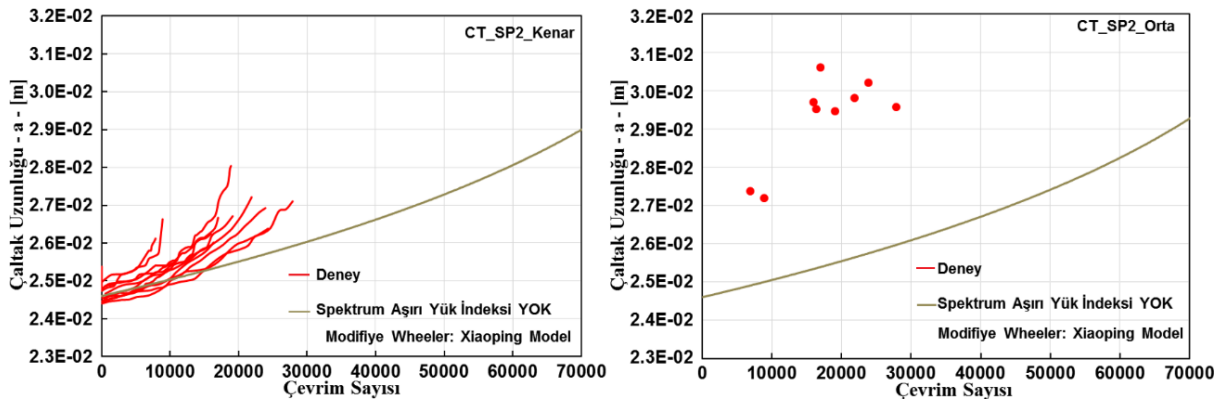
Şekil 3.4.59. Walker katsayıları ile Wheeler modelinin çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2)



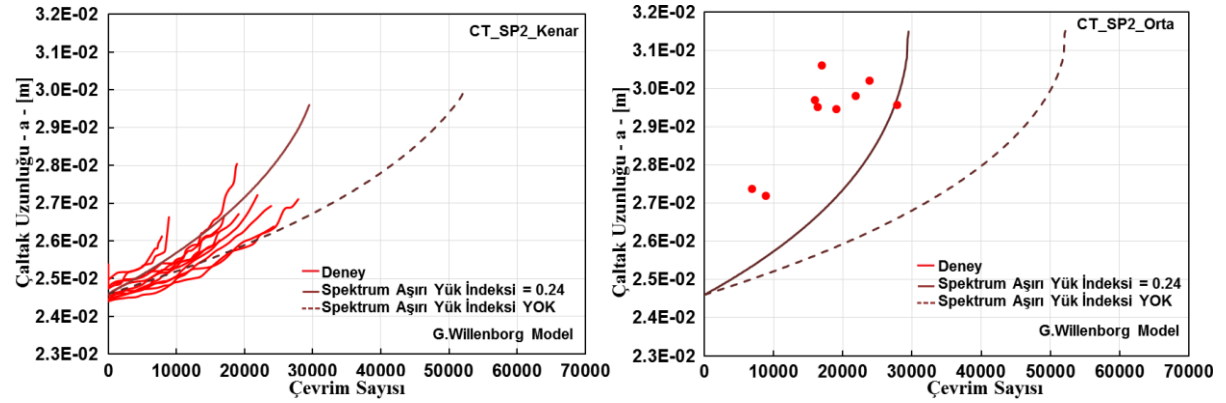
Şekil 3.4.60. . Forman modelinin Wheeler modelinde kullanımında çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2)



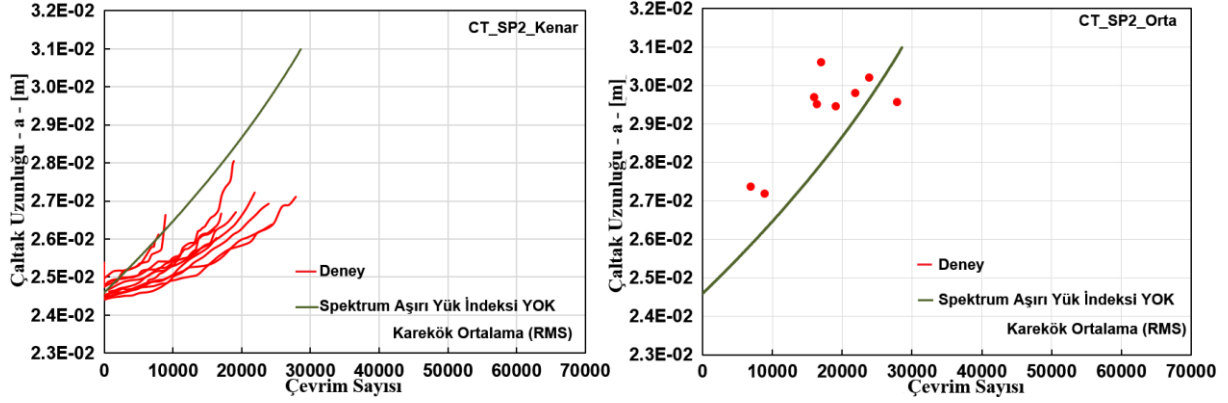
Şekil 3.4.61. Walker modelinin Wheeler modelinde kullanımında çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2)



Şekil 3.4.62. Xiaoping çatlak ilerleme denklemi ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2)



Şekil 3.4.63. Genelleştirilmiş Willenborg çatlak ilerleme denklemi ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP1)



Şekil 3.4.63. Karekök ortalama (RMS) yaklaşımı ile çatlak ilerleme ömür grafiği (SP2)

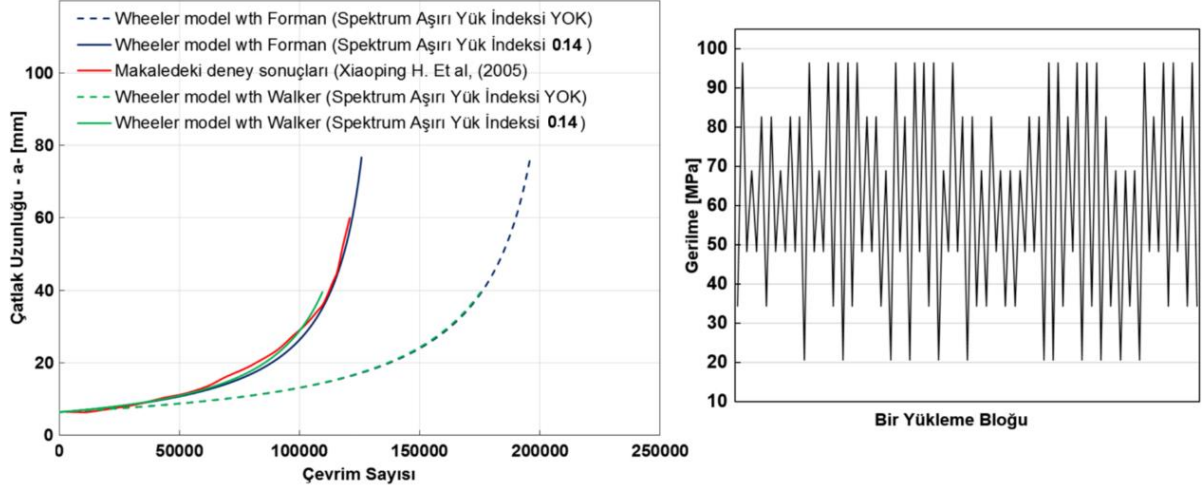
Spektrum 1 ve 2 yükleriyle gerçekleştirilen simülasyonlar toplu olarak incelendiğinde 2 boyutlu çatlak ilerlemesi için Spektrum Aşırı Yük İndeksi'nin kullanımının uygun olduğu görülmektedir. Uygulanan farklı modeller içinden Walker veya Forman çatlak ilerleme denkleminin Wheeler modelindeki çatlak ilerleme davranışıyla kullanılması durumunun (Şekil 3.4.53, 54, 60, 61) deneylere yakın sonuç verdiği görülmektedir.

Yukarıda detayları verilen yaklaşımlar ile geliştirilmiş olan FORTRAN programı ile CT numunelerinde SP1 ve SP2 spektrum yükleme durumları için hesaplanan ömür değerleri laboratuvarımızda yapılan deneylerle uyum sağlamıştır. SOL İndeks kullanımı ile geliştirilmiş olan iyileştirilmiş modelin ve programın, literatür verileri (R. Porter, 1972, Xiaoping vd., 2005) ile de karşılaştırılması amaçlanmıştır. Literatürden bulunan bir makalede karışık genlikli yükleme altındaki bir plakada iki boyutlu çatlak ilerlemesi çalışılmıştır. Gerilme şiddet faktörü formülü makaleye göre güncellenerek, R.Porter (1972) tarafından sunulan spektrum ve çatlak boyutu ile simülasyon yapılmıştır. Çalışmada malzeme katsayıları C-n verilmediği için, aynı malzeme için literatürden elde edilen katsayılar kullanılmıştır (Bölüm 11, Norman E Dowling, 2012).

$$C_{\text{walker}} = 1.42 \cdot 10^{-8} \text{ [mm/çevrim \& MPa.m}^{0.5}] \text{ ve } n = 3.59 \text{ m} = 6.80$$

$$C_{\text{Forman}} = 2.31 \cdot 10^{-6} \text{ [mm/çevrim \& MPa.m}^{0.5}] \text{ ve } n = 3.38$$

Şekil 3.4.64'ten görüldüğü üzere, SOL İndeks kullanımı (makalede verilen yükleme için  $0.14+1=1.14$  olarak hesaplanmıştır) ile ilgili çalışmadaki deneysel çatlak ilerleme eğrisi oldukça yakın bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Böylece, değişken genlikli yük altında SOL İndeks kullanımı içeren iyileştirilmiş çatlak ilerleme modeli sonuçlarının bağımsız bir çalışma sonuçları ile de sağlanması yapılmıştır.



Şekil 3.4.64. Literatürden bir çalışma ile sonuçların karşılaştırılması

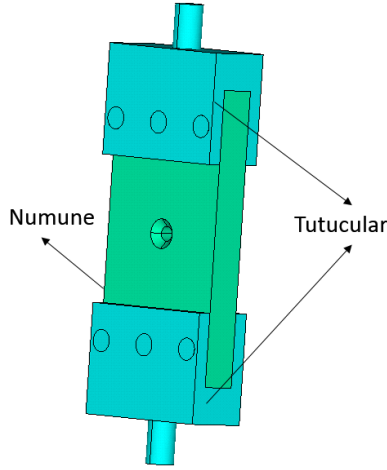
### 3.5. Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Çalışmaları

Projemizde üç boyutlu çatlak ilerlemesini incelemek için yüzey çatlaklı içeren bir numune üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Numune tipi, geometrisi belirlendikten sonra deneysel ve hesaplamalı analizler gerçekleştirilmiştir. Numune geometrisinde bazı toleranslar belirlenerek bu toleransların gerilme şiddet faktörüne etkisi deney tasarımı analizleri ile belirlenmiştir. Deney tasarımı analizlerinin sonuçları değerlendirilerek, çatlak ucundaki farklı noktalar için gerilme şiddet faktörü transfer fonksiyonları belirlenmiştir.

#### 3.5.1. Numune ve Test Sistemi Tasarımı

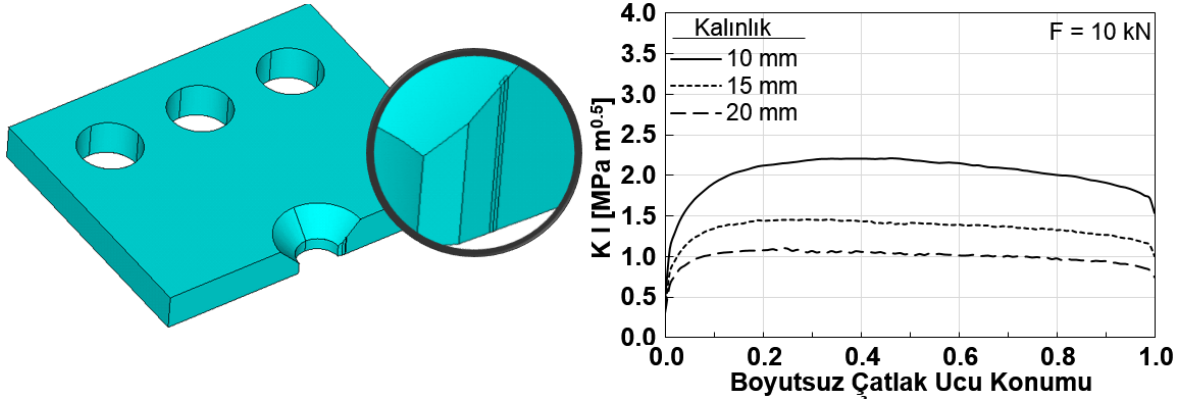
ASTM standartlarında önerilen CT numunesi iki boyutlu çatlak ilerlemesi (modellemede iki boyutlu sonlu eleman modeli gereklidir) için kullanılmakta olup, üç boyutlu yüzey çatlaklı için standartlarda önerilen bir numune tipi bulunmamaktadır. Dolayısıyla, önce üç-boyutlu yüzey çatlaklı'nın hem deneysel hem de hesaplamalı olarak incelenebileceği numune geometrileri üzerinde çalışılmıştır. Proje önerisinde verilen iki farklı numune tipi üzerinde de fizibilite çalışmaları yapılmıştır.

Öncelikle Şekil 3.5.1'de görüldüğü gibi bir havşa delikli plakaya çekme yükü uygulanması planlanmıştır. 10 mm kalınlığında bir plaka üzerine havşa deliği açılmış ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deney için gerekli çekme yükü belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.5.1. Havşa delikli plakada yorulma çatlak ilerleme test düzeneği

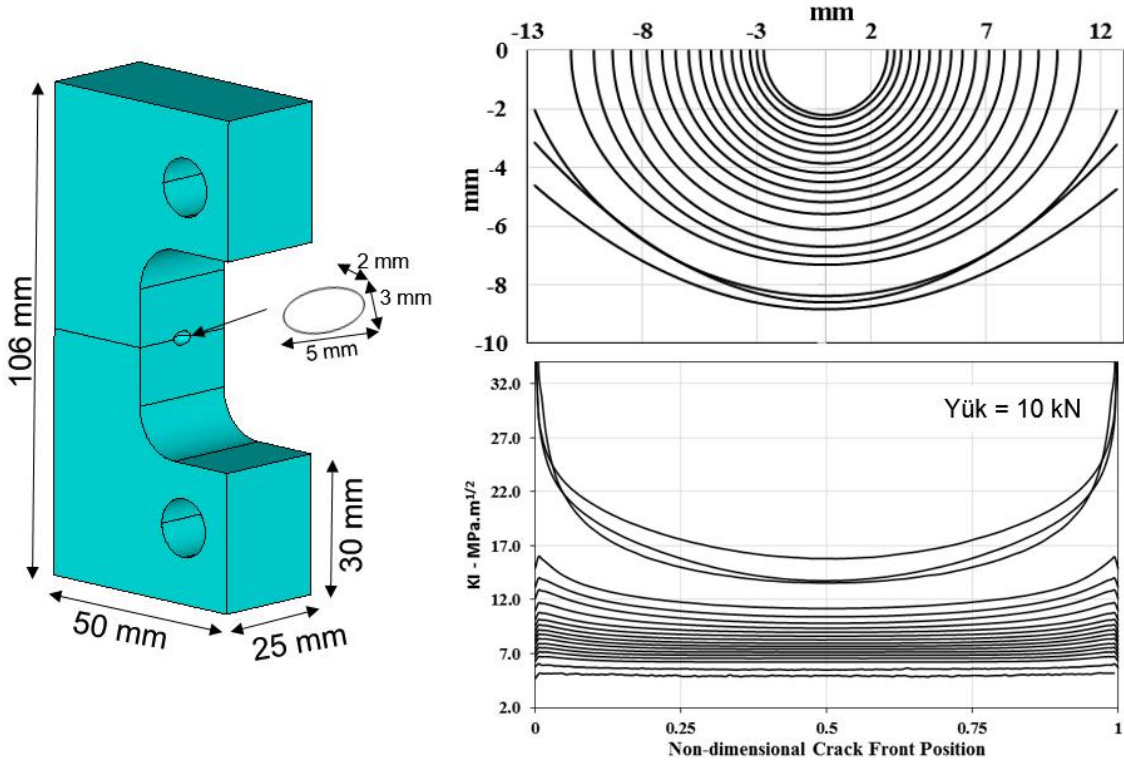
Havşa deliğinin düz kısmı boyunca çatlak oluşması durumu incelenmiş ve sonuçlar Şekil 3.5.2'de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi 10 kN yük altında çatlak ucunda oluşan gerilme şiddet faktörleri oldukça düşüktür. Ayrıca 10 mm kalınlıktaki plaka deneylerde düzlem gerilme durumunun oluşmasına sebep olabileceğinden numune kalınlığında da artırılmasına gidilmesi gerekli olabilir. Hem mevcut gerilme şiddet faktörlerinin düşük çıkmış olması, hem de kalınlığın artırılması çok daha yüksek yüklere çıkılmasını zorunlu kılacaktır.



Şekil 3.5.2. Havşa delikli plakada kalınlık boyunca ilerlemiş çatlak için gerilme şiddet faktörü dağılımları

Havşa delikli plakada elde edilen gerilme şiddet faktörlerinin oldukça düşük değerlere sahip olması nedeniyle, literatürde (Andresen P. vd. 2004), (James L.A, 1997) çalışmalarında kullanılmış Lee James numunesi olarak adlandırılan bir numune üzerinde çalışılmıştır. Bu numune genel olarak CT numunesine benzemekle birlikte numune yüksekliği artırılmıştır. Böylece numunedeki çatlakın önden görüntülenmesi de mümkün olabilecektir.

Şekil 3.5.3'te orijinal boyutları ile Lee James numunesi ve üzerine açılan elipsoit şeklinde bir oyuk görülmektedir. Oyuk içerisinde en boy oranı ( $a/2c = 1$ ,  $a = 2.75$ ) olan bir başlangıç çatlakı yerleştirilmiştir. Daha sonra 10 kN yük altında çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Çatlak ilerleme profilleri ve KI gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.5.3'te verilmiştir.

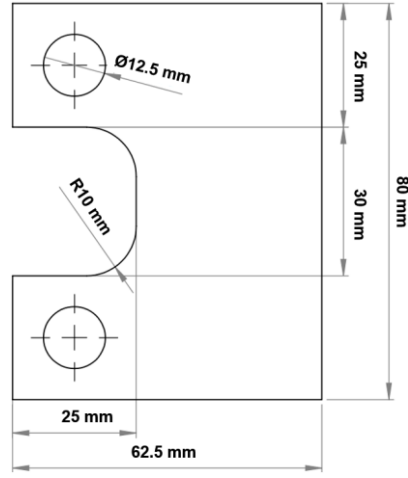


Şekil 3.5.3. Lee James numunesi ilk boyutları için çatlak ilerleme analizleri

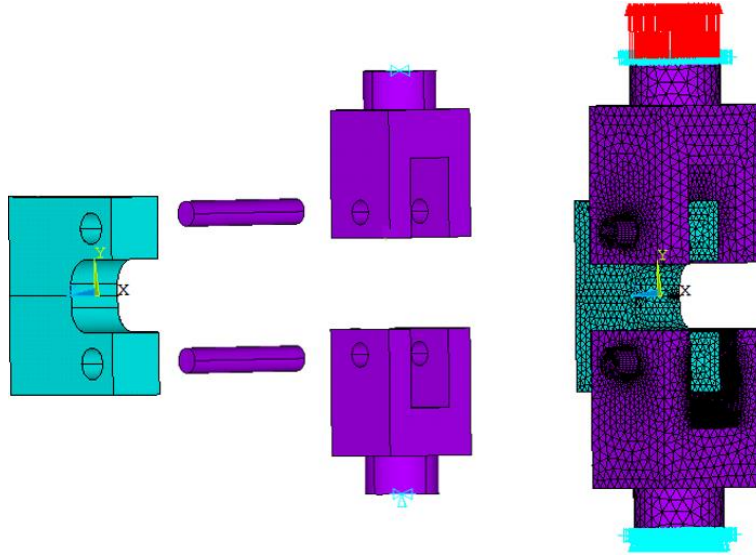
Yüzey çatlakının daha hızlı şekilde ilerleyebilmesinin sağlanması için Lee James numunesi üzerinde değişiklikler yapılmasına karar verilmiştir. Çatlak ilerlemesi için daha fazla kesit uzunluğu sağlamak amacıyla numune genişliği de 50 mm den 62.5 mm'ye çıkarılmış ve malzeme tasarrufu için numune boyu 106 mm'den sırasıyla 90 mm ve 80 mm'ye düşürülmüştür. Numune üzerinde karar verilen son boyutlar Şekil 3.5.4'te verilmiştir. 62.5 mm genişliğinde ve 80 mm boyundaki numune için, istenen gerilme şiddet faktörlerini sağlayan yük değerlerinde numune üzerinde bazı bölgelerde akma oluşup oluşmadığı, ayrıca yük-yer değiştirme eğrisinin doğrusal olup olmadığının kontrol edilmesi için elastoplastik analiz yapılmıştır. Elastoplastik analizde numune, pimler ve tutucular arasında temas mekaniği (contact) ilişkileri tanımlanmıştır. Bu analizin sonuçları incelenerek tasarlanan numunede çatlak ucu hariç herhangi bir yerde akma gerilmesinin aşılmadığı görülmüştür. Ayrıca çatlak ucu açılma yer değiştirmelerinin kuvvet şiddeti ile doğru orantılı bir şekilde değiştiği, yani



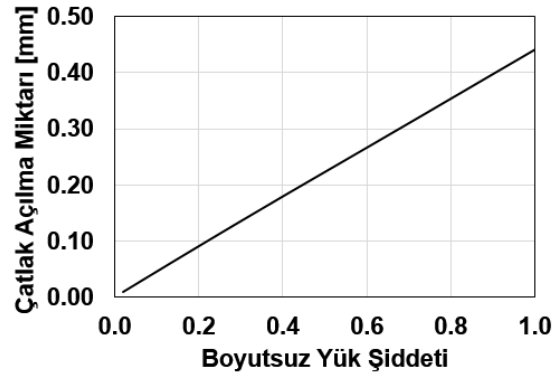
numune üzerinde çatlak ucu gerilme şiddet faktörünü etkileyecek ilave lineer olmayan bir şekil değişimi olmadığı gözlenmiştir. Elastoplastik analize ait detaylar Şekil 3.5.5 - 6'da verilmiştir.



Şekil 3.5.4. Güncellenmiş boyutlarıyla Lee James numunesinin nihai boyutları

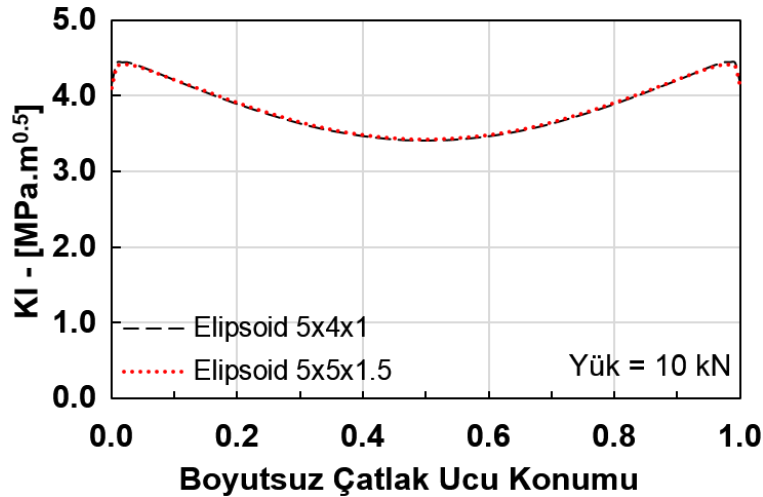


Şekil 3.5.5. Lee James numunesi, yükleme aparatları ve analiz sınır şartları



Şekil 3.5.6. Elasto-plastik analizde çatlak ucundaki açılma miktarı ile boyutsuz yük şiddeti ilişkisi, ( $P_{maks}= 50$  kN)

Numunenin dış boyutları belirlendikten sonra kırılma analizleri de yapılmıştır. Öncelikle, düzlemsel numune alın yüzeyinde 6 mm çatlak genişliği ( $c$ ) ve en boy oranı ( $a/2c = 0.5$ ) olan bir yüzey çatlağı numuneye yerleştirilmiş ve analiz edilmiştir. Beklendiği gibi bu durumda gerilme şiddet faktörleri çok düşük çıkmıştır. Bunun üzerine gerilme yığılması oluşturacak bir oyuk açılması planlanmıştır. En uygun oyuk boyutunun bulunması için kırılma analizleri yapılmıştır. Oyuk boyutları (genişlik, derinlik, yükseklik) ve elde edilen gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.5.7’de verilmiştir. Bu analizler deneylerde ön çatlak ve yorulma yükünün belirlenmesinde yol gösterici olmuştur. İki analizde de yaklaşık aynı gerilme şiddet faktörleri elde edilmiştir. Bu durumda çatlak ilerlemesinin daha fazla olacağı elipsoit (toplam genişlik 10 mm, derinlik 4 mm, ve toplam yükseklik 2 mm) seçilmiştir.



Şekil 3.5.7. Farklı oyuk geometrilerinin gerilme şiddet faktörüne etkisinin incelenmesi

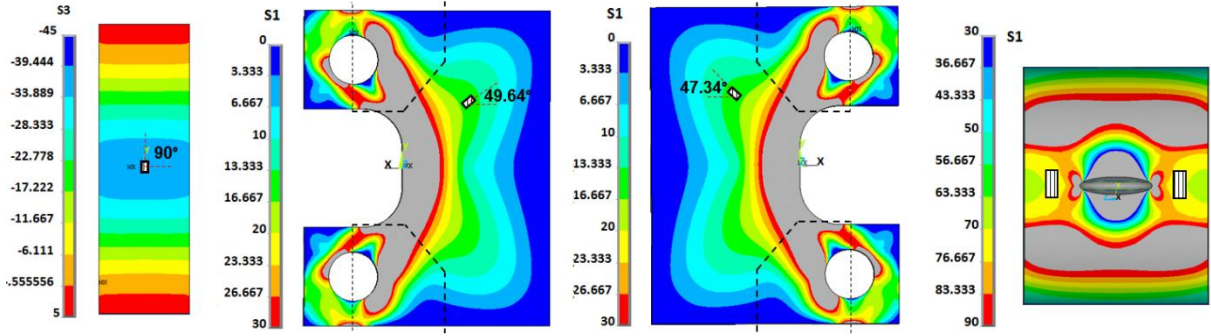
### 3.5.2 Deney Tasarımı Analizleri

Yorulma çatlak ilerlemesi deneylerinde ömür değerlerinde saçılıma sebep olacak faktörlerden birincisi olan malzeme özellikleri Bölüm 3.4.1’de incelenmişti. Saçılıma sebep olacak diğer faktör ise numunedeki geometrik toleranslar olacaktır. Geometrik saçılımların sonuçlar üzerindeki etkisini tespit etmek için numune geometrisindeki toleransların kombinasyonlarıyla çok sayıda deney yapmak gerekmektedir. Yüzlerce testin yapılmasındaki zorluk, zaman ve maliyet düşünüldüğünde deney şartlarını sağlayan sonlu elemanlar analizleri ile çözüme gitmenin uygun olacağı aşikârdır.

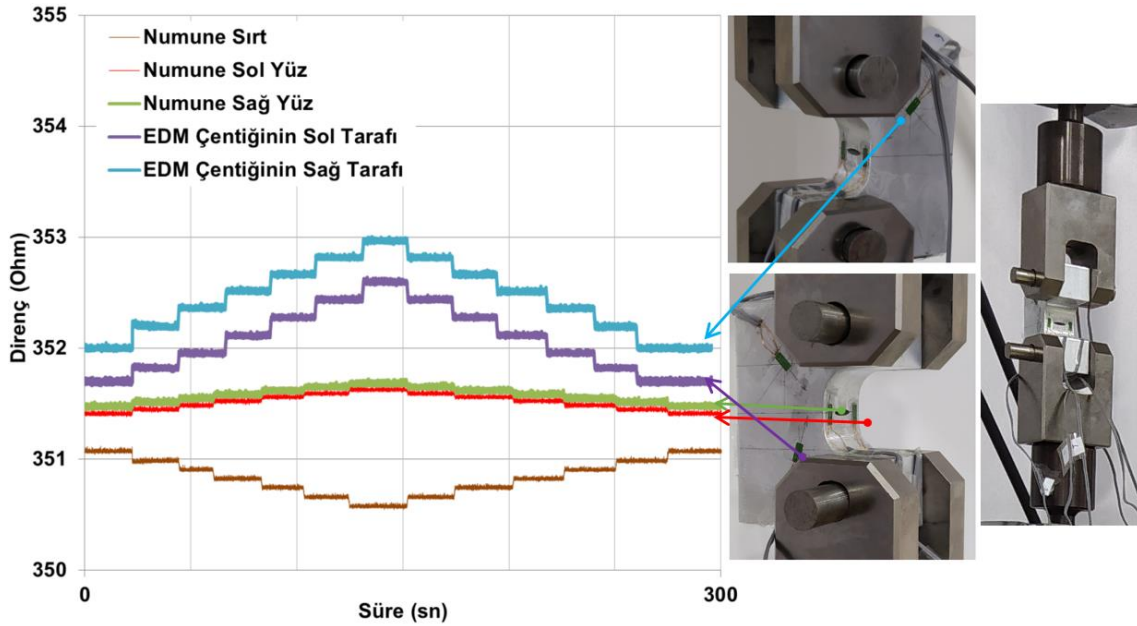
### 3.5.2.1 Gerinim Ölçer (Straingage) Doğrulama Testi

Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçların deney şartlarını tam olarak sağladığını kontrol etmek amacıyla model ve deneylerden elde edilen birim şekil değiştirmeleri kıyaslamak için gerinim ölçer (straingage) testleri yapılmıştır. Numunedeki çentiğin sol ve sağına, numunenin sırt, sol ve sağ (2 adet) yüzelerine olmak üzere toplam altı adet straingage yapıştırılmıştır. Ölçümler sırasında temassızlık probleminde dolayı straingagelerden birinden direnç verisi alınamamıştır.

Straingagelerin konum ve yönlerinin belirlenmesi için deney şartlarını sağlayan sonlu elemanlar analizi yapılmış ve ilgili düğüm noktalarındaki maksimum asal gerilmelerin yönleri belirlenmiştir (Şekil 3.5.8).



Şekil 3.5.8. Sonlu elemanlar yöntemiyle straingage konum ve yönlerinin belirlenmesi



Şekil 3.5.9. Straingagelerden alınan direnç değerleri

Straingage yapıştırılan numune, şiddetleri sırasıyla 0-2-4-6-8-10-12 kN olan kademeli yükler ile yüklenmiş ve sonrasında da tam tersi sıra ile yük kademeli olarak boşaltılmıştır. Bu sırada direnç değişimleri ölçülmüş ve ölçüm sonuçları Şekil 3.5.9'da verilmiştir. Tablo 3.5.1'de deney sırasında alınan ölçümler görülmektedir. Tablonun en alt satırında sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan birim şekil değiştirme değerleri yeşil kutucuklarda verilmiştir. Deneylerden alınan ölçümler ile sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerler arasındaki en düşük fark çentiğin sol tarafında %0.67, en yüksek fark ise çentiğin sağ tarafında %12.47 olarak hesaplanmıştır. Sağ ve sol yüzeyde straingageler benzer konumlarda ve yönlerdedir. Sonlu Eleman Analizi sonuçlarına göre de bu iki noktanın birim şekil değiştirme değerleri birbirine çok yakındır. Deney sırasında iki straingageden farklı sonuç alınması straingagelerin yapışması, ölçüm hatası gibi sebeplerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablodan görüldüğü üzere, sonlu eleman modeli ve deneylerden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri oldukça yakın uyum içerisinde olduğundan, deneylerde oluşan yük ve ilgili sınır şartlarının sonlu eleman modelinde doğru bir şekilde temsil edildiği ispat edilmiş bulunmaktadır.

Tablo 3.5.1. Straingage ölçüm sonuçları

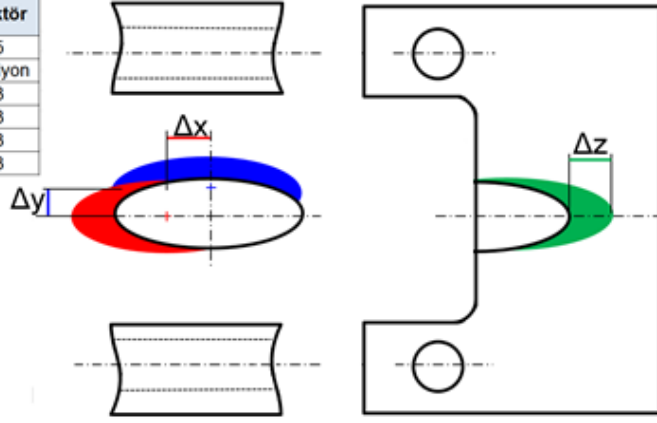
	Çentiğin Sol Tarafı	% Fark	Çentiği Sağ Tarafı	% Fark	Numune Sırtı	% Fark	Numune Sol	% Fark	Numune Sağ	% Fark
0-2 kN yüklemde $\epsilon$	0.000861602	-13.495	0.00135387	37.642	-0.000593925	15.010	0.000261981	14.617	0.00024011	5.766
0-4 kN yüklemde $\epsilon$	0.000870997	-12.551	0.00122978	25.026	-0.000564066	9.228	0.000251878	10.197	0.000244526	7.711
0-6kN yüklemde $\epsilon$	0.000940623	-5.561	0.00116643	18.585	-0.000558449	8.141	0.000259842	13.682	0.000239808	5.633
0-8kN yüklemde $\epsilon$	0.000980872	-1.520	0.0011261	14.485	-0.000552894	7.065	0.000253053	10.712	0.000237343	4.547
0-10kN yüklemde $\epsilon$	0.001002639	<b>0.666</b>	0.00110632	<b>12.475</b>	-0.000558468	<b>8.144</b>	0.000247234	<b>8.166</b>	0.000234043	<b>3.094</b>
	Çentiğin Sol Tarafı	% Fark	Çentiği Sağ Tarafı	% Fark	Numune Sırtı	% Fark	Numune Sol	% Fark	Numune Sağ	% Fark
10 kN yüklemde $\epsilon$ (ANSYS Çözümü)	0.000996010	0.67	0.000983620	12.47	-0.000516410	8.14	0.000228570	8.17	0.000227020	3.09

### 3.5.2.2 Geometrik Değişkenlerin Gerilme Şiddet Faktörlerine Etkisinin Belirlenmesi

Numune üzerinden yapılan ölçümlerle numune boyutlarında imalattan kaynaklı ufak sapmalar olabildiği görülmüştür. Tüm değişkenlerin kombinasyonu hesaplandığında 405 farklı durum ortaya çıkmaktadır. Her bir durumun sonuçlara etkisi kırılma analizleri ile FCPAS kullanılarak elde edilmiştir. Gerilme şiddet faktörlerini etkileyebilecek geometrik parametrelerden elipsoit konum koordinatları Şekil 3.5.10'da gösterilmiş ve diğer parametrelerin de dâhil olduğu limit verileri tabloda özetlenmiştir. Dalma erozyon (EDM) yöntemiyle açılacak olan oyuğun Lee James numunesi alın yüzeyinin tam olarak ortasına  $\pm 0.2$  mm sağ-sol ve/veya yukarı-aşağı kaçık işlenmesi ihtimali düşünülmüştür. Ayrıca ölçümlerle belirlenen bir etki de, oyuğun bir miktar daha fazla veya eksik derinlikte işlenebilmesi durumudur ( $\Delta z$ ). Bunun dışında başlangıç çatlağının yüzey boyutu ve CNC frezede hazırlanan numune kalınlığındaki hata da değişken olarak belirlenmiştir.

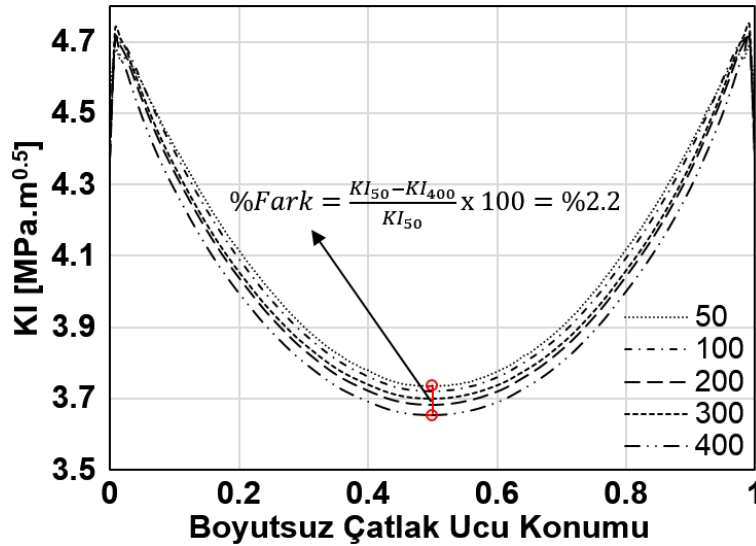
Değişkenler	Min. Değer	Maks. Değer	Artış Miktarı	Faktör
Çatlak Uzunluğu	6.6	7.4	0.2	5
Çatlak Derinliği	Çatlak Uzunluğuna bağlı bir fonksiyon			
Elipsoid ΔX	-0.2	0.2	0.2	3
Elipsoid ΔY	-0.2	0.2	0.2	3
Elipsoid ΔZ	-0.2	0.2	0.2	3
Kalınlık	24.9	25.1	0.1	3

Not: Ölçüler mm birimindedir.



Şekil 3.5.10. Lee James numunesinde geometrik değişkenler ve değerleri

Deney Tasarımı analizlerine başlanmadan önce, çatlak ucundaki sonlu eleman boyutunun yeterli olup olmadığını görmek için ön analizler yapılmıştır. Bu analizlerde numune, pimler ve tutucu arasında temas mekaniği ilişkileri tanımlanmıştır. Analizdeki diğer tüm durumlar sabit tutulurken çatlak ucundaki eleman boyutu sırasıyla çatlak derinlik boyutunun 50, 100, 200, 300 ve 400'de biri olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.5.11'den de görüldüğü üzere, sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Çatlak ucundaki elemanın derinliğin 50'de biri olduğu durum ile 400'de biri olduğu durum arasında %2.2 fark oluşmaktadır. Bu değer yeterli eleman boyutunun sağlandığını göstermektedir. Bundan sonraki analizlerde çatlak ucu eleman boyutu çatlak derinliği/100 olarak tanımlanmıştır.

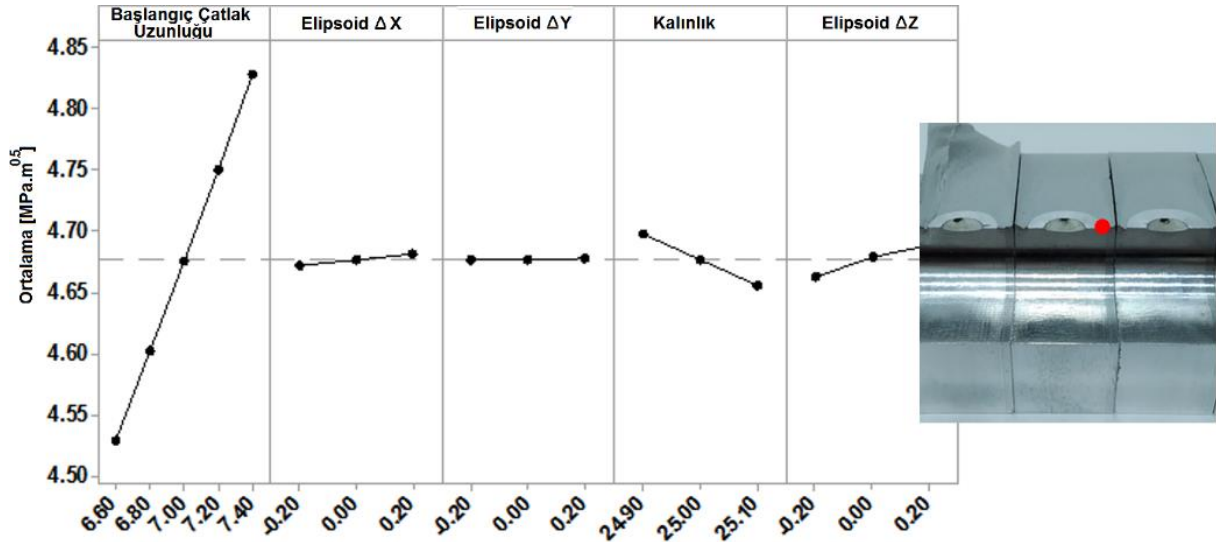


Şekil 3.5.11. LJ numunesinde çatlak ucu eleman boyutunun gerilme şiddet faktörüne etkisi

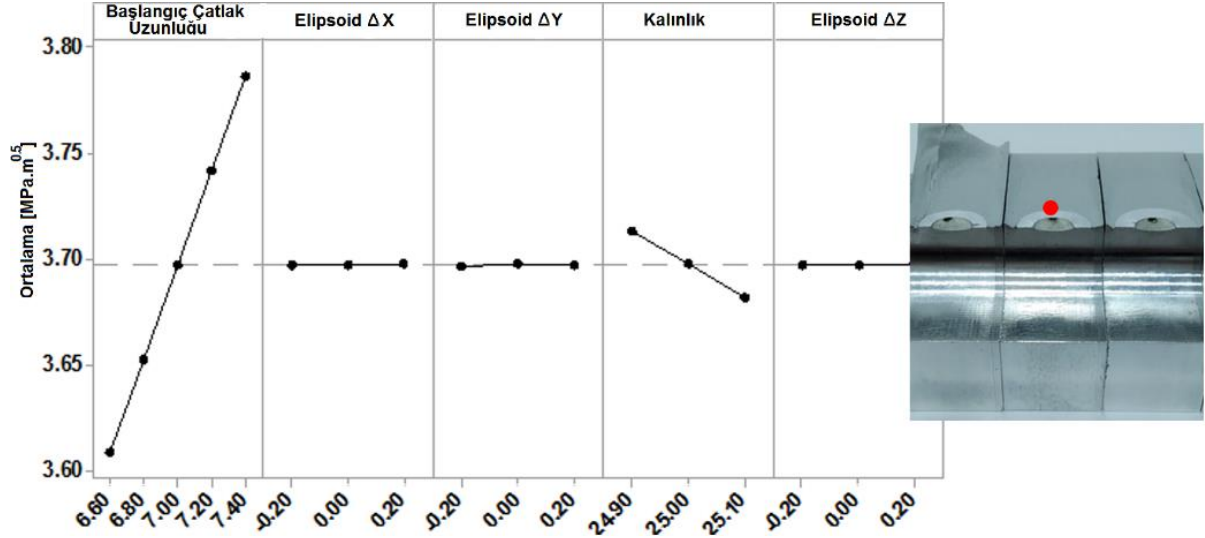
Lee James numunesi üzerine parametrik olarak elipsoit oyuk ve yüzey çatlakları yerleştirebilen ANSYS makroları hazırlanmıştır. Makrolarda numune, pim ve tutucu deney şartlarıyla birebir uyumlu bir şekilde modellenmiş olup, aralarındaki temas mekaniği ilişkileri tanımlanmıştır. Modelleme sonrasında ANSYS v12.1 sonlu elemanlar yazılımı ile tüm montajın gerilme analizi yapılmıştır. Elden edilen ANSYS çözümünden, numune yükleme deliklerindeki düğüm noktalarından kuvvet altındaki yer değiştirmeleri alınarak kırılma analizlerine yer değiştirme sınır şartı olarak girilmiştir. Alt-modelleme (sub-modeling) yapılarak çatlak önü boyunca oluşan gerilme şiddet faktörleri FCPAS çözücüsü FRAC3D kullanılarak hesaplanmıştır.

### 3.5.3 Transfer Fonksiyonu Belirleme

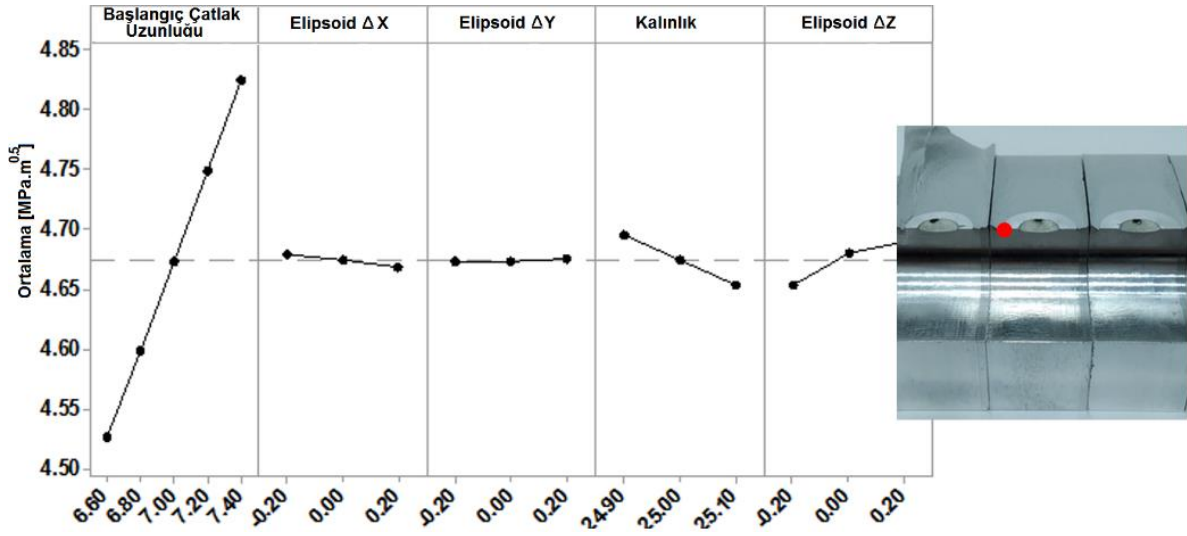
Tüm etkileri incelemek için 405 adet deney tasarımı analizi yapılmıştır ve MINITAB yazılımı kullanılarak Şekil 3.5.10'da belirlenen geometrik değişkenlerin her birinin bağımsız olarak gerilme şiddet faktörü sonuçlarına etkisi belirlenmiştir. Yapılan ana etki (main effect) analizinde kalınlığın lineer etkisi olduğu,  $\Delta x$  ve  $\Delta y$ 'nin (elipsoit oyuk için sağ/sol – aşağı yukarı kaçıklık) gerilme şiddet faktörü üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir.  $\Delta z$  ile gösterilen, oyuk derinliğinin fazla/az olması durumu sonuçlar üzerinde doğrusal duruma yakın bir etkiye sahiptir. Yine çatlak boyutunun ve kalınlığın da sonuçları doğrusal olarak etkilediği görülmüştür. Çatlak ucundaki farklı noktalar için elde edilen ana etki analiz sonuçları Şekil 3.5.12-14'te verilmiştir.



Şekil 3.5.12. LJ numunesi geometrik değişkenlerinin gerilme şiddet faktörüne etkisi (sağ uç)

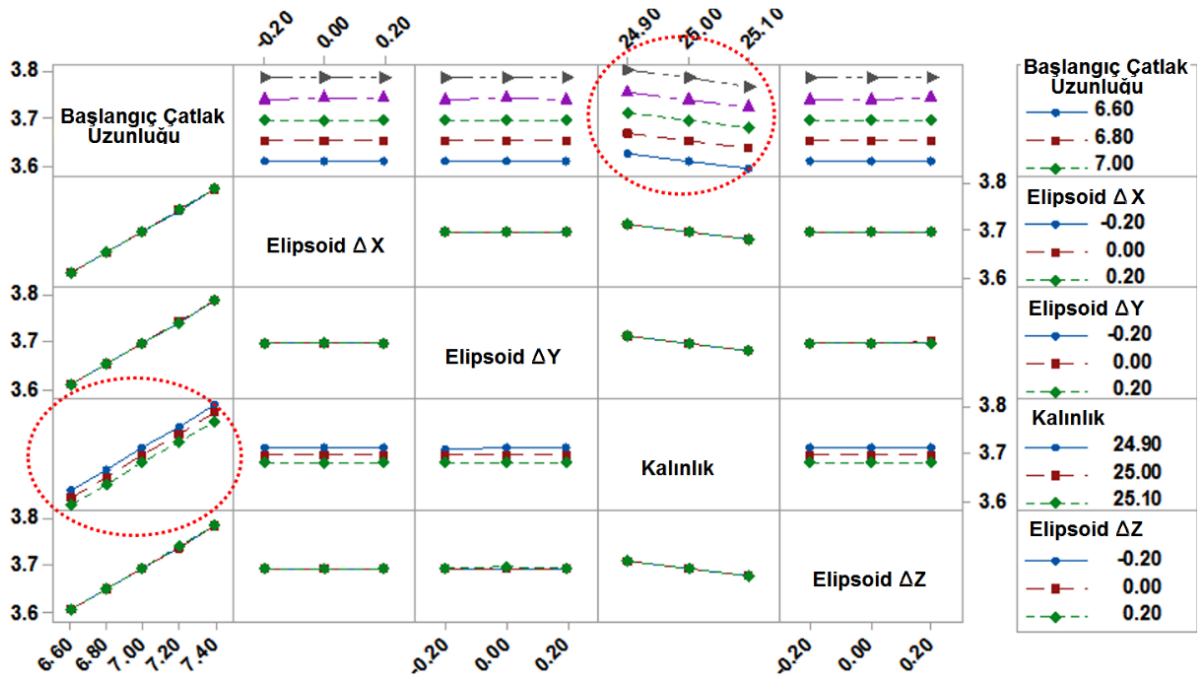


Şekil 3.5.13. LJ numunesi geometrik değişkenlerin gerilme şiddet faktörüne etkisi (orta-derinlik noktası)



Şekil 3.5.14. LJ numunesi geometrik değişkenlerin gerilme şiddet faktörüne etkisi (sol uç)

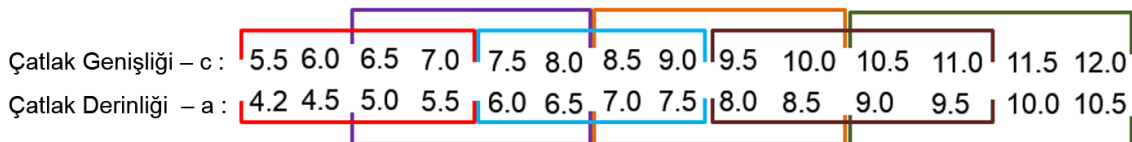
Şekil 3.5.15'te değişkenler arasındaki etkileşim ilişkisi (interaction effect) gösterilmektedir. Çatlak önünde ele alınan sağ, sol ve orta noktadaki grafikler çok benzer olduğundan sadece orta nokta için hazırlanan grafik verilmiştir. Şekil 3.5.15'e göre, çatlak uzunluğu ve kalınlık değişkenlerinin bir arada kullanılması sonuçları etkilemektedir. Ancak elipsoid  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  ve  $\Delta z$  ile çatlak uzunluğu arasında bir etkileşim görülmemektedir.



Şekil 3.5.15. Lee James numunesi geometrik değişkenlerin gerilme şiddet faktörü üzerinde etkileşim ilişkileri (orta derinlik noktası)

Etkisi olmayan faktörler ve kalınlık, analiz kombinasyonundan çıkarılmış daha sonra deney tasarımı analizleri tablosu Şekil 3.5.16'da verilen çatlakın muhtemel olarak erişmesi mümkün olan genişlik ve derinlik ölçüleri ile güncellenmiştir. Elipsoit EDM çentiğinin yatay eksantrikliğini temsil eden  $\Delta x$  değerlerinin ve etkisinin düşük olması ve değişkenin denklemden çıkarılması, K1 hesabında sağ ve sol uç için ayrı ayrı transfer fonksiyonu elde edilmesi ihtiyacını da ortadan kaldırmıştır.

Şekil 3.5.16'da her bir renk ile belirtilen kutucuk içindeki uzunluklar birbiri ile kombinasyon halinde farklı durumu ifade etmekte ve toplam 76 farklı durumu içermektedir. Elipsoit çentik için  $\Delta z$  parametresi için de üç farklı değer göz önüne alındığında, toplam 228 analiz içeren deney tasarım analizi matrisi oluşturulmuştur.



Şekil 3.5.16. Deney tasarımı analizleri için çatlak boyutları kombinasyonu

Yukarıda belirtilen 228 farklı durum için gerçekleştirilen kırılma analizlerinin tamamlanması ve elde edilen çözümlerden çatlak ucu derinlik ve serbest yüzey noktaları değerleri ele alınarak



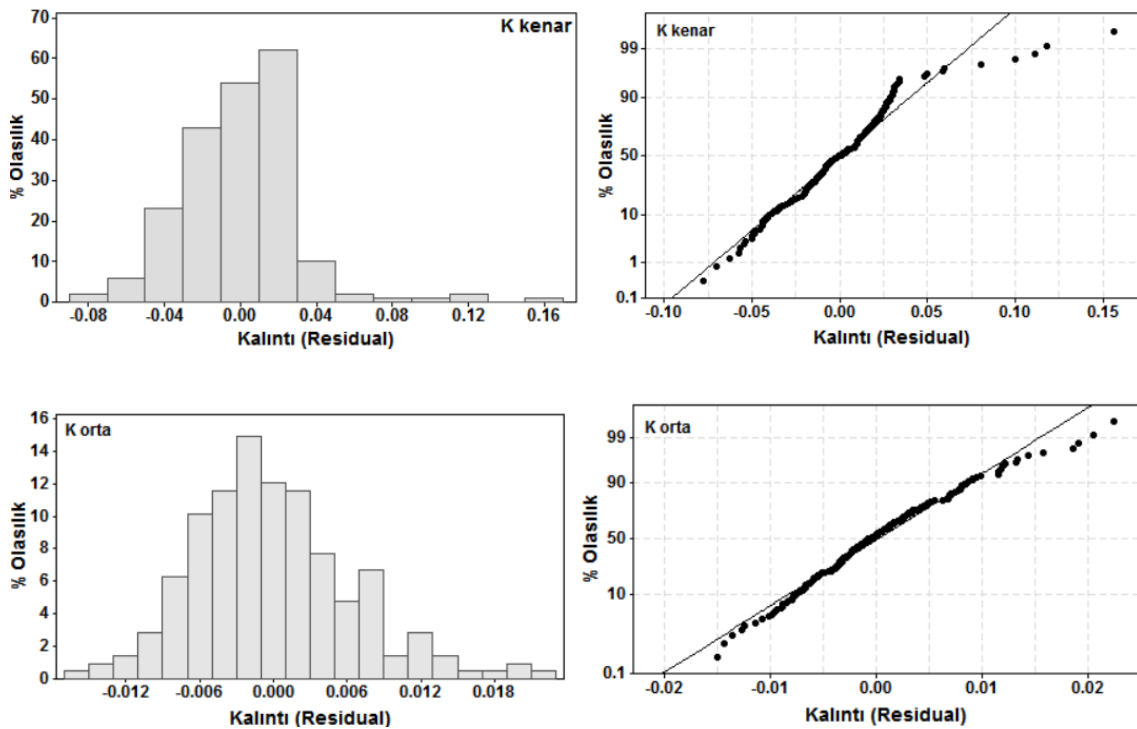
yapılan çok parametrelili regresyon analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

A çatlak uzunluğu, B çatlak derinliği, C elipsoit  $\Delta z$  ifade etmek üzere;

$$\text{Kenar için: } (R^2 = \%98.2) \quad KI = 1.1458 - 248.3 A + 69.66 B - 94.7 C + 17710 A^2 - 264201 C^2$$

$$\text{Orta için: } (R^2 = \%98.99) \quad KI = 0.33277 + 52.214 A - 20.119 B + 7.86 C + 36443 C^2$$

Önerilen transfer fonksiyonları için normal olasılık grafiği (Normal Probability Plot) ve histogram grafikleri ayrı ayrı Şekil 3.5.17'de verilmiştir.

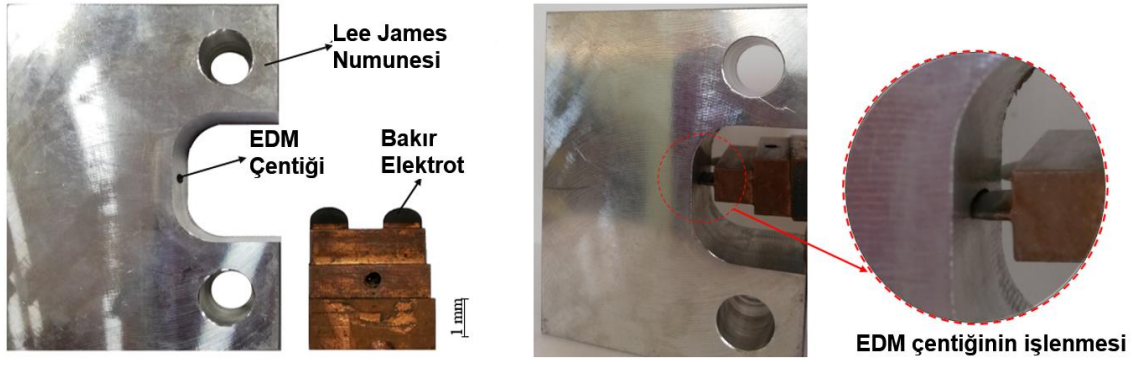


Şekil 3.5.17. Transfer fonksiyonları için kalıntı (residual) grafikleri

### 3.5.4 Değişken Genlikli Yük Altında Üç-Boyutlu Çatlak İlerleme Testleri

#### 3.5.4.1 Lee James Numunesi ile Kırılma Testleri

Numune tasarımı sırasında belirlenen boyutlara göre ilk olarak Al 7075-T651 malzemesinden CNC freze ile numuneler üretilmiş sonrasında dalma erozyon metodu (Electro discharge machining - EDM) ile çentik açılmıştır. EDM ile çentik oluşturulmasına ait detaylar Şekil 3.5.18'de verilmiştir.



Şekil 3.5.18. Lee James Numunesine EDM ile elipsoit çentik açılması

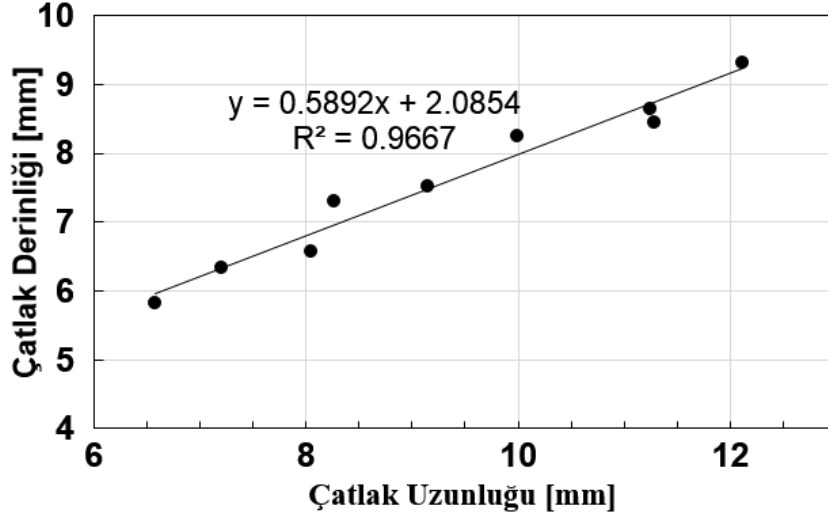
Oluşturulan elipsoit etrafında çatlak başlaması için 15 kN yorulma yükü uygulanmıştır. Numune alın yüzeylerinde yaklaşık 1.5 mm çatlak ilerlemesi kamerada görüldüğü anda deney durdurulmuş ve 0.65 kN/s statik çekme yükü altında numuneler kopartılmıştır. Kırılma yüzeyleri incelenerek dalma erozyon yöntemiyle oluşturulan oyuğun geometrisi teyit edilmiştir. Gerçekleştirilen testlere ait kopma yükleri Tablo 3.5.2’de verilmiştir. Tablo 3.5.2’de son iki satırda kırmızı ile yazılmış olan deneylerde kopma yükü elde edilememiştir. 20190304\_05 numaralı deneyde çatlak boyutu çok küçük olduğundan dolayı kırılma gerçekleşmesi için gerekli yük oldukça yüksektir. Bu nedenle deney test cihazı ve aparatlara zarar vermemek için kırılma yüklemesi yapılmamıştır. 20190304\_06 ise deneydeki aksaklıklardan dolayı veri alınamamıştır.

Tablo 3.5.2. Lee James numunesi ile gerçekleştirilen kırılma testleri

Numune	Ön Çatlak Gerilme Oranı (R)	Ön Çatlak Yükü (kN)	Çatlak Derinliği (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	Çekme Hızı (kN/s)	Kritik Yük (kN)
20190220_01	0.1	15	4.74	5.79	0.65	56.461
20190222_01	0.1	15	7.1	8.59	0.65	35.332
20190226_01	0.1	15	6.12	6.865	0.65	41.023
20190304_01	0.1	15	4.96	6.63	0.65	48.374
20190304_02	0.1	15	7.65	9.845	0.65	30.538
20190304_03	0.1	15	6.24	6.615	0.65	41.152
20190304_04	0.1	15	7.3	9.26	0.65	31.979
20190304_05	0.1	15	4.11	4.36	0.65	NaN
20190304_06	0.1	15	9.3	9.91	0.65	NaN

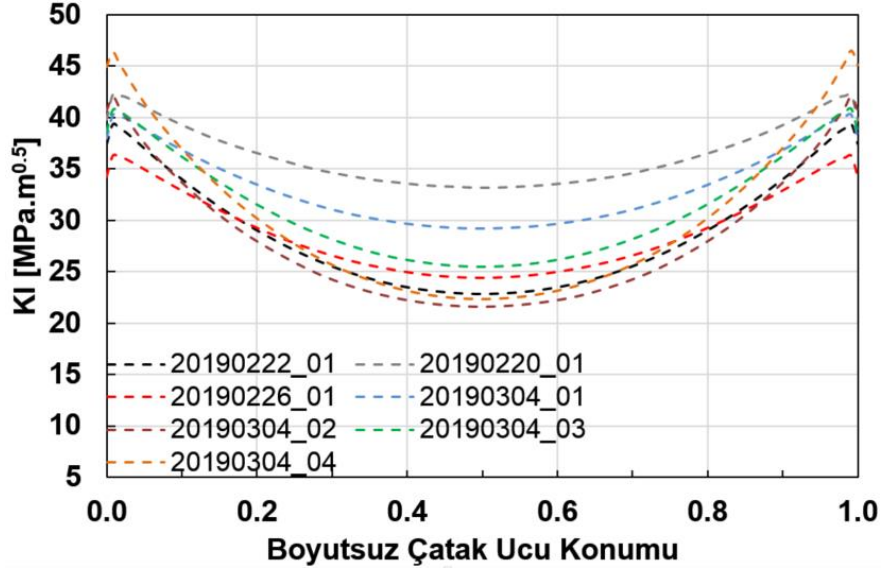
Tablo 3.5.2’de verilen deneylerden, kopma yükü dışında farklı bir veri daha elde edilmiştir. Lee James numunesinde üç-boyutlu çatlak ilerlemesi olacağından, yüzeylerden içeride kalan bölgelerde çatlak ilerlemesinin gözlemlenmesi mümkün olmamaktadır. Ancak çatlakın yüzey ve derinlik yönlerinde ilerleme boyutlarının ve oranlarının ilişkisi çıkarılabilir. Tablo 3.5.2’de

verilen tüm deneylerden sonra yorulma ön çatlaklarının boyutları piksel boyutu üzerinden ölçülmüş ve Şekil 3.5.19'da gösterilen veriler elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, çatlak derinliği ve yüzey uzunluğu arasında  $R^2$  değeri yüksek bir lineer denklem elde edilmiştir.



Şekil 3.5.19. Çatlak yüzey uzunluğu ve derinliği arasındaki ilişkinin belirlenmesi

Üç-boyutlu çatlak ilerlemesi için bir deney standardı ve gerilme şiddet faktörlerinin hesaplanmasında CT numunesine benzer empirik bir formül olmadığından dolayı deneylerde elde edilen kopma yükünün hesaplamalı olarak da bulunup bulunamayacağı konusu araştırılmıştır. Tablo 3.5.2'de verilen deneylerdeki çatlak konfigürasyonları (yorulma ön çatlakından sonraki profil) FCPAS "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz" yazılımı ile analiz edilmiştir. İlgili numuneler için yapılan analizlerden elde edilen gerilme şiddet faktörü dağılımları Şekil 3.5.20'de verilmiştir.



Şekil 3.5.20 Değişik boyutlardaki yüzey çatlakları için mod-I gerilme şiddet faktörü dağılımları

Şekil 3.5.20'den görüldüğü üzere deneylerdeki kopma yüklerinde yapılan analizlerde, serbest yüzey noktaları için yaklaşık 40 MPa m<sup>0.5</sup> gerilme şiddet faktörü değeri elde edilmiştir. Ayrıca küçük boyutlu çatlaklarda orta nokta ile kenarlardaki gerilme şiddet faktörü değeri arasındaki fark yüksektir. Bu da çatlak derinlik yönünde, kopmayı zorlaştıran bir sınırlayıcı etki (constraint effect) olduğu anlamına gelmektedir. Çatlak boyutu büyüdükçe bu etki azalmakta ve çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörleri uç ve kenarlarda birbirine yaklaşmaktadır.

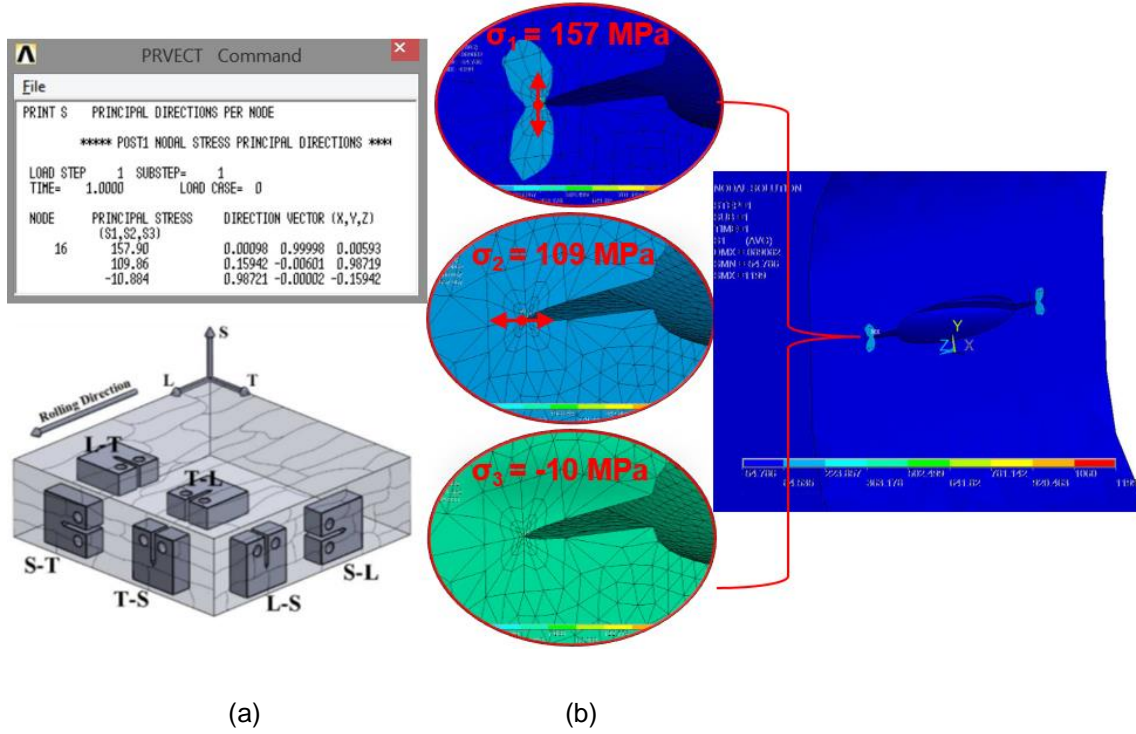
Deneylerde kullanılan numuneler toplu olarak Şekil 3.5.21'de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, düzgün ve simetrik yorulma çatlak ilerlemeleri elde edilmiştir.



Şekil 3.5.21. Farklı çatlak boyutlarında kırılma testi yapılmış Lee James numuneleri

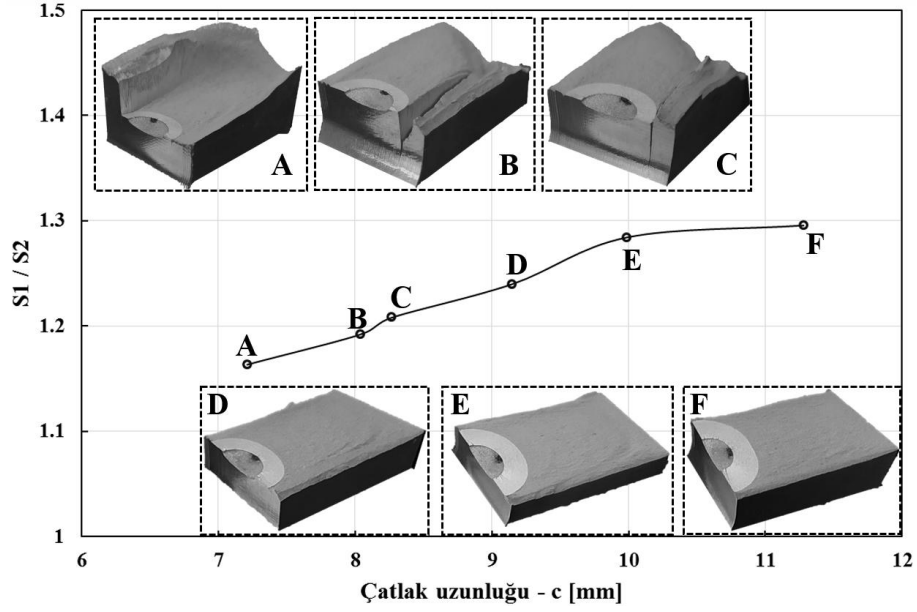
Şekil 3.5.21'de soldan iki numune dikkatli incelendiğinde mod-I yüklemesi altında beklenmeyen bir kırılma yüzeyi olduğu görülmektedir. Bu numunelerde yorulma ön çatlaklığı oldukça küçük

olduğundan lokal olarak çatlak ucu bölgesinde, şiddeti birincil asal gerilmeye yakın olan ikincil asal gerilmenin yönü, haddeleme ile yassılaştırılması beklenen malzeme tanecik araları yüzeylerine dik olarak yönelmekte ve kopma bu düzlemlerde gerçekleşmektedir. Şekil 3.5.22'de verilen şemaya göre, bu şekilde ilerleyen bir çatlak yüzeyi S-L yönünü temsil etmektedir. İriç ve Ayhan (2018) çalışmasından görüleceği üzere, L-T yönündeki kırılma tokluğu  $29 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$  civarında iken, S-L yönündeki kırılma tokluğu  $25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$  civarındadır. Bu da, ilgili gerilme bileşenin olması durumunda, çatlakın tanecikler arasındaki S-L yönelmesine göre ilerlemeyi tercih edeceğini göstermektedir. Şekil 3.5.22'de yukarıdaki açıklamaları teyit eden ve sonlu eleman analizinden elde edilen çatlak ucu bölgesi asal gerilme dağılımları da verilmiştir.



Şekil 3.5.22. (a) Hadde yönüne göre çatlak yönleri (İriç, S. ve Ayhan, A.O., 2018), (b) Asal gerilme dağılımları

Çatlak uzunluğunun artmasıyla birincil asal gerilmenin baskınlığı da artmakta kırılma yüzeyleri mod-I açılma yönünde oluşmaktadır. Şekil 3.5.22'de verilen sonlu elemanlar analizi deneylerdeki tüm çatlak uzunlukları için tekrarlanmış ve asal gerilme değerleri incelenmiştir. Asal gerilmelerin değişimi ile kırılma yüzeyleri arasındaki ilişki Şekil 3.5.23'te net olarak görülmektedir.



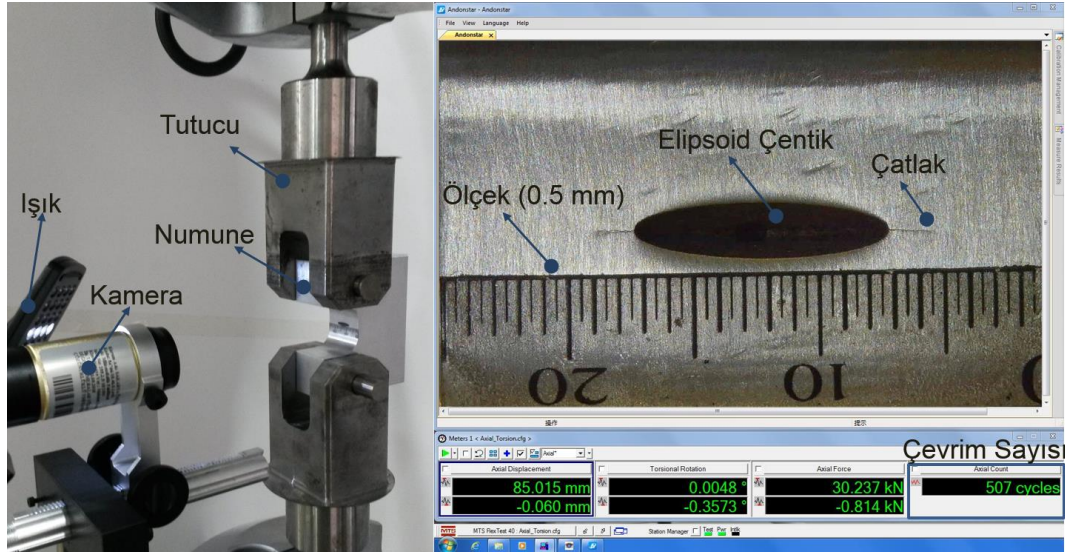
Şekil 3.5.23. Çatlak uzunluğuna bağlı olarak birincil asal gerilmelerin ( $S1/S2$ ) oranındaki değişim

### 3.5.4.2. Sabit Genlik Altında Üç-Boyutlu Çatlak İlerleme Testleri

Lee James numunesi ile sabit genlik ( $R = 0.1, 0.5, 0.8$ ) ve karışık genlik (SP1-SP2-SP3) altında toplam 49 adet test gerçekleştirilmiştir. Deney sayıları Tablo 3.5.3'te verilmiştir. Üç-boyutlu çatlak ilerleme testlerinde Kısım 3.4.1'de açıklanan düzeneğin bir benzeri kullanılmıştır. Bu deneylerde tek kamera ile numune alın yüzeyinde bulunan iki çatlak ucu noktası takip edilebilmektedir. Şekil 3.5.24'te, deney düzeneği ve bilgisayar ekran görüntüsü verilmiştir. Ekran görüntüleri sık aralıklarla kaydedilerek daha sonra bu görüntüler üzerinde Çevrim Sayısı-Çatlak Uzunluğu grafikleri elde edilmiştir.

Tablo 3.5.3. Üç-boyutlu çatlak ilerleme test sayıları

Test	Test Sayısı	Numune Türü
Sabit genlik altında çatlak ilerleme testleri $R = 0.1$	5	LJ
Sabit genlik altında çatlak ilerleme testleri $R = 0.5$	5	LJ
Sabit genlik altında çatlak ilerleme testleri $R = 0.8$	9	LJ
Karışık genlik altında çatlak ilerleme testleri LJ-SP1	10	LJ
Karışık genlik altında çatlak ilerleme testleri LJ-SP2	10	LJ
Karışık genlik altında çatlak ilerleme testleri LJ-SP3	10	LJ



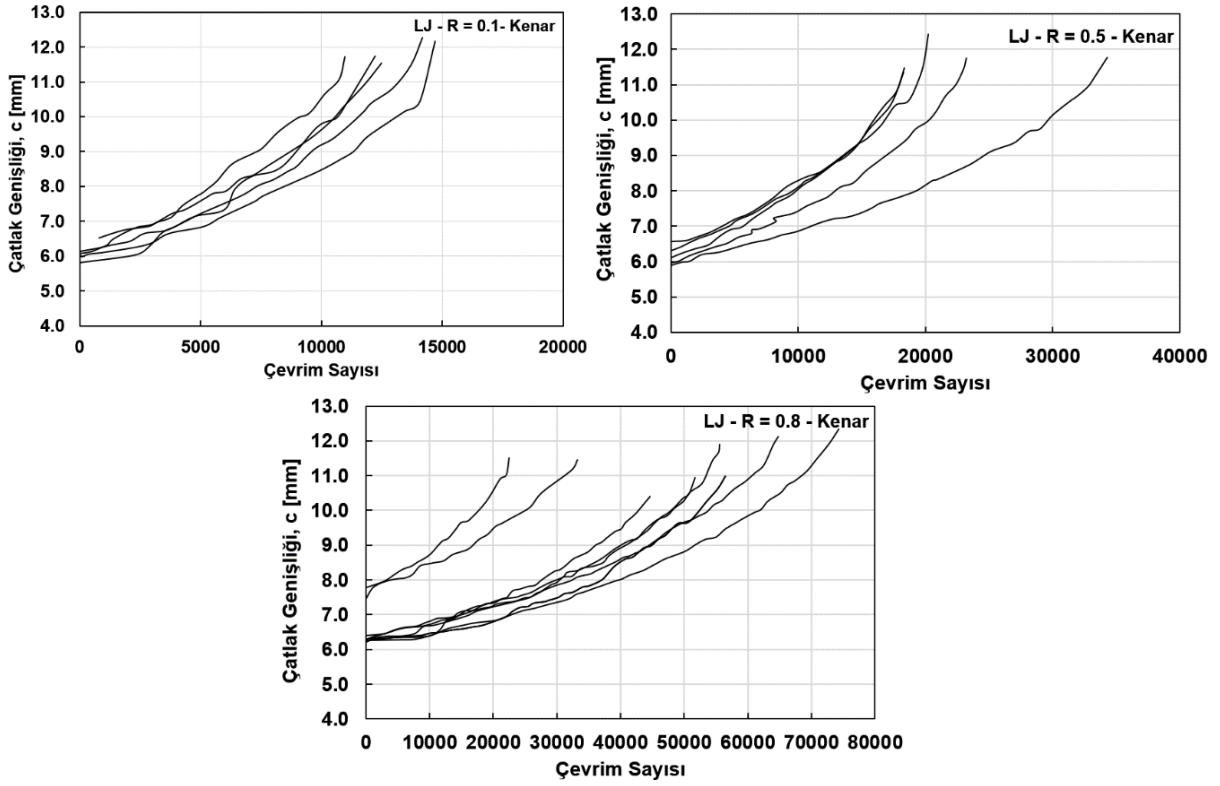
Şekil 3.5.24. Üç-boyutlu çatlak ilerleme test düzeneği

Tablo 3.5.4. Sabit genlik altında üç-boyutlu yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları

Sabit Genlik				Ön Çatlak Uzunluğu			da/dN		
Numune Adı	Numune Türü	Ön Çatlak Gerilme Oranı, R	Ön Çatlak Yüğü (kN)	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>(avg)</sub> (mm)	R	Maks. Yük	Çevrim Sayısı
20191011_01	LJ	0.1	12.4	6.040	5.570	5.805	0.1	15.5	12224
20191011_02	LJ	0.1	12.4	6.400	6.660	6.530	0.1	15.5	10978
20191014_01	LJ	0.1	12.4	6.470	5.780	6.125	0.1	15.5	12487
20191014_02	LJ	0.1	12.4	6.040	5.971	6.006	0.1	15.5	14698
20191015_01	LJ	0.1	12.4	5.947	6.210	6.079	0.1	15.5	14176
20191015_02	LJ	0.1	13	5.746	6.020	5.883	0.5	17	34296
20191016_01	LJ	0.1	13	6.320	6.290	6.305	0.5	20	20218
20191016_02	LJ	0.1	13	5.865	6.060	5.963	0.5	20	23200
20191017_02	LJ	0.1	13	6.150	6.070	6.110	0.5	20	18321
20191025_01	LJ	0.1	13	6.752	5.757	6.255	0.5	20	18298
20191018_01	LJ	0.1	17	8.000	6.880	7.440	0.8	30	33246
20191022_01	LJ	0.1	17	6.320	6.300	6.310	0.8	32	51679
20191023_01	LJ	0.1	17	6.180	6.250	6.215	0.8	32	44590
20191024_02	LJ	0.1	17	6.328	6.157	6.243	0.8	32	56501
20191101_02	LJ	0.1	17	8.370	7.470	7.920	0.8	32	22930
20191113_01	LJ	0.1	17	8.370	7.470	7.920	0.8	32	53222
20191113_02	LJ	0.1	17	8.37	7.47	7.920	0.8	32	55623
20191203_01	LJ	0.1	17	8.37	7.47	7.920	0.8	32	64835
20191204_01	LJ	0.1	17	6.150	6.660	6.405	0.8	32	74322

Tamamlanan deneylere ait grafikler toplu olarak Şekil 3.5.25'te verilmiştir. Ayrıca R = 0.1, 0.5 ve 0.8 için kırılma yüzeyleri sırasıyla Şekil 3.5.26-28'de verilmiştir. Bazı deneylerde (özellikle R = 0.8) çatlak yüzeyi simetrik oluşmamıştır. Simetri bozukluğunun yüksek olduğu deneylerin

sonuçları değerlendirilmemiş ve bu deneyler tekrarlanmıştır. Simetrik çatlak oluşmama problemi ile ilgili detaylar Kısım 3.5.4.4'de açıklanacaktır.



Şekil 3.5.25. Sabit genlik altında üç-boyutlu çatlak ilerleme test grafikleri

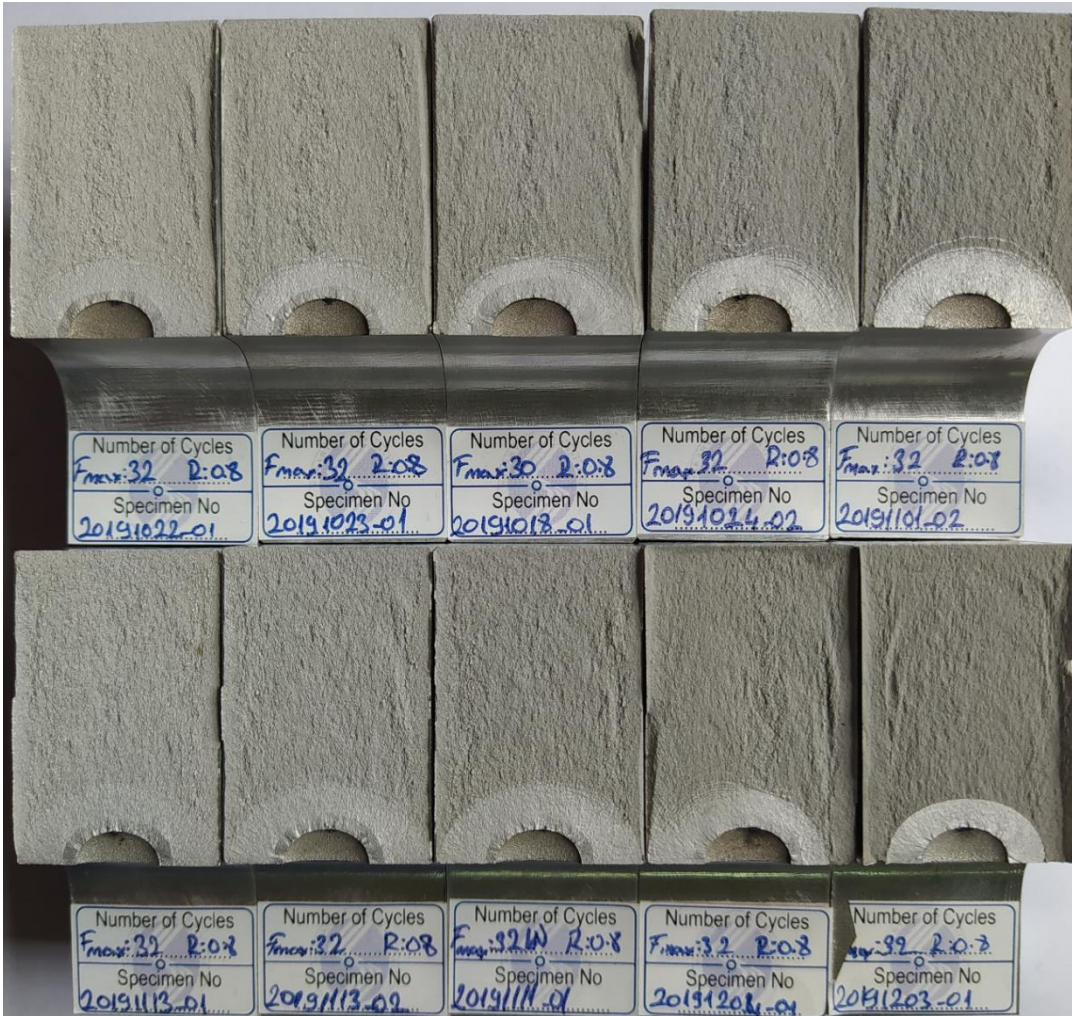


Şekil 3.5.26. Sabit genlik altında üç boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri (R= 0.1)



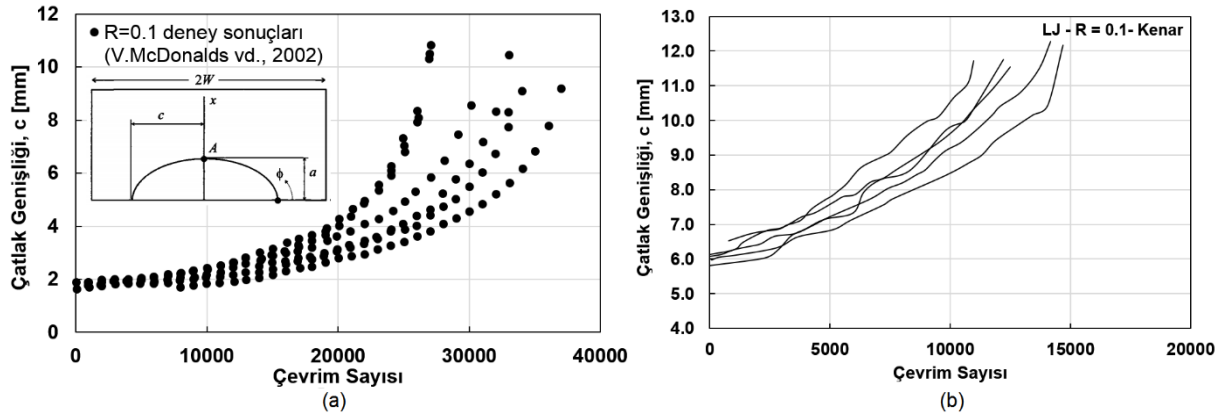


Şekil 3.5.27. Sabit genlik altında üç-boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri (R= 0.5)



Şekil 3.5.28. Sabit genlik altında üç-boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri (R= 0.8)

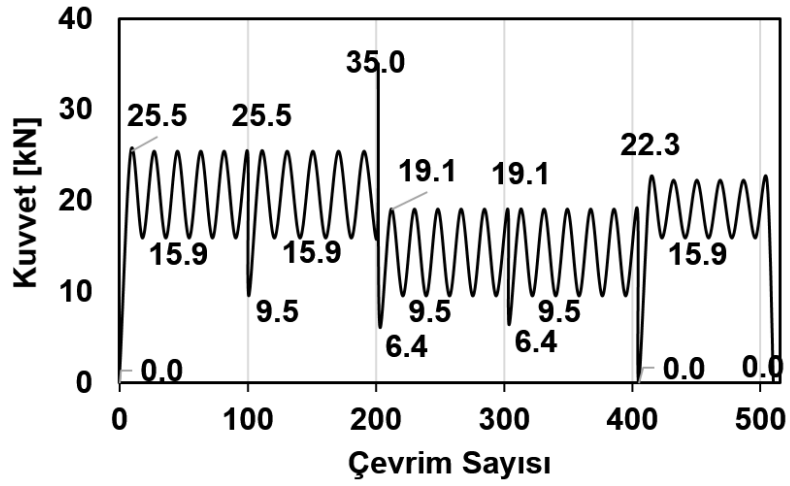
Deneylerdeki saçılım literatürdeki benzer bir çalışma ile karşılaştırılmıştır. V.McDonalds vd. (2002) çalışmasında yüzey çatlaklarının ilerlemesini deneysel olarak incelemiştir. Çalışması boyunca gerçekleştirdiği tekrarlı deneylerden oluşan saçılım grafiği Şekil 3.5.29a'da verilmiştir. Şekil 3.5.29b'de verilen grafik ise proje çalışmamızda  $R=0.1$  genliğinde LJ numunelerinin deneyinden elde edilen grafikdir. 3.5.29a-b arasında, yükleme şartları ve numune türü açısından benzerlik yoktur. İki grafik sadece saçılım seviyesinin uygunluğu açısından karşılaştırma için birlikte verilmiştir. V. McDonalds (2002)'de minimum çevrim sayısının maksimum çevrim sayısına oranı 0.72'dir. Bu değer projemizdeki deneysel çalışmada 0.89'dur. Bir başka deyişle, bu çalışmadaki saçılım oranı ilgili literatür çalışmasında elde edilen saçılımdan kısmen daha azdır.



Şekil 3.5.29. LJ numunesi  $R=0.1$  deneylerindeki saçılımın literatür ile karşılaştırılması

### 3.5.4.3 Karışık Genlikli Yorulma Yüğü Altında Üç Boyutlu Çatlak İlerleme Testleri

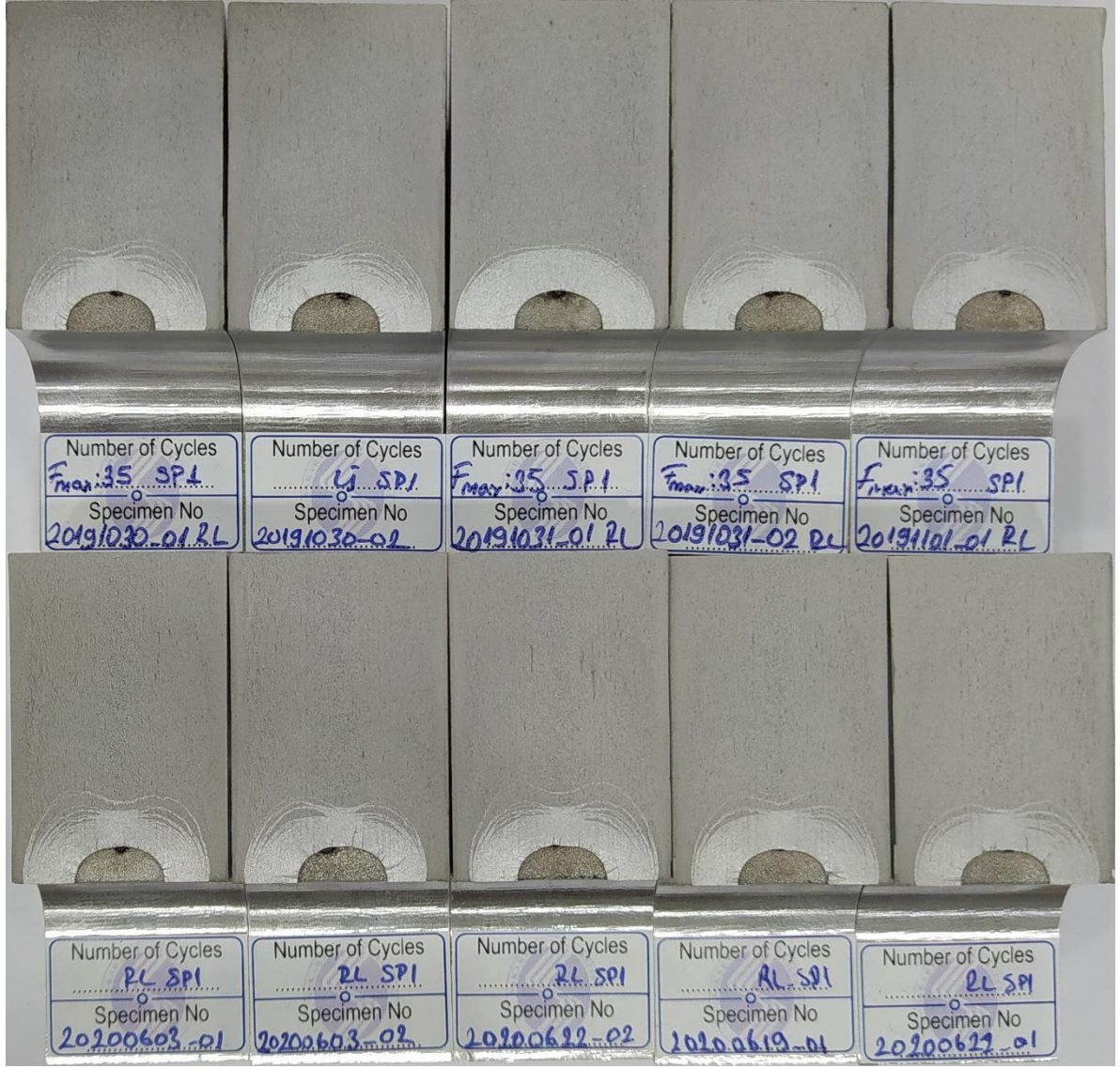
Lee James numunesi kullanılarak sabit genlik altında gerçekleştirilen deneylerden sonra karışık genlikli yüklemenin olduğu deneylere geçilmiştir. CT numunesindeki iki boyutlu çatlak ilerlemesinde olduğu gibi karışık genlikli deneylerde iki farklı spektrum kullanılmış ayrıca sağlama deneyleri için farklı bir spektrum daha eklenmiştir. İlk olarak Kısım 3.4.2'de verilen Spektrum 1 yüklemesinin 3.18 kat artırılması ile LJ numunesi için yeni bir Spektrum-1 hazırlanmıştır. Bu durumda maksimum yük 35 kN olmaktadır. Elde edilen spektrum detaylı olarak Şekil 3.5.30'da verilmiştir. Bu spektrum altında gerçekleştirilen testlere ait detaylar Tablo 3.5.5'de incelenebilir.



Şekil 3.5.30. Üç-boyutlu çatlak ilerleme testlerinde kullanılan karışık genlikli Spektrum 1

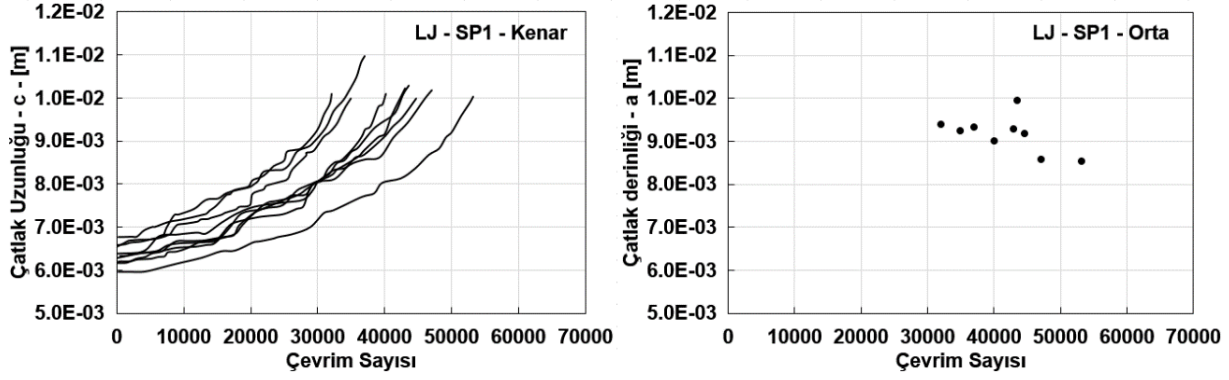
Tablo 3.5.5. Karışık genlikli üç boyutlu yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları (Spektrum 1)

Spectrum 1 / LJ				Ön Çatlak Uzunluğu			da/dN		
Numune Adı	Numune Türü	Ön Çatlak Gerilme Oranı, R	Ön Çatlak Yüğü (kN)	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>(avg)</sub> (mm)	Spektrum	Maks. Yüğü	Çevrim Sayısı
20191030_01	LJ	0.1	17	6.250	6.360	6.305	Spektrum 1	35	40128
20191030_02	LJ	0.1	17	6.000	6.180	6.090	Spektrum 1	35	42650
20191031_01	LJ	0.1	17	6.940	6.390	6.665	Spektrum 1	35	37044
20191031_02	LJ	0.1	17	7.120	6.720	6.920	Spektrum 1	35	32024
20191101_01	LJ	0.1	17	6.610	6.730	6.670	Spektrum 1	35	35022
20200619_01	LJ	0.1	17	6.250	6.070	6.160	Spektrum 1	35	44638
20200622_01	LJ	0.1	17	6.190	6.380	6.285	Spektrum 1	35	47104
20200622_02	LJ	0.1	17	6.470	6.310	6.390	Spektrum 1	35	43608
20200623_01	LJ	0.1	17	6.385	6.250	6.318	Spektrum 1	35	43192
20200623_02	LJ	0.1	17	6.220	5.686	5.953	Spektrum 1	35	53266



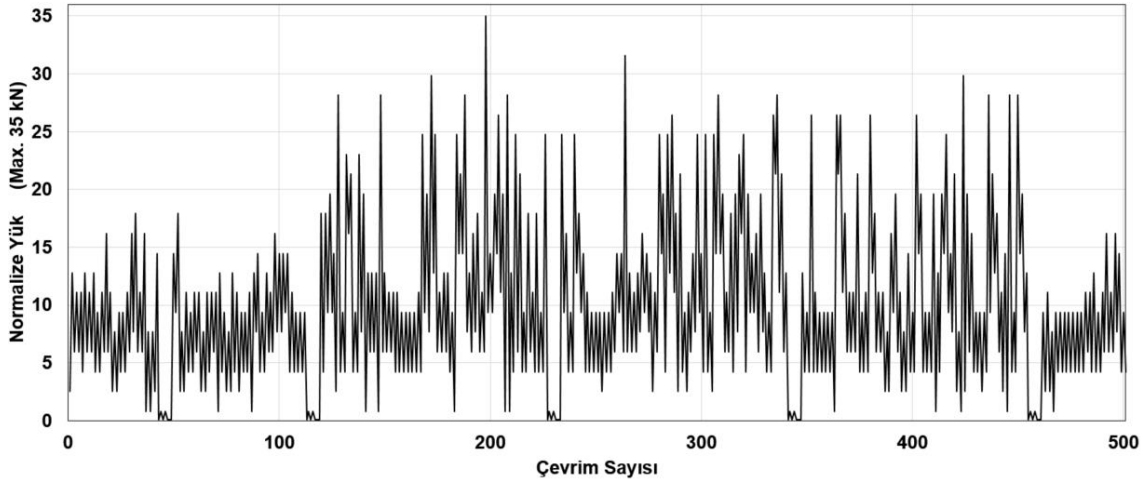
Şekil 3.5.31. Üç-boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri (Spektrum 1)

Numunelerde Spektrum-1 yüklemesi sonrasında oluşan kırılma yüzeyleri Şekil 3.5.31'de görülmektedir. Spektrum-1 yükü uygulanan deneylere ait çatlak ilerleme grafikleri ise Şekil 3.5.32'de görülmektedir. Şekil 3.5.32'de deney sırasında numunelerin yüzeyinden alınan çatlak uzunlukları ve deney sonrasında orta kısımlardan ölçülen nihai çatlak derinliği ayrı ayrı verilmiştir. Deney sırasında numunenin orta kısmındaki çatlak uzunluğunun ölçülmesi mevcut imkânlarımızla mümkün değildir. Aşırı yük çizgilerinin (overload striation markings) de deneyin son kısmına kadar kırılma yüzeyinde net olmamasından dolayı numunenin orta kısmı için sadece son adım verisi alınabilmektedir.



Şekil 3.5.32. Spektrum 1 profili ile yapılan deneyler için çatlak ilerleme ömür grafikleri

Kısım 3.4.2'de CT numunelerine uygulanmak üzere FALSTAFF yüklemesi profiliyle bir bölüm alınmıştır. Spektrum-2 olarak adlandırılan bu yük profili test ve simülasyonlarda çatlak ömrü boyunca tekrarlı olarak kullanılmıştır. CT numuneleri için kullanılan Spektrum-2 yüklemesi profilinin ölçeklendirilerek üç-boyutlu çatlak ilerleme testlerinde de kullanılması kararlaştırılmıştır. LJ numunesine göre CT numunesindeki kritik kopma yükü daha düşük olduğundan çatlak ilerleme ömrünü daha makul sayılarda tamamlamak için CT numunesinde Spektrum-2 yüklemesi profili için 11 kN olan maksimum yük değeri ölçeklendirilerek, LJ numunesi için Spektrum-2 maksimum yük değeri 35 kN olarak belirlenmiştir. LJ numunelerine uygulanan Spektrum-2 yük profili Şekil 3.5.33'te görülmektedir.



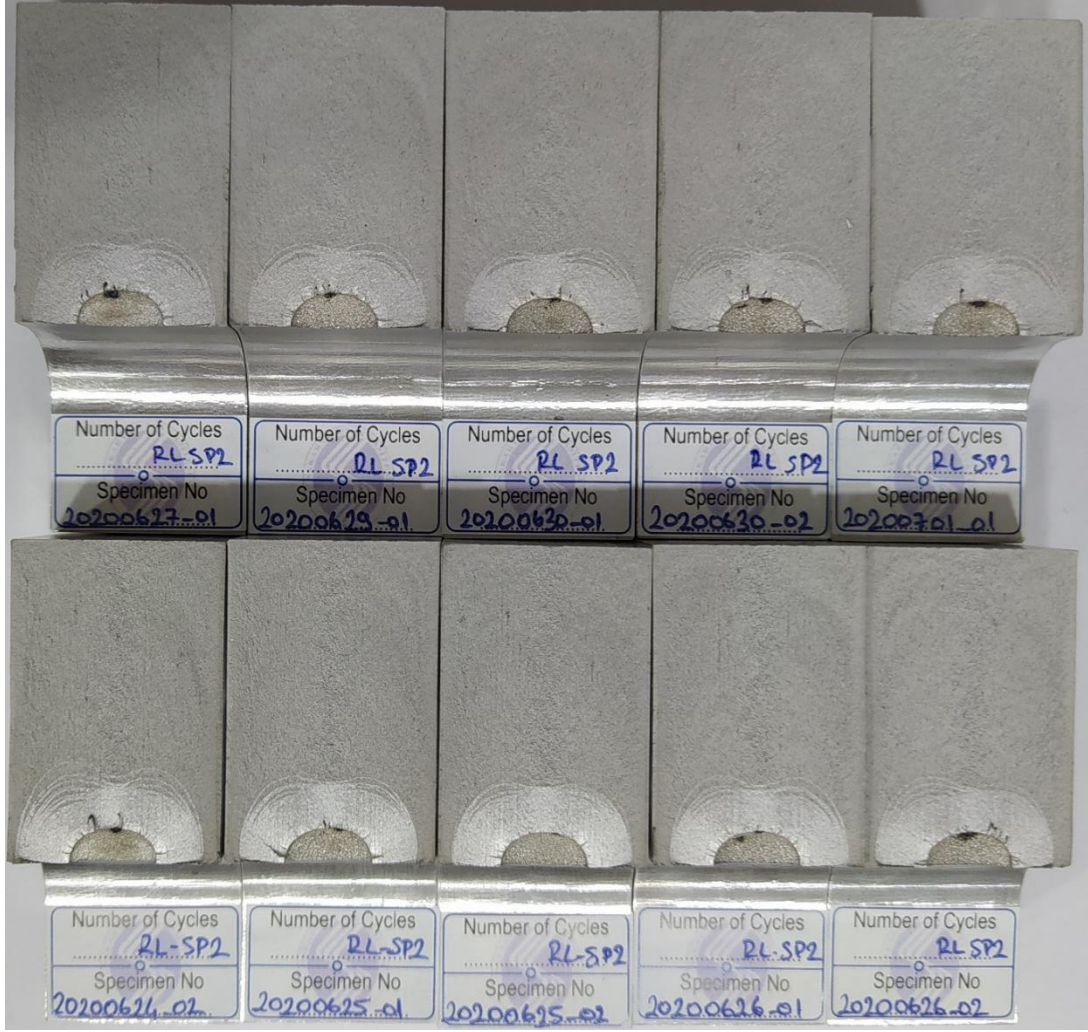
Şekil 3.5.33. Üç-boyutlu çatlak ilerleme testlerinde kullanılan Spektrum 2 yük profili

Spektrum-2 yüklemesiyle gerçekleştirilen testlere ait bilgiler Tablo 3.5.6'da özetlenmiştir. Başlangıç çatlak uzunlukları da göz önünde bulundurularak tablodaki çevrim sayıları incelendiğinde deneylerden tekrarlanabilir sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

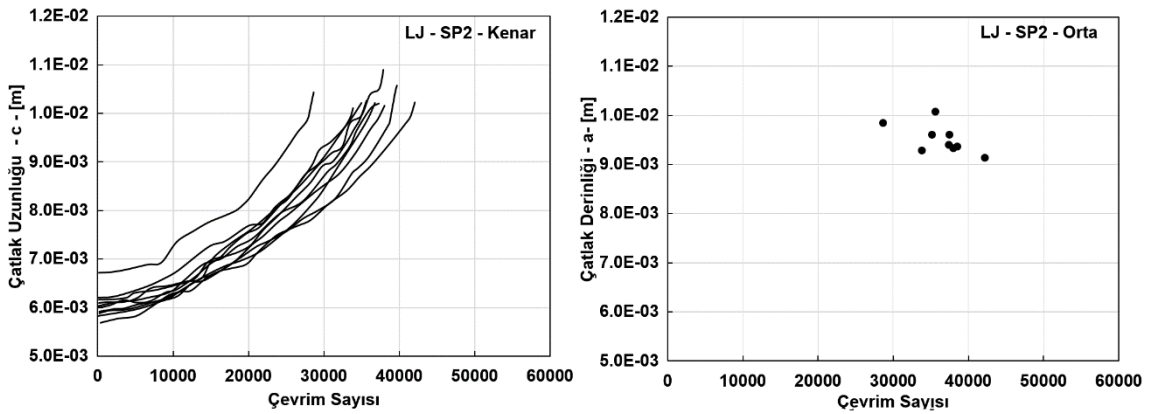
Tablo 3.5.6. Karışık genlikli üç-boyutlu yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçları (Spektrum 2)

Spectrum 2 / LJ				Ön Çatlak Uzunluğu			da/dN		
Numune Adı	Numune Türü	Ön Çatlak Gerilme Oranı, R	Ön Çatlak Yüğü (kN)	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>(avg)</sub> (mm)	Spektrum	Maks. Yük	Çevrim Sayısı
20200624_02	LJ	0.1	17	6.250	6.160	6.205	Spektrum 2	35	37968
20200625_01	LJ	0.1	17	6.150	6.175	6.163	Spektrum 2	35	35626
20200625_02	LJ	0.1	17	6.800	6.640	6.720	Spektrum 2	35	28657
20200626_01	LJ	0.1	17	6.050	6.150	6.100	Spektrum 2	35	33826
20200626_02	LJ	0.1	17	6.030	5.742	5.886	Spektrum 2	35	37436
20200627_01	LJ	0.1	17	5.920	5.911	5.916	Spektrum 2	35	38536
20200629_01	LJ	0.1	17	5.855	6.150	6.003	Spektrum 2	35	35169
20200630_01	LJ	0.1	17	5.792	5.595	5.694	Spektrum 2	35	42209
20200630_02	LJ	0.1	17	6.100	5.796	5.948	Spektrum 2	35	37508
20200701_01	LJ	0.1	17	5.961	5.685	5.823	Spektrum 2	35	39718

Spektrum-2 yüklemesi sonrasında numunelerde oluşan kırılma yüzeyleri Şekil 3.5.34'te görülmektedir. Spektrum-2 yükü uygulanan deneylere ait çatlak ilerleme grafikleri Şekil 3.5.35'te numunenin yüzeyinden alınan çatlak uzunlukları ve deney sonrasında numunenin orta kısmından ölçülen son çatlak derinlikleri ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 3.5.34. Üç-boyutlu çatlak ilerleme deneyleri sonrası kırılma yüzeyleri (Spektrum 2)



Şekil 3.5.35. Spektrum 2 deneyleri için çatlak ilerleme ömür grafikleri

### 3.5.4.4 Çatlak İlerleme Profillerinde Karşılaşılan Simetri Bozukluğunun İncelenmesi

Numune geometrisi ve yükleme şartları simetrik olmasına rağmen Lee James numunesi ile yapılan birçok testte, alın yüzeyi üzerinde çentiğin iki tarafındaki çatlak boyutunun simetrik olmadığı görülmüştür. Benzer durum daha önce CT türü numunede de görülmüştür. Bu durum detaylı olarak incelenmiş olup, konu hakkında bir makale yayınlanmıştır (Ayhan A.O., Yaren M.F, 2020).

CT ve LJ numunelerinde her iki yüzeydeki çatlak boyutunun farklı olmasıyla birlikte numunenin iç kısmında yorulma çatlak önü (crack front) boyunca eliptik sürekliliğin bozulduğu görülmektedir. Numunenin iç kısmında bazı noktalarda çatlak profili geride kalmakta ve bu da çatlak yüzeyindeki simetriyi bozmaktadır. Ayrıca çatlağın geri kaldığı noktada ani kırılma yüzeyinin renk tonunda da farklılık göze çarpmaktadır. Şekil 3.5.36'da LJ numunesinde geri kalmış çatlak ve simetri bozukluğu detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.5.37'de çatlağın geri kaldığı noktadaki ani kırılma yüzeyinin renk tonu farkı gösterilmiştir.

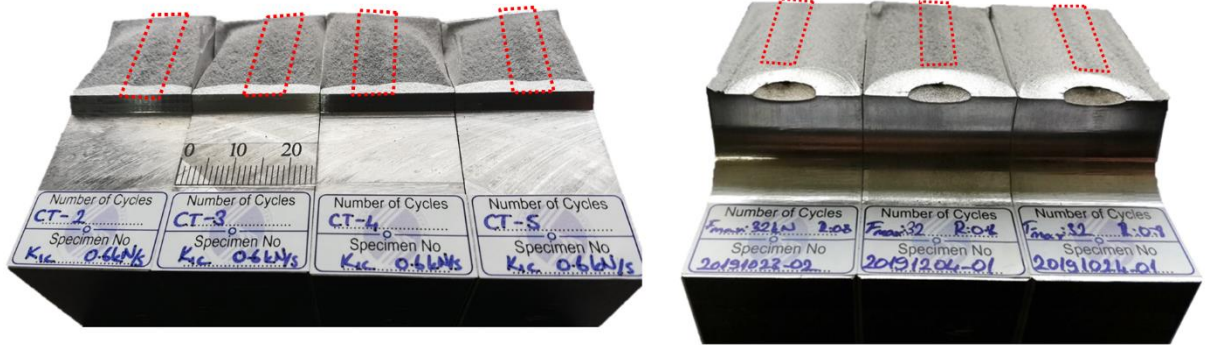


Şekil 3.5.36. Spektrum 1 yüklemesi altında üç boyutlu çatlak ilerlemesi sırasında oluşan simetri bozukluğu

Plaka şeklinde temin edilen Al 7075-T651 malzemesi 30 mm kalınlıktadır. Numune hazırlanırken bu kalınlık 25 mm'e düşürülmektedir. 5 mm inceltme işlemi her iki kenardan eşit olarak (2.5mm) gerçekleştirildiğinde ani kırılma yüzeyindeki farklı renk tonunun tam ortada, tek



taftan (5 mm) inceltilmesi durumunda ise inceltilen tarafa yakın oluğu görülmektedir. Şekil 3.5.36'da 3 adet LJ numunesi incelendiğinde bu durum daha net görülmektedir.



Şekil 3.5.37. CT ve LJ numunelerinde ani kırılma yüzeylerinde oluşan renk tonu farkı

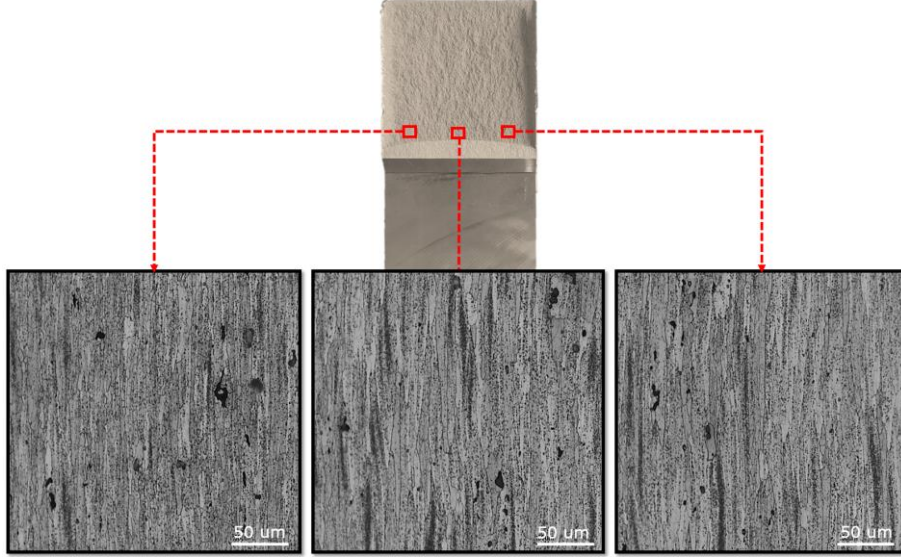
Şekil 3.5.37'de verilen renk tonu farkının göz yanılması olmadığını kanıtlamak ve sayısal değerlerle ifade etmek amacıyla CT numunelerinden biri için yüzey pürüzlülüğü taraması (profilometre) ölçümü yapılmıştır. Renk tonu farklılığının olduğu bölgede yüzeydeki pürüzlülüğün daha fazla olduğu Şekil 3.5.38'de görülmektedir.



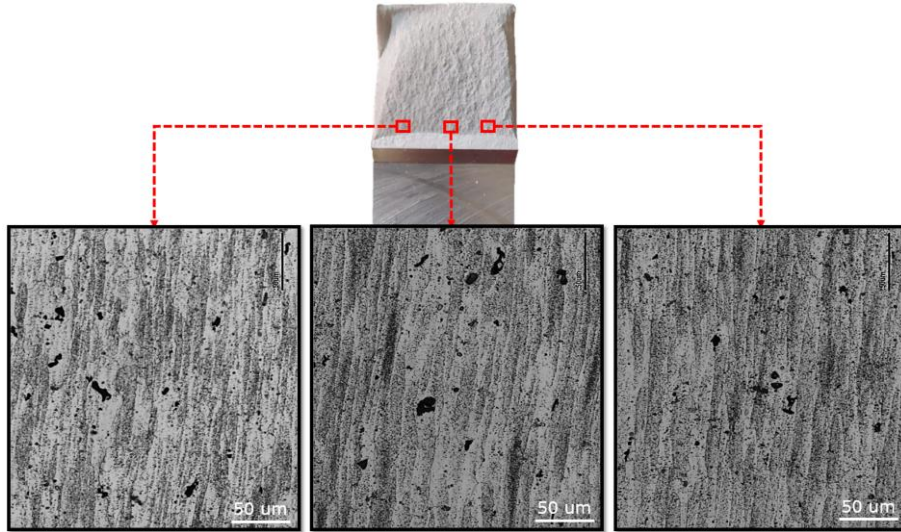
Şekil 3.5.38. CT numunesi üzerinden alınan yüzey pürüzlülük ölçümü

Tüm bulgulara dayanarak simetri bozukluğuna sebep olan kusurun numunenin iç yapısından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. İç yapının araştırılması için optik mikroskop ve elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri de alınmıştır. Mikroskop görüntüleri öncesinde numune yüzeyi parlatılmış ve Keller çözeltisi (%5 HF %10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> %85 H<sub>2</sub>O) ile yaklaşık 20 sn dağlama işlemi yapılmıştır. Şekil 3.5.39-40'daki optik mikroskop görüntüleri ve Şekil 3.5.41'deki SEM görüntüsü incelendiğinde, malzemenin orta kısmındaki tanecik yönelmesi boyutunun kenarlara göre farklı olduğu görülmektedir. Haddeleme işlemi sırasında kenardaki tanecik

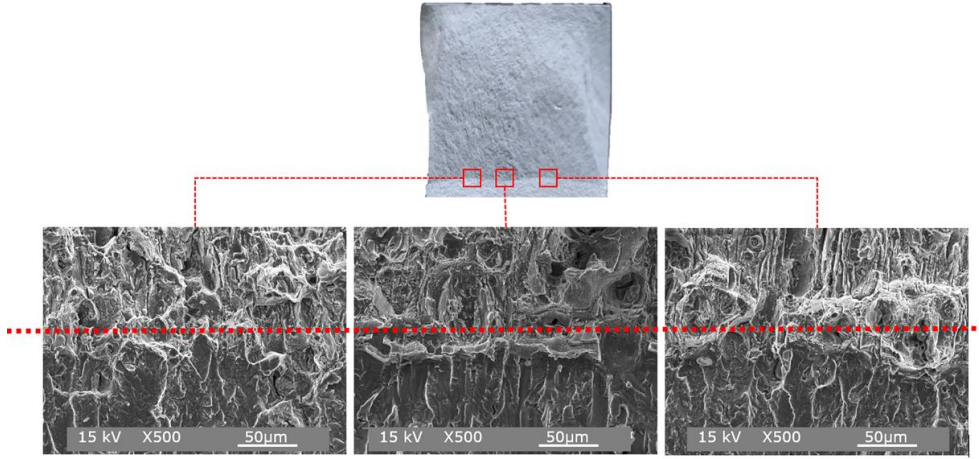
yönlenmesinin hadde yönüne paralel olduğu ancak orta kısımda arzu edilen yönlenmenin tam sağlanamadığı görülmektedir. Bu da numunenin kalınlık boyunca orta kısmında çatlak ilerlemesini bölgesel olarak zorlaştırmaktadır.



Şekil 3.5.39. CT numunesi üzerinden alınan optik mikroskop görüntüsü (Şekil 3.5.35 soldan 1. CT numunesi)



Şekil 3.5.40. CT numunesi üzerinden alınan optik mikroskop görüntüsü (Şekil 3.5.35 soldan 3. CT numunesi).



Şekil 3.5.40. CT numunesi üzerinden alınan elektron mikroskobu görüntüsü

Yukarıda belirtilen incelemelerden ve haddelme işlemini simüle etmek için ilave olarak gerçekleştirilen elasto-plastik analizlerden, malzemenin orta bölgesindeki tanecik yönelmesi farklılığına istinaden bu bölgede daha sünek çatlak ilerlemesi gerçekleşmekte ve daha elastik olarak ilerleyen diğer çatlak ucu bölgelerine göre geri kalmaktadır. Ayrıca, numune üretimi sürecinde gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemi ile kalınlık yönünde her iki yüzeyden eşit miktarda talaş kaldırılmamış ise, bu bölge kalınlık merkez noktasına göre eksantriklik oluşturduğu için, bulunduğu tarafın çatlak ilerlemesini de yavaşlatmakta ve çatlak yüzey noktalarında anti-simetrik bir çatlak ilerlemesine neden olmaktadır. Çalışmanın tüm detayları ilgili makaleden elde edilebilir (Ayhan A.O., Yaren M.F, 2020).

### 3.6 Monte Carlo Çatlak İlerleme Simülasyon Yöntemi

DeneySEL çalışmaların sonucunda belirlenen malzeme özelliklerindeki değişkenliği temsil eden dağılımların ve diğer değişkenlerin çatlak ilerleme ömründe sebep olacağı değişkenliği ve ilgili dağılımı tahmin etmek için Monte-Carlo simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Monte Carlo simülasyonlarında belirli limitler aralığında malzeme özelliği, geometrik boyutlar ve yükteki değişkenlikler incelenmiştir.

İlk olarak, daha önceden belirlenen numune üretim toleransları ve çatlak ilerleme ile ilgili malzeme özelliklerinin dağılımları içerisinde ilgili değişkenler için rastgele değerler seçilmektedir (random number picking). Belirlenen bu değerler kullanılarak, verilen bir yükleme profili/spektrum için her bir yük çevrimi dikkate alınarak çatlak ilerleme ömür analizi yapılmakta ve hesaplanan ömür değeri kaydedilmektedir. Bu süreçte, yükleme profili boyunca deney cihazının yükleme hassasiyeti (class 0.5) dikkate alınarak yükte oluşabilecek olan değişkenlik de analize dâhil edilmektedir. İlgili parametrelerin dağılımından seçilen yeni değerler ile Monte-Carlo simülasyonunda bir sonraki durum analizi (next case analysis) aynı

şekilde gerçekleştirilmekte ve istenilen analiz sayısına kadar devam ettirilmektedir. Dolayısıyla, simülasyon süresince değişken dağılımlarından rastgele, ancak dağılımı tarayacak şekilde bir olasılık dağılımına göre değer seçimi yapılması kritik öneme sahiptir. Bu sayede işlem girdilerindeki değişkenliğin sonuçtaki değişkenliğe etkisi gerçekçi bir şekilde yansıtılabilmektedir.

Monte-Carlo simülasyonları için proje önerisi sürecinde hazır yazılımlar kullanılabileceği düşünülmüştü. Hazır paket yazılımların yeterince esneklik sağlamayacağı, proje sürecinde ve sonrasında yapılabilecek gerekli uyarılama ve güncellemelerin yeterince verimlilik sağlayamayabileceği düşünüldüğünde, özgün bir kod ortaya konulmasının daha isabetli olacağı kanaatine varılarak, tamamen bağımsız ve yeni bir yazılım üzerinde çalışılmasına karar verilmiştir.

Oluşturulacak analiz programına ait algoritma süreç haritası Şekil 3.6.1'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, algoritma içerisinde iç içe iki temel döngü bulunmaktadır. Bu döngülerden içteki döngü, verilen bir yükleme profilindeki her bir yük çevrimini değerlendirerek çatlak ilerleme analizini gerçekleştiren ve ömrünü hesaplayan kısım için tasarlanmıştır. Dış döngü ise, analizi gerçekleştirilen her bir Monte-Carlo simülasyon durumu için değişkenlerdeki dağılımları belirlemek amacıyla kullanılmaktadır.

Yük profilleri, hazırlanan ve programla aynı dizinde bulunması gerekli "Loadspec.txt" dosyasından okunmaktadır.

"Değişkenlerin olasılık dağılımlarına göre değerlerinin seçilmesi" Şekil 3.6.1'de verilen algoritmanın ilk işlemidir. Bunun için olasılık dağılımlarına göre rastgele veri üretimi gerekmektedir. Rastgele veri üretimi için çevrim içi verilen açık kaynak kodlu bir Fortran alt-programı üzerinde doğrulama çalışmaları yapılmış ve kullanımının uygun olduğuna karar verilmiştir (Chander ve Northrop, 2003). "3.4.1. Sabit Genlikli Yük Altında Gerçekleştirilen Test Sonuçlarındaki Saçılımın İncelenmesi" başlığı altında verilen istatistikî veriler kullanılarak program çalıştırılmış ve sonuçlar MINITAB ortamında yeniden histogram grafiği olarak çizdirilmiştir. Ayrıca aynı Loc ve Scale verileri ile MINITAB ortamında rastgele veri üretilmiş ve bu veriler de histogram grafiği olarak çizilmiştir. İki farklı program kullanılarak üretilen veriler ve ilgili histogram grafikleri oldukça yakın çıkmıştır. Elde edilen grafikler Şekil 3.6.2'de verilmektedir.

Başlangıç çatlak uzunluğu/uzunlukları, numune kalınlığı, yük üzerindeki değişkenlikler normal dağılıma uygundur ve rastgele değer seçimi için de normal dağılım fonksiyonu tanımlanmıştır. Kullanılan test cihazının yük hücresi hassasiyetinin Class 0.5 olmasından dolayı yük

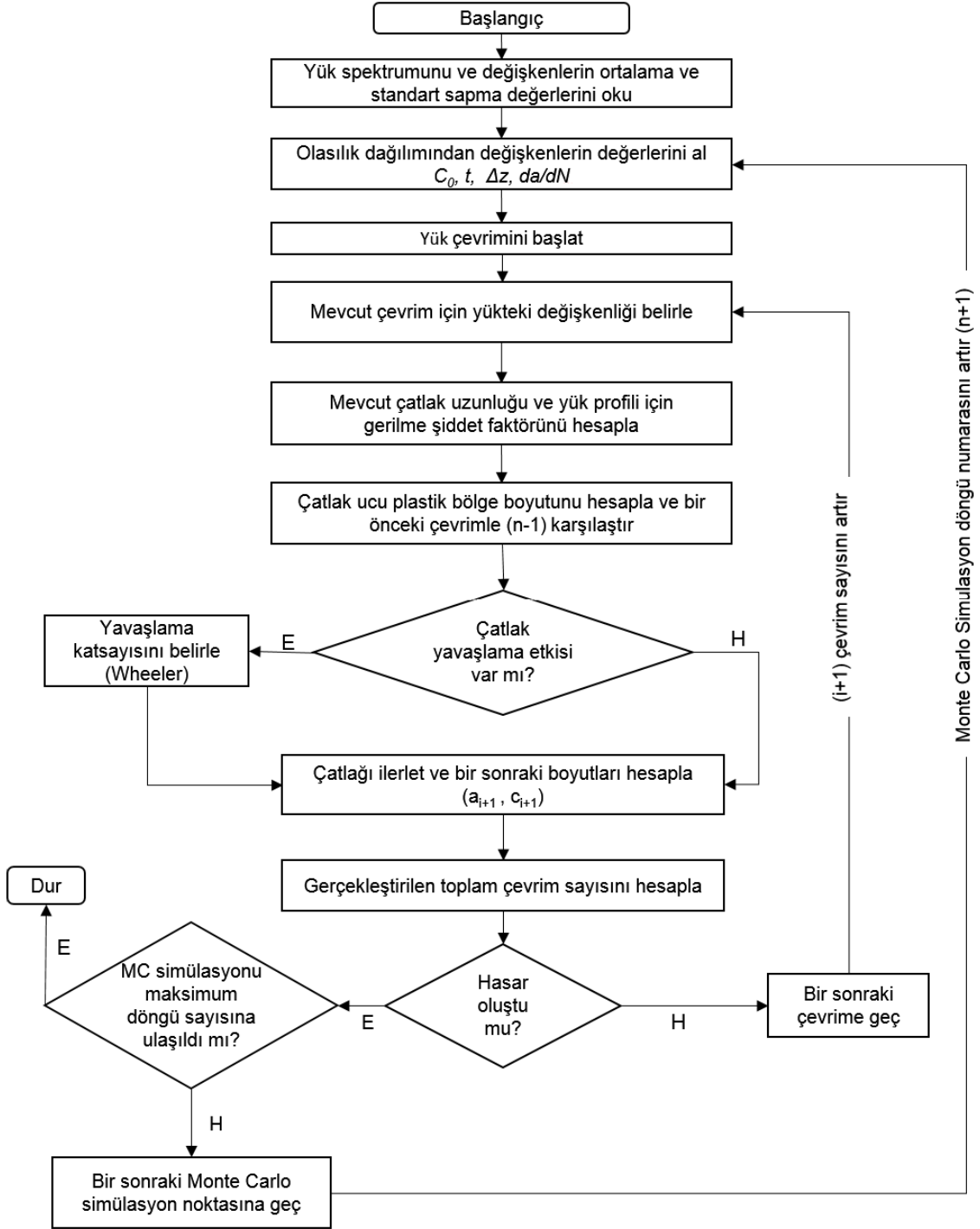
dağılımının tanımlanmasında ortalama değer 0, standart sapma ise 0.005 girilmiştir. CT numunelerinin deneylerinden elde edilen da/dN eğrilerinin incelenmesinden, verilen bir  $\Delta K$  seviyesine karşılık gelen çatlak ilerleme hızlarının ise lognormal dağılıma daha uygun olduğu belirlenmiştir. Lognormal dağılım, logaritması normal dağılıma uygun olan dağılım olarak tanımlanabilir. Bu tanımdan yola çıkarak, rastgele seçilen çatlak ilerleme hızı da lognormal dağılım olarak tanımlanmış ve ömür hesabının son adımında ters logaritması alınarak kullanılmıştır.

Başlangıç çatlak uzunluğu/uzunlukları, numune kalınlığı, yük üzerindeki değişkenlikler normal dağılıma uygundur ve rastgele değer seçimi için de normal dağılım fonksiyonu tanımlanmıştır. Kullanılan test cihazının yük hücresi hassasiyetinin Class 0.5 olmasından dolayı yük dağılımının tanımlanmasında ortalama değer 0, standart sapma ise 0.005 alınmaktadır.

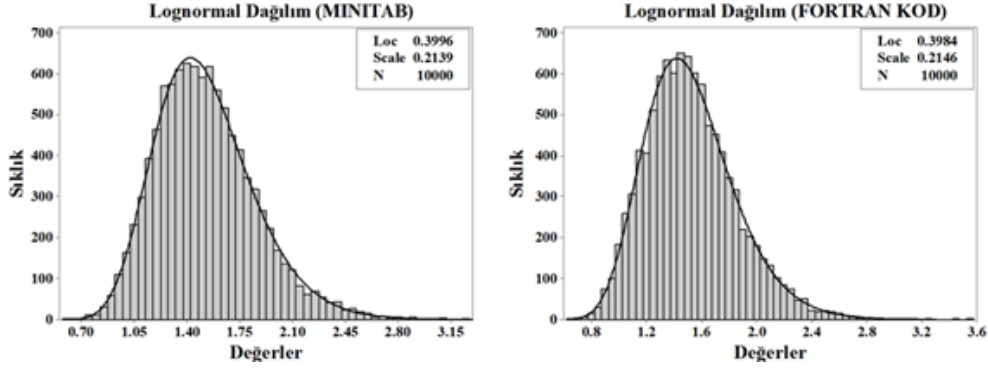
Her bir yük çevrimindeki çatlak ilerleme miktarının belirlenmesi için öncelikle ortalama çatlak ilerleme hızı hesaplanmaktadır. Sonrasında CT numuneleri ile yapılan karışık genlikli çatlak ilerleme testlerinden elde edilen çatlak ilerleme eğrilerindeki değişim seviyelerine göre kalibre edilmiş belli bir standart sapma değeri (0.001), olasılık dağılımından rastgele seçilmiş bir rakamla ölçeklendirilerek hesaplanan ortalama çatlak ilerleme hızına eklenmektedir. Burada rastgele seçilmiş olan ve standart sapmayı ölçeklendirmek amacıyla kullanılan rakam, histogram grafiklerinin verildiği şekillerde “da/dN çarpanı” olarak adlandırılmıştır. da/dN çarpanı ortalaması 0, standart sapması ( $\sigma$ ) 1 olan ve  $\pm 3\sigma$  aralığında normal dağılıma göre seçilmiş bir rakamdır. Normal dağılıma göre rastgele seçilmiş olan da/dN çarpanı ile matematiksel işlem yapılabilmesi için işlemdeki diğer elemanların da normal dağılım göstermesi gerekmektedir. Bu nedenle işlemdeki diğer eleman olan ortalama çatlak ilerleme hızının ve standart sapmanın logaritması alınarak normal dağılıma uygun hale getirilmesi sağlanmış, ardından işlem yapılmıştır. Ölçeklendirilmiş standart sapma değeri ile toplanan çatlak ilerleme hızının en son adımda ters logaritması alınması ile lognormal dağılıma uygun hale getirilmesi sağlanmıştır. Denklem 3.6.1’de, herhangi bir Monte Carlo analiz durumu için da/dN çatlak ilerleme oranı hesaplanması gösterilmektedir.

$$\log_{10}\left(\frac{da}{dN}\right) = \log_{10}\left(\frac{da}{dN}\right)_{ort} + (da/dN \text{ Çarpanı}) \cdot \log_{10}\left(\frac{da}{dN}\right)_{std.sapma} \quad (3.6.1)$$

CT numunelerinde iki-boyutlu çatlak ilerleme simülasyonlarında ASTM E399 standardındaki denklem, LJ numuneleri için ise Kısım 3.5.3’te verilmiş olan transfer fonksiyonu yardımıyla gerilme şiddet faktörleri hesaplanmaktadır.



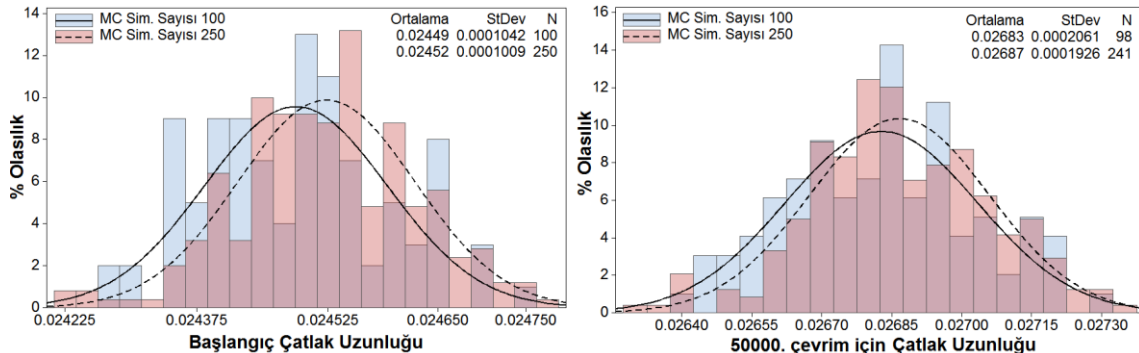
Şekil 3.6.1. Monte Carlo temelli çatlak ilerleme simülasyonu yazılımı için tasarlanan işlem adımları

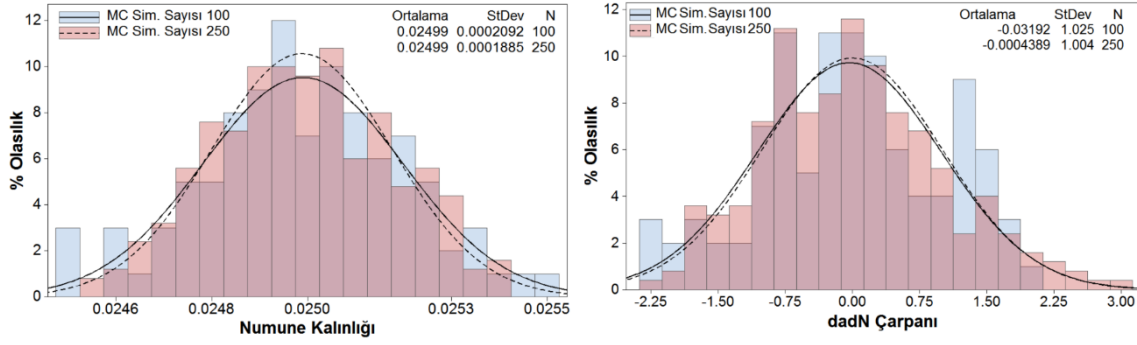


Şekil 3.6.2. MINITAB ve projede geliştirilen program ile üretilen rastgele verilerin histogram dağılımları

### 3.6.1 Olasılık Temelli Çatlak İlerleme Ömür Tahmini

Rastgele veri üretimi için çevrim içi açık kaynak kod olarak değerlendirilen Fortran alt-programı için doğrulama çalışmalarından sonra, yine Fortran kodlama dilinde Şekil 3.6.1’de verilen algoritmaya uygun olarak Monte Carlo yöntemine dayalı çatlak ilerleme simülasyonu için ana program oluşturulmuştur. Şekil 3.6.1’de belirtilen Monte Carlo Simülasyonu maksimum döngü sayısı, kullanıcı tarafından verilen bir girdi değeridir. Maksimum Monte Carlo Simülasyon döngü sayısı, ilgili girdi parametre dağılımlarından rastgele seçilecek olan değişkenlerin sayısını da belirlemektedir. Verilen bir değişken dağılımı, ortalama ve standart sapma ile tanımlanan dağılım aralığında daha fazla sayıda rastgele veri ile tarandığında hassasiyetin artması beklenmektedir. Bu nedenle maksimum Monte Carlo Simülasyon sayısının çok düşük tutulmaması uygun olacaktır. Çalışmamızda belirlenen döngü sayısının yeterliliğini sorgulamak amacıyla maksimum döngü sayısının 250 ve 100 olduğu iki boyutlu çatlak ilerlemesi için iki farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda rastgele seçilmiş olan değişkenlerin histogram grafikleri Şekil 3.6.3’te verilmiştir. Histogram grafiklerinde 100 ile 250 adet maksimum Monte Carlo Simülasyon döngü sayısı arasında önemli bir fark görülmemiştir. Sonuçların kontrolü ve grafik edilmesi daha kolay olacağından sonraki simülasyonlarda maksimum Monte Carlo döngü sayısı 100 olarak belirlenmiştir.





Şekil 3.6.3. Monte Carlo simülasyonu döngü sayısının değişken dağılımlarına etkisi

Monte Carlo Simülasyonu gerçekleştirilecek olan yük spektrumu için harici bir metin dosyası oluşturulur. Daha sonra, çalıştırılan simülasyon programına kullanıcı tarafından numune kalınlığı, başlangıç çatlak uzunluğu, yük hücresinin hassasiyeti ve  $da/dN$  çarpanı için ortalama ve standart sapma değerleri girilmektedir. CT numunesi ve LJ numunesi için gerilme şiddet faktörleri ve parametreler açısından değişiklikler içeren iki farklı kod hazırlanmıştır. LJ numunesi için simülasyon yapılacaksa yukarıda sayılan değişkenlere ek olarak başlangıç çatlak boyutu genişlik ve derinlik olarak iki ayrı değişken ve EDM çentik oyuğunun  $\Delta Z$  hata payı da değişken olarak tanımlanmalıdır. Bu değişkenler kullanıcı tarafından girildikten sonra kod çatlak ilerleme ömrünü her bir yük adımı için ayrı ayrı hesaplayarak çatlak ilerleme eğrilerinin sayısal değerlerini ve toplam ömürleri hesaplamaktadır. Sonuç olarak her bir Monte Carlo Simülasyonu için üç ayrı çıktı metin dosyası üretilmektedir. Bu dosyalardan biri yük profilinin her bir noktası için hesaplanan çatlak ilerlemesi ve ilgili diğer değerleri içeren “\*.txt” isimli dosyadır. Diğer ikisi ise belirli aralıklarla sırasıyla ilerleyen çatlak önünün orta ve kenar noktaları için işlem sonuçlarını içeren “\*.plot.txt” ve “\*.edge\_plot.txt” dosyalarıdır. Her bir simülasyonda tekrar tekrar analiz edilen spektrum profilinin on binlerce noktası için hesap yapıldığı düşünüldüğünde, belirli aralıklarla alınan “\*.plot.txt” dosyaları ile grafik işlemleri gerçekleştirmenin daha kolay olacağı aşikârdır. Üretilen dosyalara örnek olarak Şekil 3.6.4’te dosyanın içinden bir ekran görüntüsü verilmiştir.

MC Sim	I_block	I_SPPI	I_SPPI_Gl	I_Cyc_Gl	I_Cyc_Loc	dadN	ASze(I_SPPI_Gl)	SPPI_Load(I_SPPI)	SIF(I_SPPI_Gl)	DeltaSIF(I_SPPI_Gl)	a_plast(I_SPPI_Gl)	P_ZSze(I_SPPI_Gl)	FI
1	1	1	1	0	0	0.0000E+00	0.2450E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.2052-288	0.0000E+00	0.0000E+00
1	1	200	100	100	0.8938E-07	0.2451E-01	0.8000E+01	0.1342E+02	0.5031E+01	0.2455E-01	0.3987E-04	0.1000E+01	0.0000E+00
1	1	201	201	100	0.0000E+00	0.2451E-01	0.5000E+01	0.3385E+01	-0.5031E+01	0.2455E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	1	202	202	100	0.0000E+00	0.2451E-01	0.3000E+01	0.5031E+01	-0.3354E+01	0.2455E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	1	401	401	200	0.8957E-07	0.2452E-01	0.8000E+01	0.1342E+02	0.5034E+01	0.2456E-01	0.3991E-04	0.1000E+01	0.0000E+00
1	1	402	402	200	0.0000E+00	0.2452E-01	0.5000E+01	0.8389E+01	-0.5034E+01	0.2456E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	1	601	601	300	0.2408E-07	0.2452E-01	0.6000E+01	0.1007E+02	0.3356E+01	0.2454E-01	0.2246E-04	0.6121E+00	0.0000E+00
1	1	602	602	300	0.0000E+00	0.2452E-01	0.2000E+01	0.3356E+01	-0.6713E+01	0.2454E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	1	801	801	400	0.2409E-07	0.2452E-01	0.6000E+01	0.1007E+02	0.3357E+01	0.2455E-01	0.2247E-04	0.6212E+00	0.0000E+00
1	1	802	802	400	0.0000E+00	0.2452E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	-0.1007E+02	0.2455E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	1	1001	1001	500	0.3087E-07	0.2453E-01	0.7000E+01	0.1175E+02	0.3358E+01	0.2456E-01	0.3059E-04	0.7225E+00	0.0000E+00
1	1	1002	1002	500	0.0000E+00	0.2453E-01	0.5000E+01	0.1175E+02	0.3358E+01	0.2456E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	2	1	1003	500	0.0000E+00	0.2453E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.2456E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	2	200	1202	600	0.8997E-07	0.2454E-01	0.8000E+01	0.1344E+02	0.5039E+01	0.2458E-01	0.4000E-04	0.8629E+00	0.0000E+00
1	2	201	1203	600	0.0000E+00	0.2454E-01	0.5000E+01	0.8399E+01	-0.5039E+01	0.2458E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	2	202	1204	600	0.0000E+00	0.2454E-01	0.3000E+01	0.5039E+01	-0.3360E+01	0.2458E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	2	401	1403	700	0.9017E-07	0.2455E-01	0.8000E+01	0.1345E+02	0.5042E+01	0.2459E-01	0.4005E-04	0.9296E+00	0.0000E+00
1	2	402	1404	700	0.0000E+00	0.2455E-01	0.5000E+01	0.8404E+01	-0.5042E+01	0.2459E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	2	601	1603	800	0.2423E-07	0.2455E-01	0.6000E+01	0.1009E+02	0.3362E+01	0.2457E-01	0.2254E-04	0.6121E+00	0.0000E+00
1	2	602	1604	800	0.0000E+00	0.2455E-01	0.2000E+01	0.3362E+01	-0.6724E+01	0.2457E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1	2	801	1803	900	0.2424E-07	0.2455E-01	0.6000E+01	0.1009E+02	0.3363E+01	0.2457E-01	0.2254E-04	0.6213E+00	0.0000E+00

Şekil 3.6.4. \*.plot.txt dosyasının örnek ekran görüntüsü



İstenilen sayıda Monte Carlo Simülasyonu için dosyalar oluşturulduktan sonra grafikler Excel ortamında hazırlanmaktadır. Sırasıyla her bir dosyanın içinden çevrim sayısı (I\_Cyc\_GI) ve çatlak uzunluğu (ASze(I\_SPPI\_GI) değerleri bir Excel sütununa kopyalanmakta ve grafik edilmektedir. Bu işlemin çok sayıda dosya için yapılması zahmetli olduğundan Excel Geliştirici ortamında bir VBA makro hazırlanmıştır. Makro sayesinde dosyalardan değerlerin kopyalanması otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Makronun çalışacağı Excel ile \*.txt dosyaları aynı dizinde bulunmalı ve Excel çalışma kitabının ilk sekmesinde Monte Carlo Simülasyonun son sayısı girilmelidir. Makro için hazırlanan kod Şekil 3.6.5'ten incelenebilir.

```
Sub dosyaOku()  
  
For a = 1 To Sheets("dosyalar").Cells(2, 1)  
    txtFiles = CStr(a) & ".plot_txt"  
    Cells(1, a) = txtFiles  
  
    Open txtFiles For Input As #1  
    i = 2  
  
    Do Until EOF(1)  
        Line Input #1, textline  
        Text = Text & textline  
        Cells(i, a) = Mid(textline, 61, 11)  
        i = i + 1  
    Loop  
  
    Close #1  
Next a  
Cells(2, 1).EntireRow.Delete  
'MsgBox Sheets("dosyalar").Cells(2, 1)  
End Sub
```

Şekil 3.6.5. Çatlak uzunluk değerlerini \*.txt dosyasından Excel'e kopyalayan VBA makro

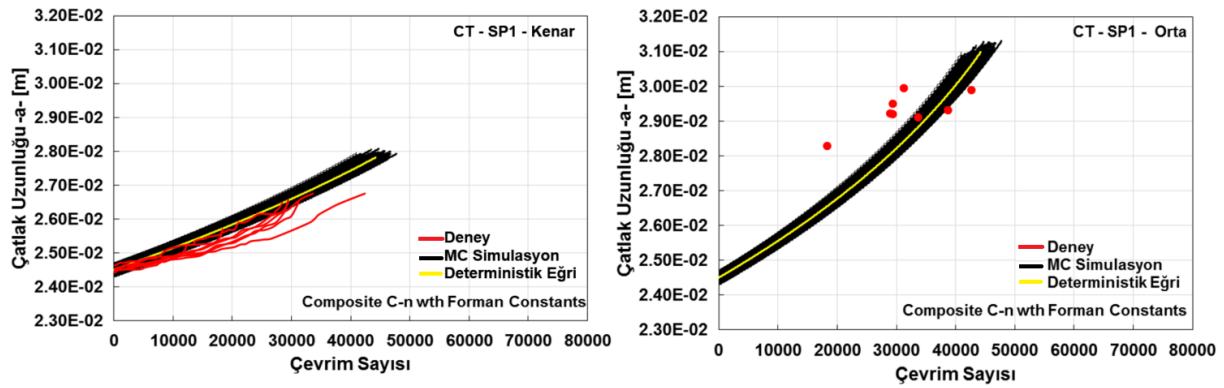
Excel ortamında tüm Monte Carlo simülasyonları için değerler ayrı ayrı sütunlara kopyalandıktan sonra olasılık dağılımlarının elde edilmesi için MINITAB programı kullanılmaktadır.

### 3.6.2 Deneyler ile Karşılaştırma ve Model İyileştirme

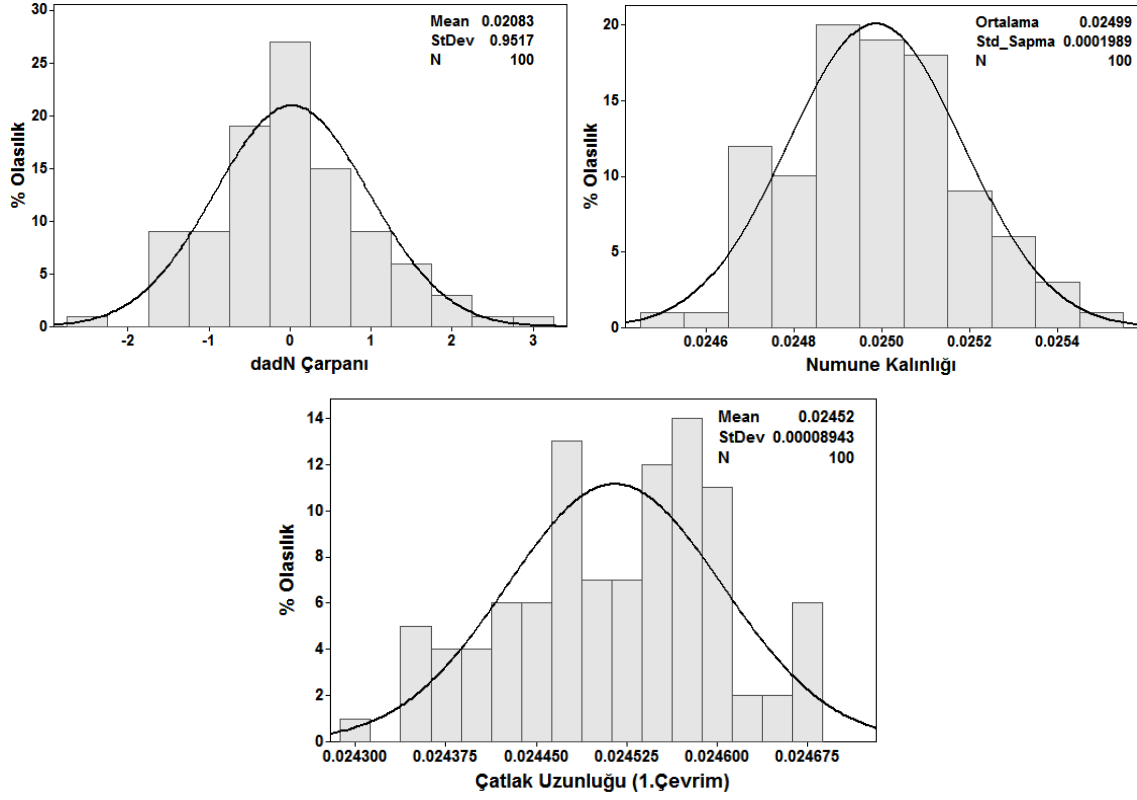
Bölüm 3.4.3'te CT numuneleri ile iki-boyutlu çatlak ilerlemesi için herhangi bir standart sapma olmadan hesaplanan ömür değerleri ve deneylerle karşılaştırması verilmişti. Bu bölüm altında ise Monte Carlo yöntemi kullanılarak değişkenlerdeki ortalama ve standart sapma değerlerinin dikkate alındığı çatlak ilerleme simülasyonlarının sonuçları verilecektir. İki boyutlu çatlak ilerlemesi için verilen grafiklerde, iyileştirilmiş modelin içerdiği Spektrum Aşırı Yük indeksi (SOL İndeks) kullanılmıştır. Konu ile ilgili detaylı açıklama Bölüm 3.4.3'ten okunabilir. Şekil 3.6.6 – 61 arasında CT numuneleri için SP1 ve SP2 yüklemeleri altında gerçekleştirilen Monte Carlo Simülasyonlarına ait çatlak ilerleme ömür grafikleri, girdi ve çıktıların dağılımları, çatlak ilerleme yavaşlaması (retardation) ve gerilme oranı (stress ratio, R) etkileri de dikkate alınarak

değerlendirilen her bir model için ayrı ayrı verilmiştir. Monte Carlo Simülasyonu çıktılarındaki dağılımlar, herhangi bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluğu olasılık dağılımı veya herhangi bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen yük çevrim sayısı olasılık dağılımı olarak iki farklı şekilde belirlenebilmektedir. Bu iki tür dağılıma ait örnekler de Şekil 3.6.6-61 aralığında görülmektedir. Verilen dağılımlar, normal olasılık dağılımları olup, bu dağılımlar kullanılarak kümülatif dağılım grafikleri de ayrıca elde edilebilir. Ayrıca Şekil 3.6.6 – 61’de verilen sonuçlar, CT numunesinin çatlak ucu serbest yüzey (kenar) ve çatlak ucu ortası (orta) noktalarının her ikisi için de verilmiştir.

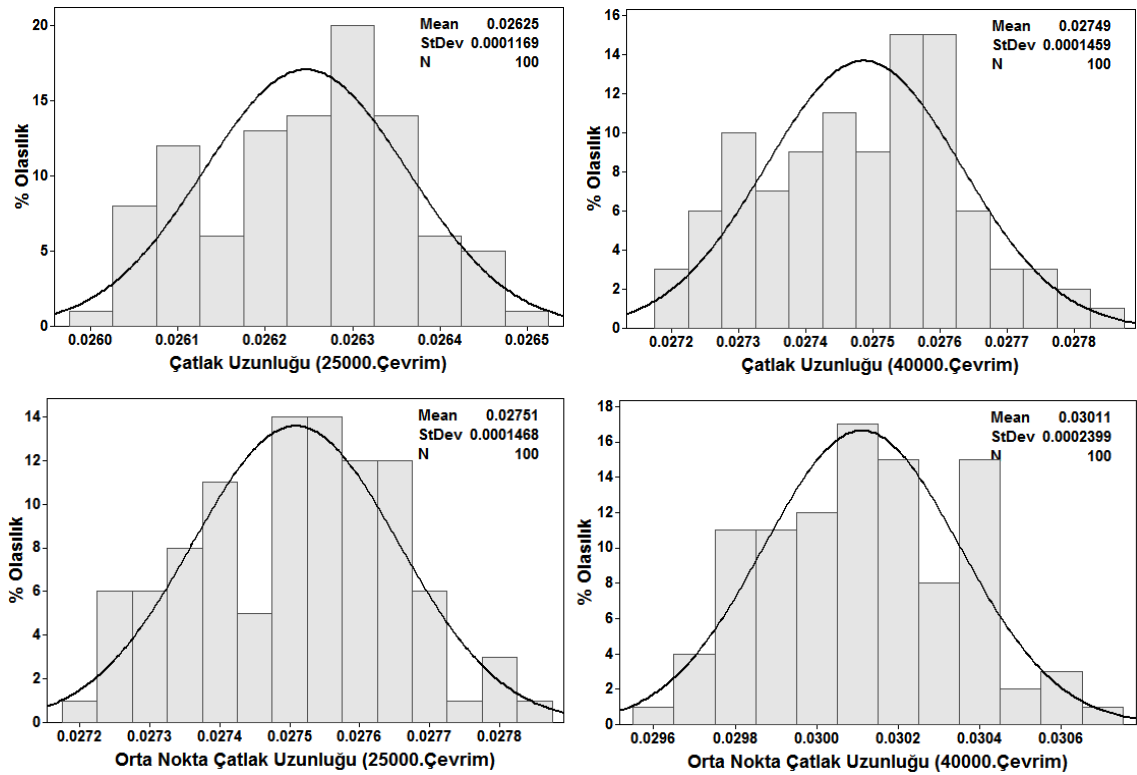
Daha önce açıklanan farklı modeller kullanılarak gerçekleştirilen olasılık temelli çatlak ilerleme analizlerinden elde edilen aşağıda verilen sonuçlar içerisinde, her bir numune ve yük durumu için sunulan ilk iki model olan “Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli” ve “Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli” içerisinde, her bir yük çevrimi için ilgili modele göre ortalama gerilme etkisi hesabı yapılmamakta olup, sadece gerilme şiddet faktörü aralığı ( $\Delta K$ ) ve Forman ve Walker modelleri kullanılarak farklı R-oranlarına göre birleştirilmiş da/dN eğrisinin C-n değerleri ile çatlak ilerleme hesabı yapılmaktadır. Bir başka deyişle, denenen yaklaşımlardan ikisi olan bu hesaplamalarda, Forman veya Walker modeli ile elde edilen kompozit da/dN eğrileri kullanılarak, R-oranı etkisi (mean stress effect, R-ratio) bir ortalama etki yaklaşımı ile ele alınmış, her bir yük çevrimi için ise çatlak ilerleme gecikmesi (crack propagation retardation) hesabı Wheeler modeline göre yapılmıştır. Aşağıda sunulan diğer tüm modellerde ise, ilgili çatlak ilerleme gecikmesi ve/veya R-oranı hesaplamaları her bir yük çevrimi için ayrı ayrı yapılmıştır.



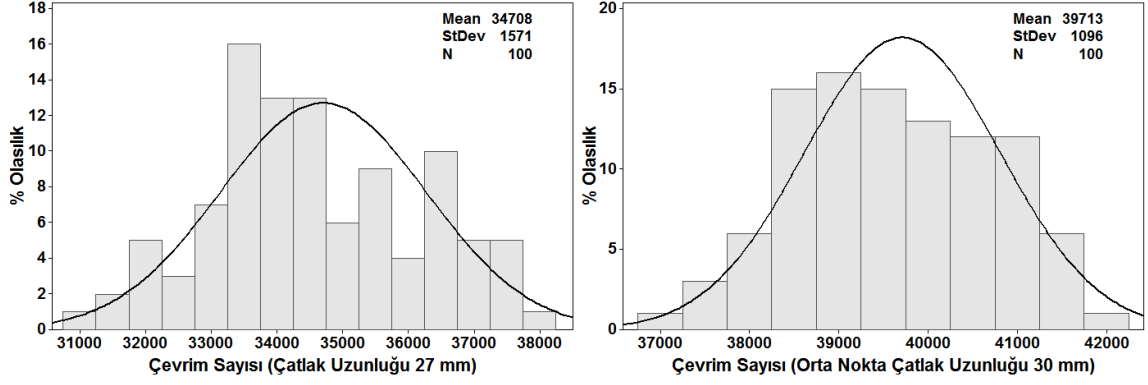
Şekil 3.6.6. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



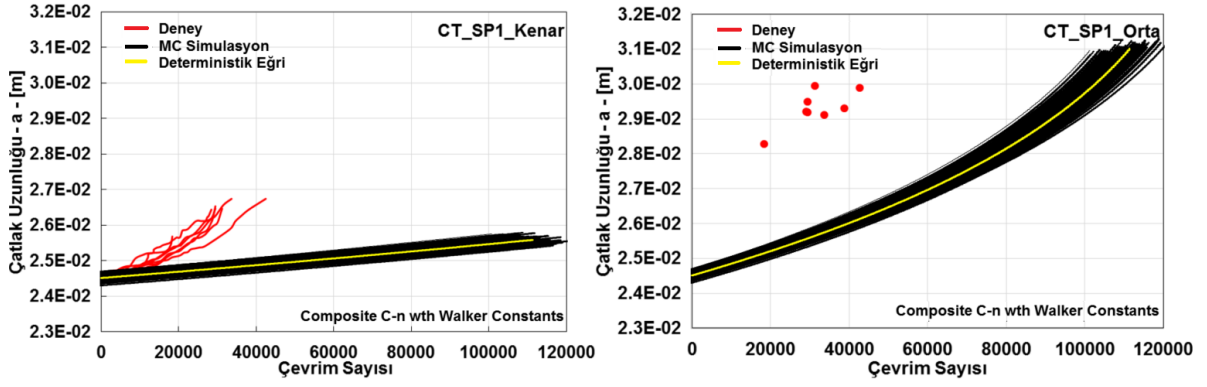
Şekil 3.6.7. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



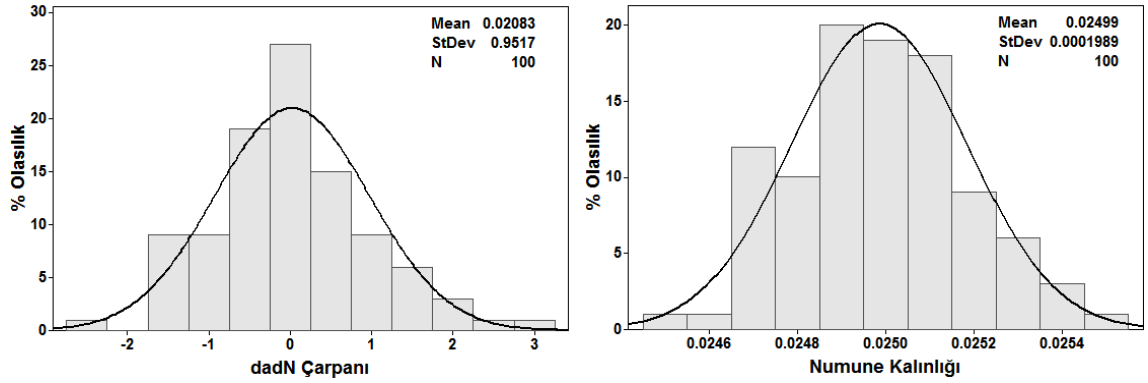
Şekil 3.6.8. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)

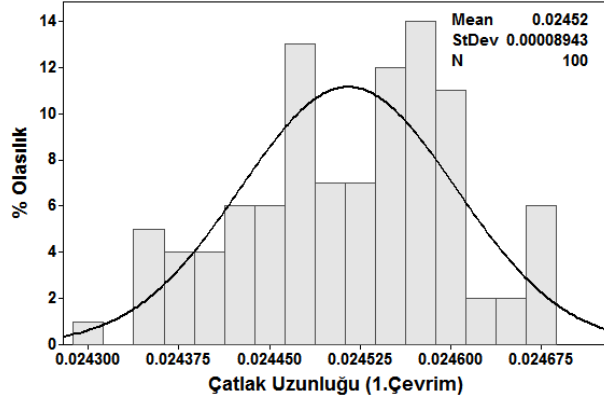


Şekil 3.6.9. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)

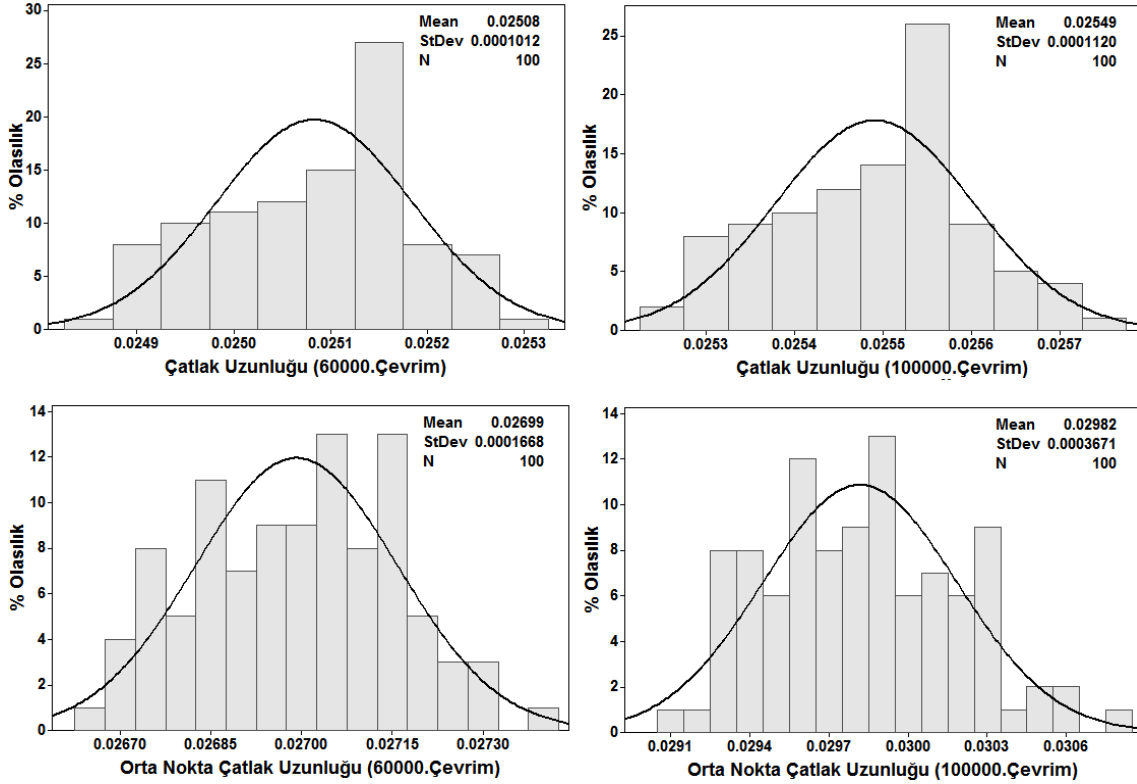


Şekil 3.6.10. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

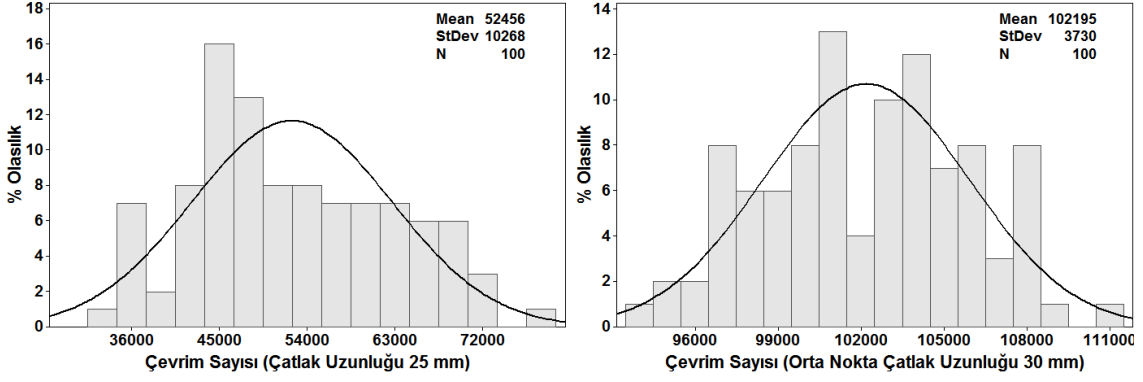




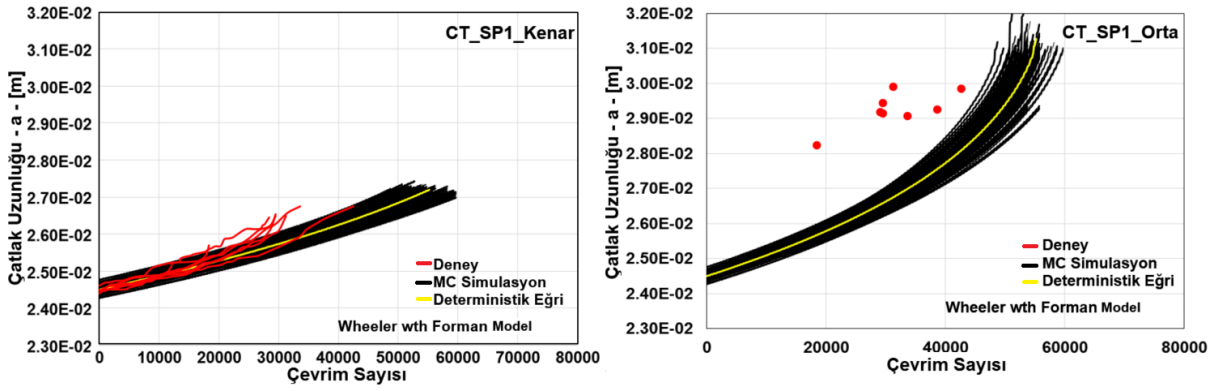
Şekil 3.6.11. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



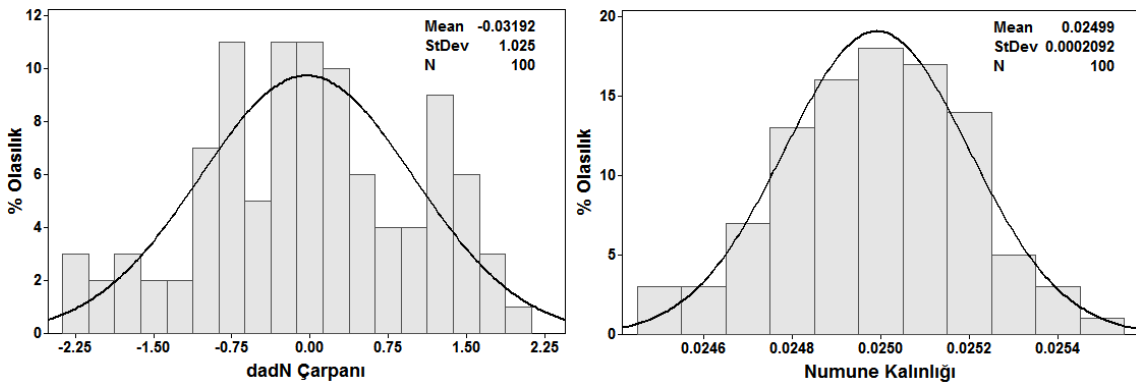
Şekil 3.6.12. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

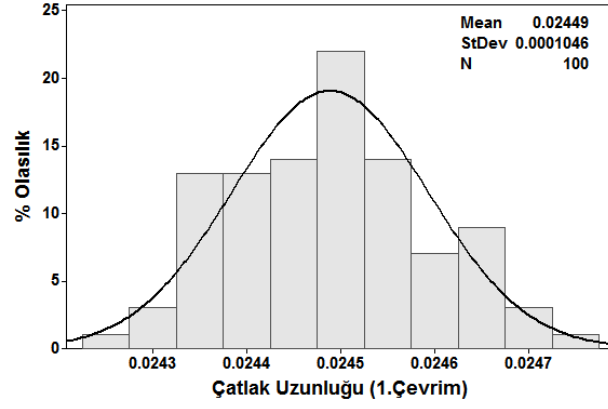


Şekil 3.6.13. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

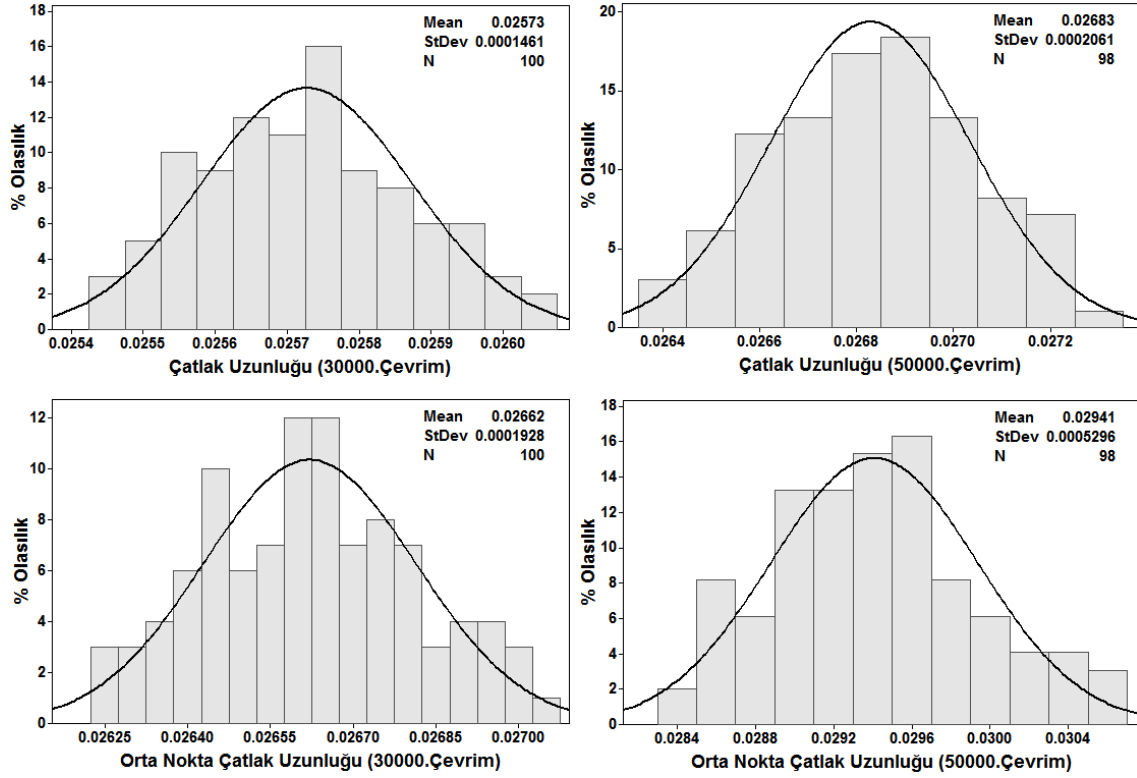


Şekil 3.6.14. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

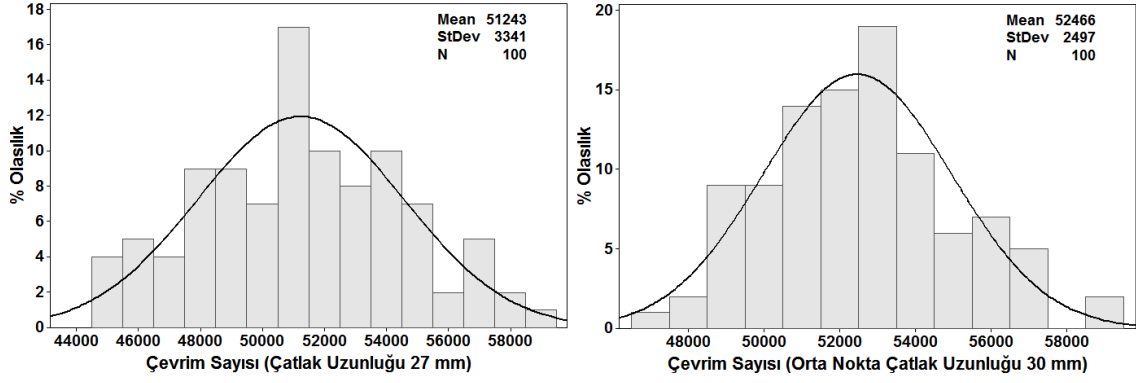




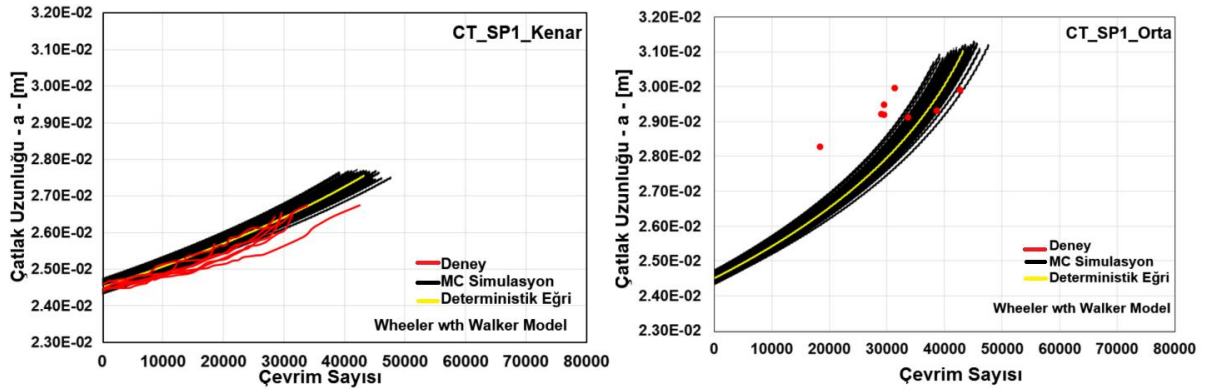
Şekil 3.6.15. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



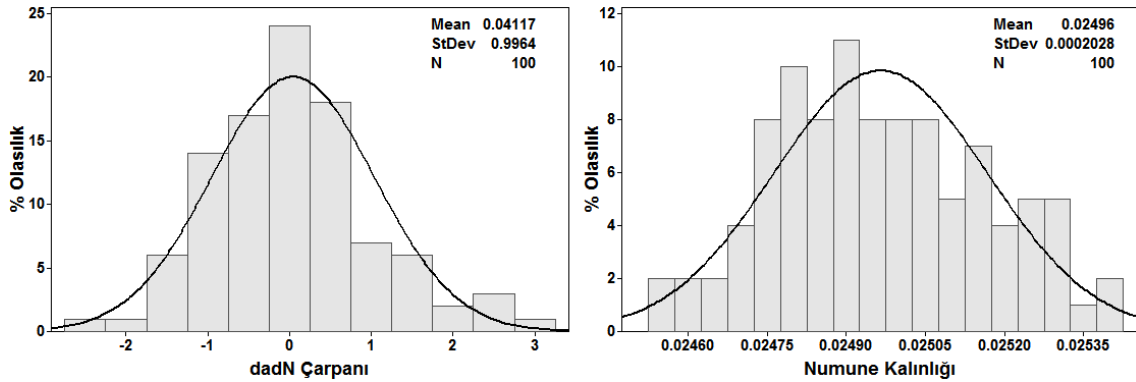
Şekil 3.6.16. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



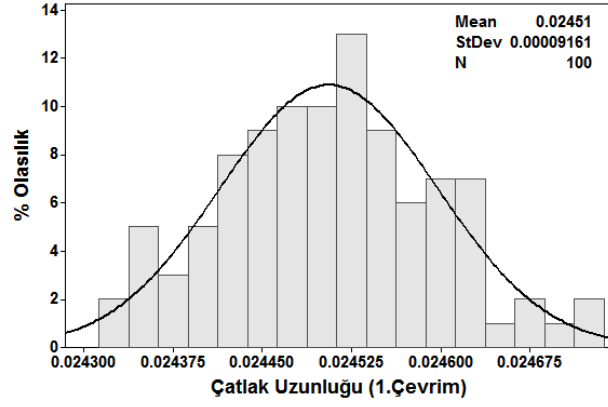
Şekil 3.6.17. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



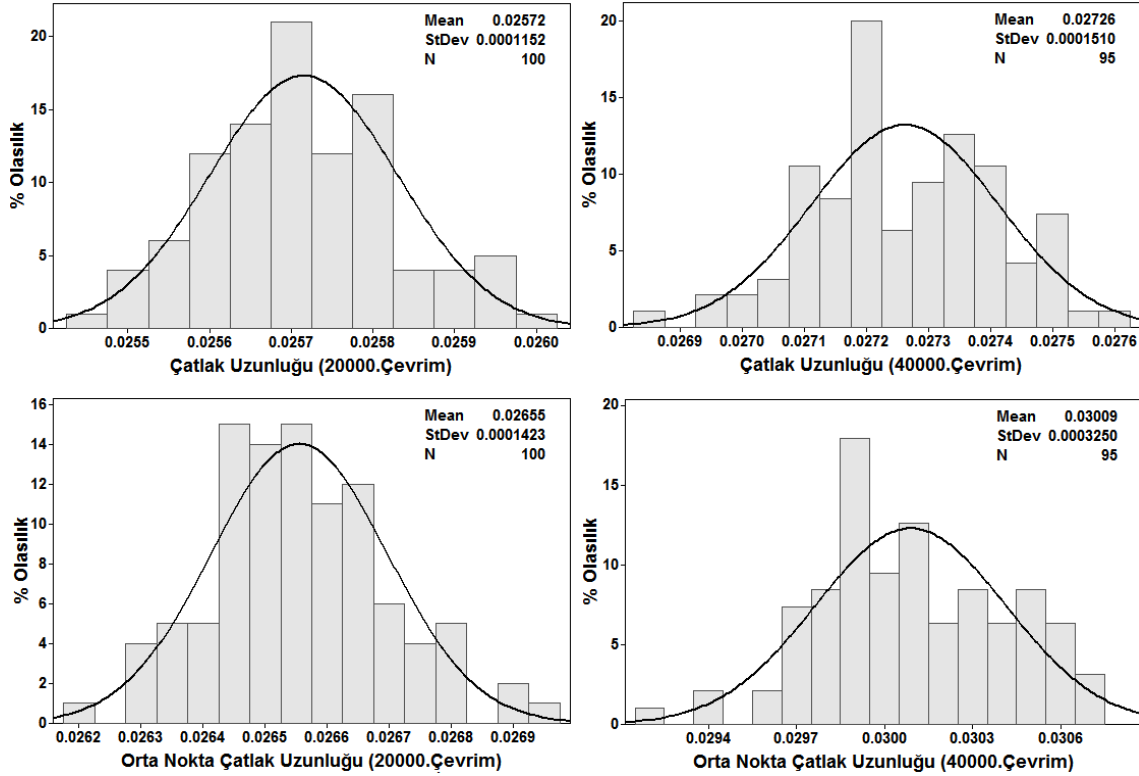
Şekil 3.6.18. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



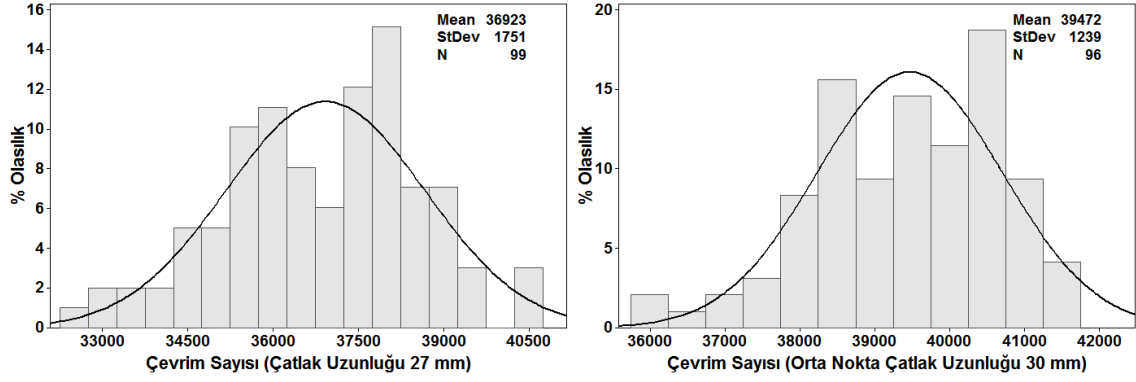




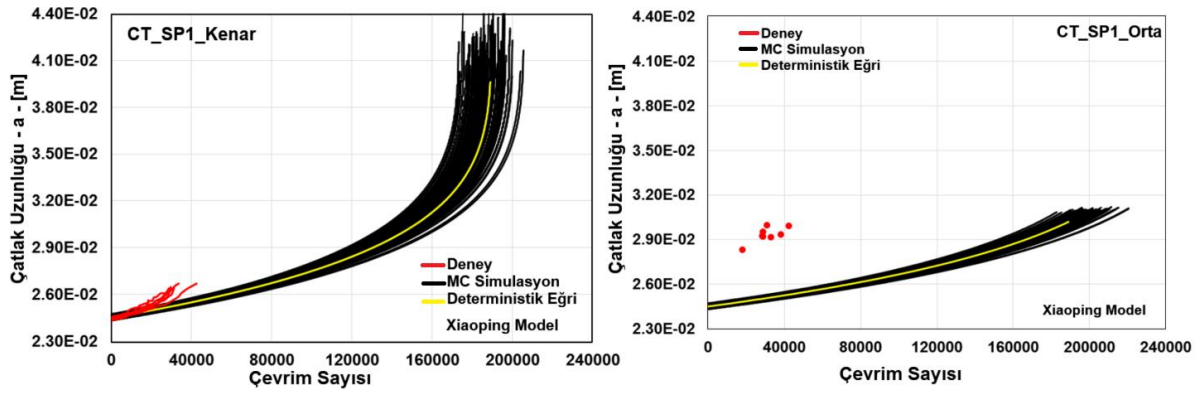
Şekil 3.6.19. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



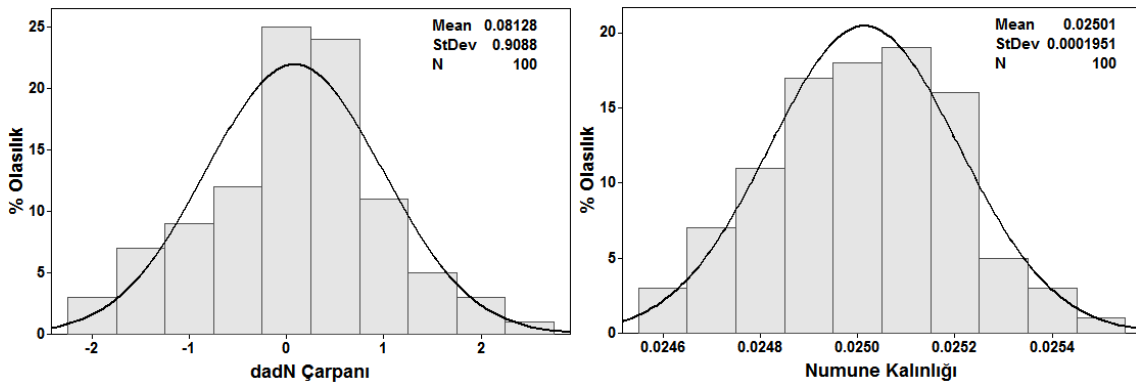
Şekil 3.6.20. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)

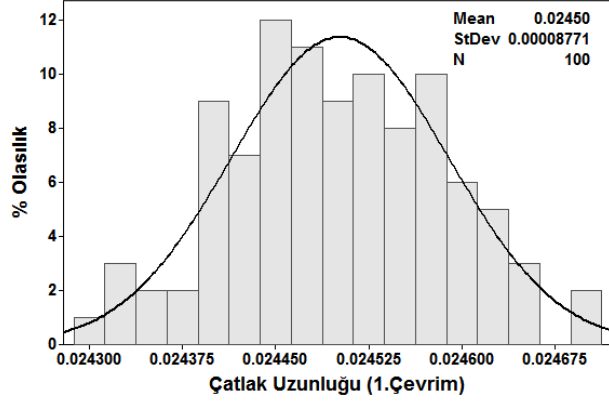


Şekil 3.6.21. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)

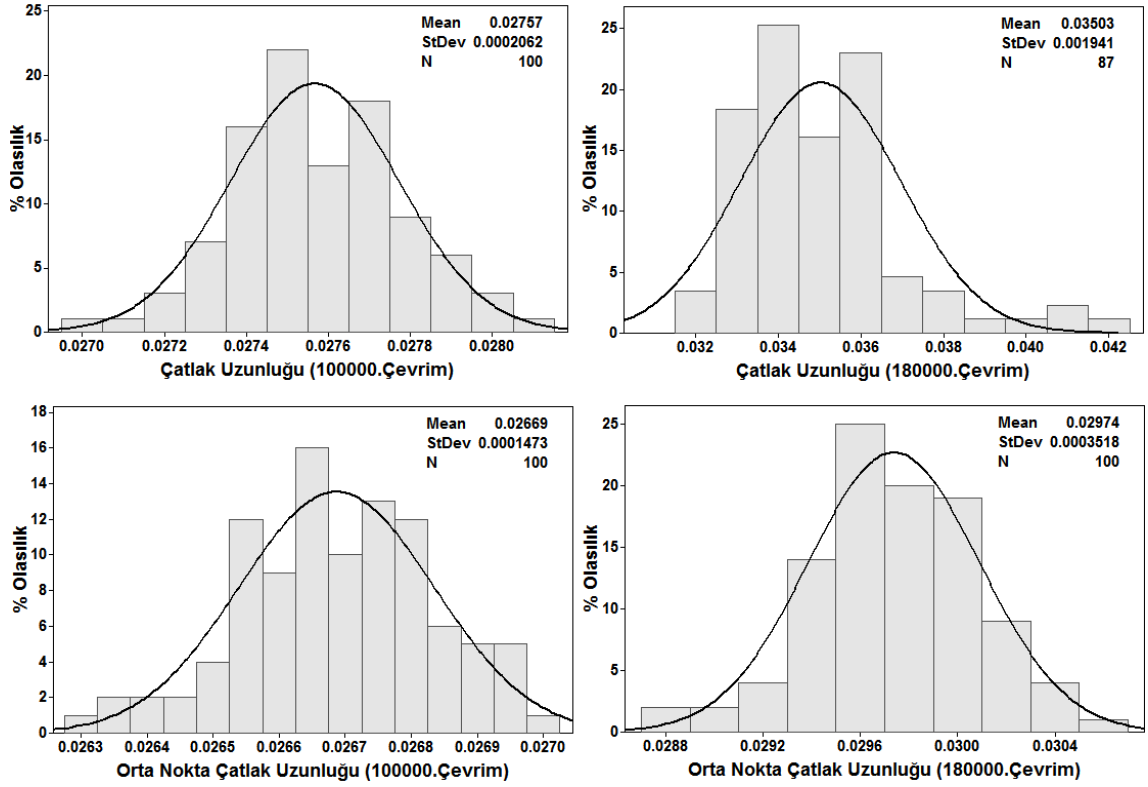


Şekil 3.6.22. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

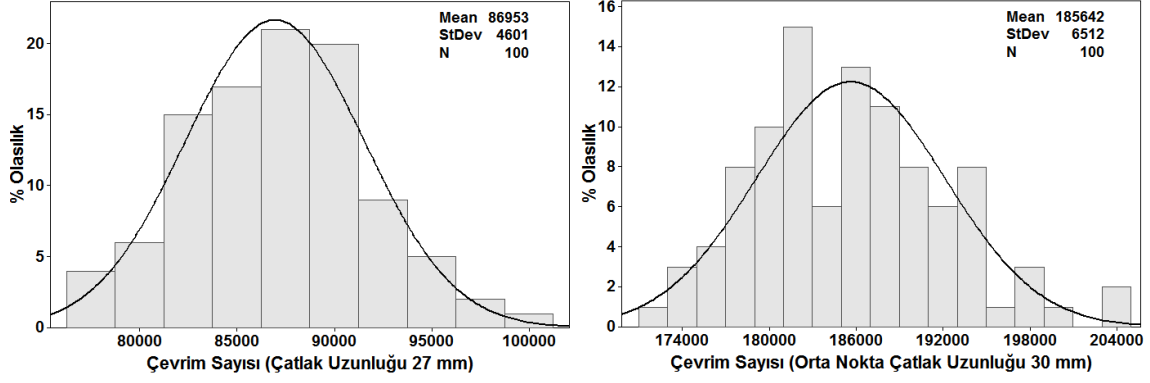




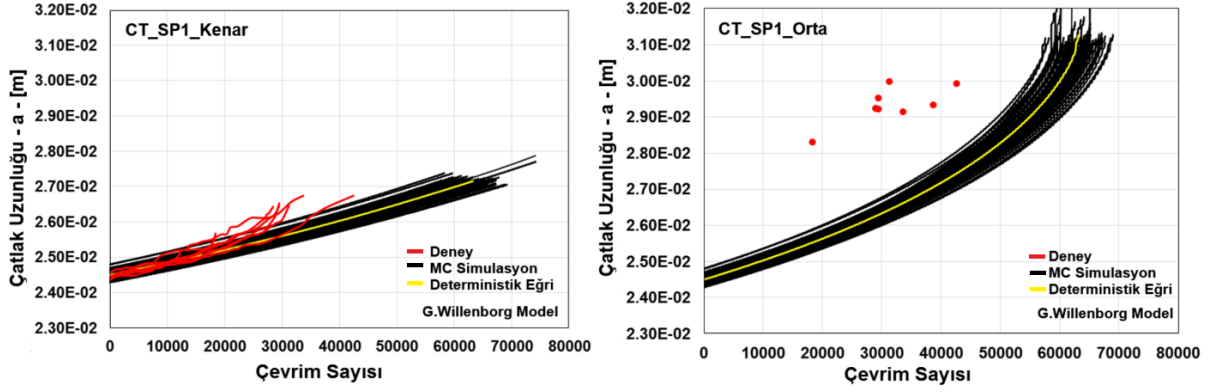
Şekil 3.6.23. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



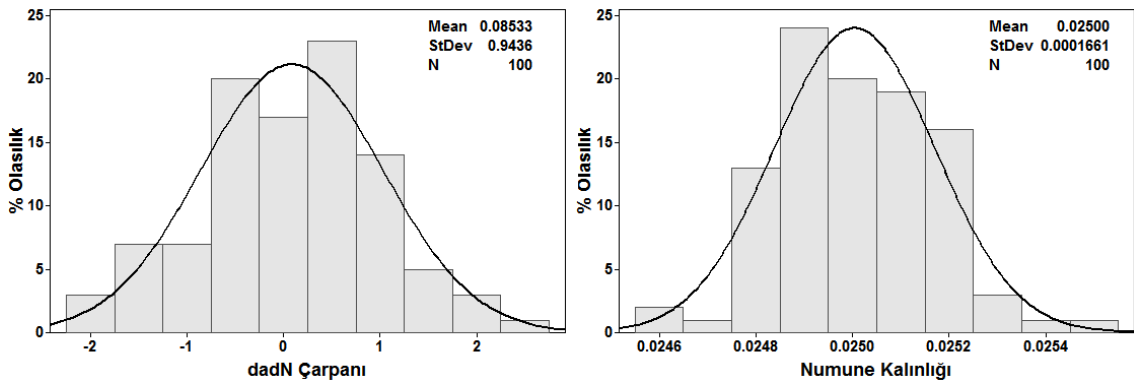
Şekil 3.6.24. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

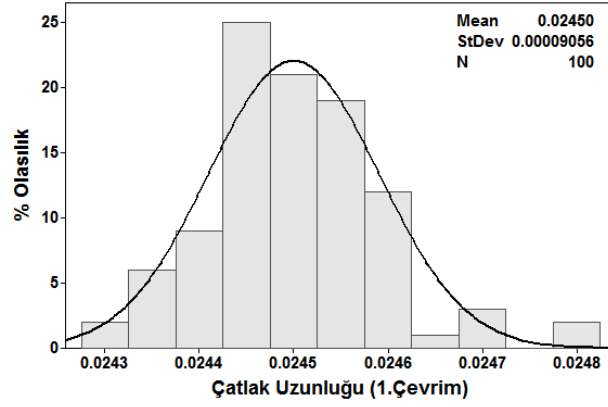


Şekil 3.6.25. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

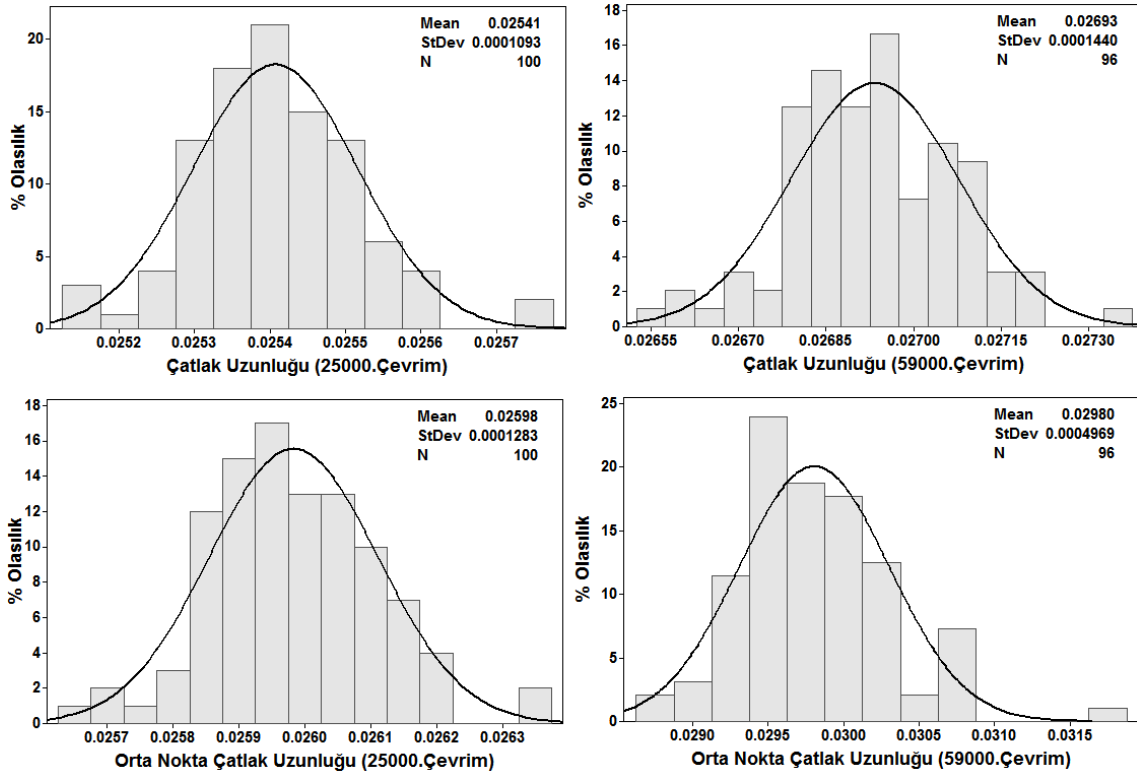


Şekil 3.6.26. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)

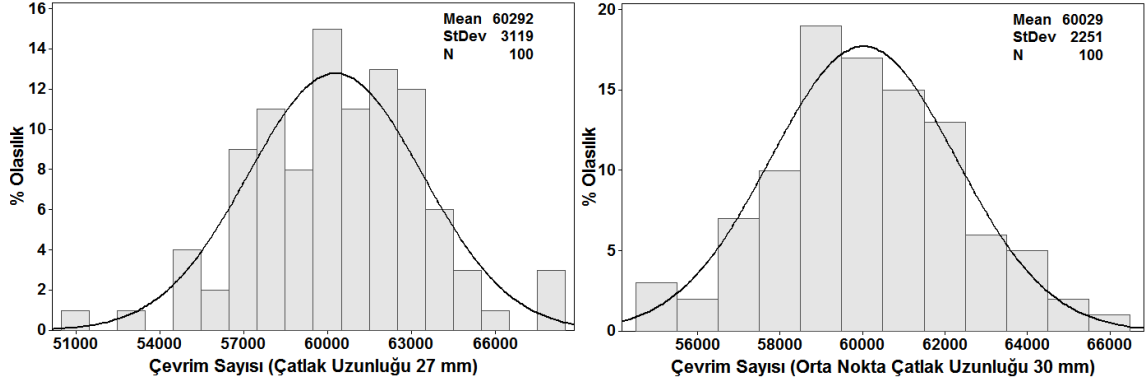




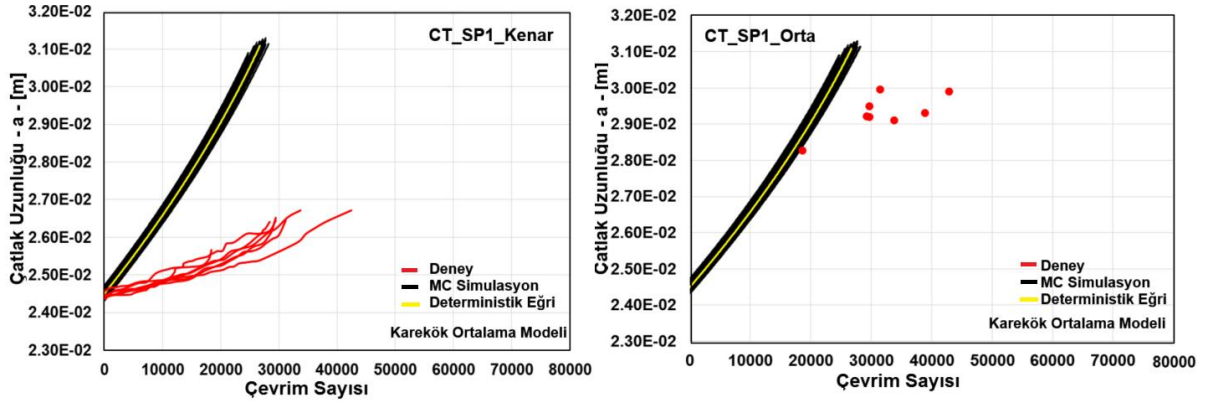
Şekil 3.6.27. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



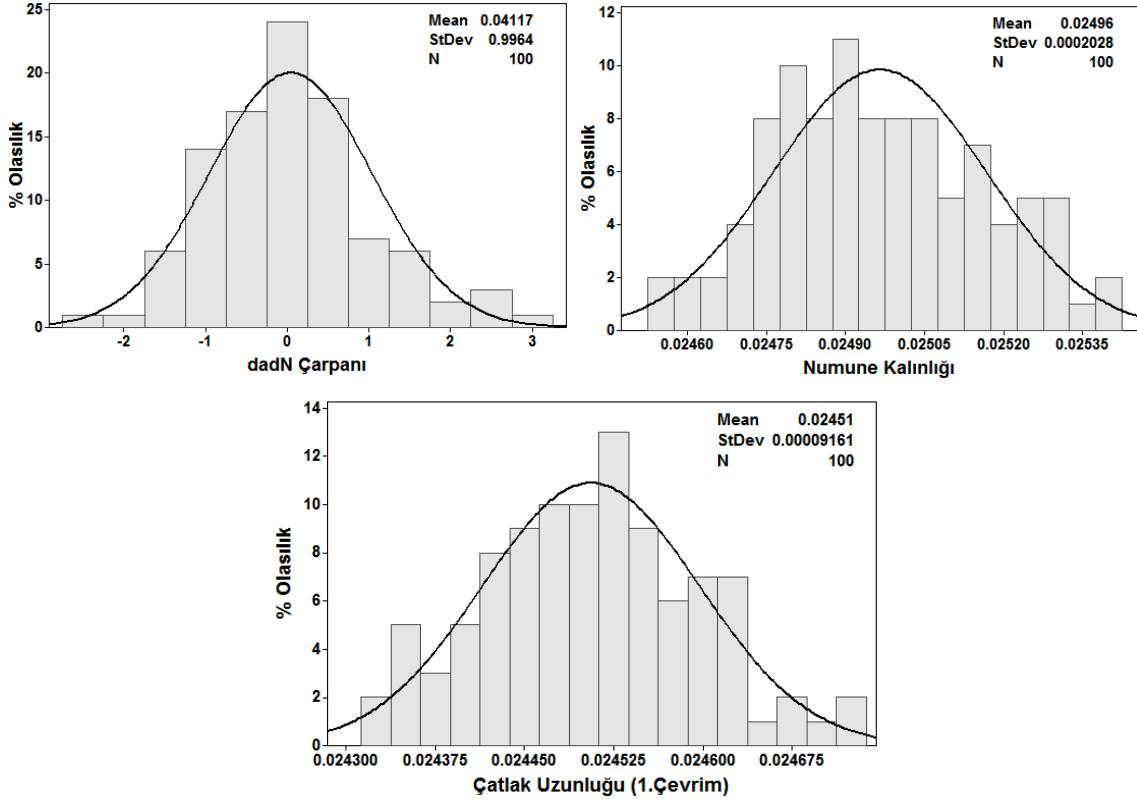
Şekil 3.6.28. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



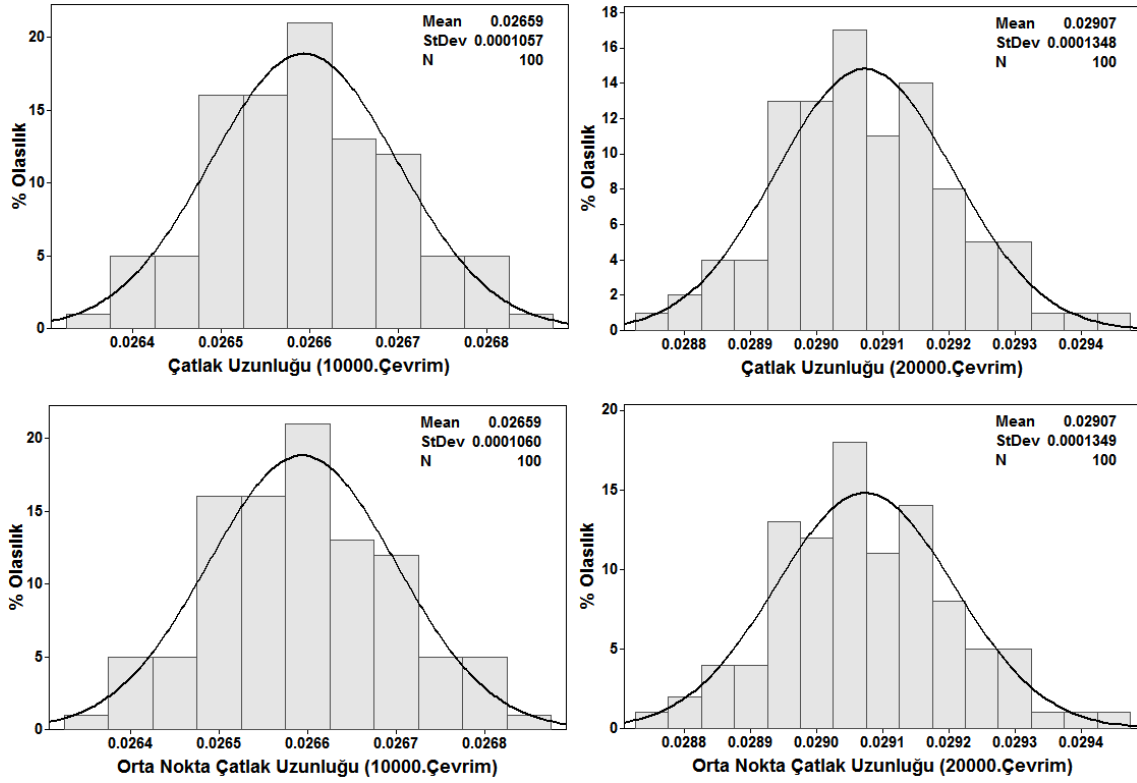
Şekil 3.6.29. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



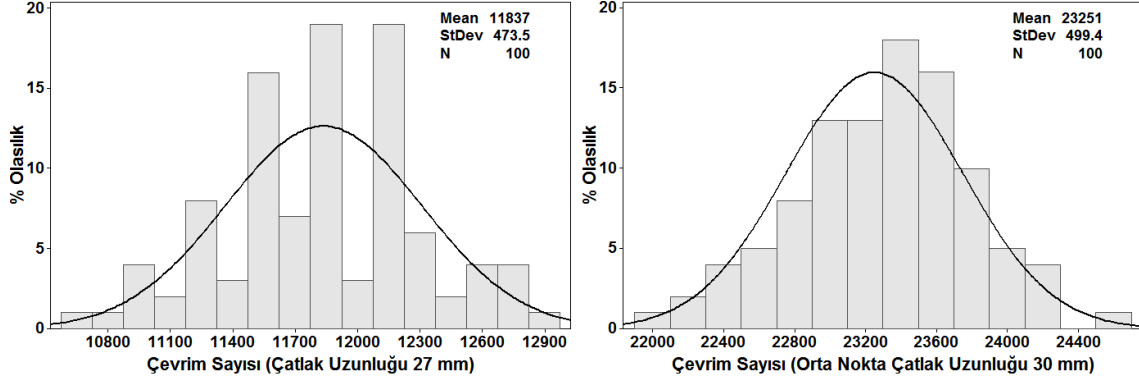
Şekil 3.6.30. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



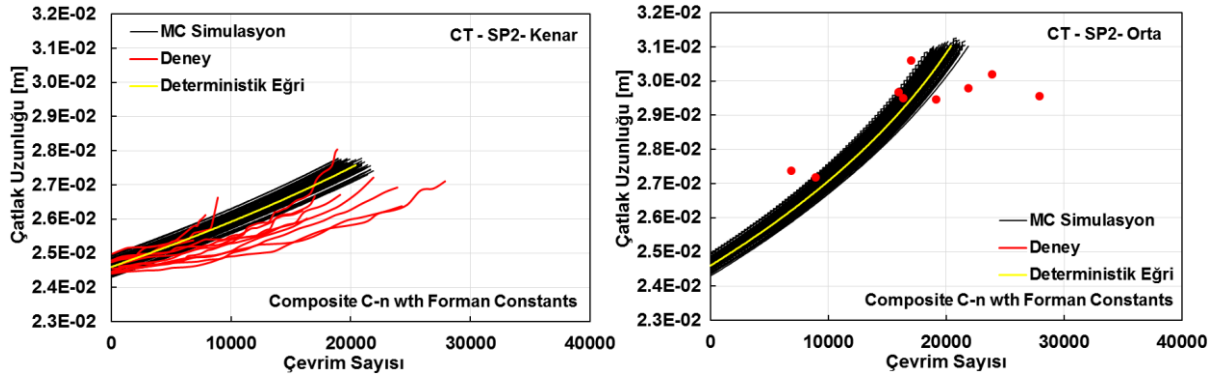
Şekil 3.6.31. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



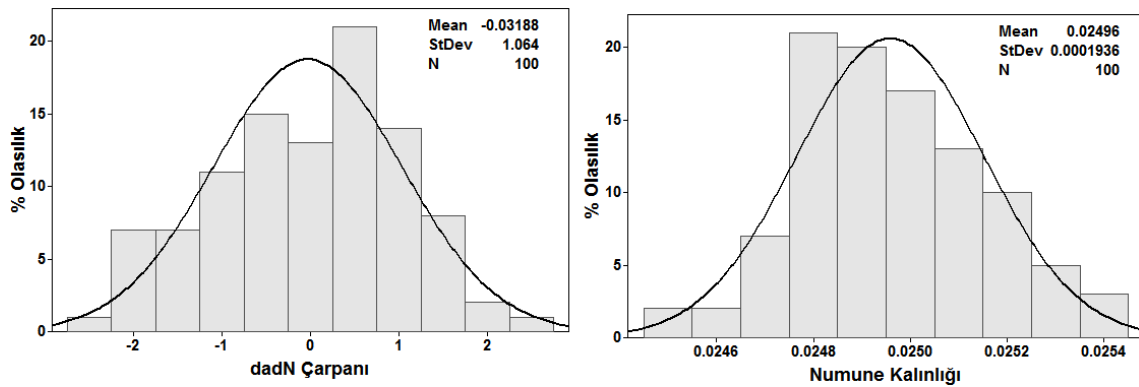
Şekil 3.6.32. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



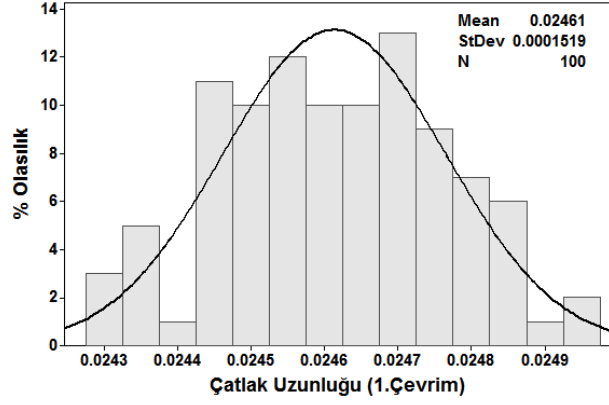
Şekil 3.6.33. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



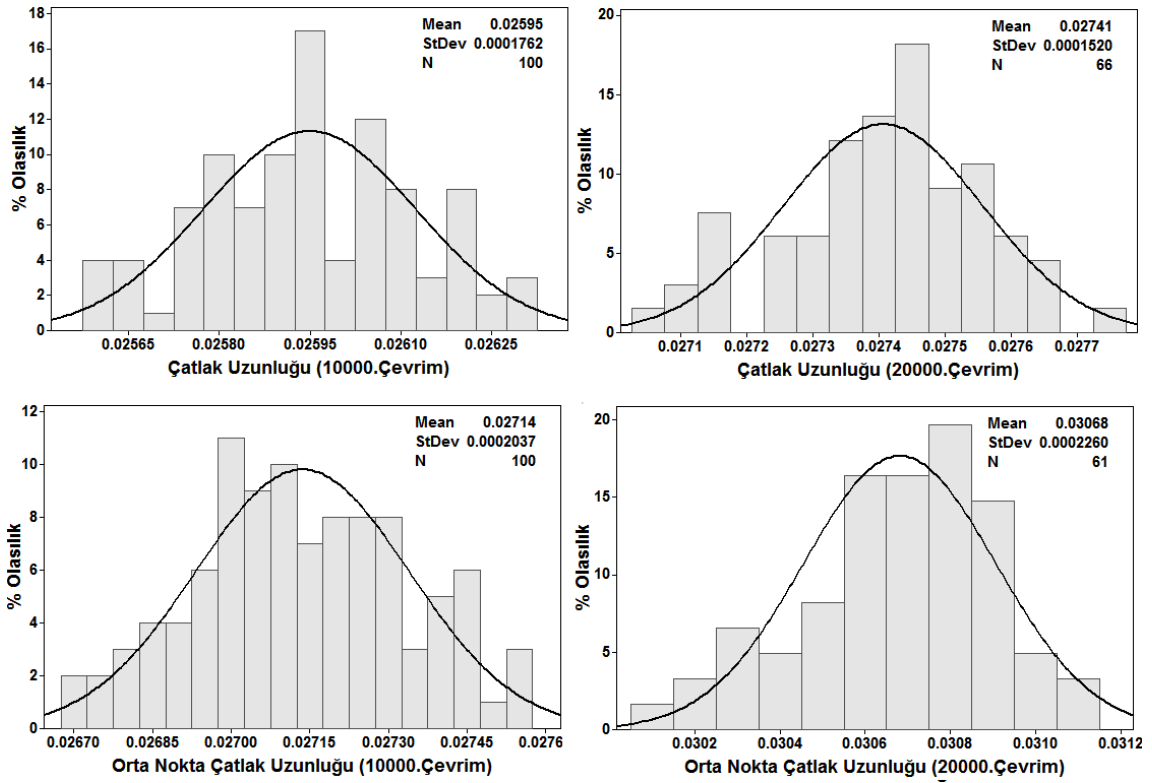
Şekil 3.6.34. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



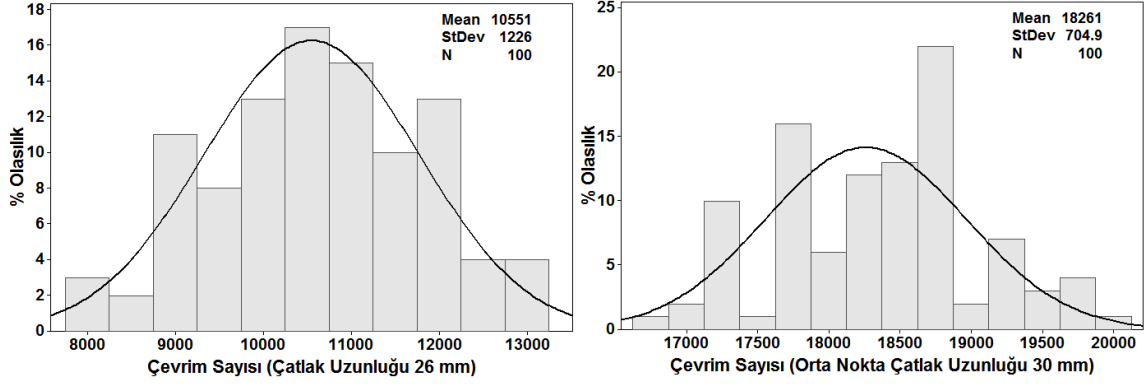




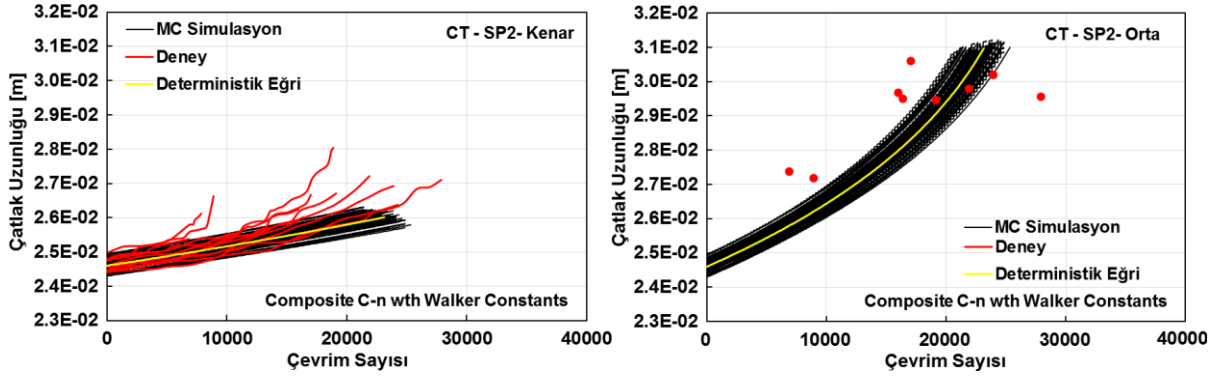
Şekil 3.6.35. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



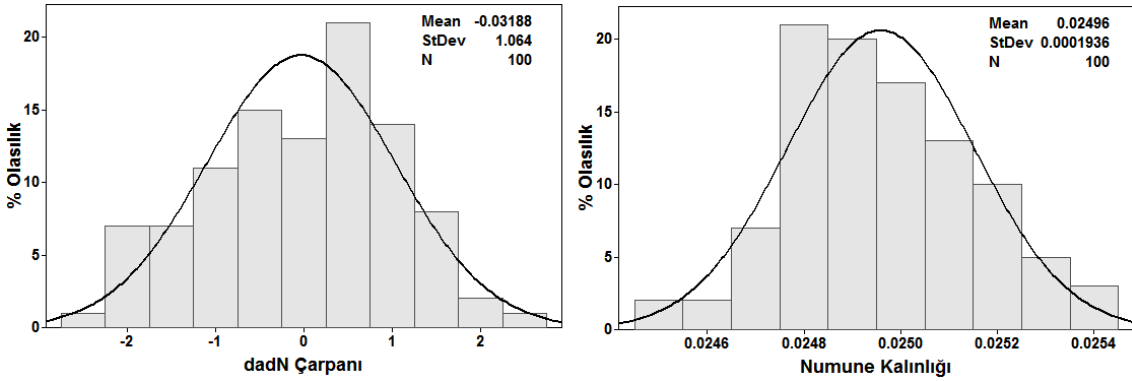
Şekil 3.6.36. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)

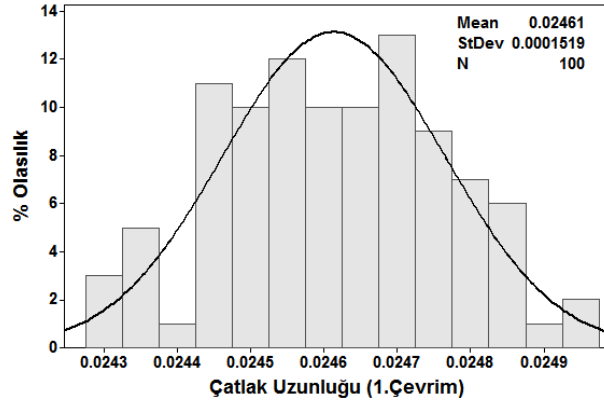


Şekil 3.6.37. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)

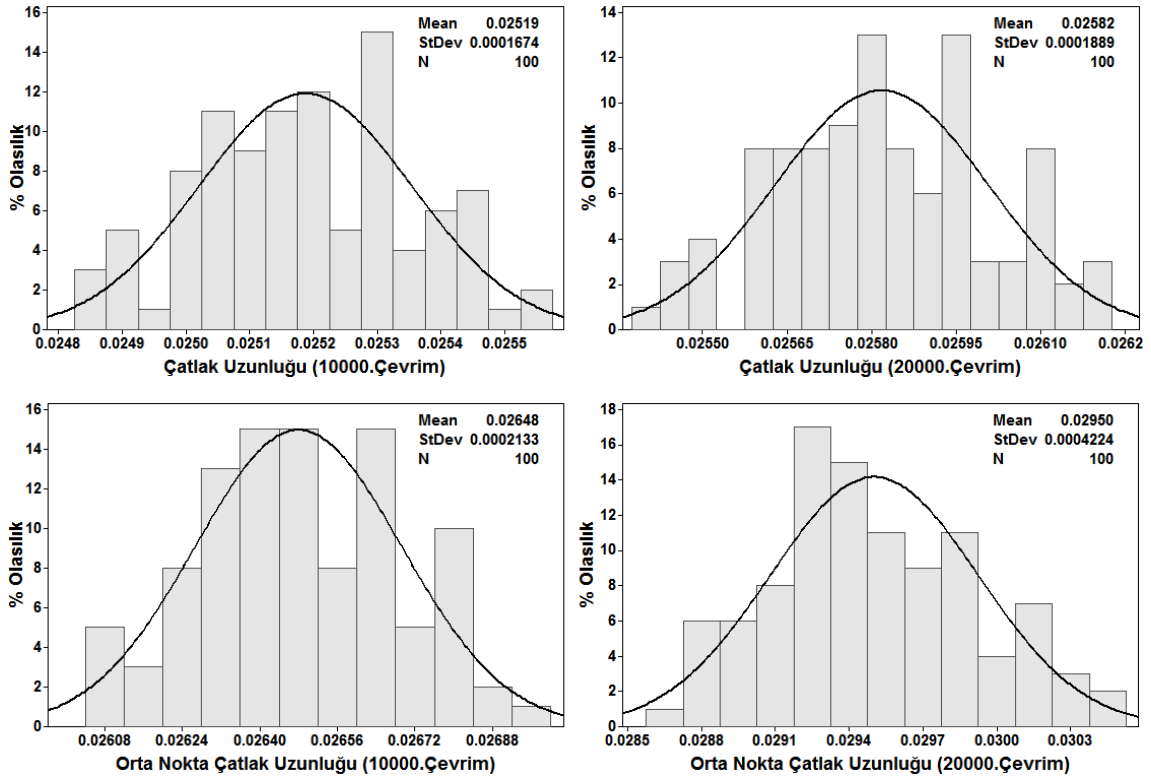


Şekil 3.6.38. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

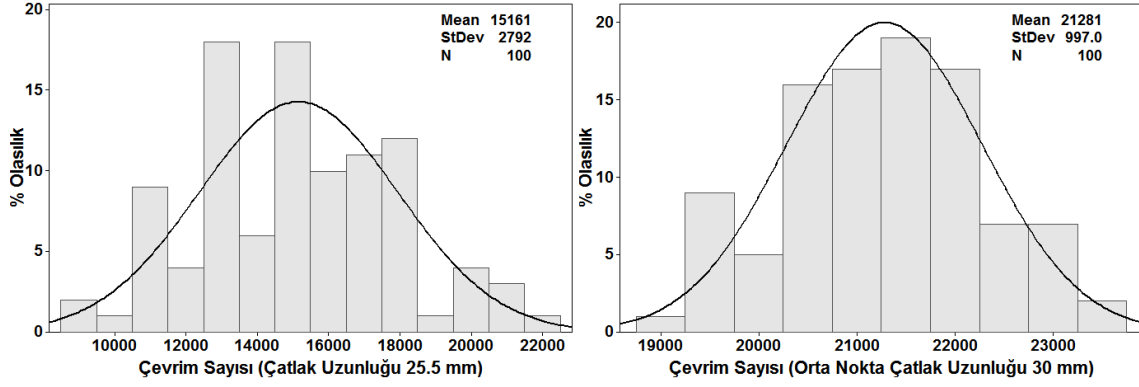




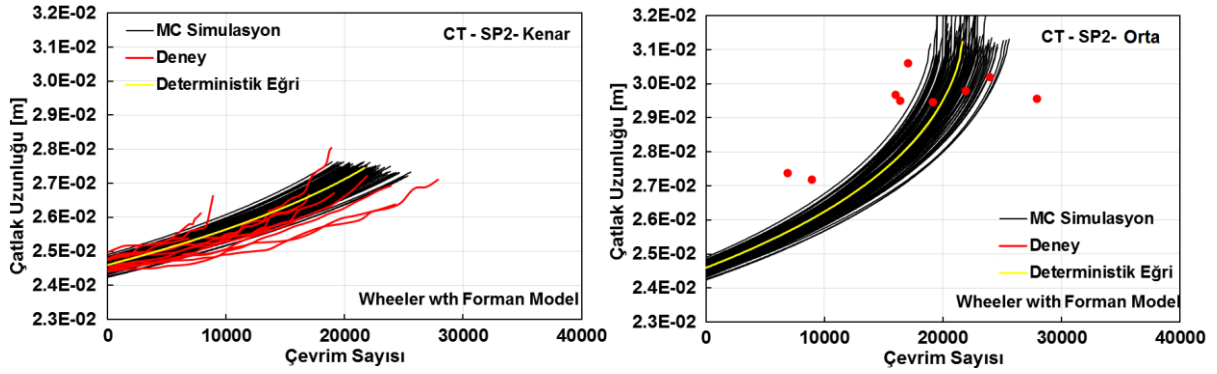
Şekil 3.6.39. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



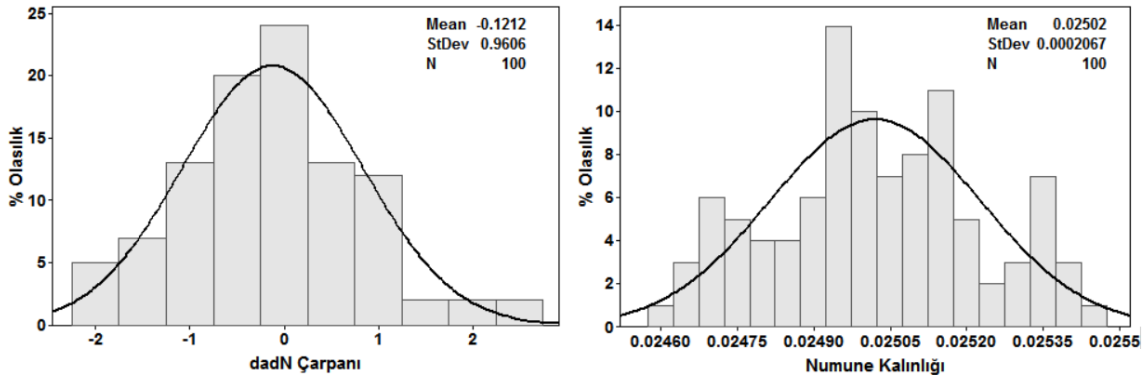
Şekil 3.6.40. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

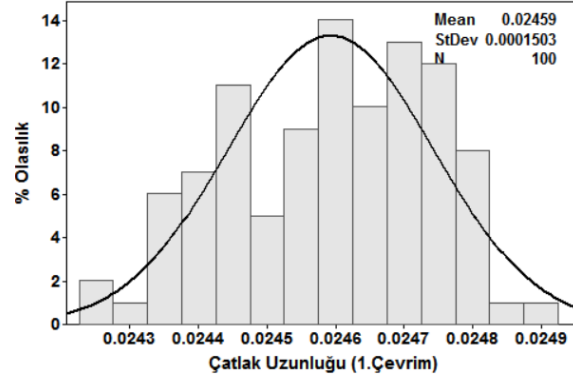


Şekil 3.6.41. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

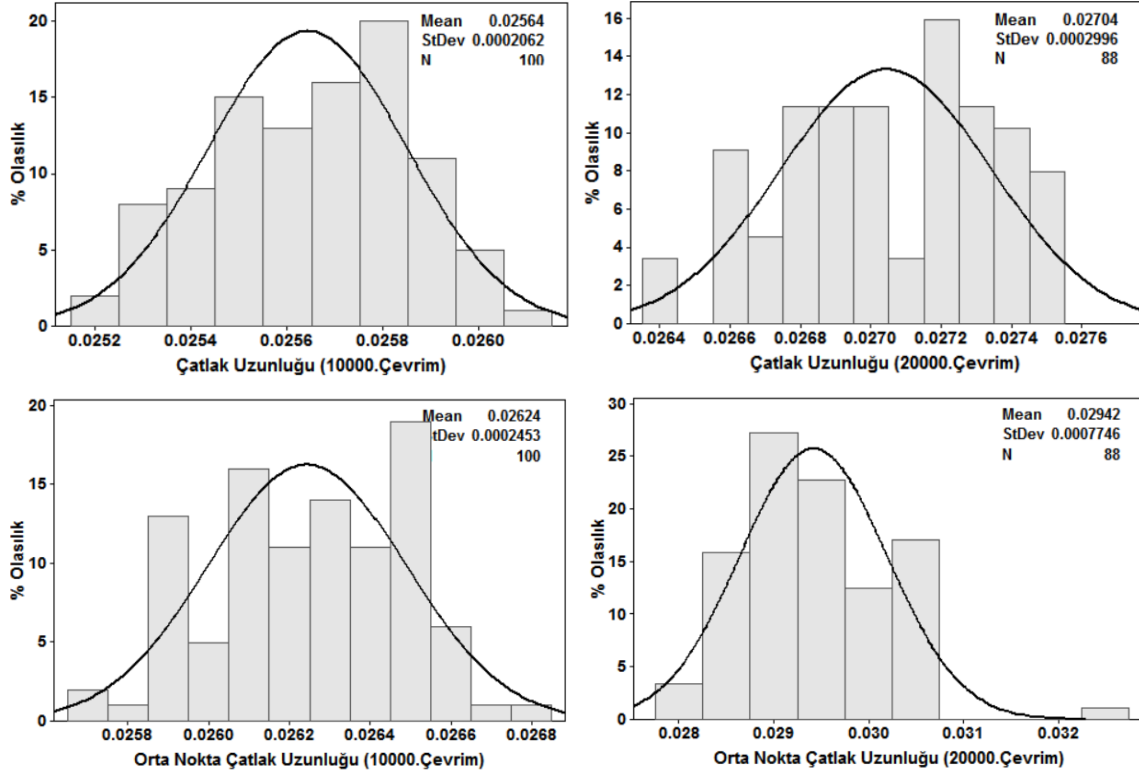


Şekil 3.6.42. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

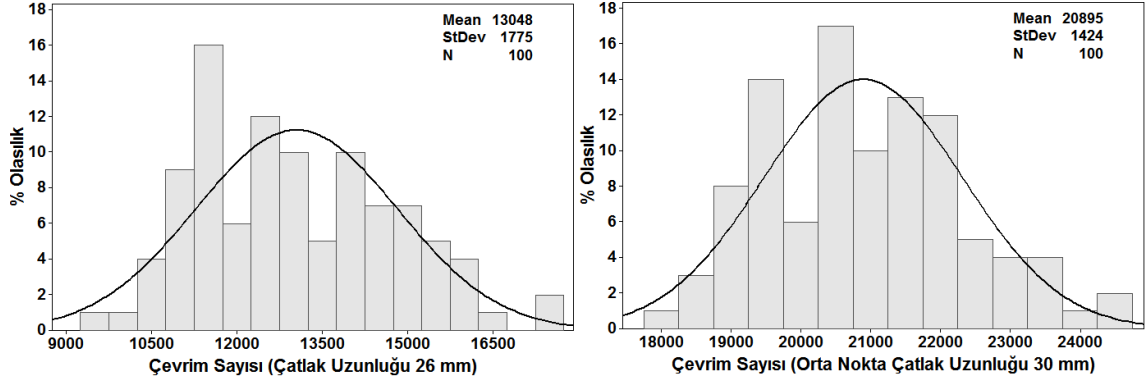




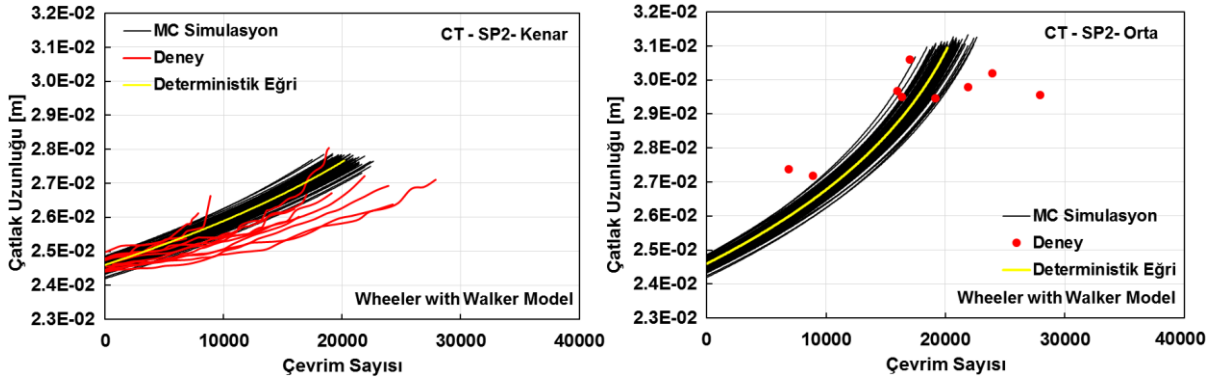
Şekil 3.6.43. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



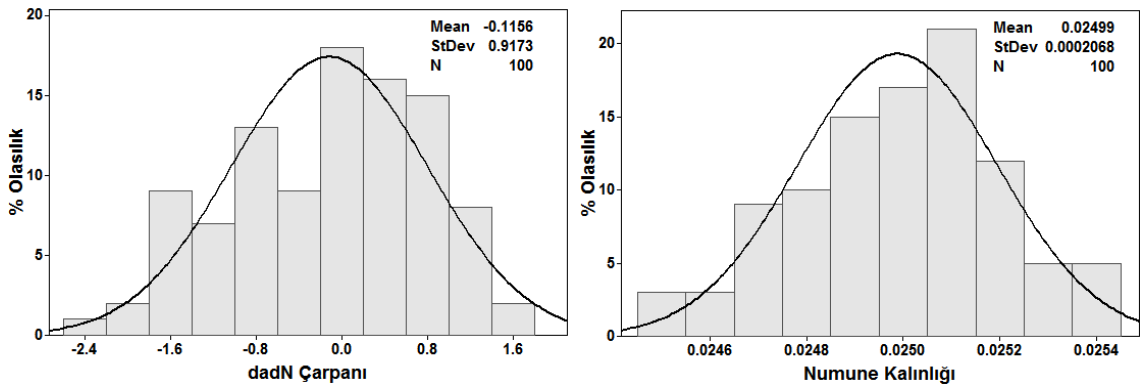
Şekil 3.6.44. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

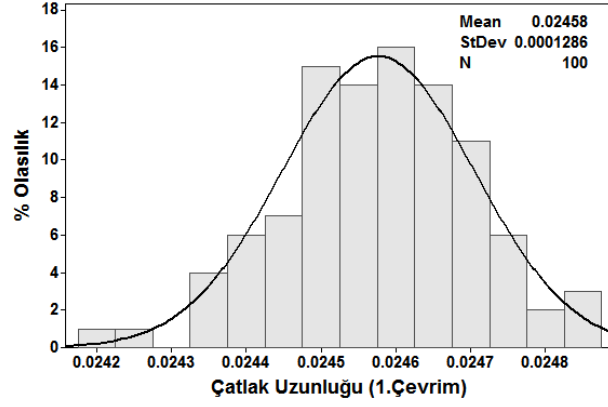


Şekil 3.6.45. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

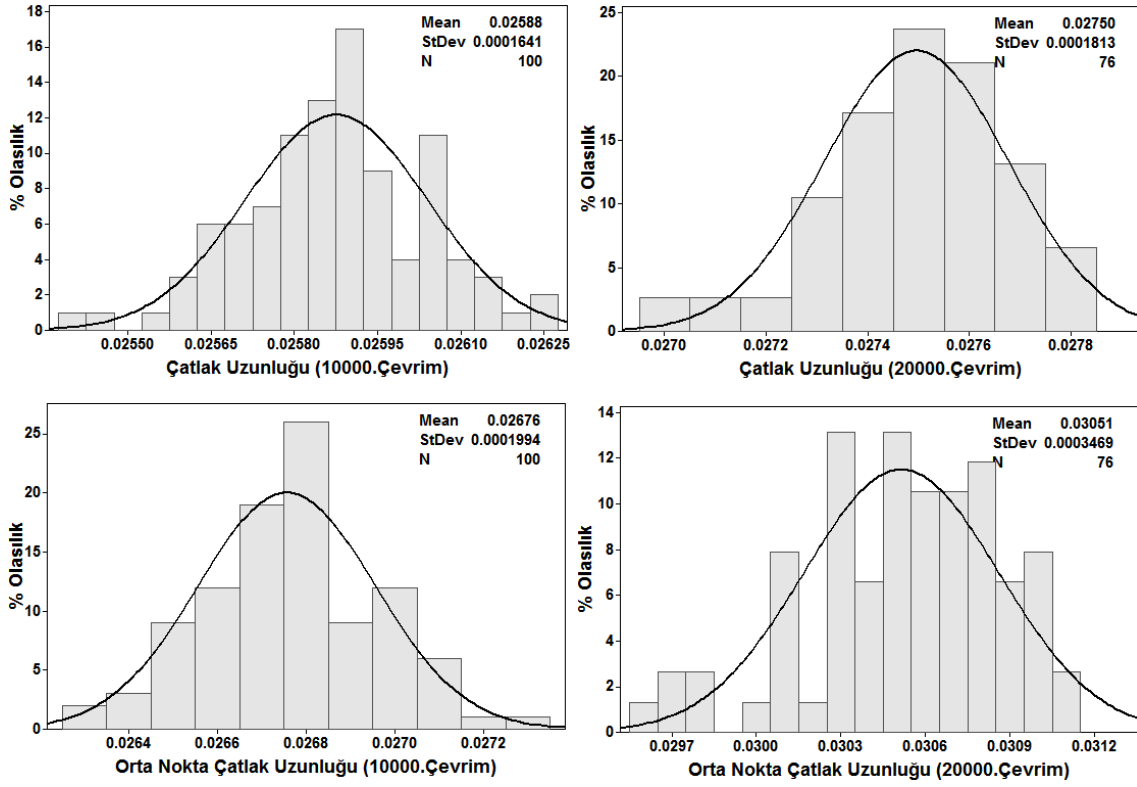


Şekil 3.6.46. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)

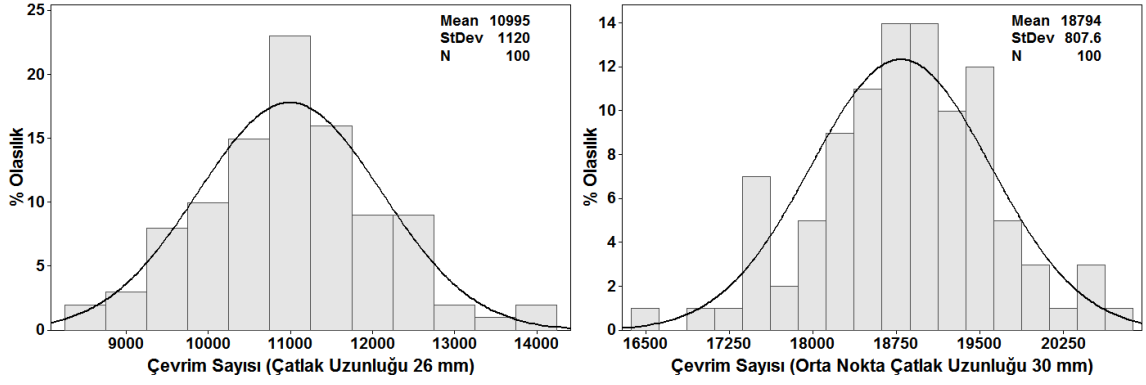




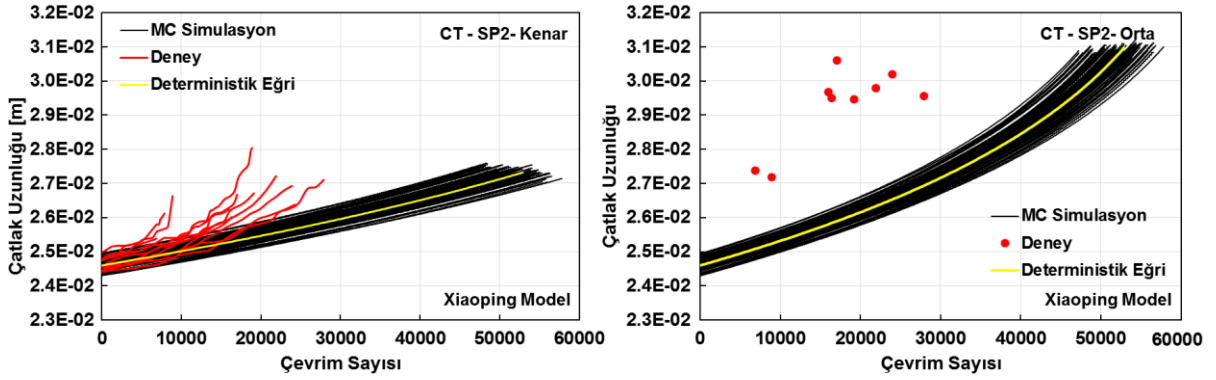
Şekil 3.6.47. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



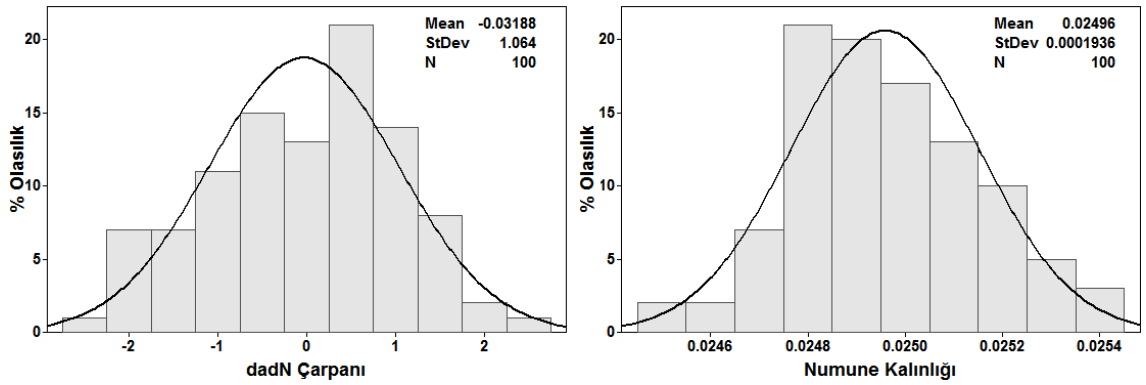
Şekil 3.6.48. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



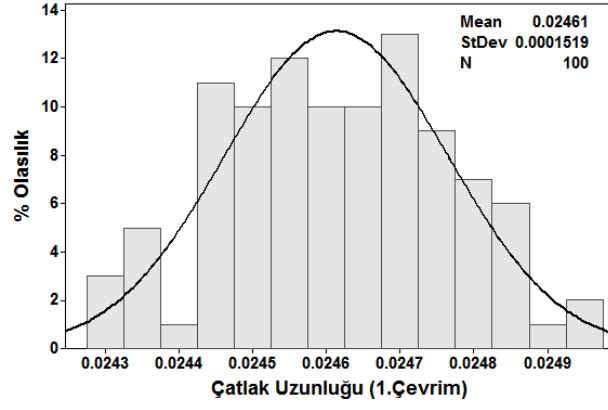
Şekil 3.6.49. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



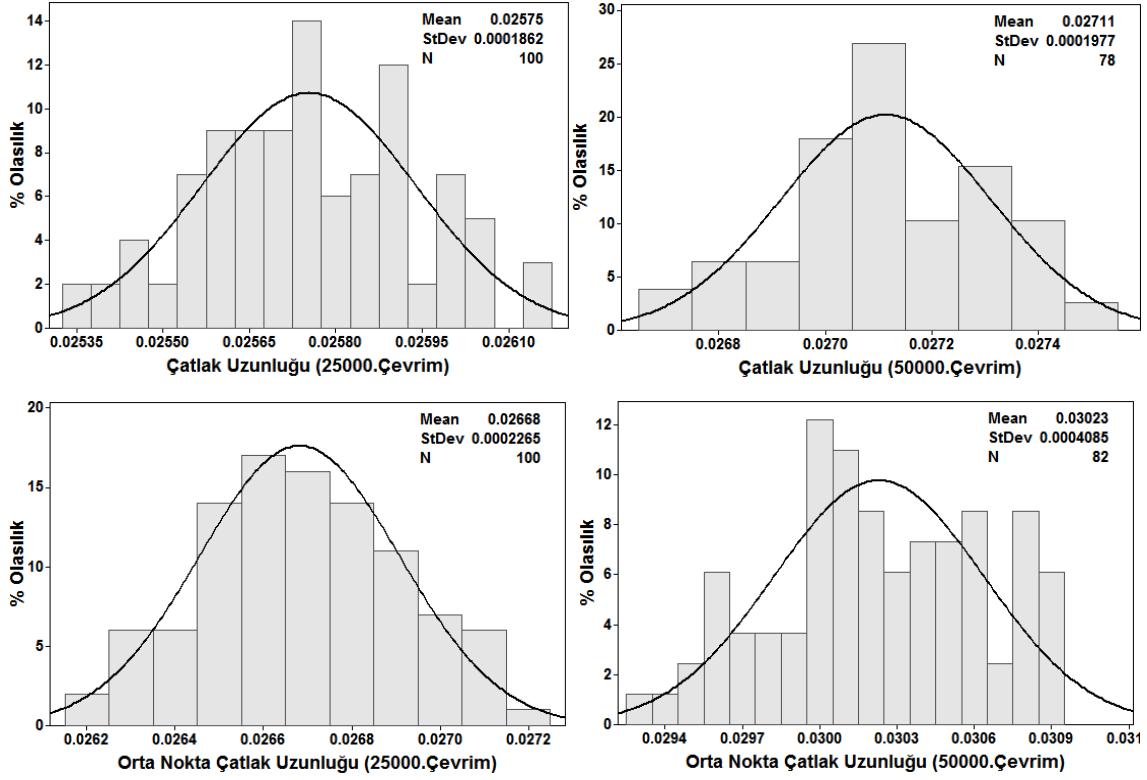
Şekil 3.6.50. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



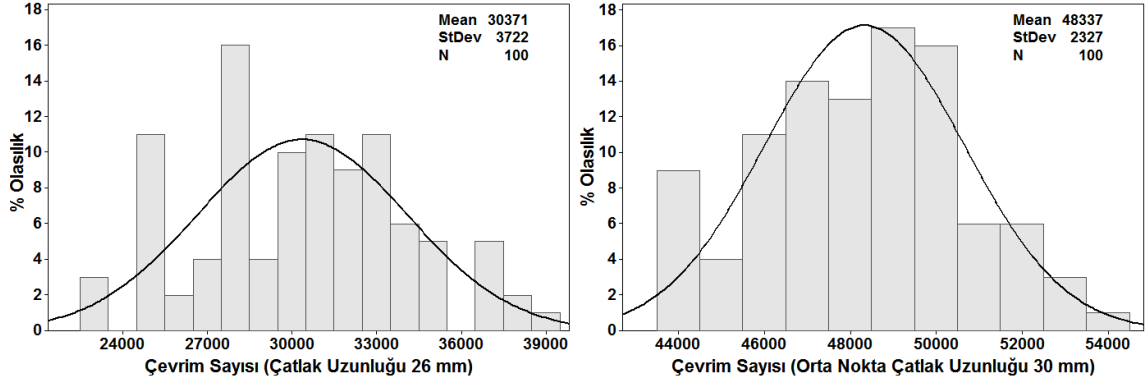




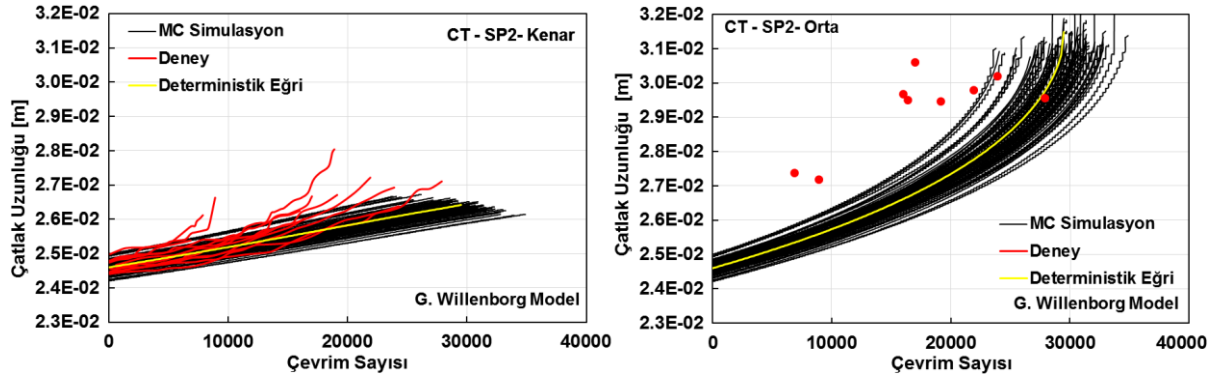
Şekil 3.6.51. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



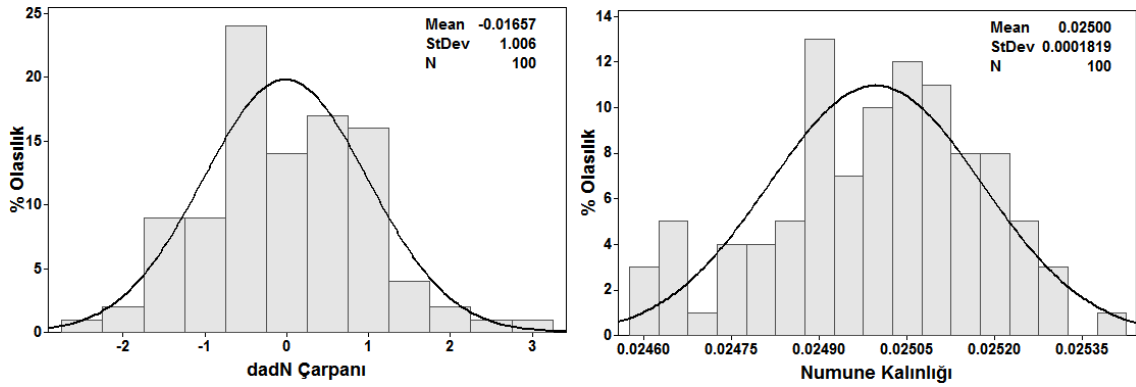
Şekil 3.6.52. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

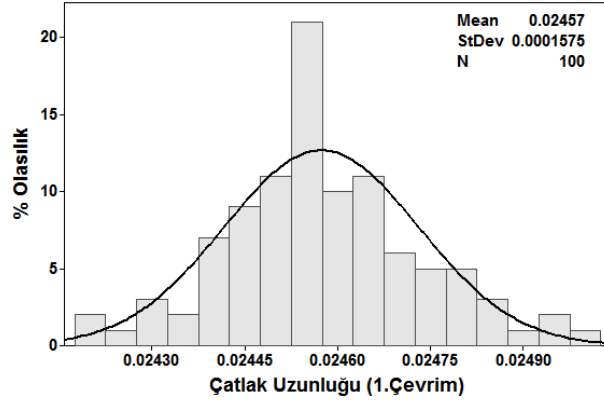


Şekil 3.6.53. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

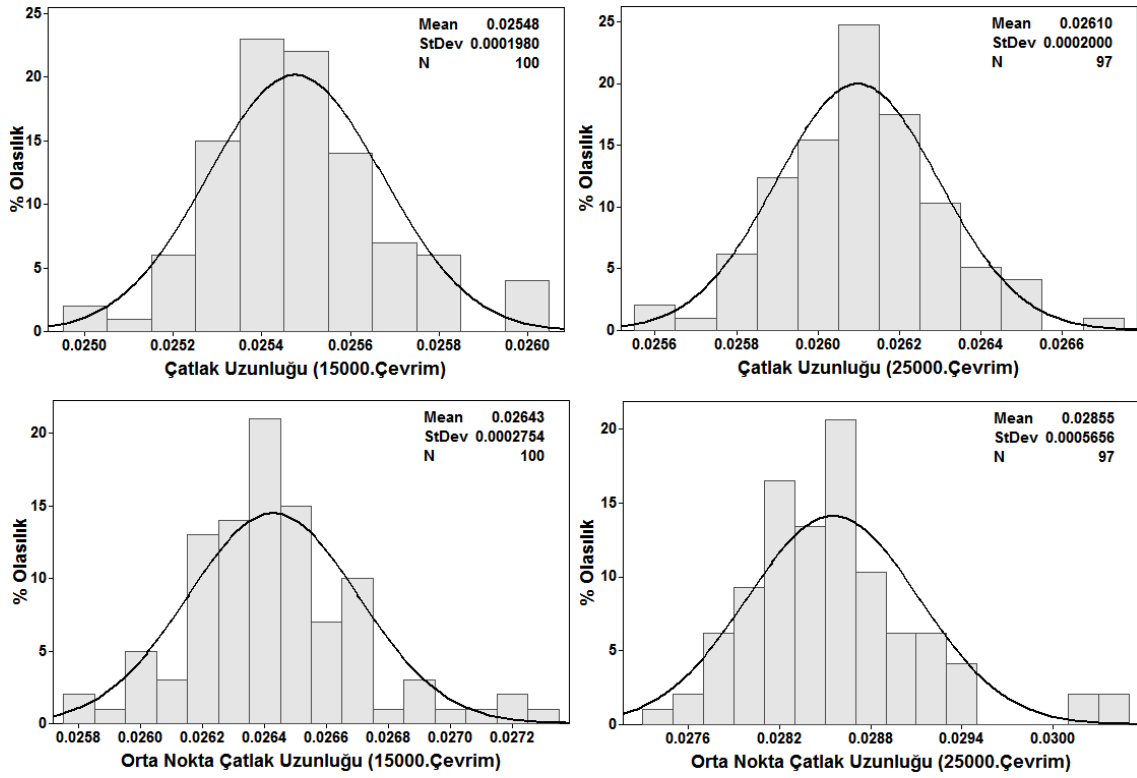


Şekil 3.6.54. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)

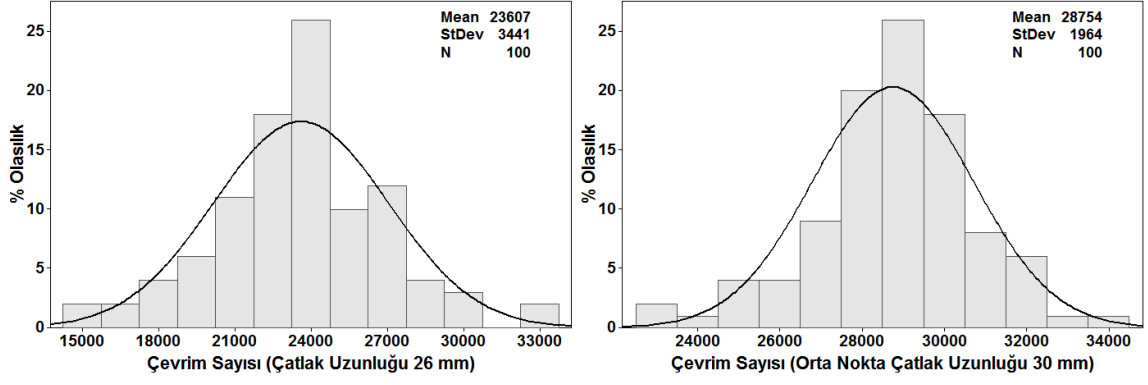




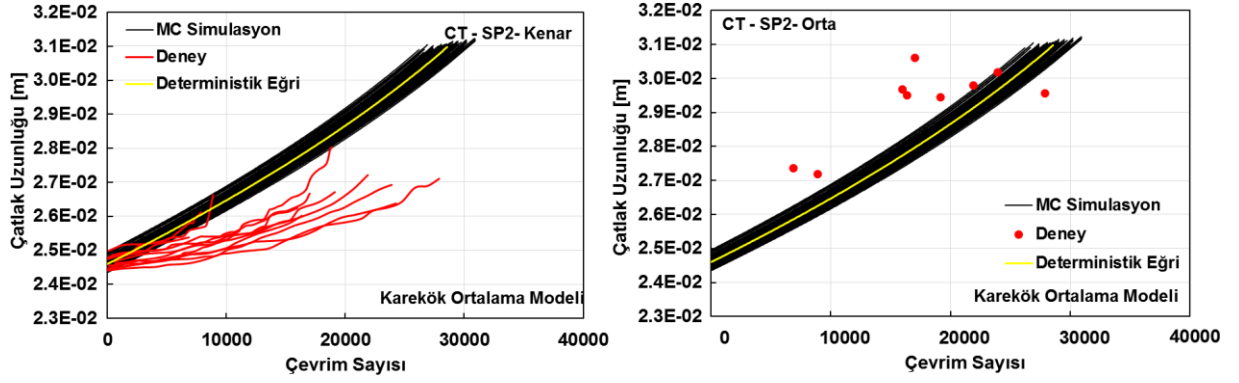
Şekil 3.6.55. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



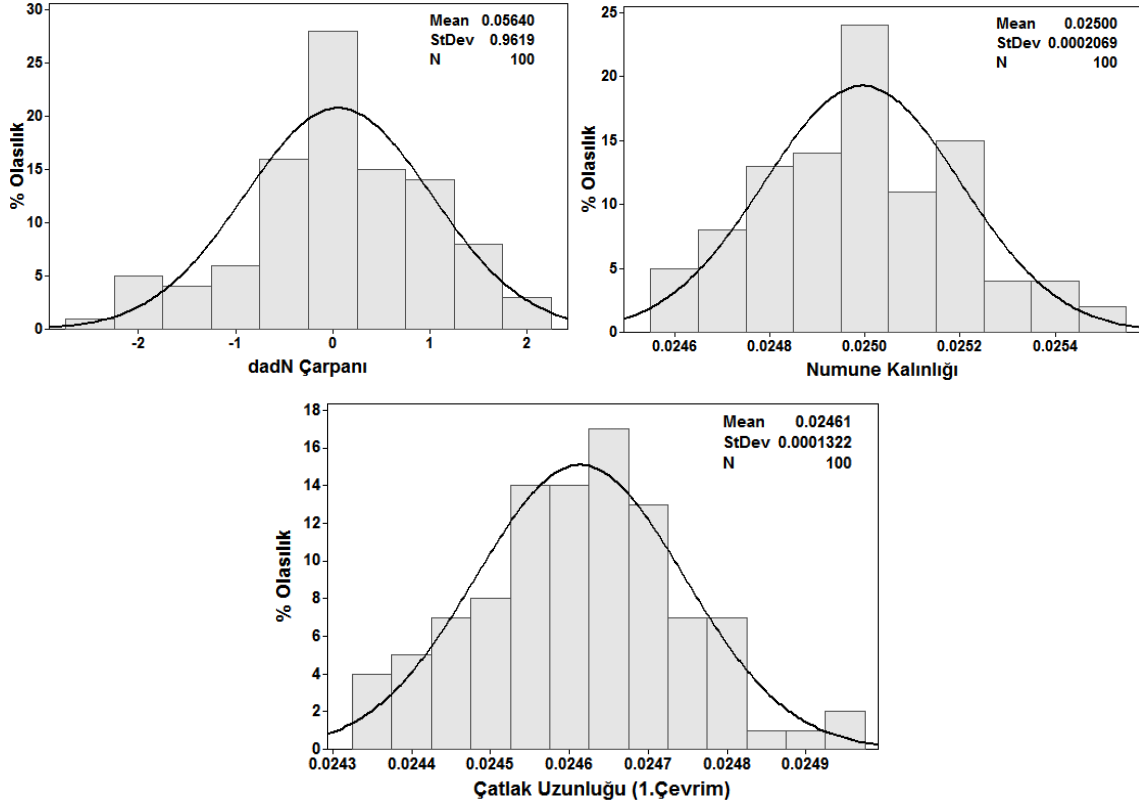
Şekil 3.6.56. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



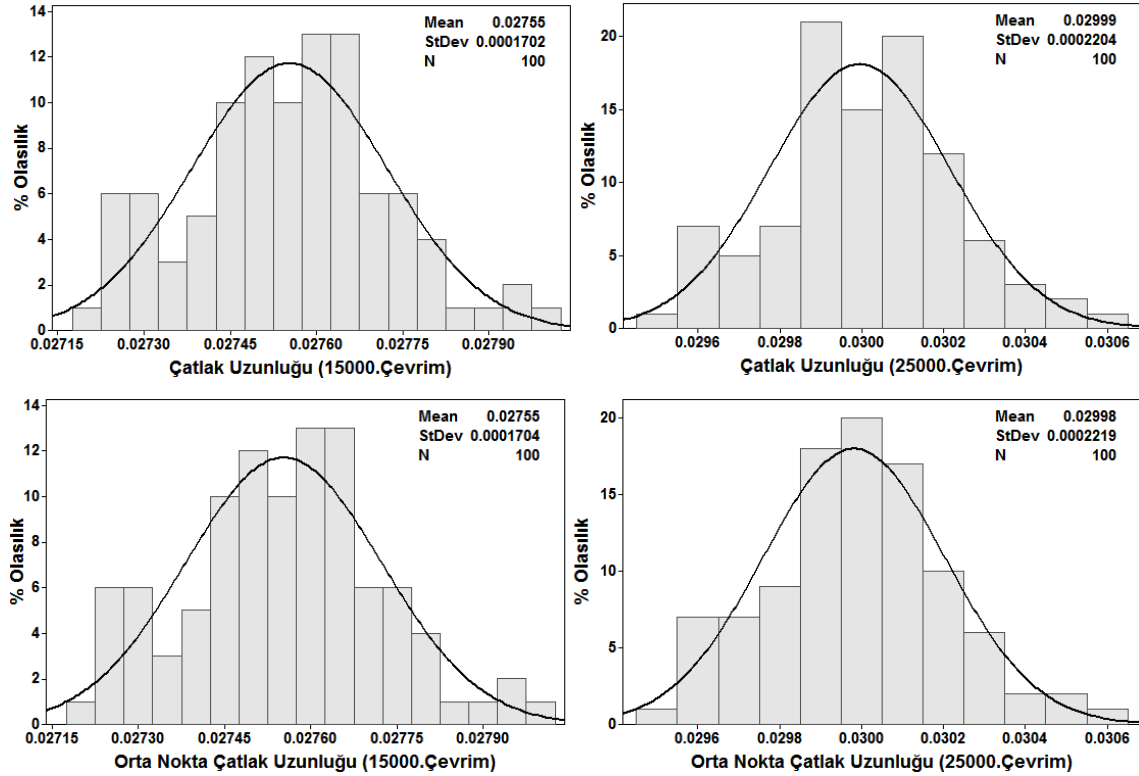
Şekil 3.6.57. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



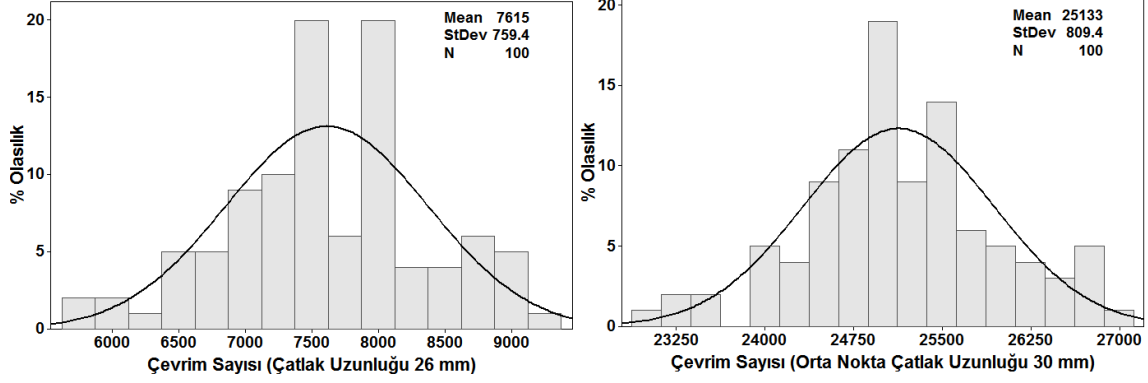
Şekil 3.6.58. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



Şekil 3.6.59. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



Şekil 3.6.60. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



Şekil 3.6.61. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)

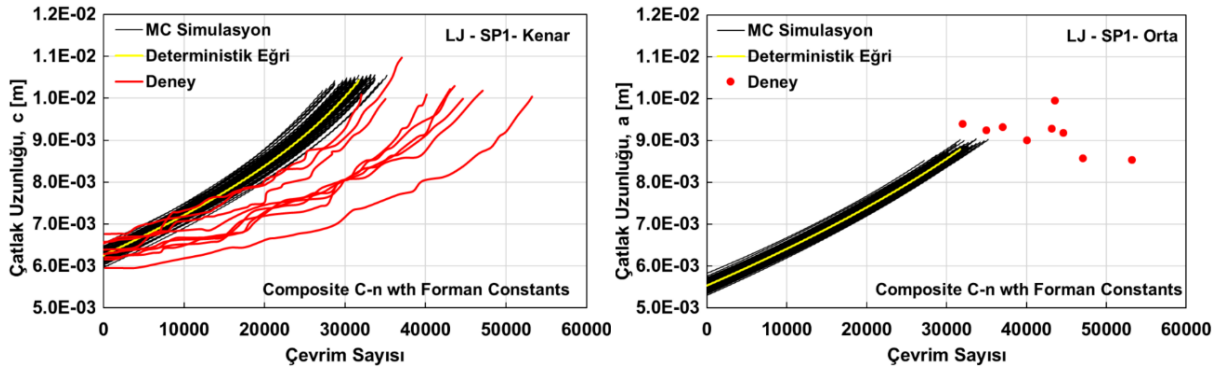
Yukarıda detayları ile verilen iki boyutlu çatlak ilerlemesinde olduğu gibi, üç boyutlu mod-I çatlak ilerlemesi için de farklı çatlak ilerleme modelleri kullanılmış ve modellerin karşılaştırması Tablo 3.6.1’de verilmiştir. Daha önce bölüm 3.4.3’de açıklanan Spektrum Aşırı Yük İndeksi (SOL indeks) üç boyutlu çatlak ilerleme simülasyonları için de denenmiştir. Tablo 3.6.1’den görüleceği üzere SOL indeksin uygulanmadığı simülasyon sonuçları deney sonuçları ile daha uyumludur. İki ve üç boyutlu çatlak ilerlemesi mukayese edildiğinde, üç boyutlu çatlak ilerlemesi durumunda, 25 mm kalınlığa sahip numune ön ve arka yüzeylerinin yarı-eliptik çatlağın serbest yüzeylere doğru ilerleme hızının, aşırı yükler altında CT numunesindeki çatlak ilerleme hızı kadar yüksek olmadığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, LJ numunesi için yapılan simülasyon sonuçlarından görüleceği üzere, üç-boyutlu mod-I çatlak ilerleme analizlerinden SOL indeks kullanılmaması uygun görülmüştür.

Tablo 3.6.1. LJ numunesi test ve simülasyon sonuçları karşılaştırması

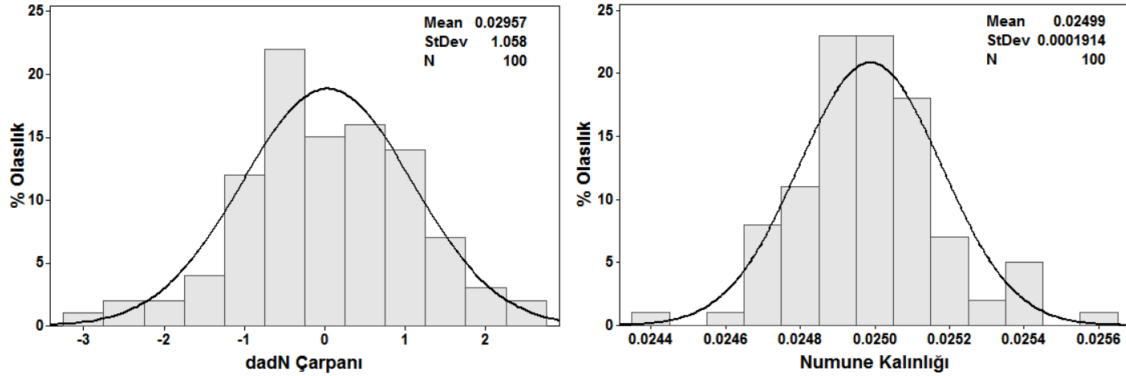
Model	İlerleme Davranışı	Çatlak İlerleme Denklemi	SOL index	LJ SP1				LJ SP2				LJ SP3			
				Çevrim Sayısı	K. Çatlak Uzunluğu	Test	Sim.	Çevrim Sayısı	K. Çatlak Uzunluğu	Test	Sim.	Çevrim Sayısı	K. Çatlak Uzunluğu	Test	Sim.
Composite C-n	Wheeler	Forman Const with Paris-Erdoğan	✓	26200	10.7 mm	16164	10.7 mm	20029	10.7 mm	42650	10.2 mm	35169	10.2 mm	31586	10.3 mm
Composite C-n	Wheeler	Forman Const with Paris-Erdoğan	✗	34200	10.7 mm	25200	10.8 mm	27057	10.8 mm						
Composite C-n	Wheeler	Walker	✓	55700	10.1 mm	14514	11.1 mm	20369	10.9 mm						
Composite C-n	Wheeler	Walker	✗	83700	10.1 mm	24140	11.1 mm	32072	10.9 mm						
Walker	Wheeler	Walker	✓	20200	11.0 mm	12980	10.8 mm	16100	10.7 mm						
Walker	Wheeler	Walker	✗	29700	10.7 mm	22183	10.8 mm	25647	10.7 mm						
Forman	Wheeler	Forman	✓	37200	11.4 mm	21240	11.1 mm	25598	10.8 mm						
Forman	Wheeler	Forman	✗	55200	10.9 mm	36108	10.9 mm	40438	11.1 mm						
Xiaoping	Wheeler	Paris-Erdoğan	✗	55700	10.9 mm	40356	11.0 mm	45301	11.0 mm						
GWillenborg	GWillenborg	Forman	✓	50200	11.9 mm	20532	11.7 mm	24553	11.2 mm						
RMS (Manjunatha)	RMS	Newman	✗	19900	12.5 mm	24036	12.5 mm	24800	12.5 mm						

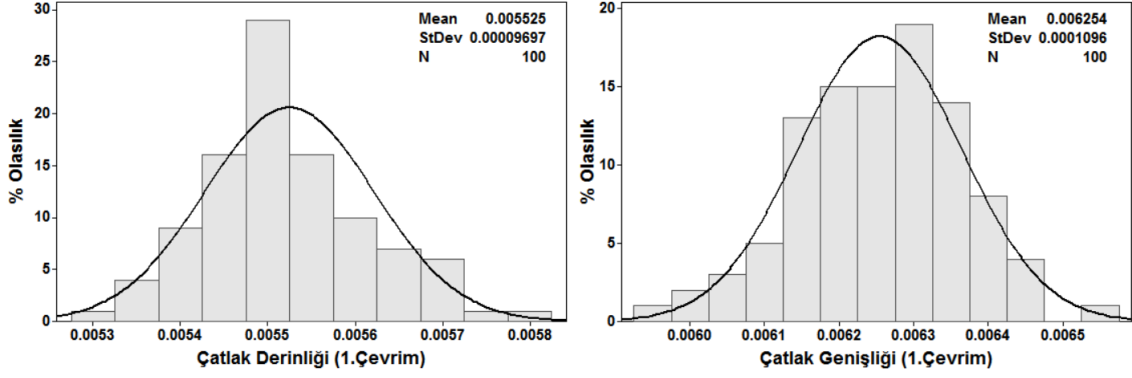
Şekil 3.6.62-117’de, LJ numunesi için farklı çatlak ilerleme modelleri ile gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyonlarından elde edilen olasılık temelli çatlak ilerleme eğrileri, girdi ve çıktılarını

dağılımları, çatlak ilerleme yavaşlaması (retardation) ve gerilme oranı (stress ratio, R) etkileri de dikkate alınarak değerlendirilen her bir model için ayrı ayrı verilmiştir. Monte Carlo Simülasyonu çıktılarındaki dağılımlar, herhangi bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluğu olasılık dağılımı veya herhangi bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen yük çevrim sayısı olasılık dağılımı olarak iki farklı şekilde belirlenebilmektedir. Bu iki tür dağılıma ait örnekler de Şekil 3.6.62-117'de görülmektedir. Verilen dağılımlar, normal olasılık dağılımları olup, bu dağılımlar kullanılarak kümülatif dağılım grafikleri de ayrıca elde edilebilir. Ayrıca Şekil 3.6.62 – 117'de verilen sonuçlar, LJ numunesinin çatlak ucu serbest yüzey (kenar veya c noktası) ve çatlak ucu ortası (orta veya a noktası) noktalarının her ikisi için de verilmiştir.

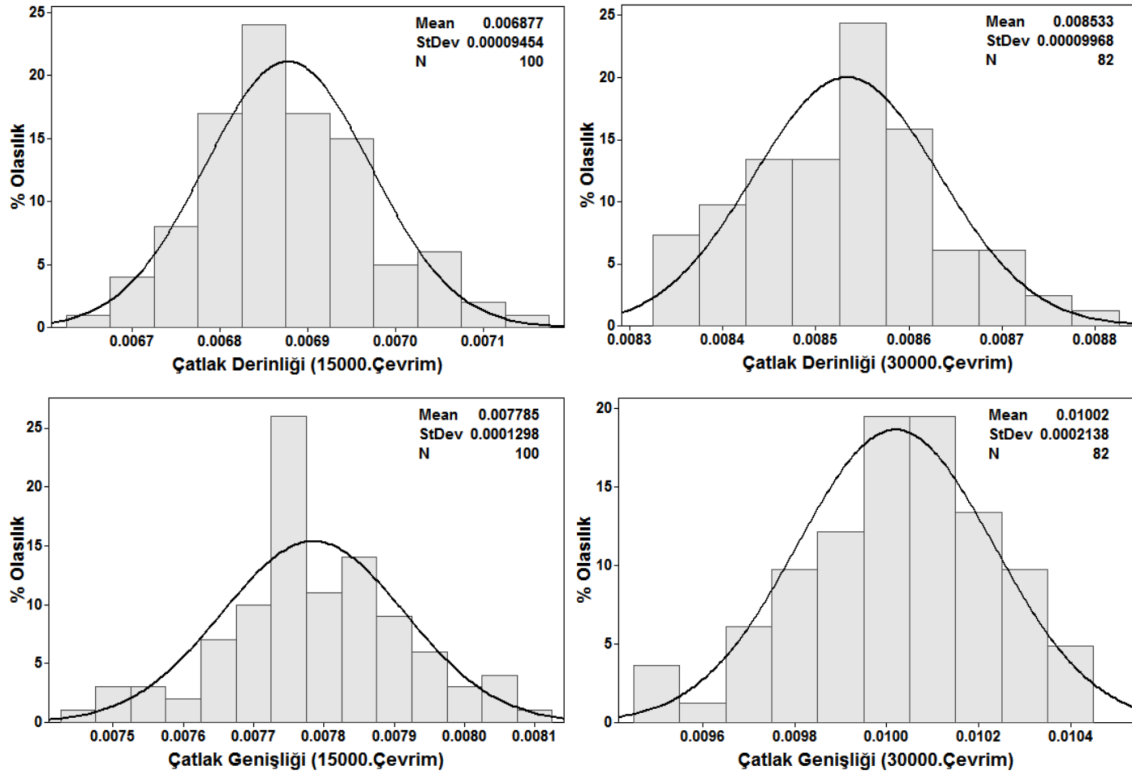


Şekil 3.6.62. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



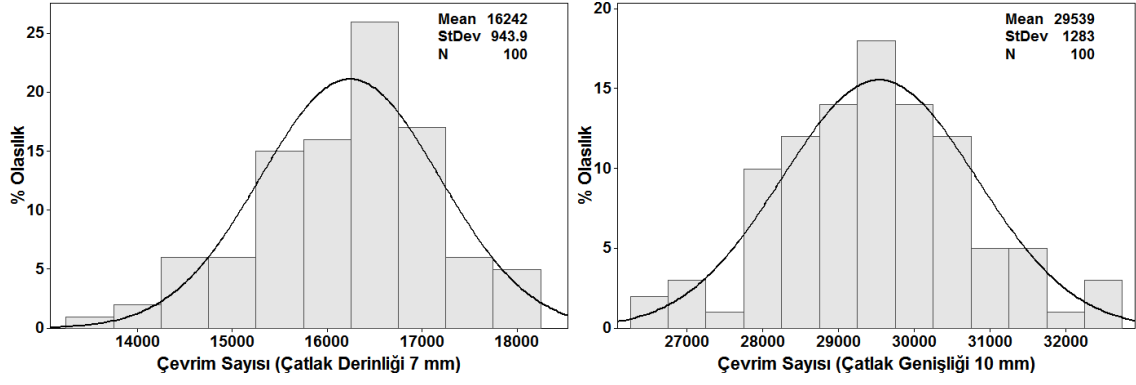


Şekil 3.6.63. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)

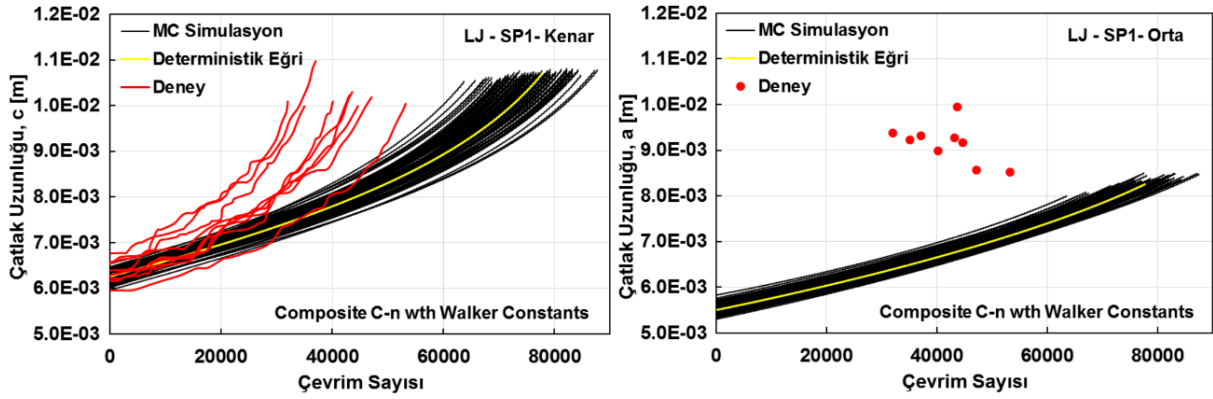


Şekil 3.6.64. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)

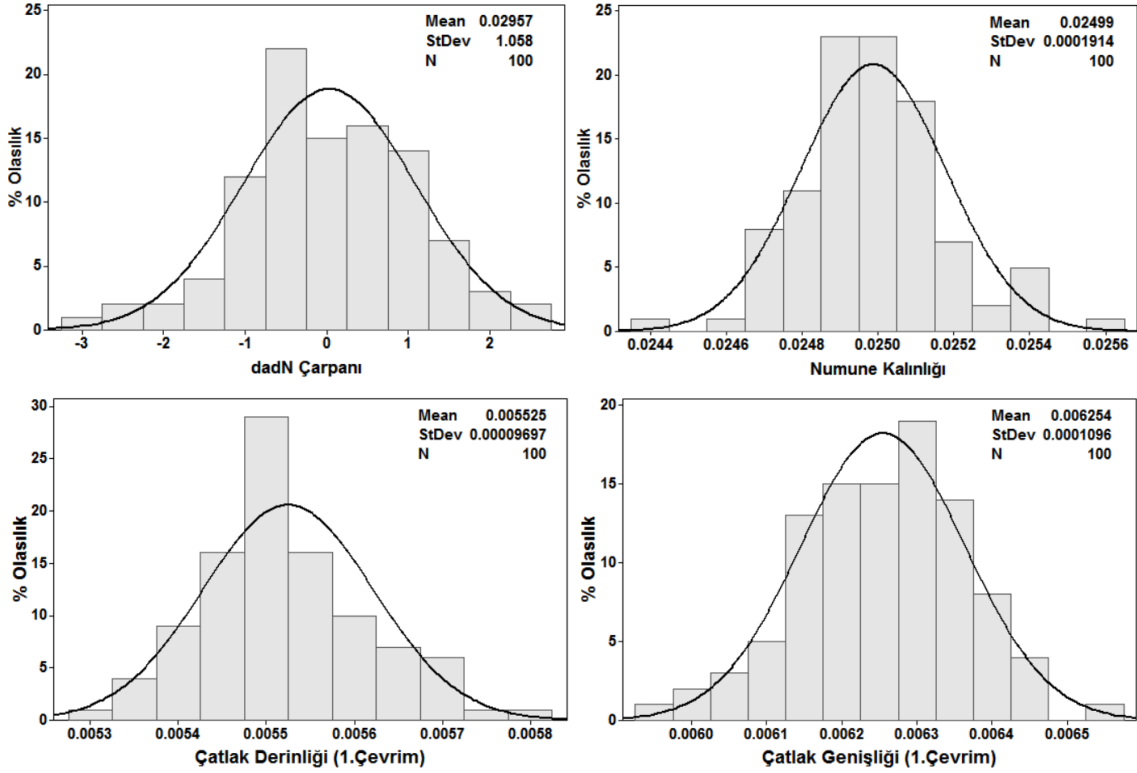




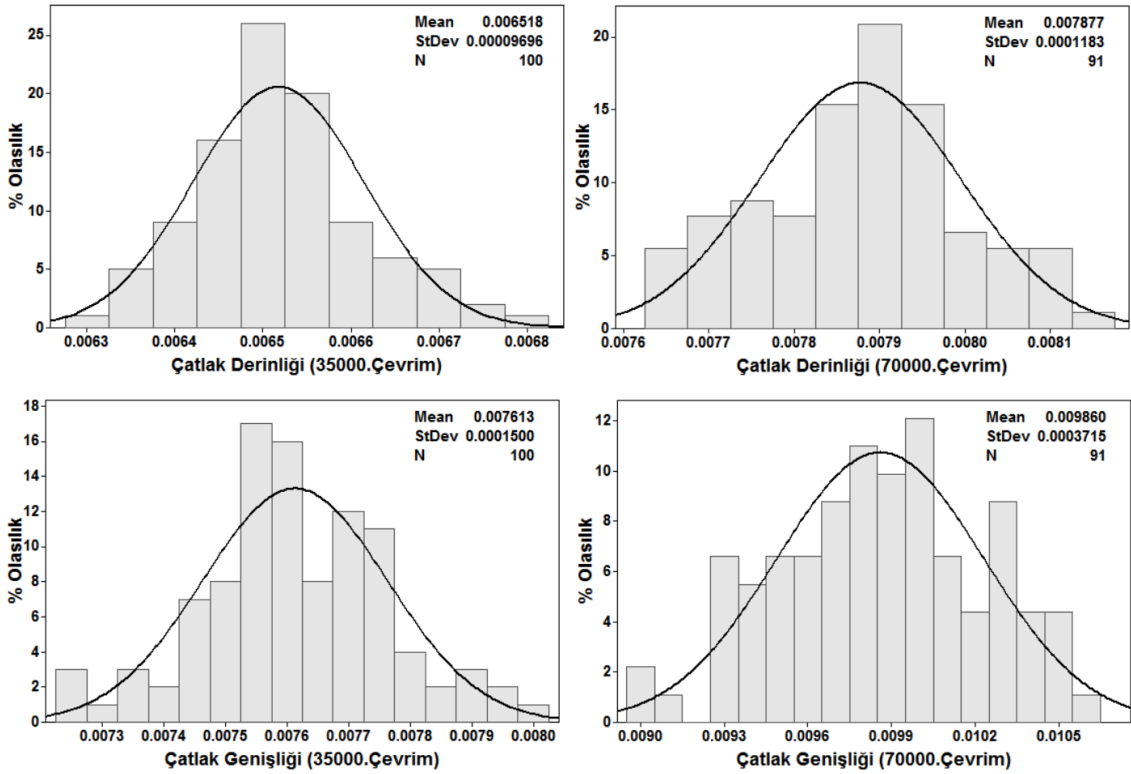
Şekil 3.6.65. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



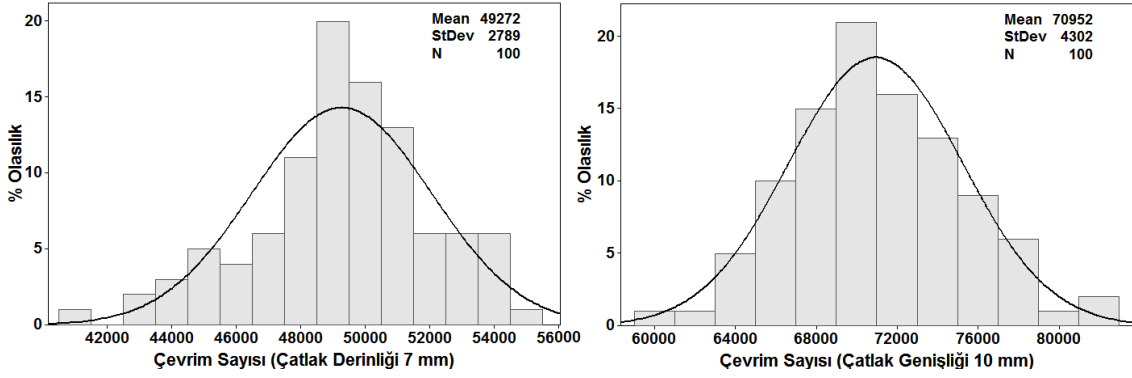
Şekil 3.6.66. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



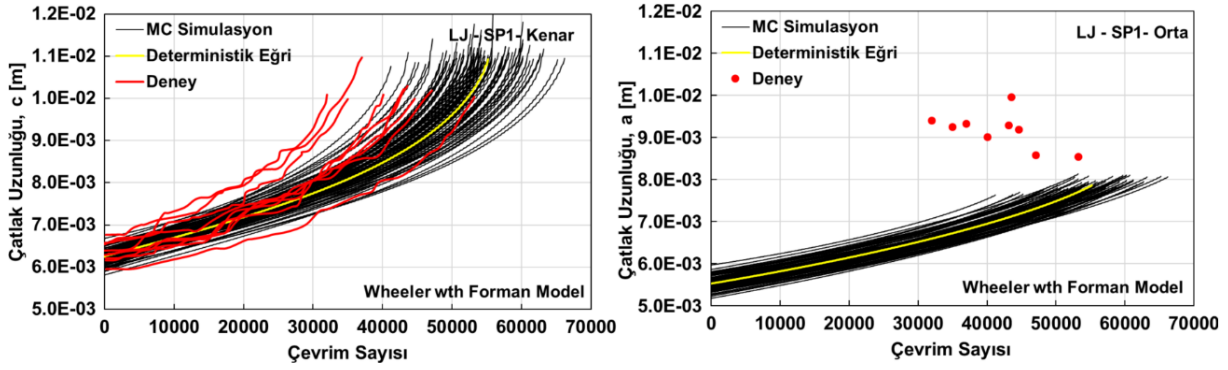
Şekil 3.6.67. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



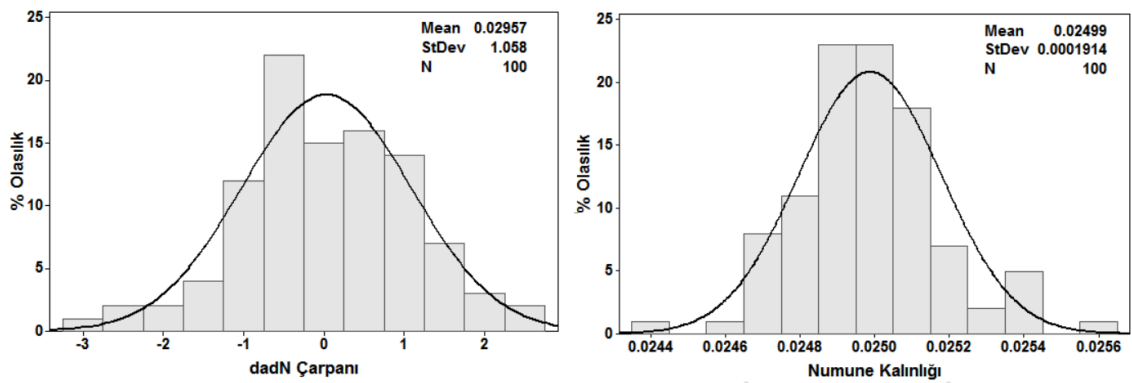
Şekil 3.6.68. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

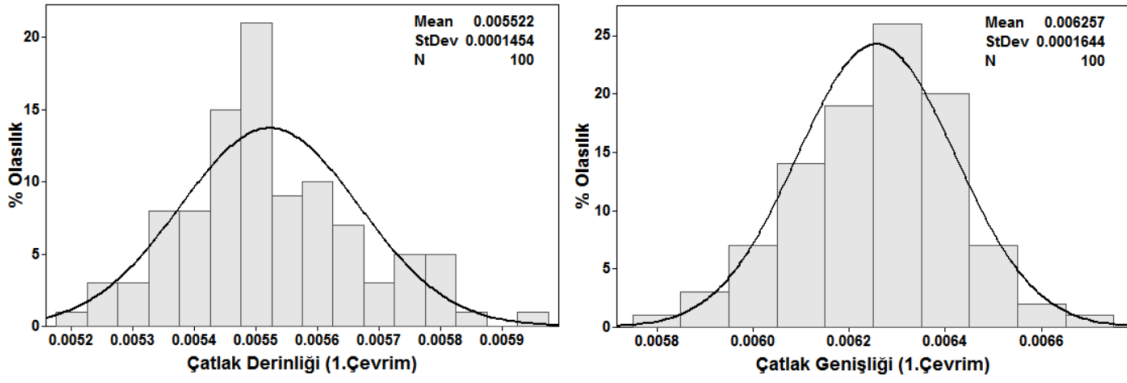


Şekil 3.6.69. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

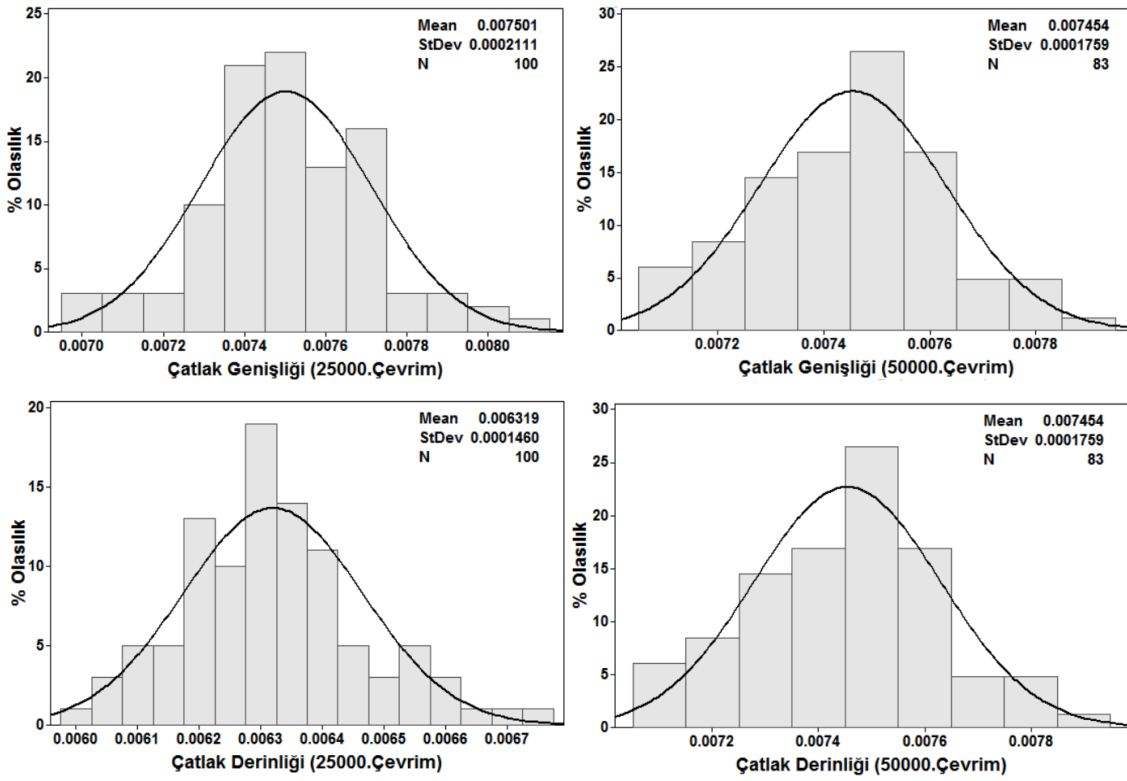


Şekil 3.6.70. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

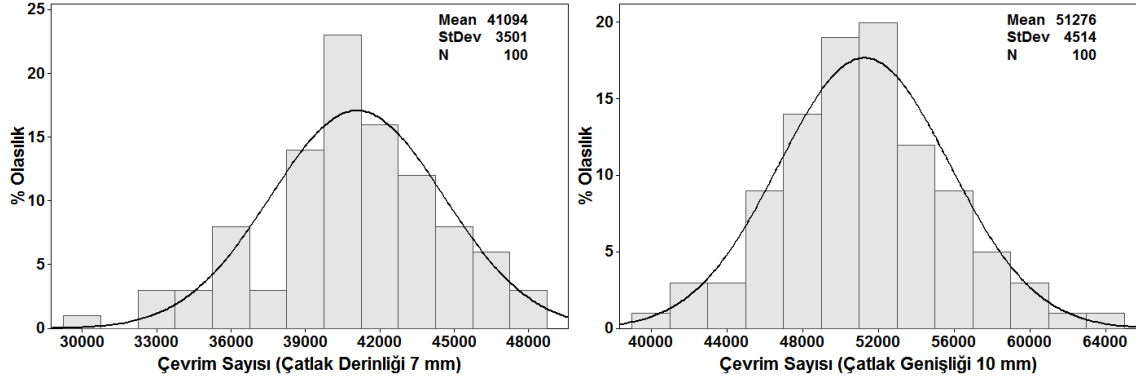




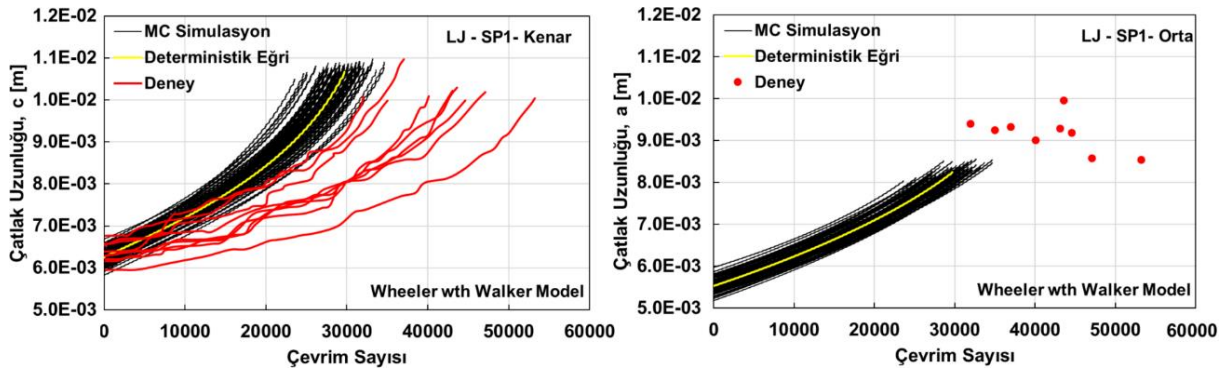
Şekil 3.6.71. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



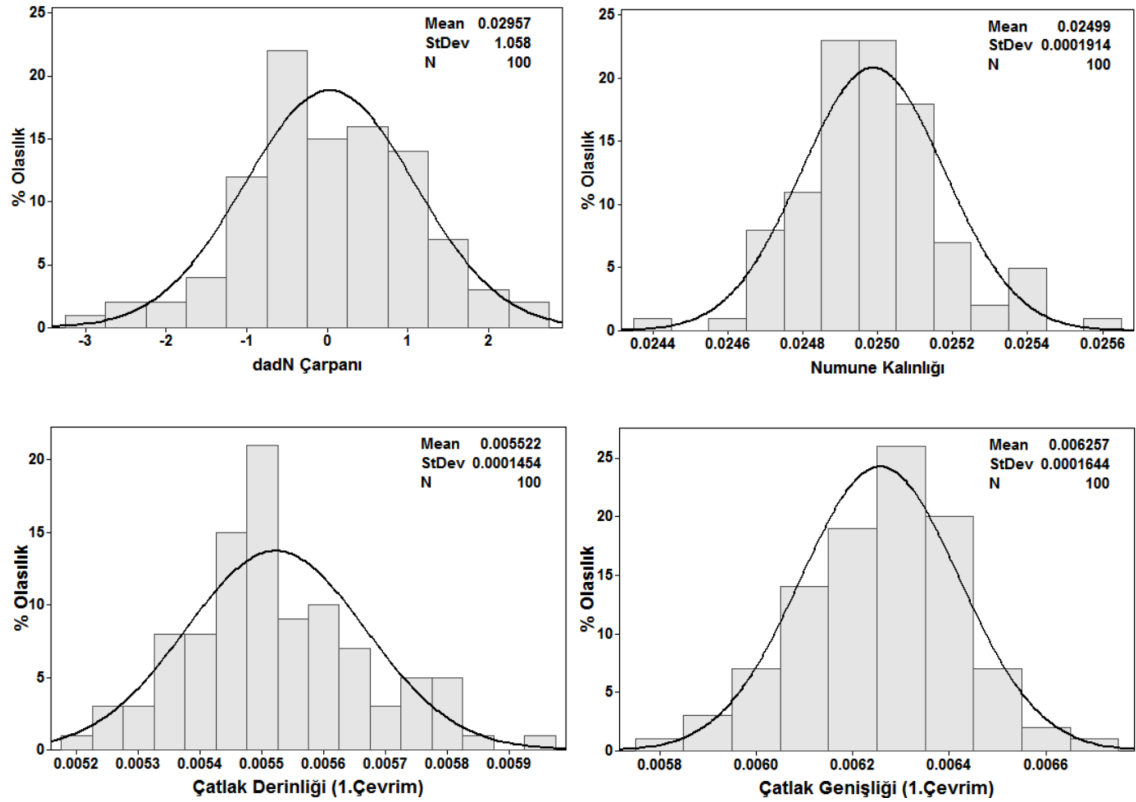
Şekil 3.6.72. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



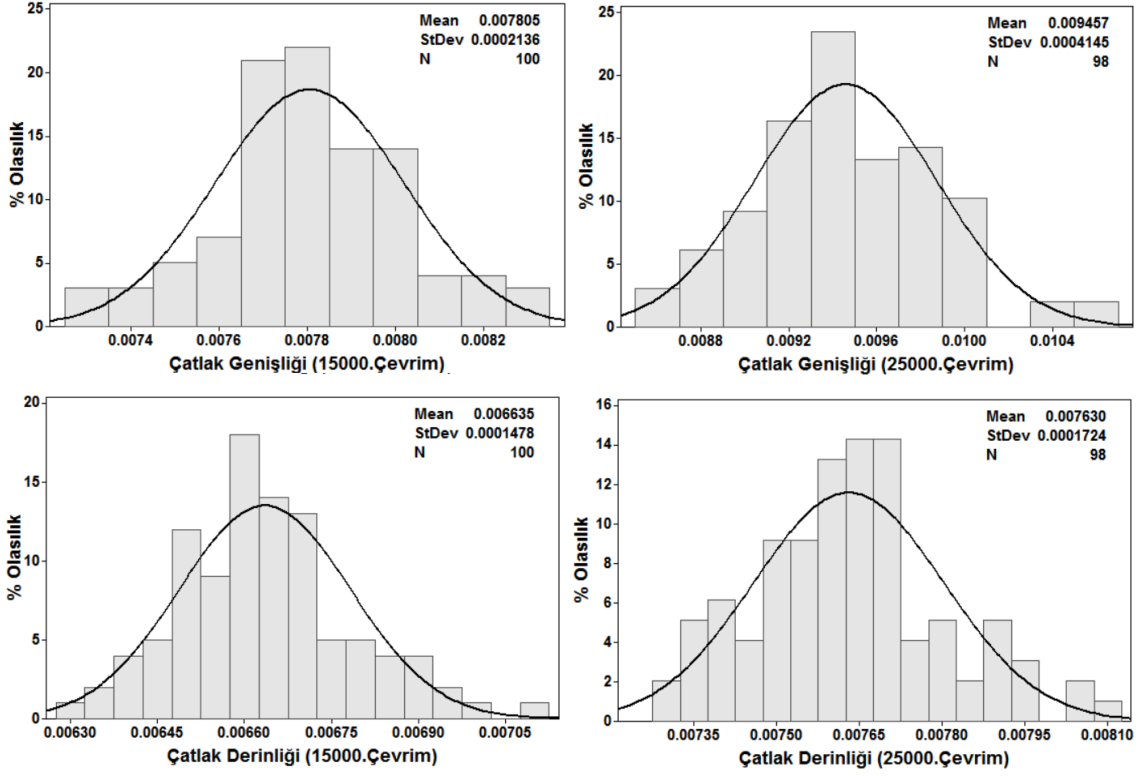
Şekil 3.6.73. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



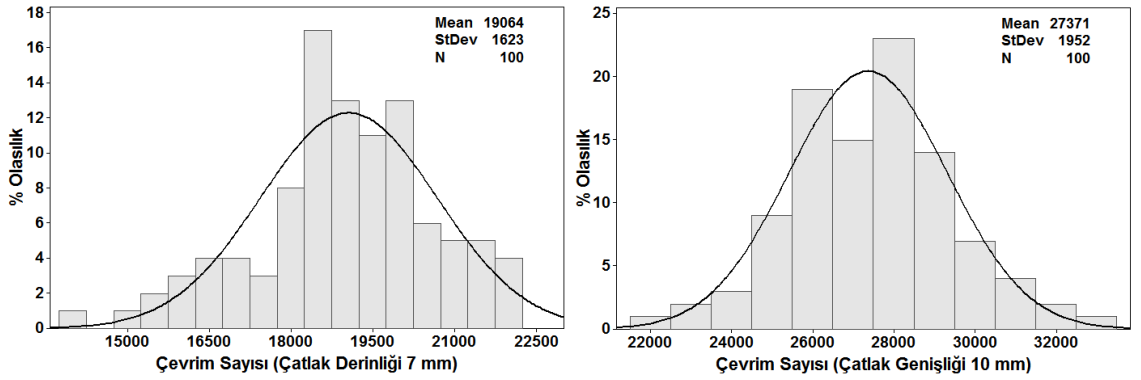
Şekil 3.6.74. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



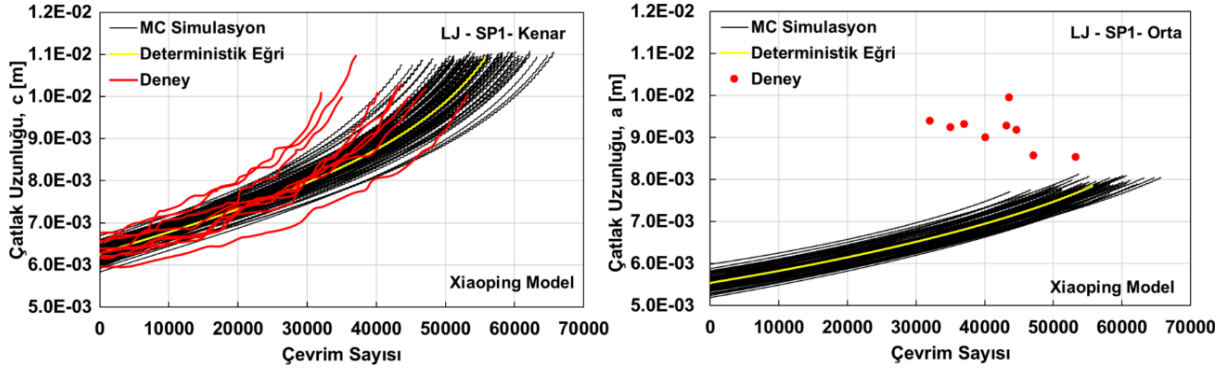
Şekil 3.6.75. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



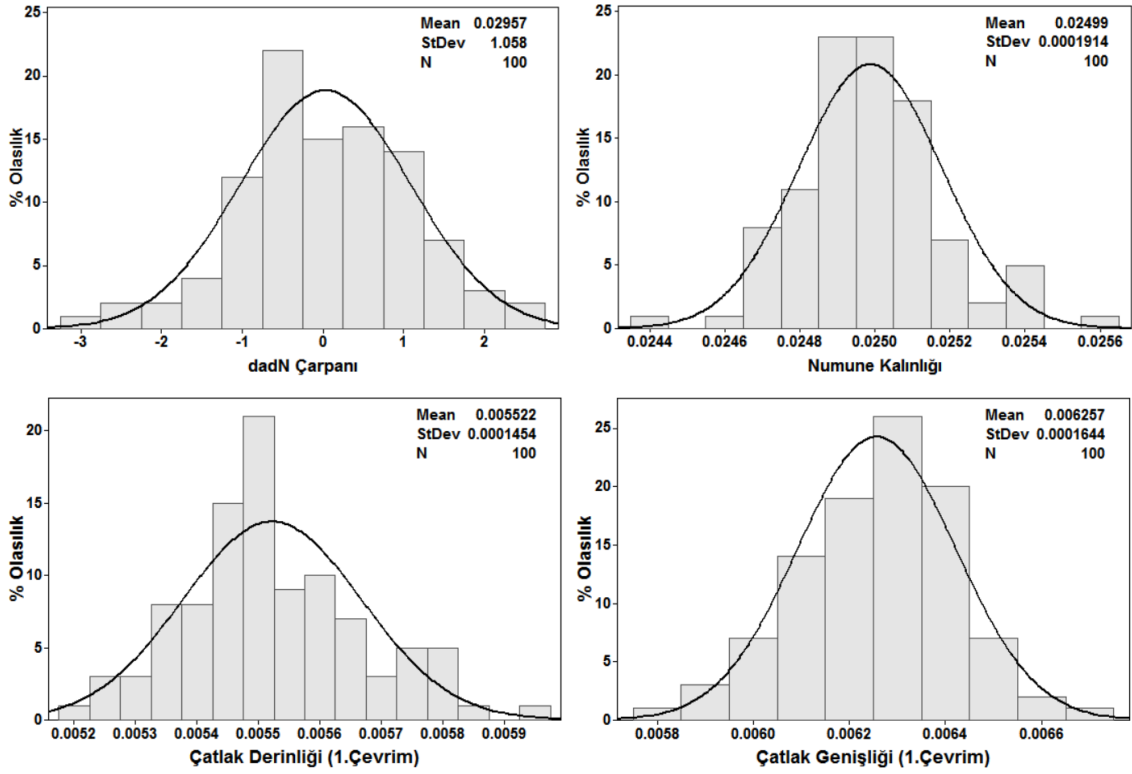
Şekil 3.6.76. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



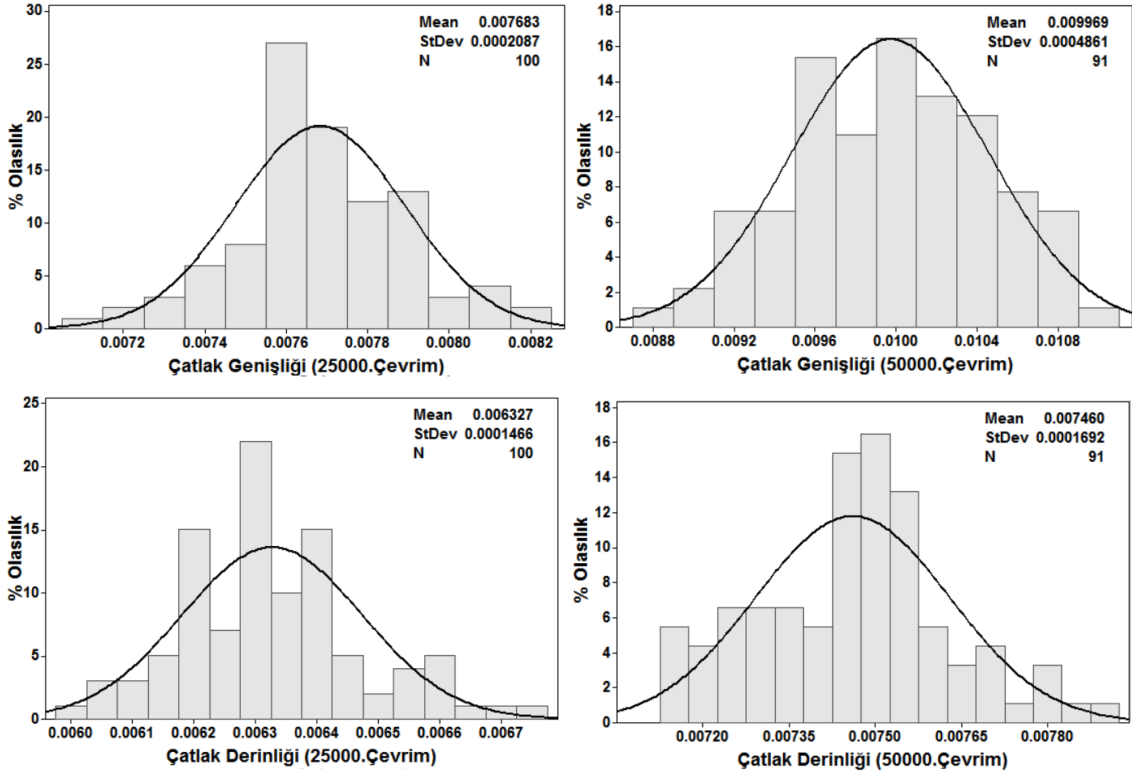
Şekil 3.6.77. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



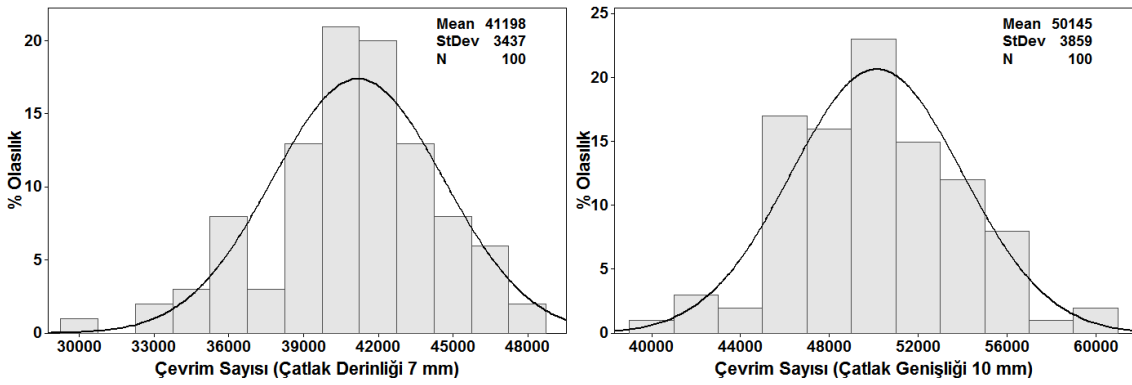
Şekil 3.6.78. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



Şekil 3.6.79. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

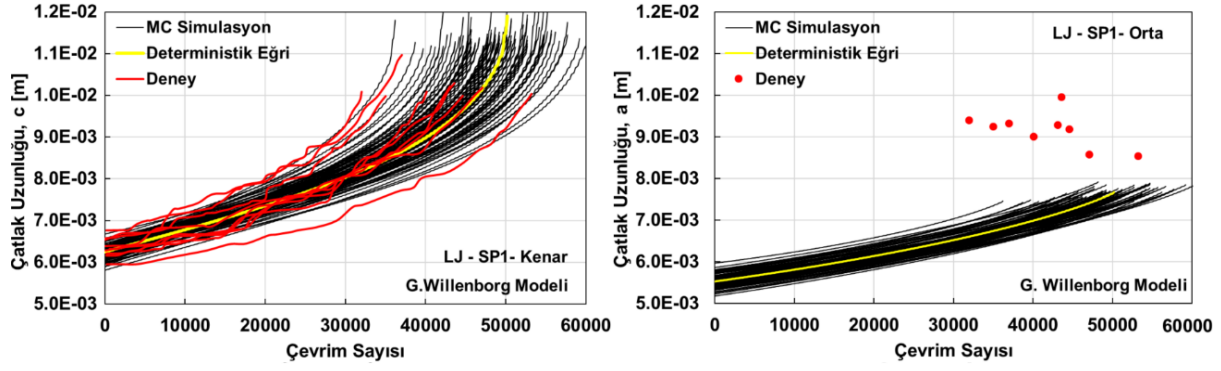


Şekil 3.6.80. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

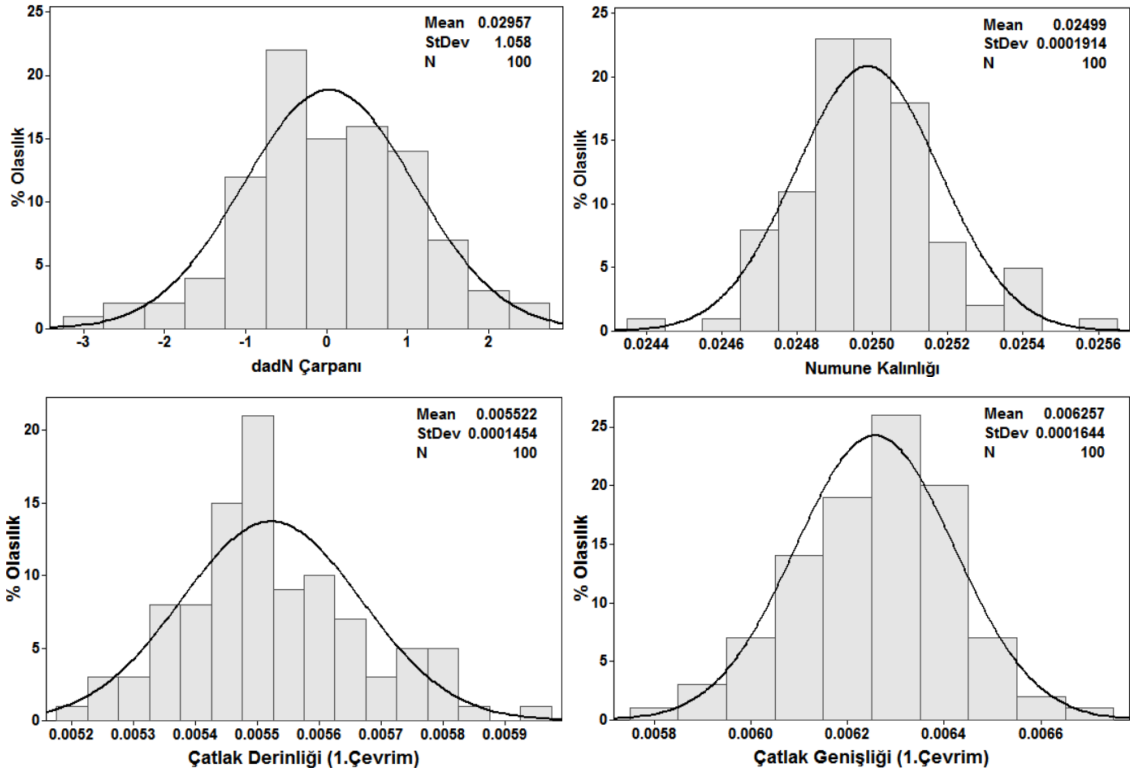


Şekil 3.6.81. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

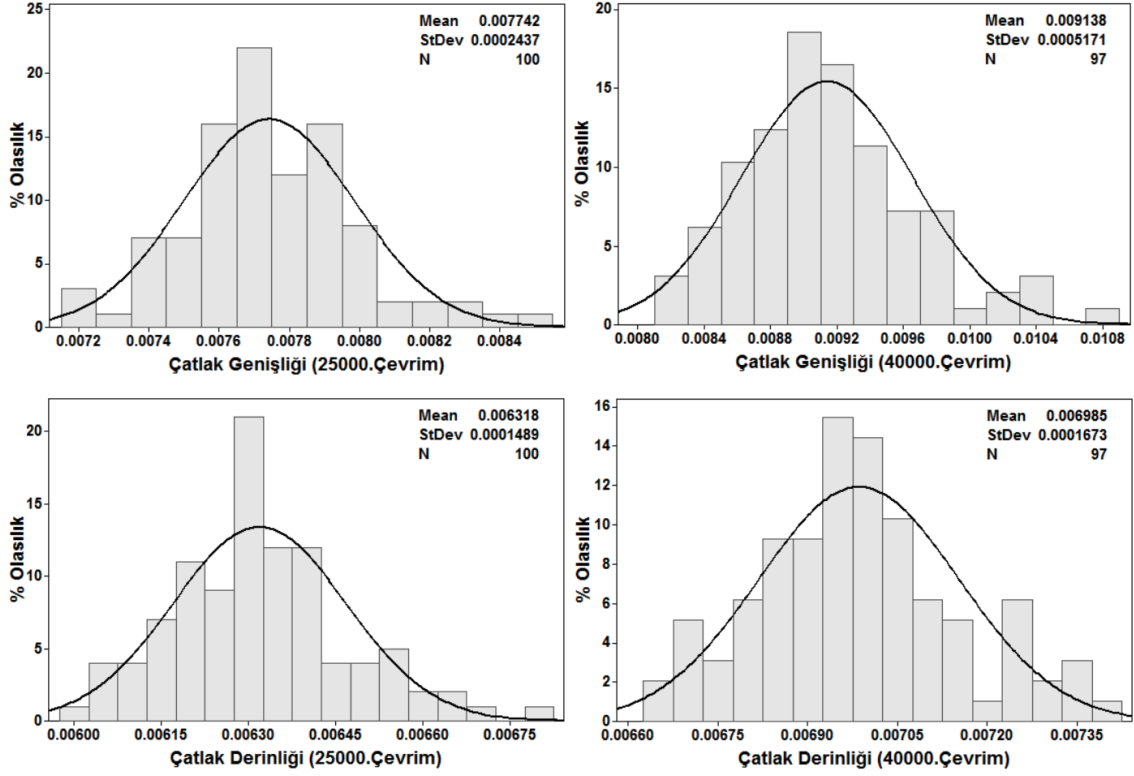




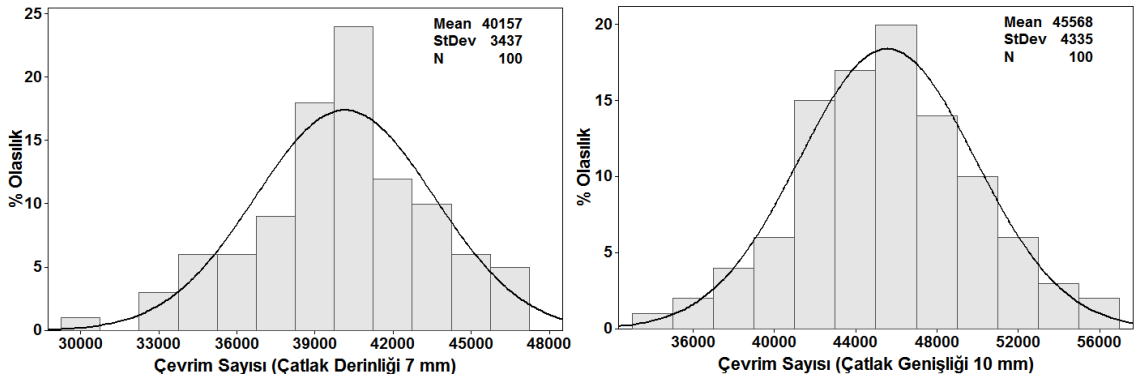
Şekil 3.6.82. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



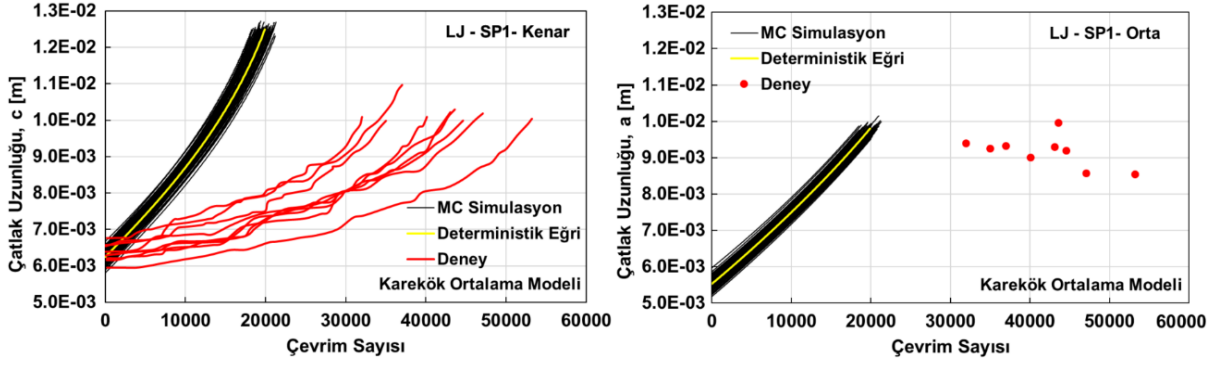
Şekil 3.6.83. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



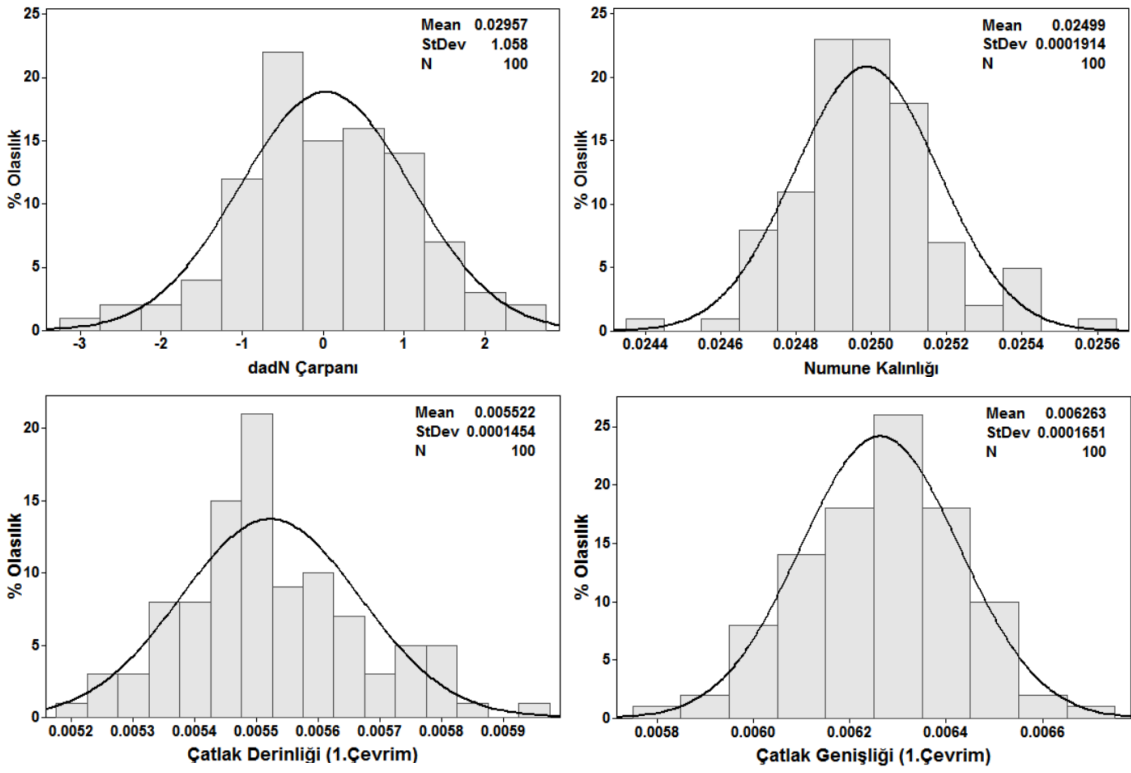
Şekil 3.6.84. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



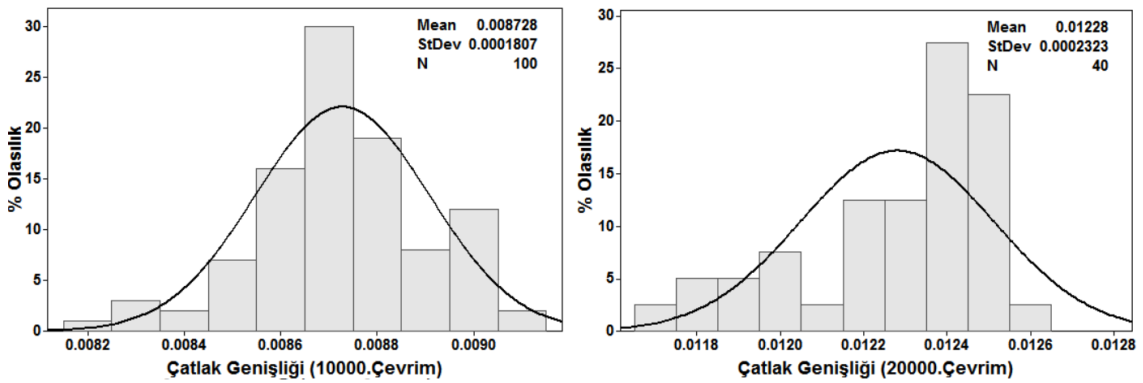
Şekil 3.6.85. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)

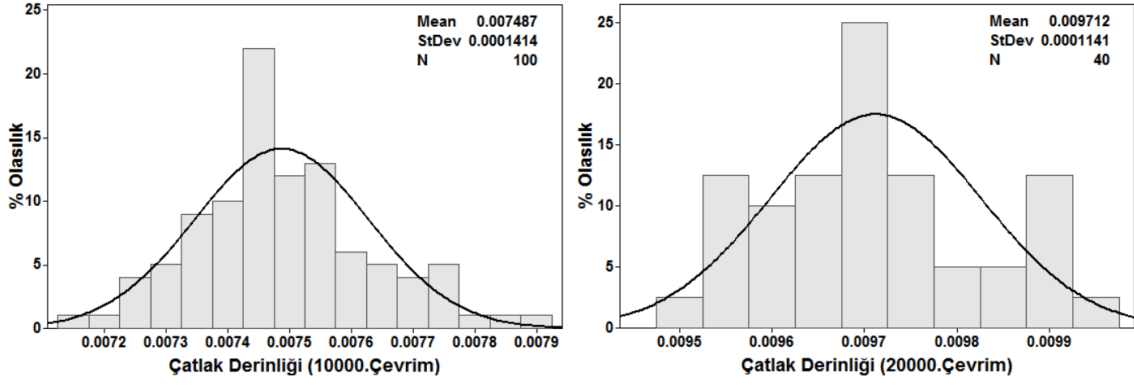


Şekil 3.6.86. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)

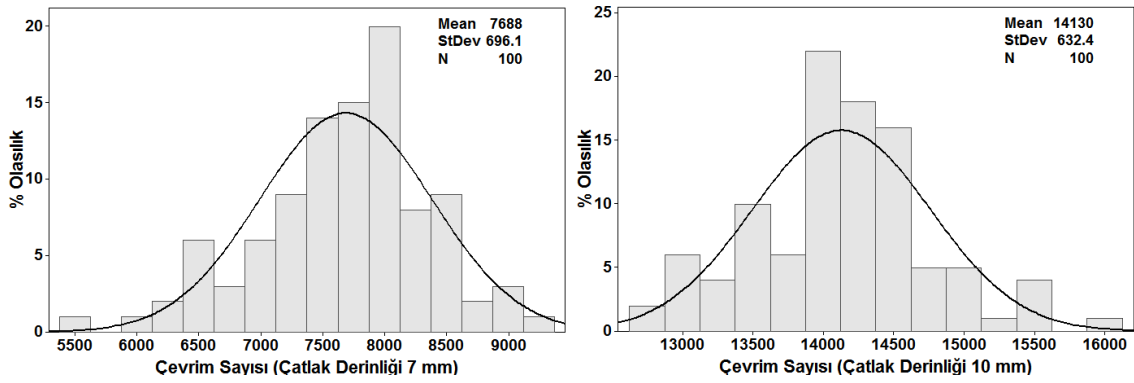


Şekil 3.6.87. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)

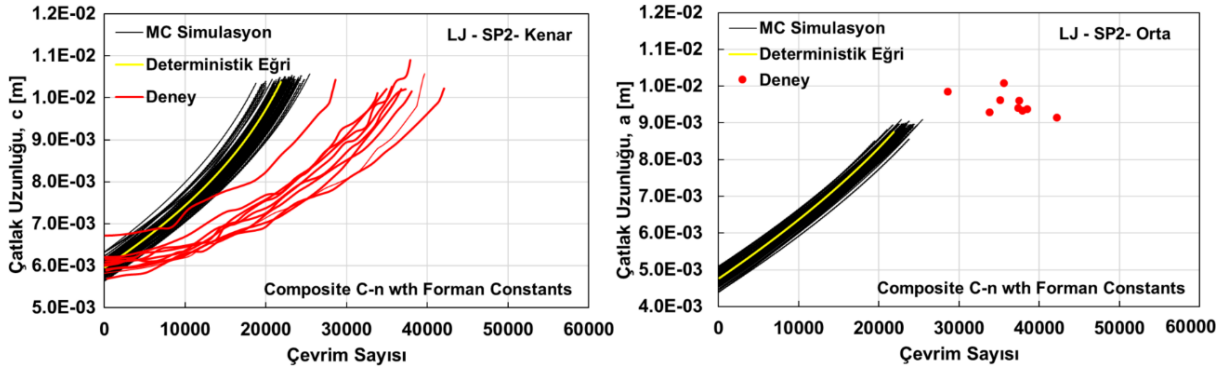




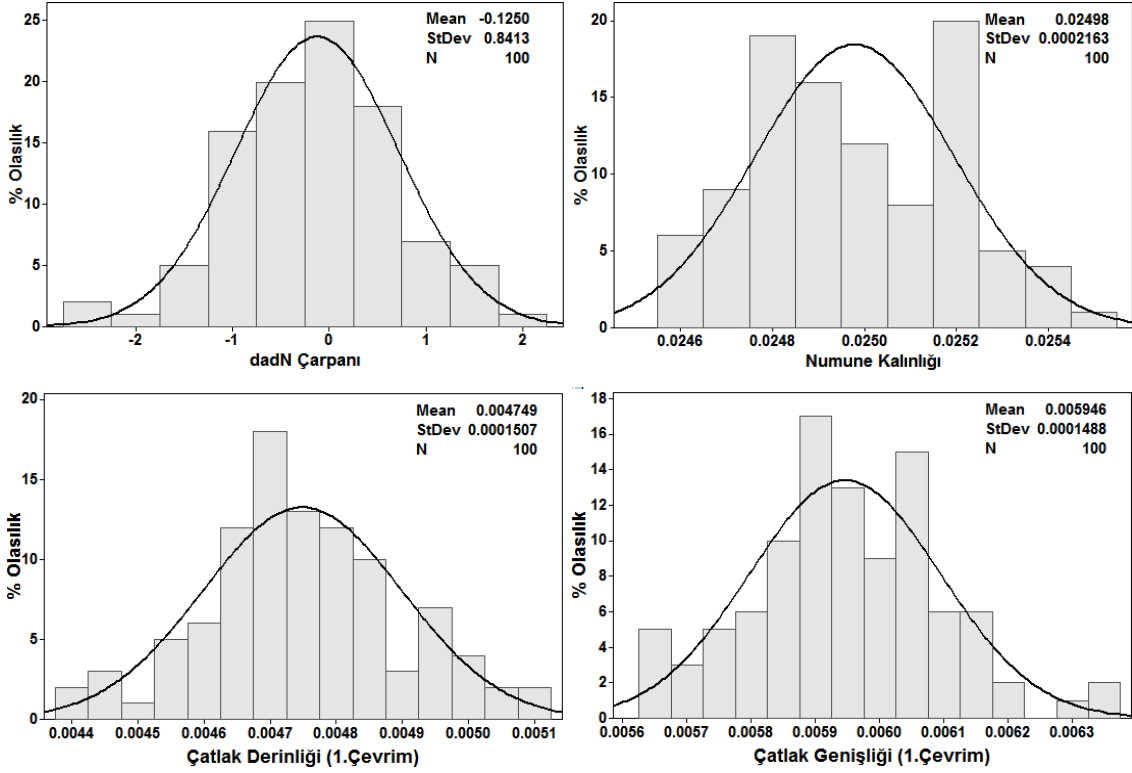
Şekil 3.6.88. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



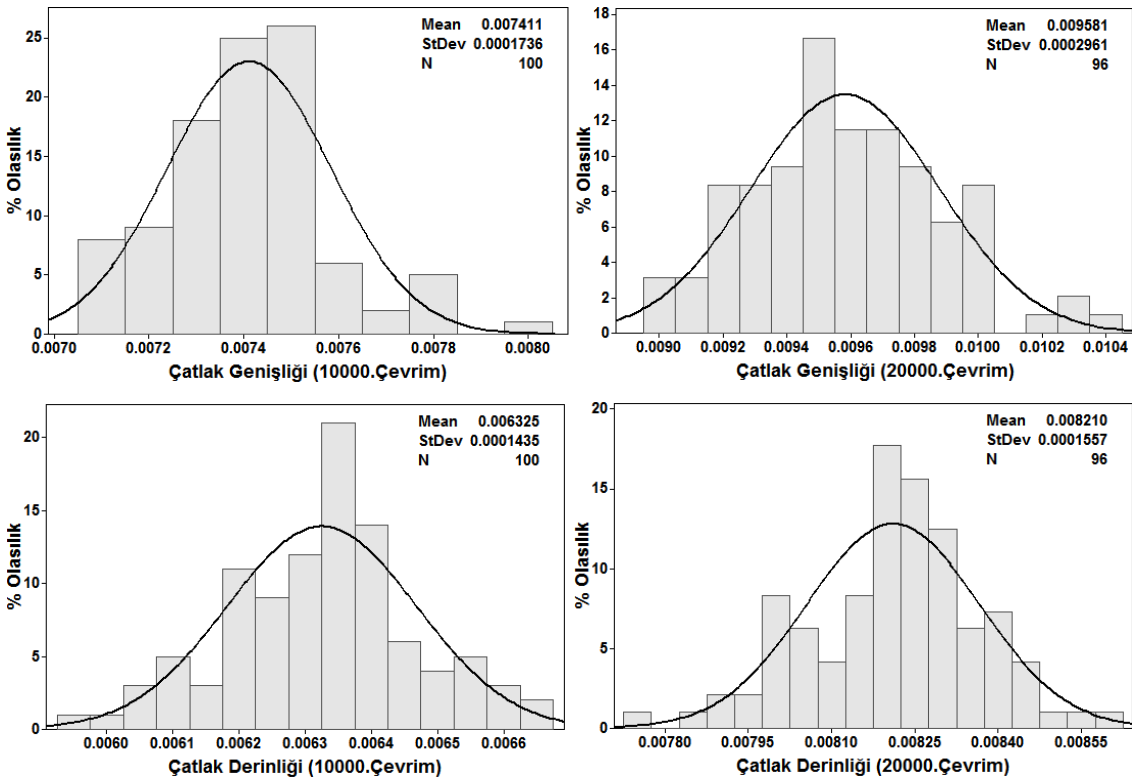
Şekil 3.6.89. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP1 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



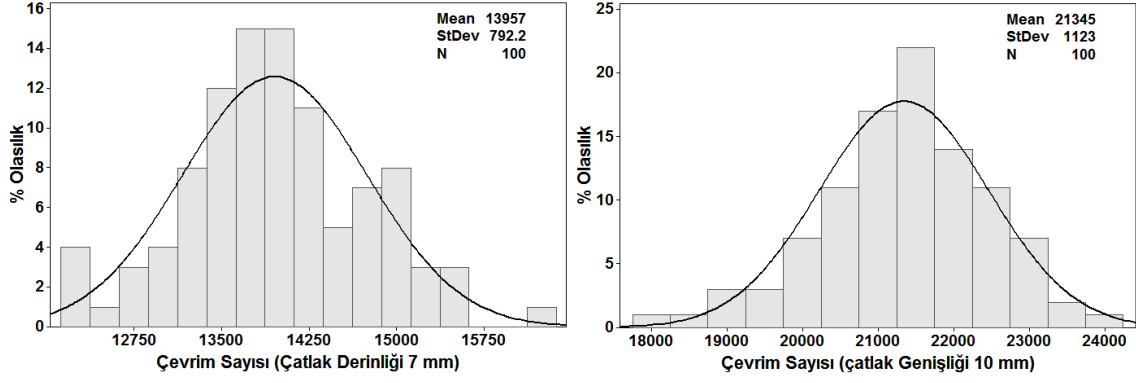
Şekil 3.6.90. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



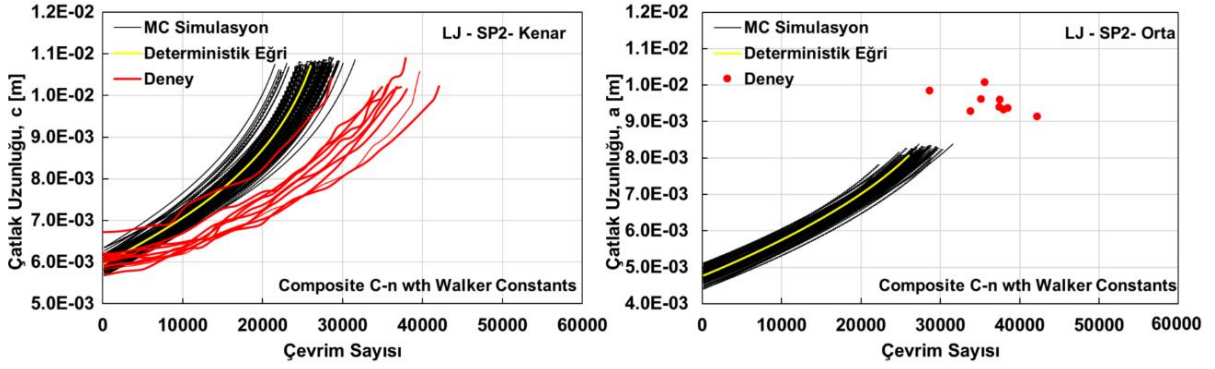
Şekil 3.6.91. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



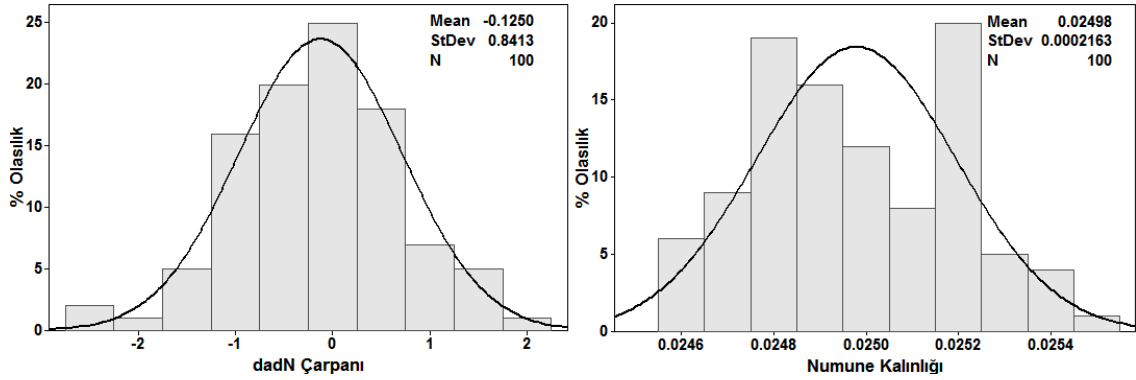
Şekil 3.6.92. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)

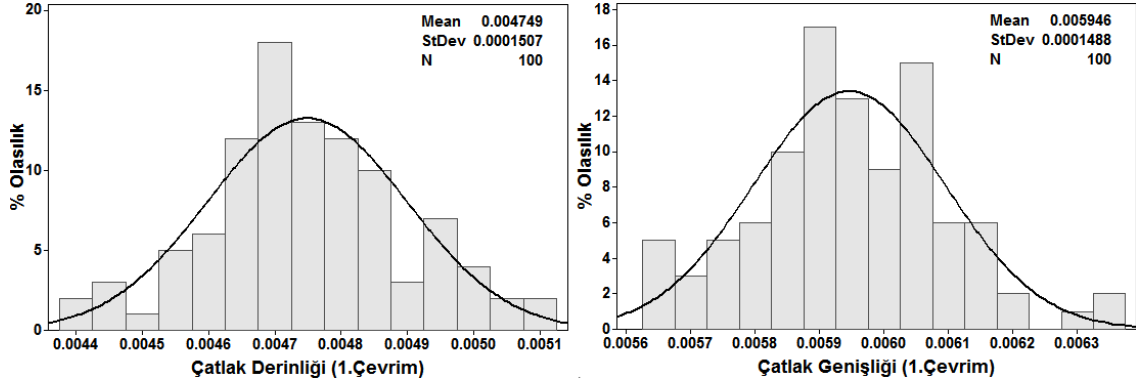


Şekil 3.6.93. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)

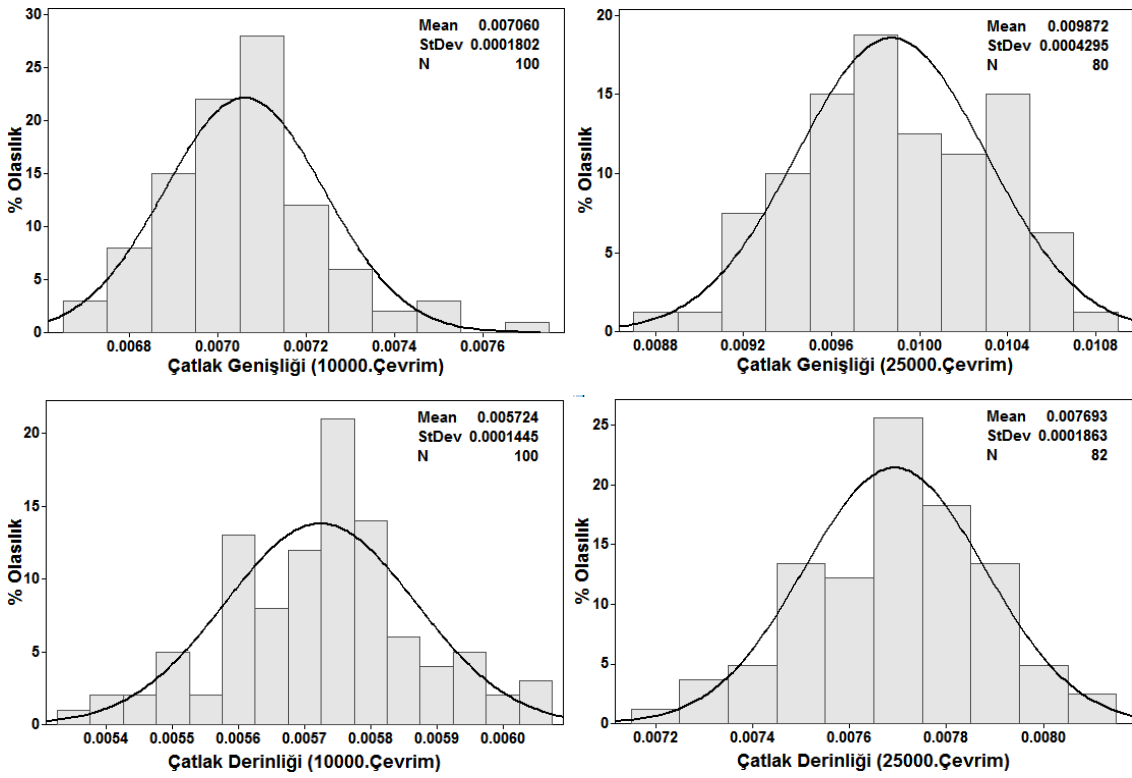


Şekil 3.6.94. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

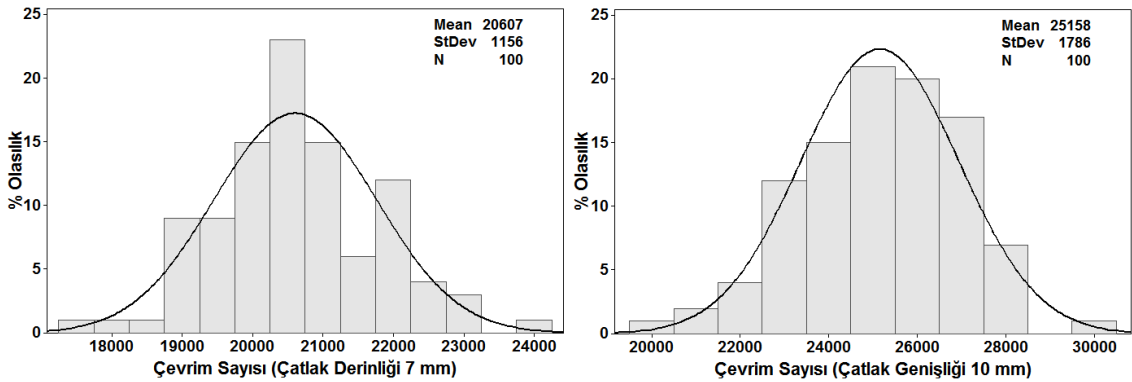




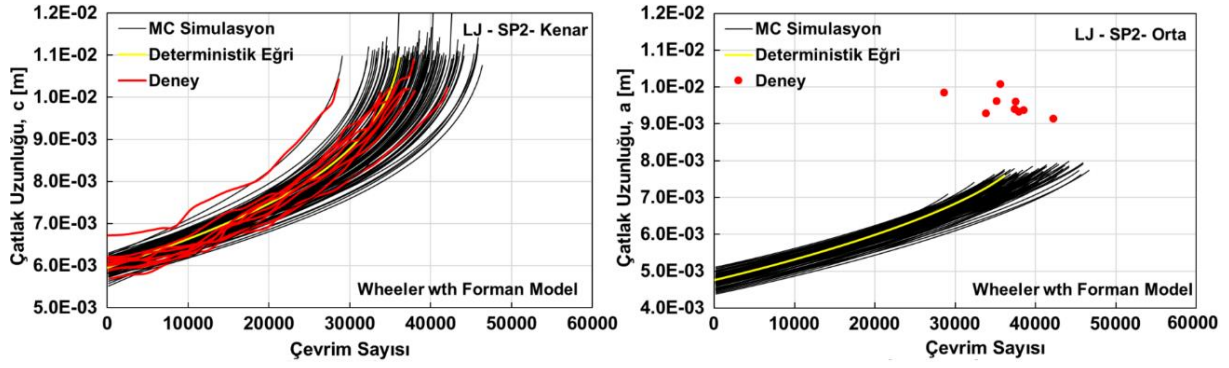
Şekil 3.6.95. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



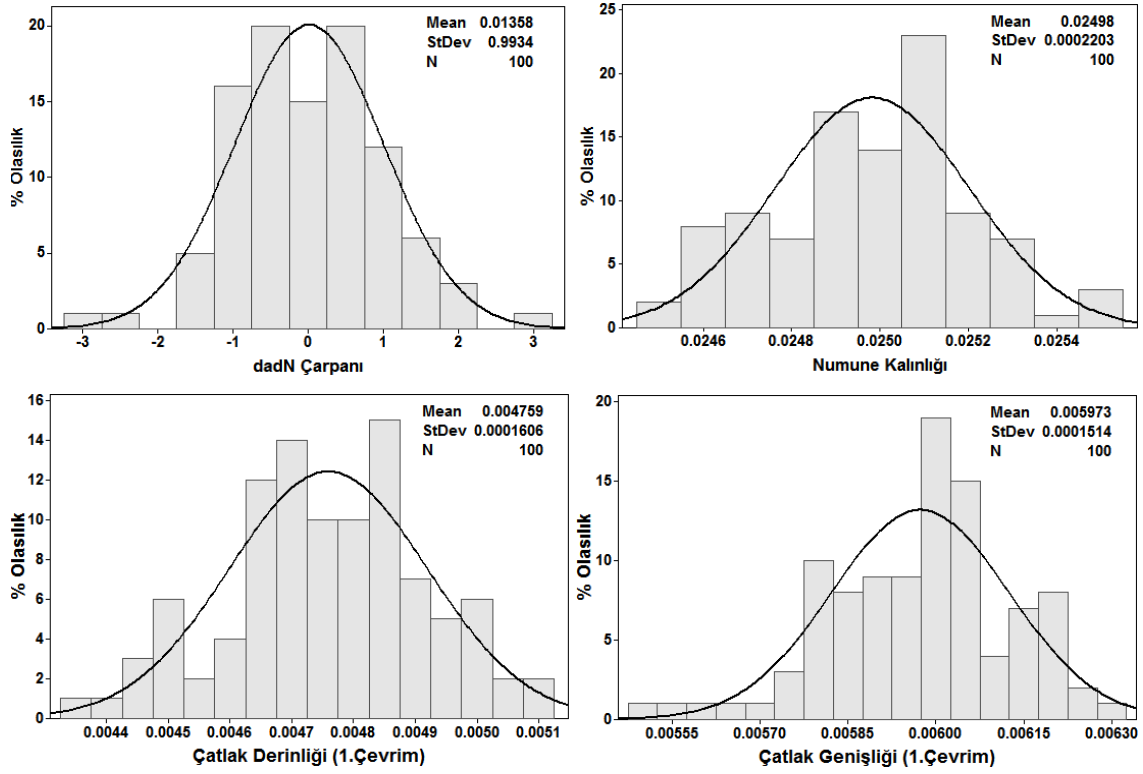
Şekil 3.6.96. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



Şekil 3.6.97. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)

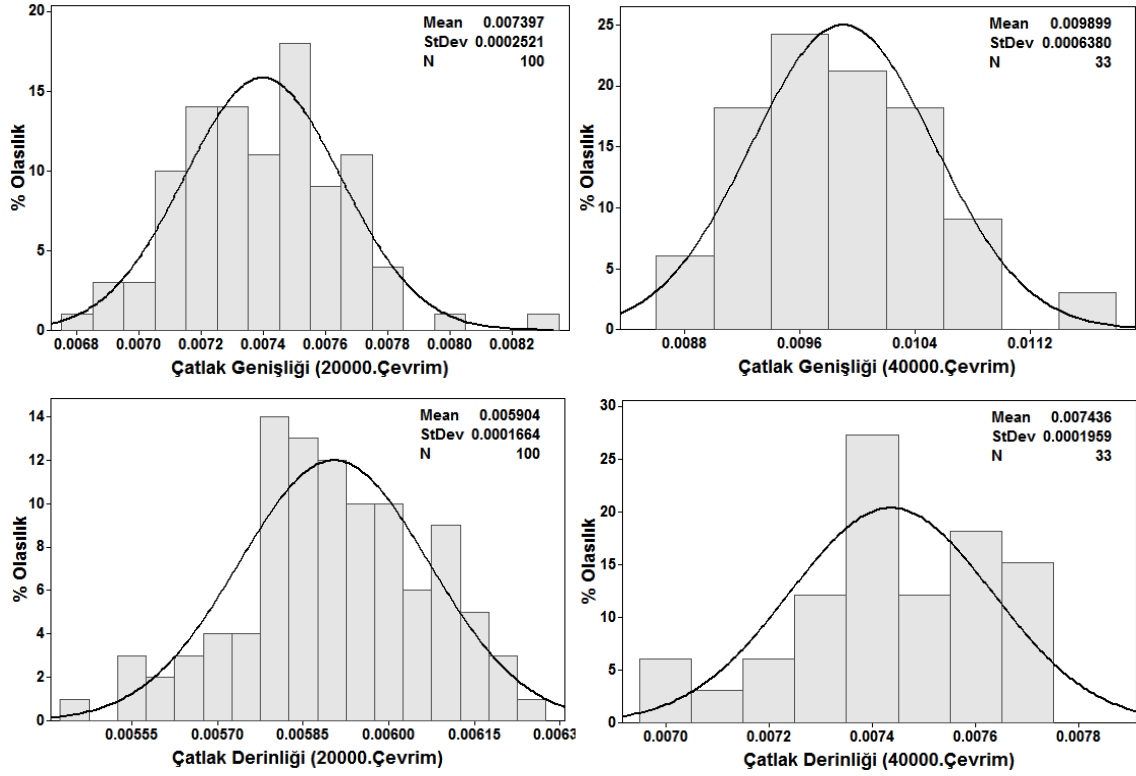


Şekil 3.6.98. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

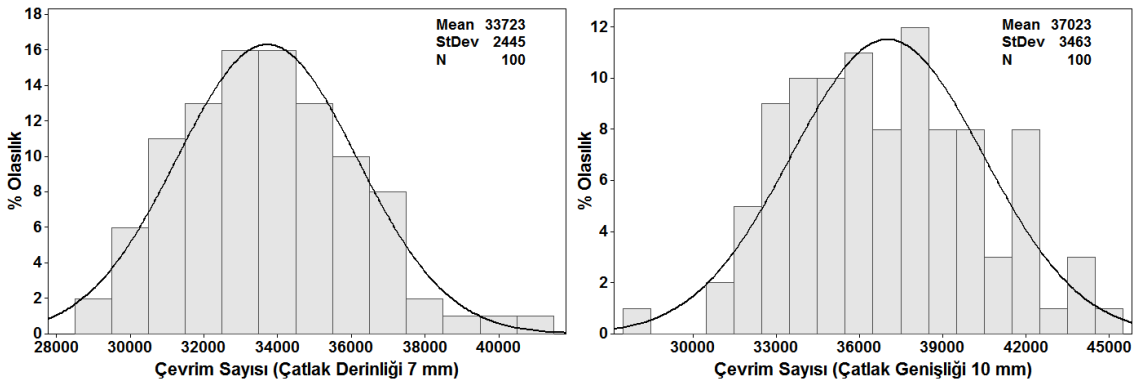


Şekil 3.6.99. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

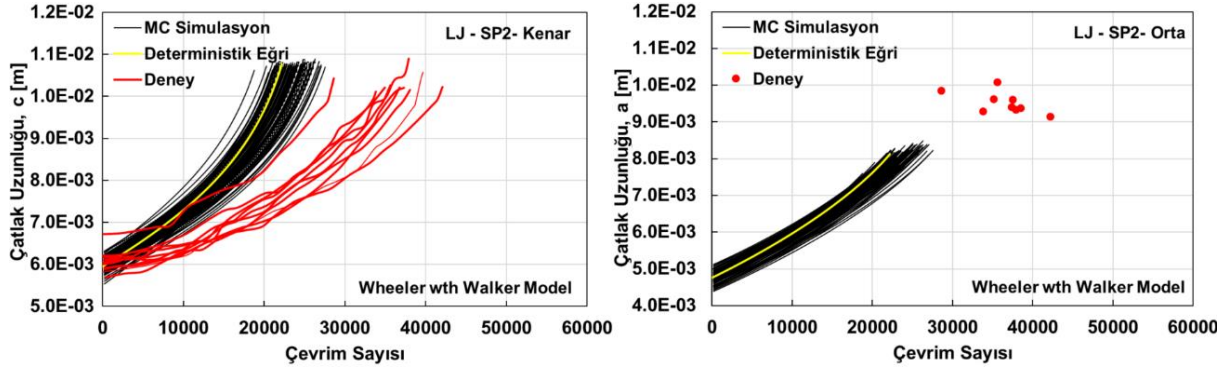




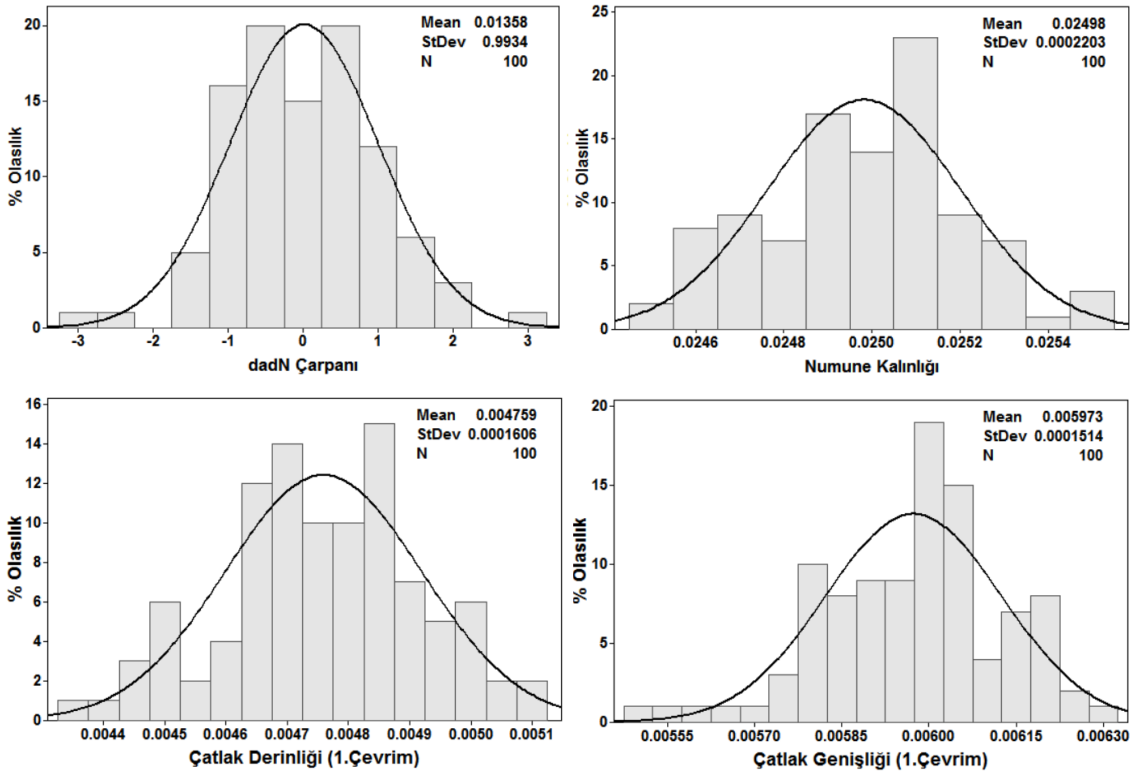
Şekil 3.6.100. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



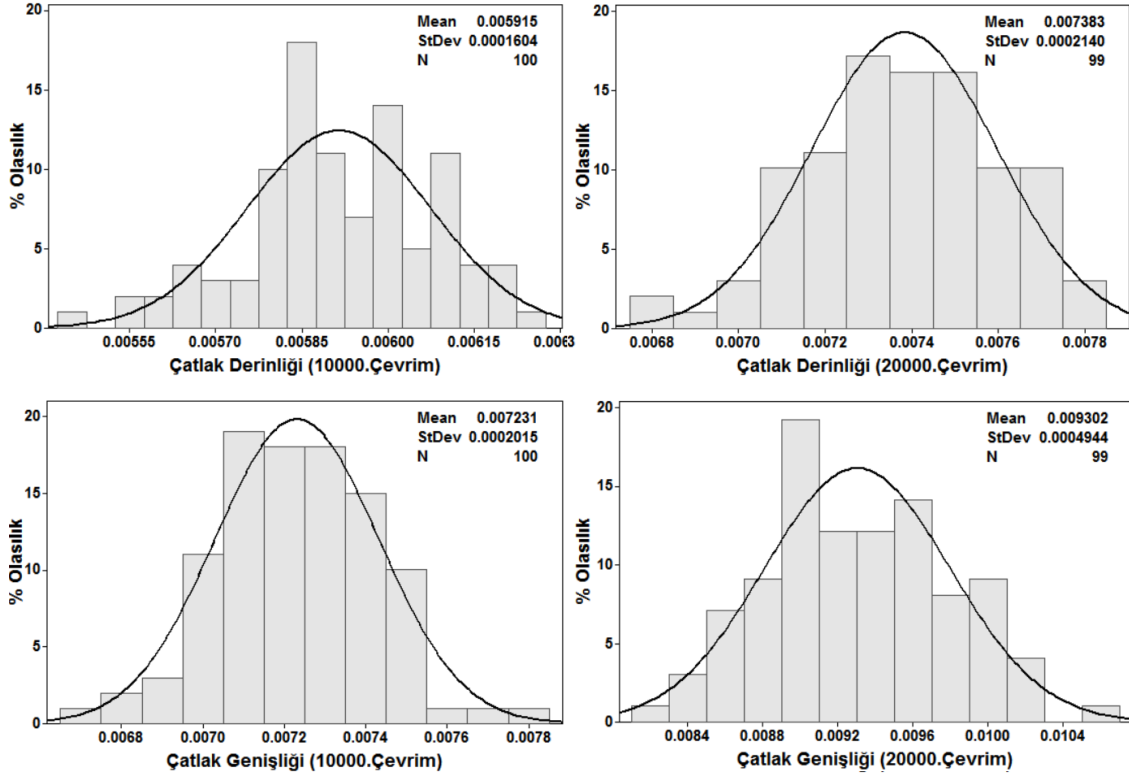
Şekil 3.6.101. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



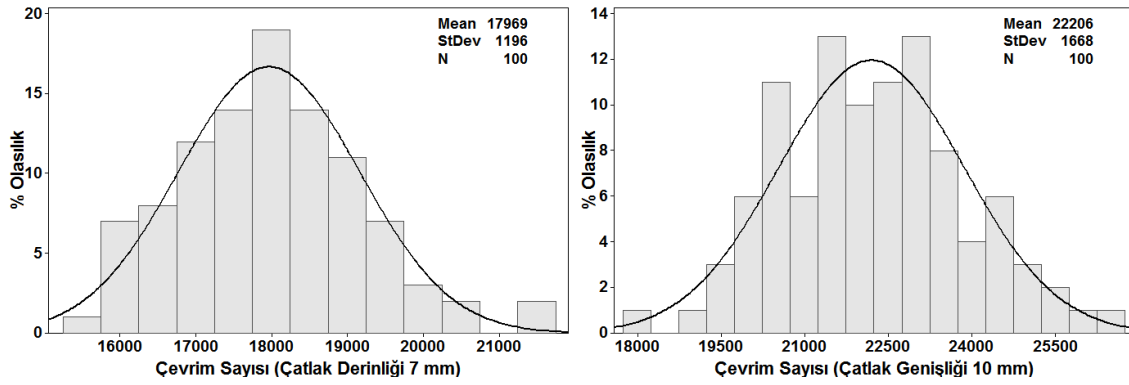
Şekil 3.6.102. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



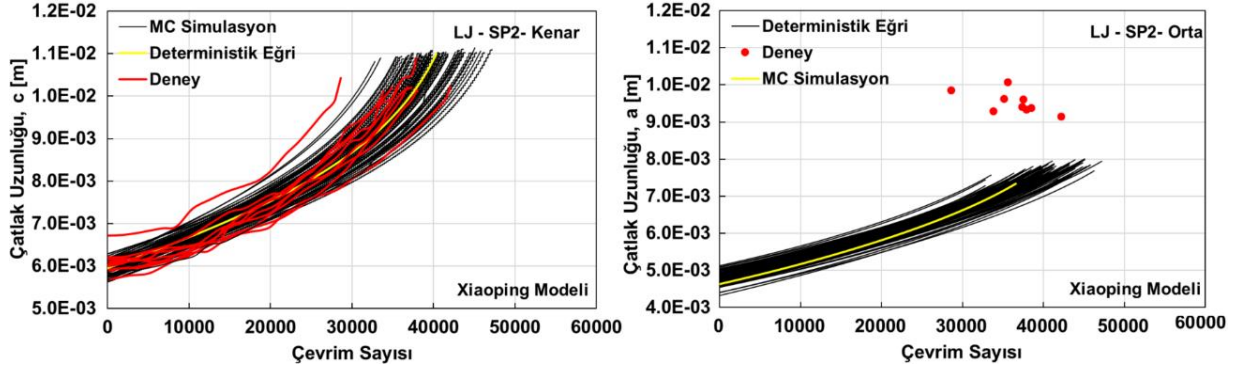
Şekil 3.6.103. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



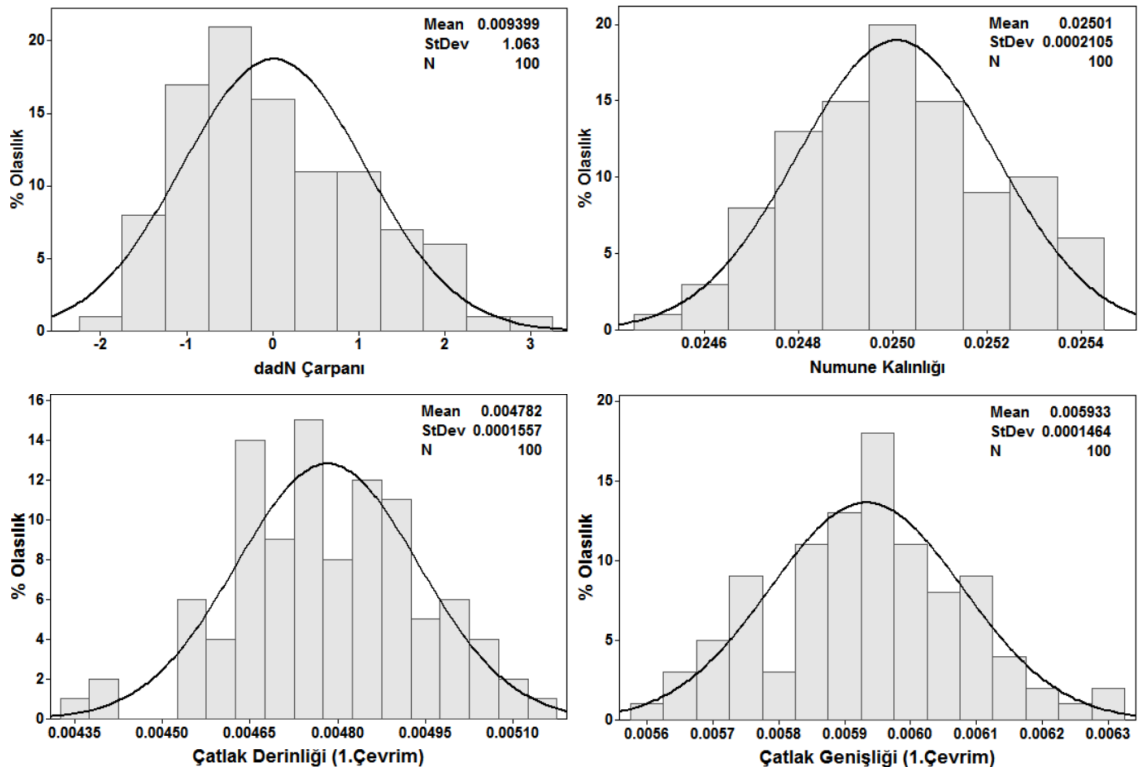
Şekil 3.6.104. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



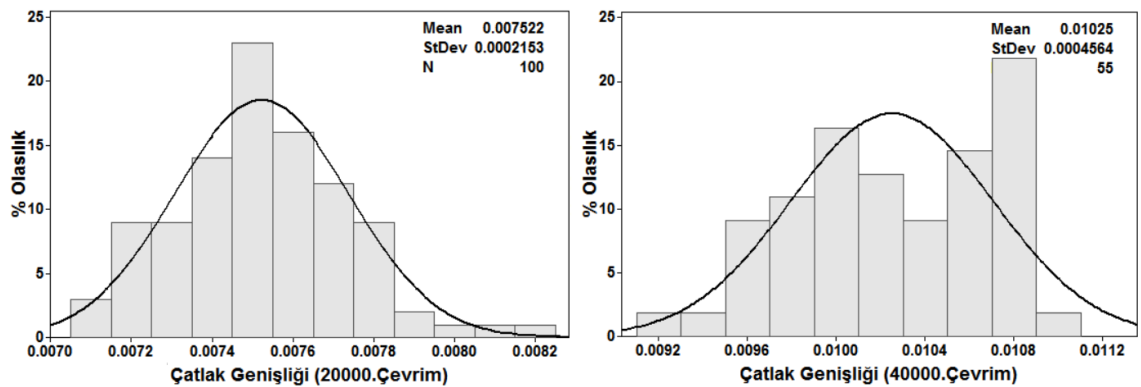
Şekil 3.6.105. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)

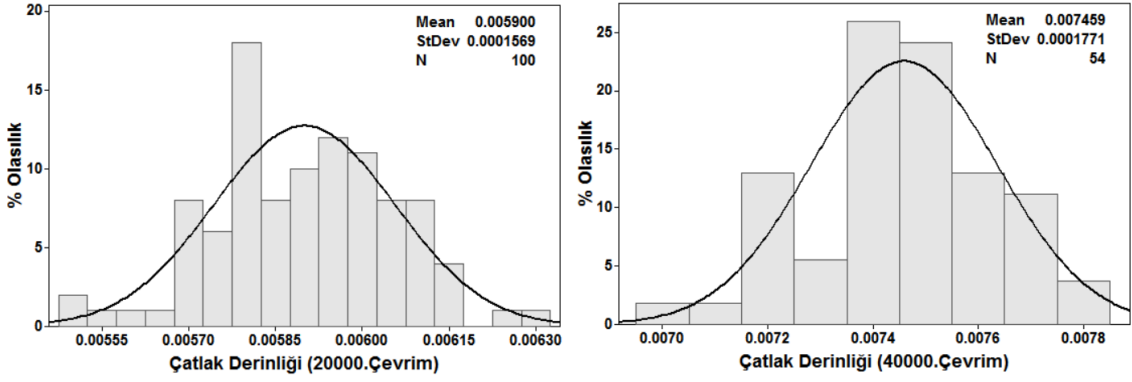


Şekil 3.6.106. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

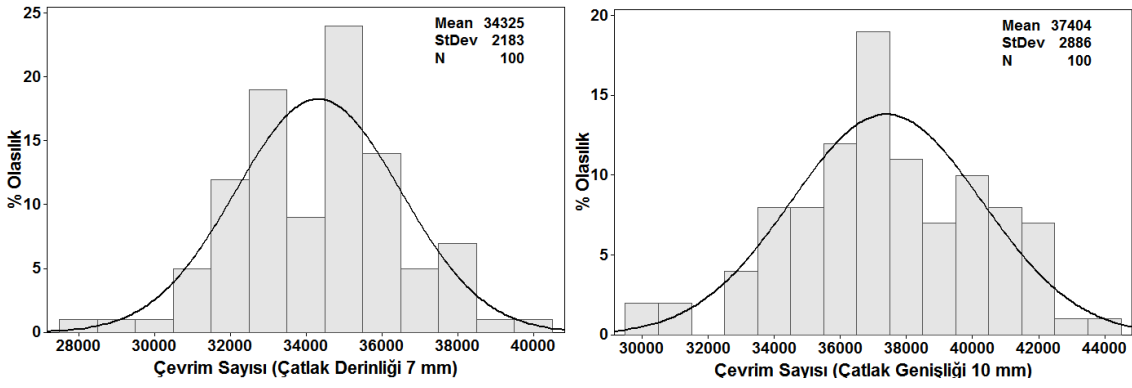


Şekil 3.6.107. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli)

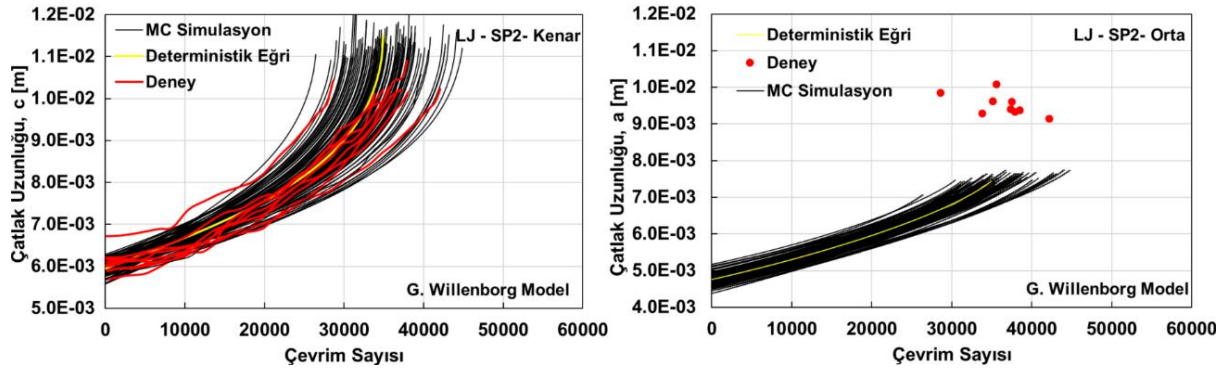




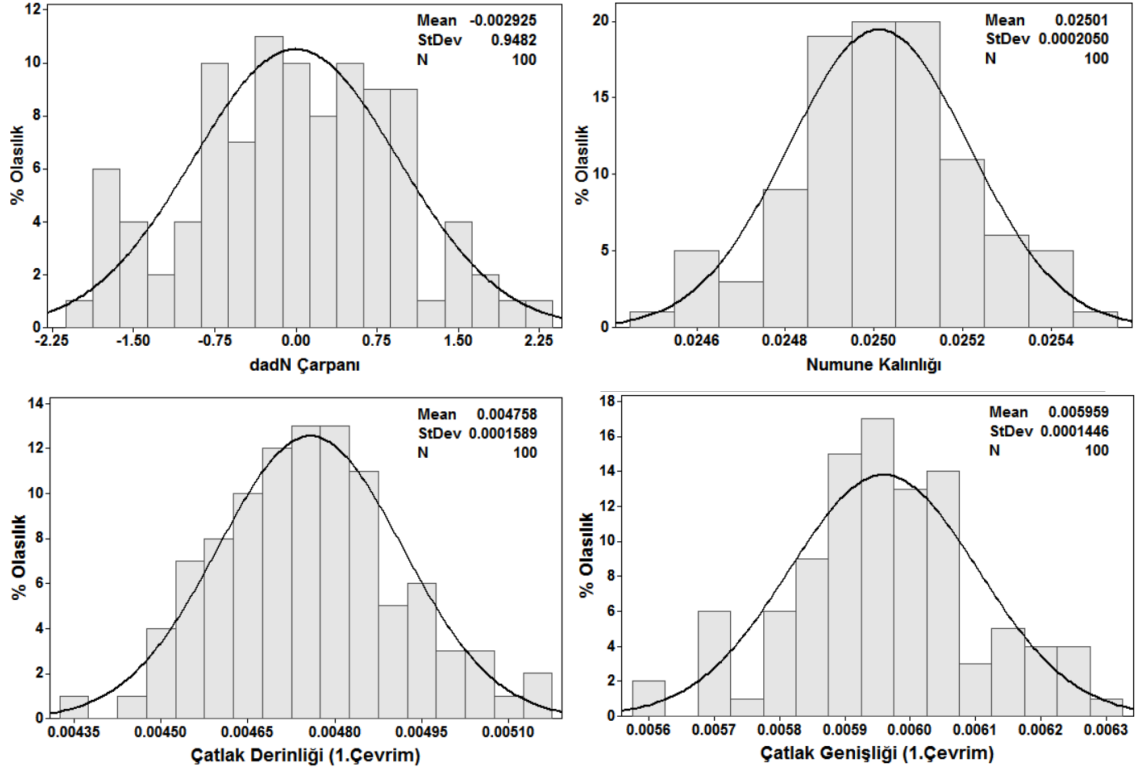
Şekil 3.6.108. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



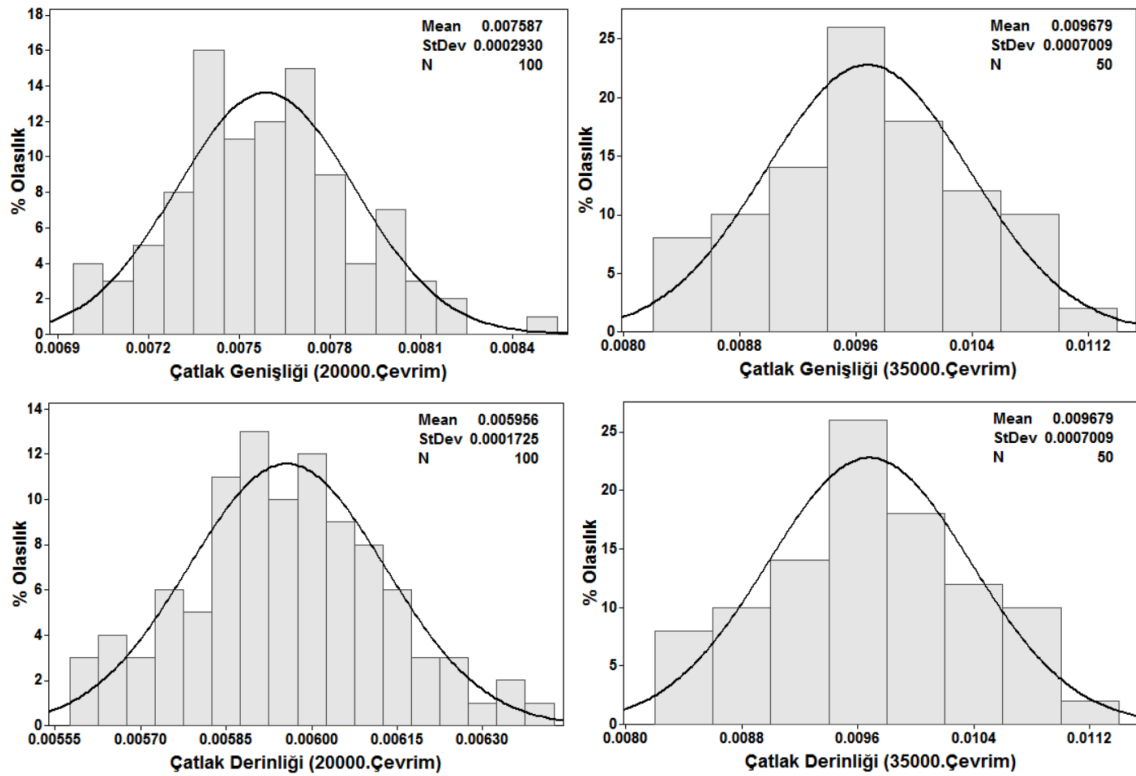
Şekil 3.6.109. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



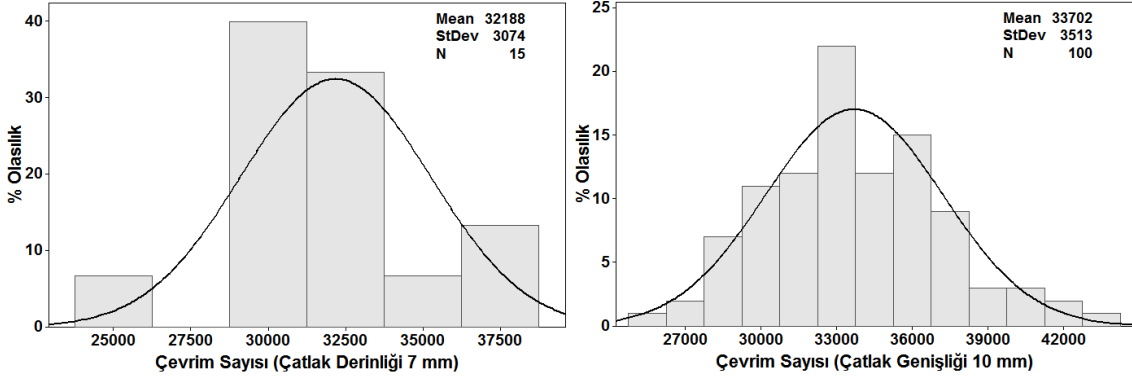
Şekil 3.6.110. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



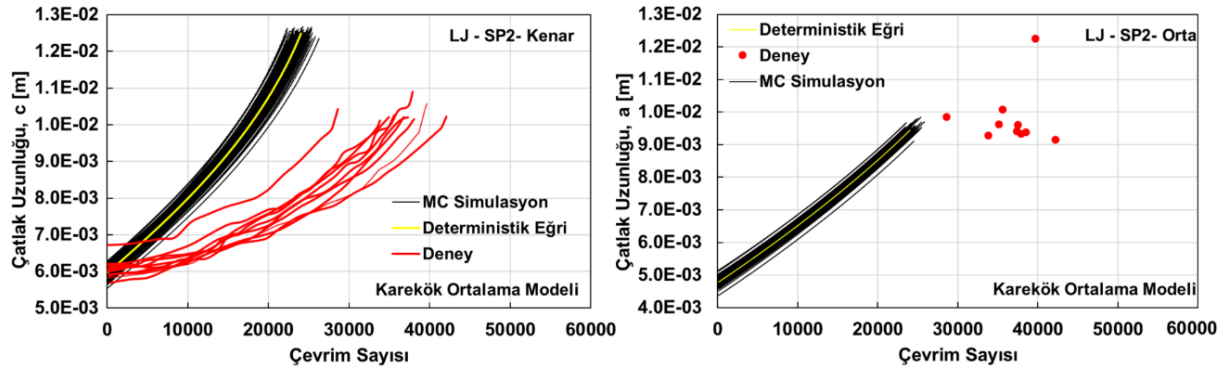
Şekil 3.6.111. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



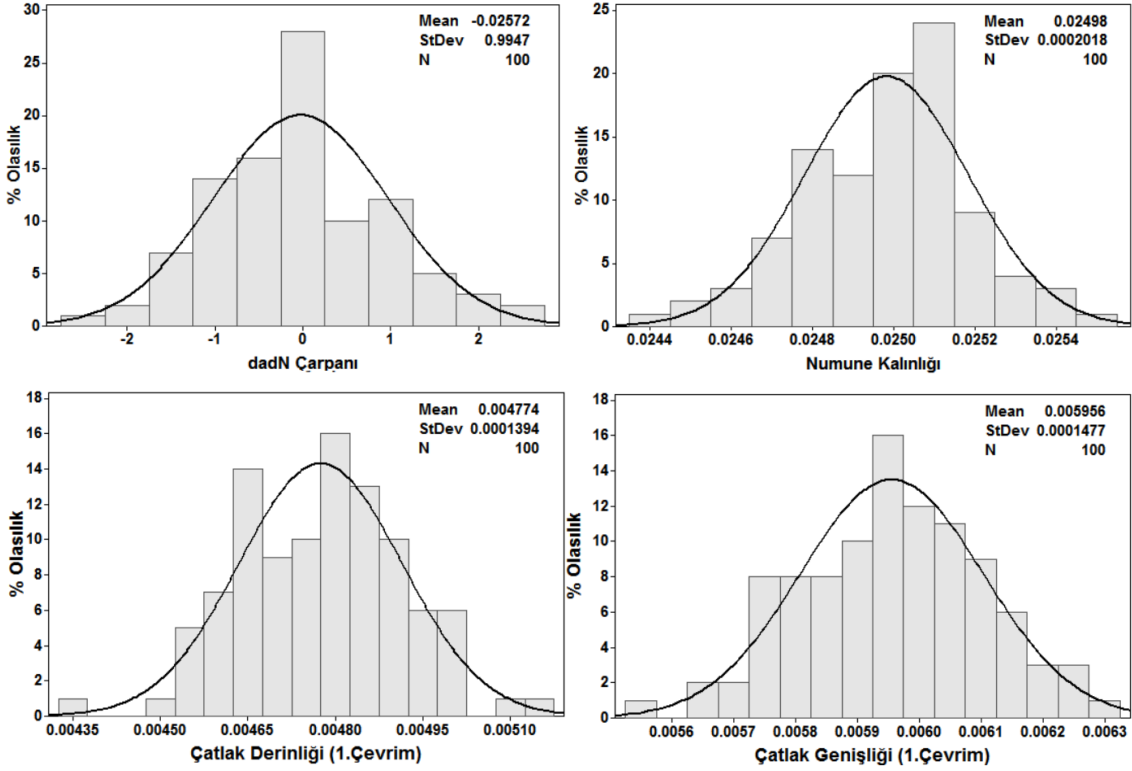
Şekil 3.6.112. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



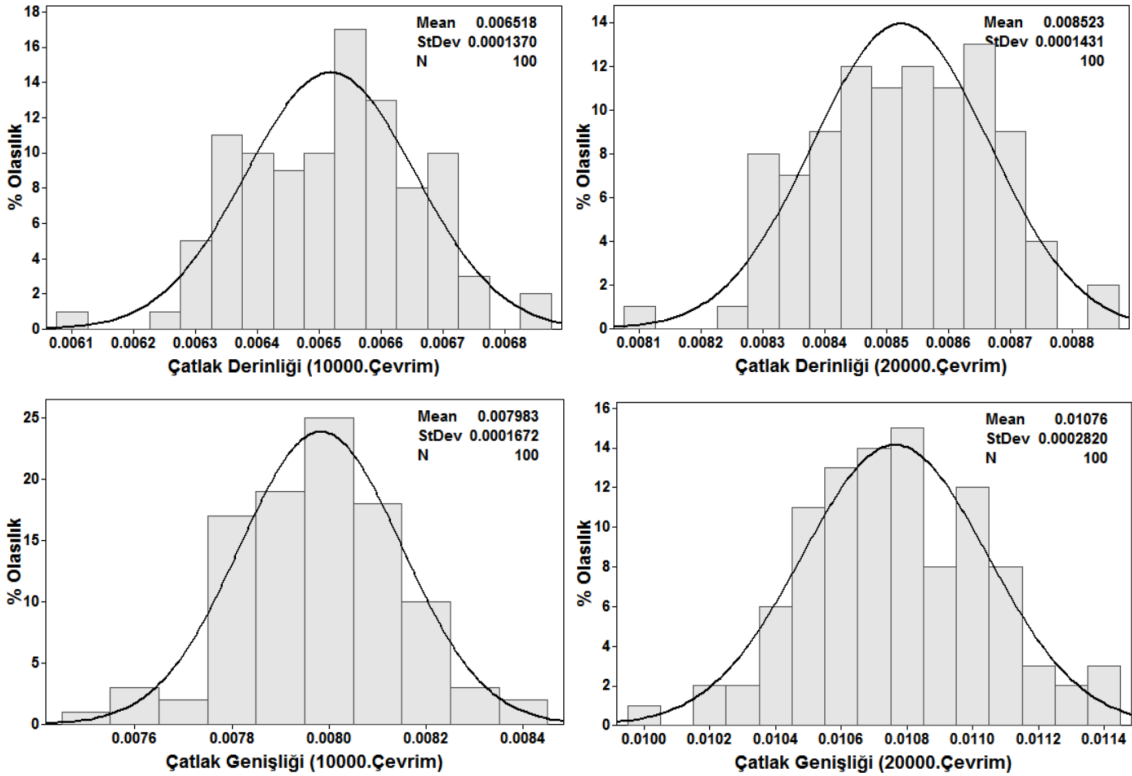
Şekil 3.6.113. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağıllımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



Şekil 3.6.114. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)

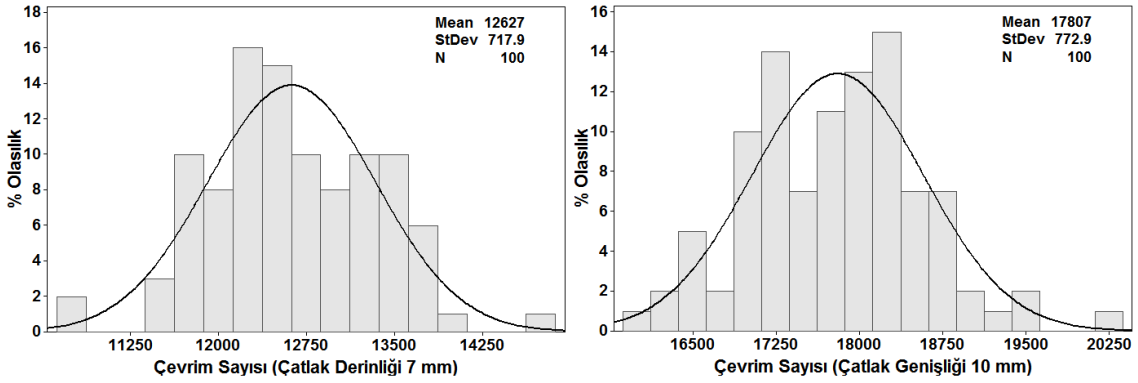


Şekil 3.6.115. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



Şekil 3.6.116. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)





Şekil 3.6.117. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (CT numunesi, SP2 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)

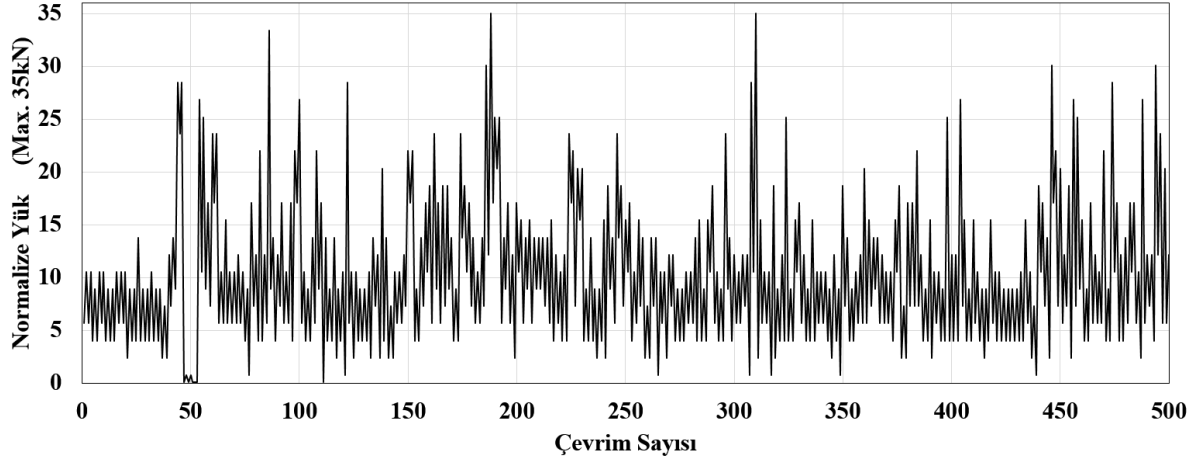
Farklı modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde üç boyutlu çatlak ilerlemesi için Wheeler modelindeki yaklaşım kullanılarak Forman denkleminin kullanıldığı model (Şekil 3.6.70,98), Xiaoping modeli (Şekil 3.6.78,106) ve Genelleştirilmiş Willenborg Modelinin (Şekil 3.6.82,110) deneylerle uyumlu sonuç verdiği görülmektedir. Daha önce açıklandığı üzere üç boyutlu çatlak ilerlemesi için Spektrum Aşırı Yük İndeksi kullanılmamıştır. İki ve üç boyutlu çatlak ilerlemesi için her ikisinde de deneylere yakın sonuç veren model Forman denkleminin kullanıldığı Wheeler modeli yaklaşımı olarak belirlenmiştir.

### 3.6.3 Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Çatlak İlerlemesi Sağlama Deney ve Simülasyonları

Önceki bölümlerde, iki farklı değişik genlikli yük profili (spektrum yüklemesi) altında gerçekleştirilen çoğul testlerin deneysel sonuçları ile olasılık temelli iki- ve üç-boyutlu çatlak ilerleme simülasyonlardan elde edilen çatlak ilerleme eğrileri farklı modeller kullanılarak mukayese edilerek ilgili tüm sonuçlar detaylarıyla sunulmuştur. Yapılan değerlendirmeler sonucunda; değişken genlikli yük altında iki- ve üç-boyutlu mod-I çatlak ilerleme ömürlerinin tahmini için, çatlak ilerleme gecikmesi için Wheeler modeli ve yük ortalama değer etkisi için ise Forman modelinin entegre bir şekilde kullanılmasının genel olarak en iyi sonucu verdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, değişken genlikli yük altında iki boyutlu çatlak ilerleme problemleri için, aşırı yük altındaki kısmi çatlak ilerleme hızlanması için spektrum aşırı yük indeksi (SOL indeks) kullanımı da model iyileştirmesi olarak sunulmuş ve literatürden elde edilen bağımsız bir uygulama ile de sağlanması yapılmıştır.

Önceki bölümde üç-boyutlu mod-I çatlak ilerlemesi için iki ayrı spektrum yük profili için yapılan olasılık temelli analiz ve elde edilen sonuçların bağımsız ve farklı bir yük profili altında sağlanmasının yapılması amacıyla farklı bir spektrum belirlenmiştir. Spektrum 3 (SP3) olarak

isimlendirilen bu spektrum SP2'de olduğu gibi FALSTAFF yüklemeye spektrumundan farklı bir bölümün seçilmesi ile elde edilmiştir. SP3 yüklemeye spektrumu Şekil 3.6.118'de verilmiştir.



Şekil 3.6.117. Üç boyutlu çatlak ilerlemesi için kullanılan SP3 yüklemeye spektrumu

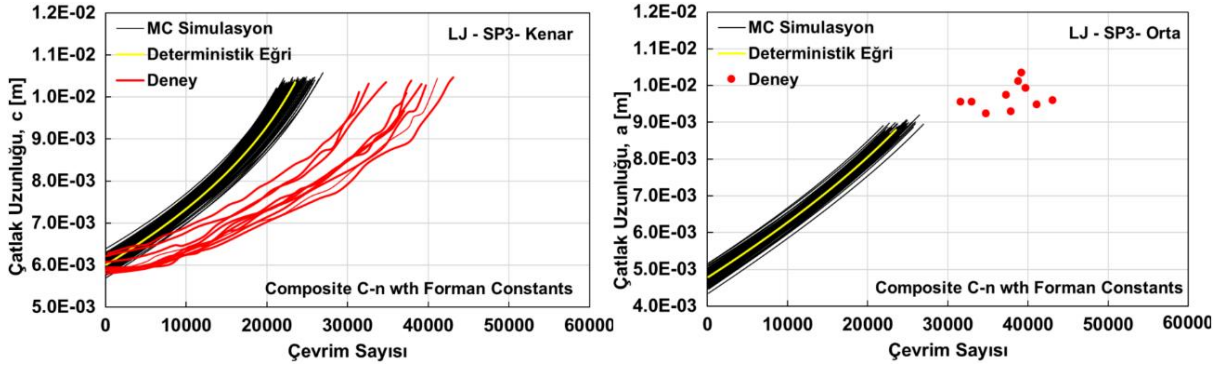
Spektrum 3 karışık genlikli yük profili altında ve çatlak ilerleme ömür eğrilerindeki değişkenlikleri de tespit etmek amacıyla 10 adet deney gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.5.4'te açıklanan prosedür takip edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. SP3 yüklemesi altında gerçekleştirilen deneylere ait bilgiler Tablo 3.6.2'de özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.6.2. SP3 yük profili ile gerçekleştirilen deneyler

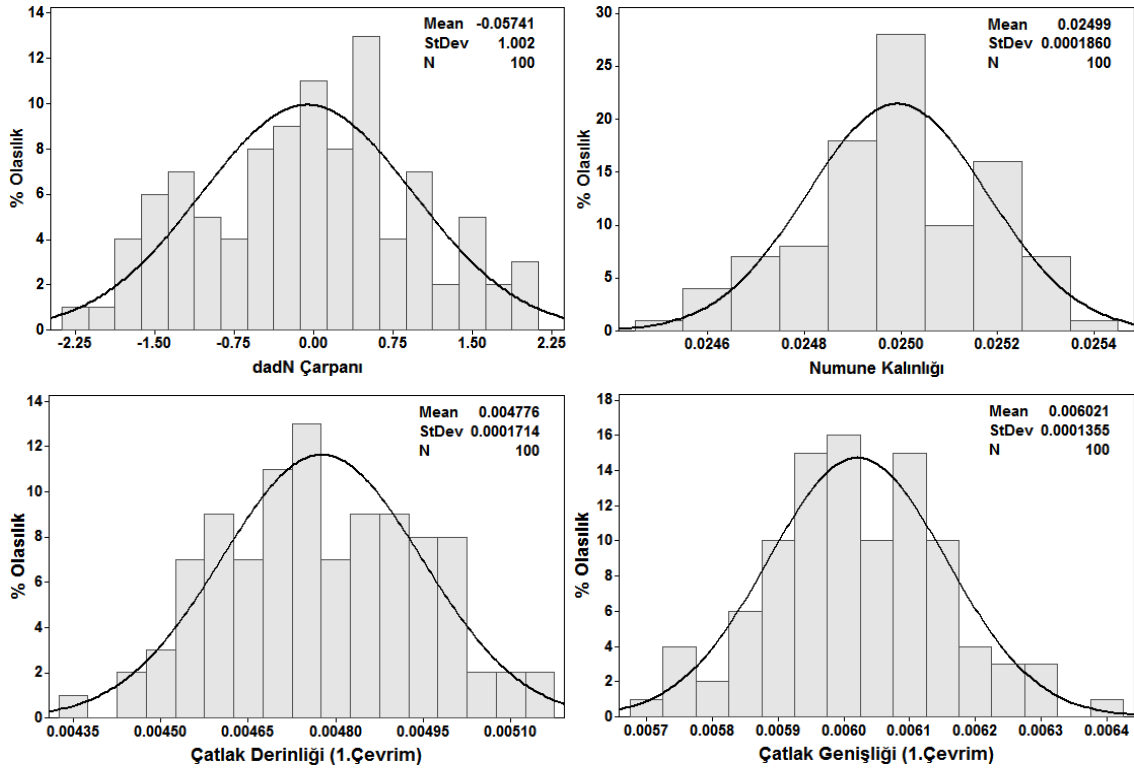
Spectrum 3 / LJ				Ön Çatlak Uzunluğu			da/dN		
Numune Adı	Numune Türü	Ön Çatlak Gerilme Oranı, R	Ön Çatlak Yükü (kN)	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>(avg)</sub> (mm)	Spektrum	Maks. Yük	Çevrim Sayısı
20200702_01	LJ	0.1	17	5.990	5.895	5.943	Spektrum 3	35	39176
20200703_01	LJ	0.1	17	5.855	5.754	5.805	Spektrum 3	35	37888
20200703_02	LJ	0.1	17	6.240	6.190	6.215	Spektrum 3	35	34797
20200706_01	LJ	0.1	17	6.060	5.620	5.840	Spektrum 3	35	39717
20200706_02	LJ	0.1	17	5.600	6.000	5.800	Spektrum 3	35	43104
20200707_01	LJ	0.1	17	6.290	5.859	6.075	Spektrum 3	35	31586
20200707_02	LJ	0.1	17	5.586	6.150	5.868	Spektrum 3	35	38782
20200708_01	LJ	0.1	17	5.670	6.110	5.890	Spektrum 3	35	37284
20200708_02	LJ	0.1	17	6.420	6.130	6.275	Spektrum 3	35	33014
20200709_01	LJ	0.1	17	5.856	5.960	5.908	Spektrum 3	35	41137

Önceki bölümde olduğu gibi, deneyler sonrasında Monte Carlo Çatlak İlerleme Simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Farklı modellere göre elde edilen sonuçlar deneylerle karşılaştırmalı olarak Şekil 3.6.118-145 arasında verilmiştir. Şekil 3.6.118-145 arasında, kullanılan her bir model için olasılık temelli çatlak ilerleme ömür grafikleri, Monte Carlo analizinde kullanılan girdi

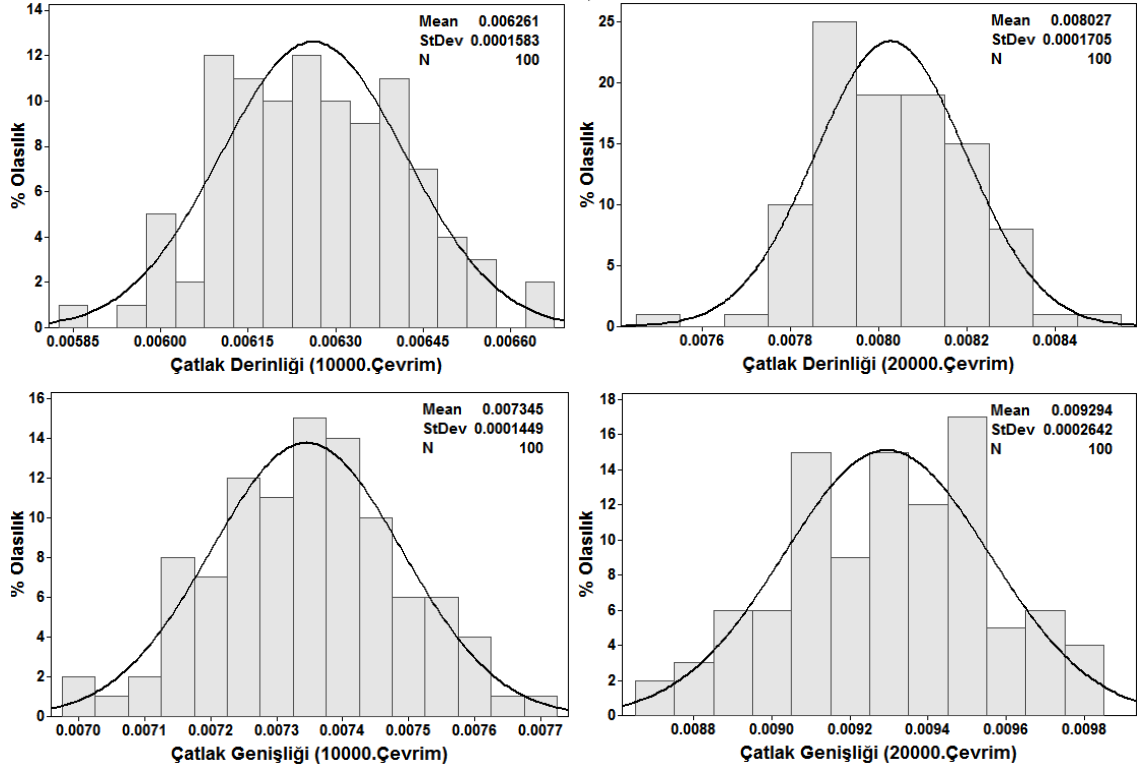
parametrelerin dağılımları, belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluğu olasılık dağılımları ve belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayısı olasılık dağılımları da daha önceki bölümde olduğu gibi aynı formatta verilmiştir.



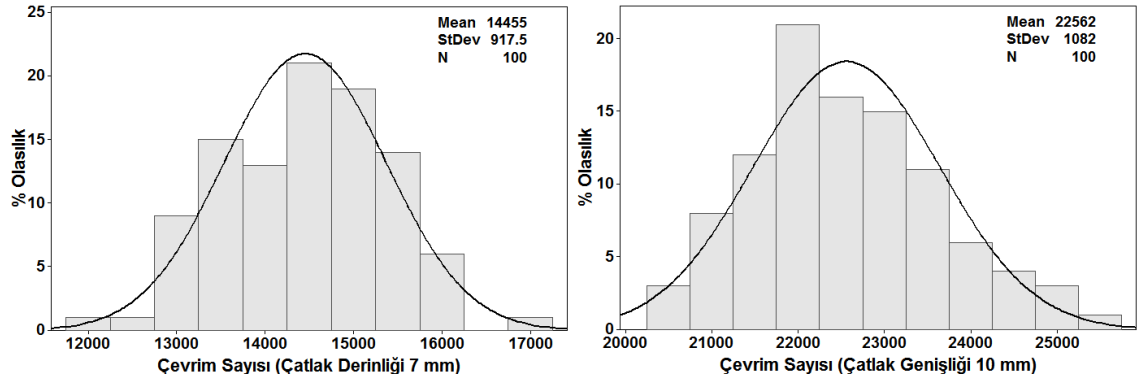
Şekil 3.6.118. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



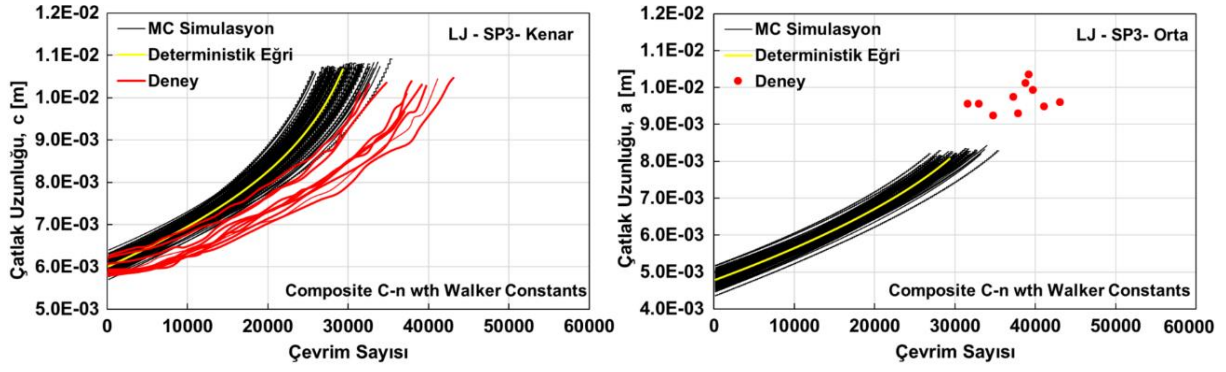
Şekil 3.6.119. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



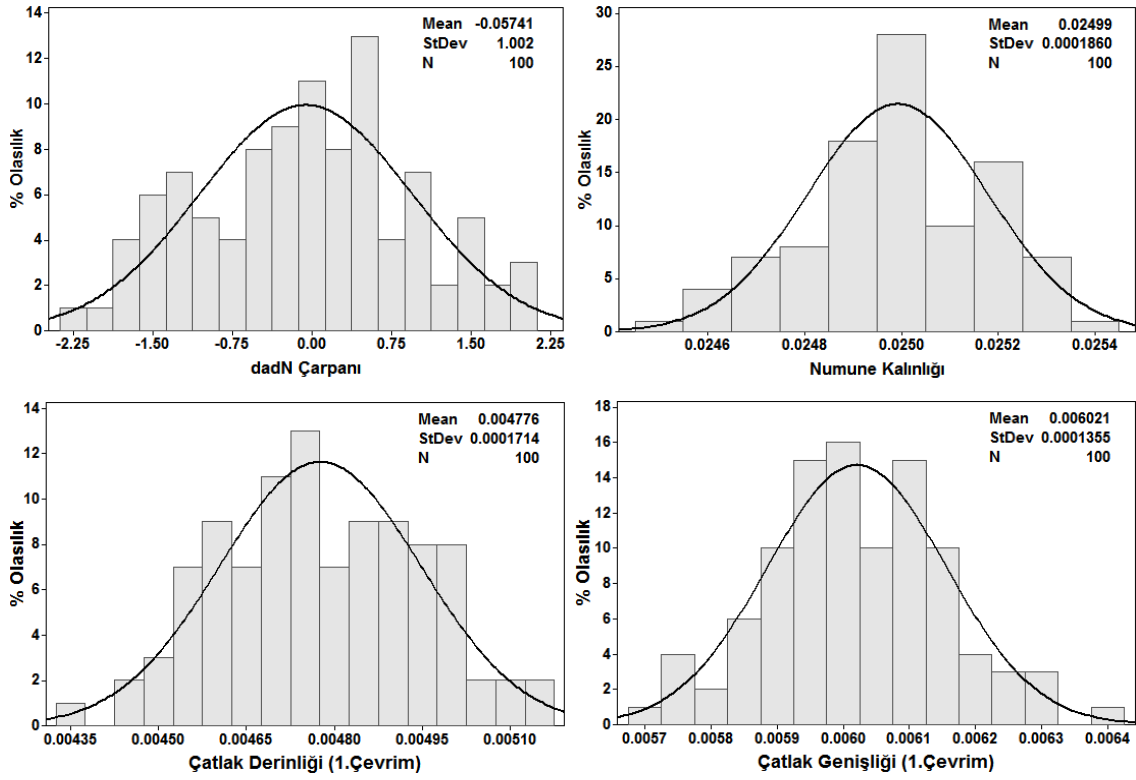
Şekil 3.6.120. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



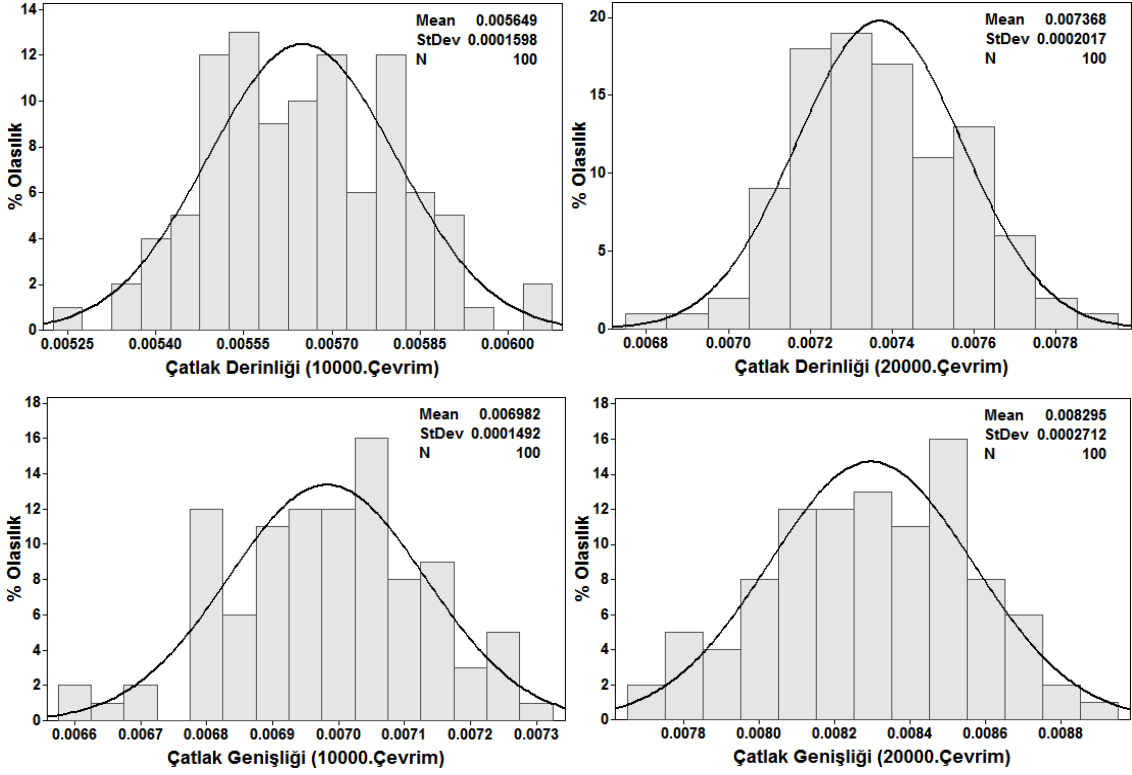
Şekil 3.6.121. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Forman C-n değerleri ile Wheeler modeli)



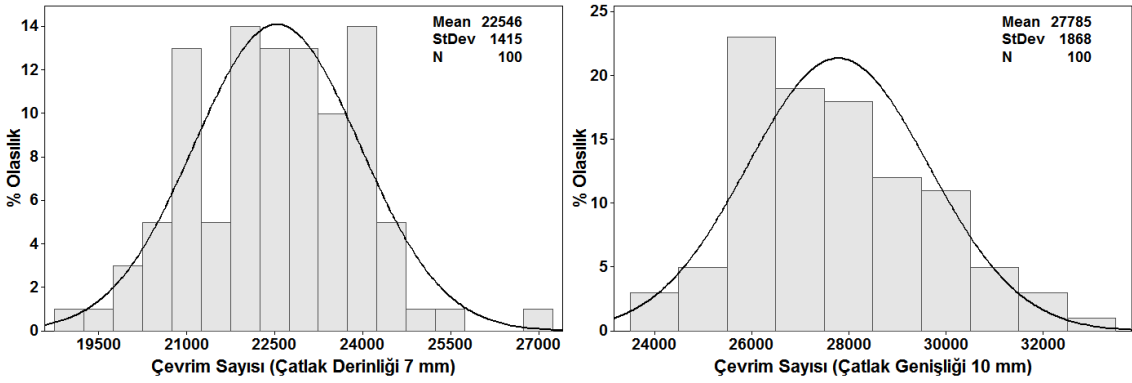
Şekil 3.6.122. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, , Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



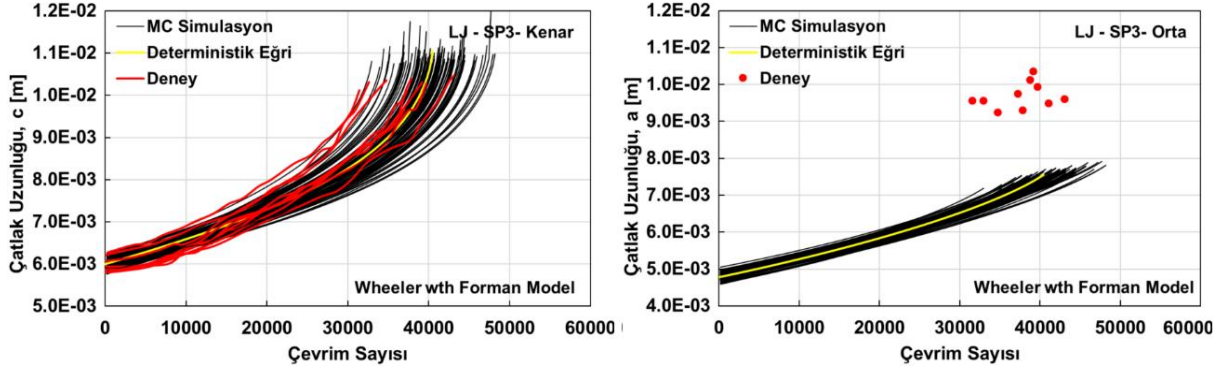
Şekil 3.6.123. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



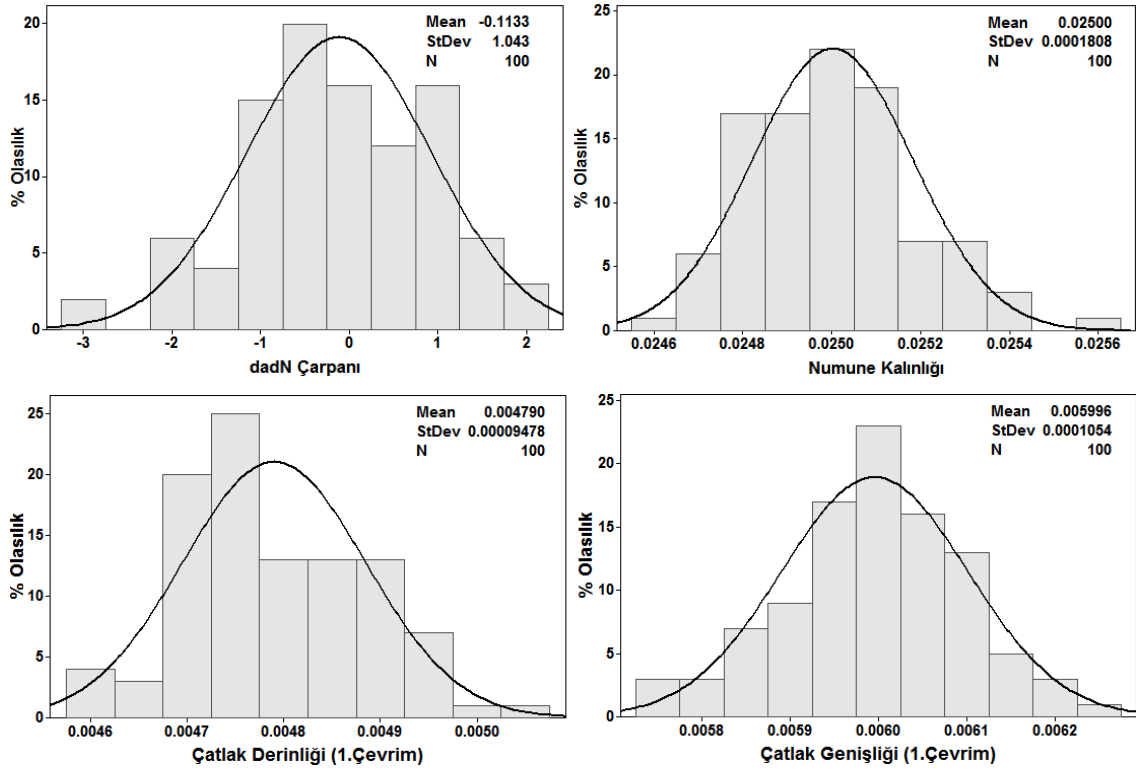
Şekil 3.6.124. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



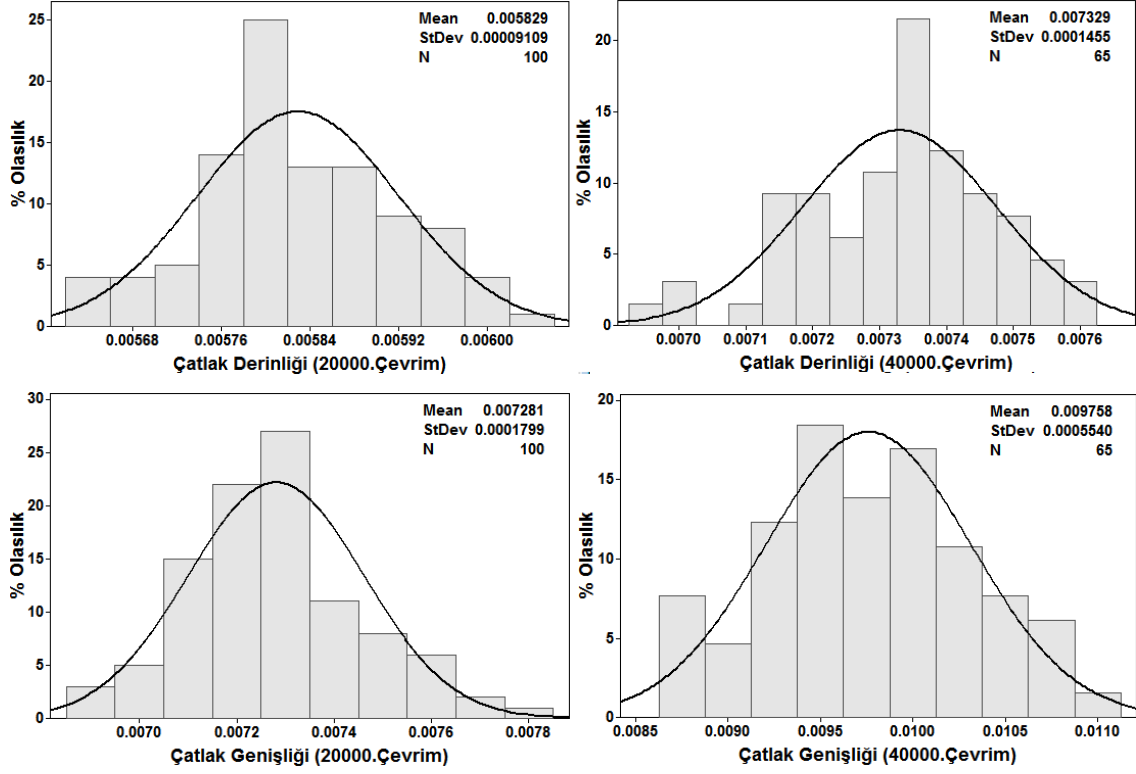
Şekil 3.6.125. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Walker C-n değerleri ile Wheeler modeli)



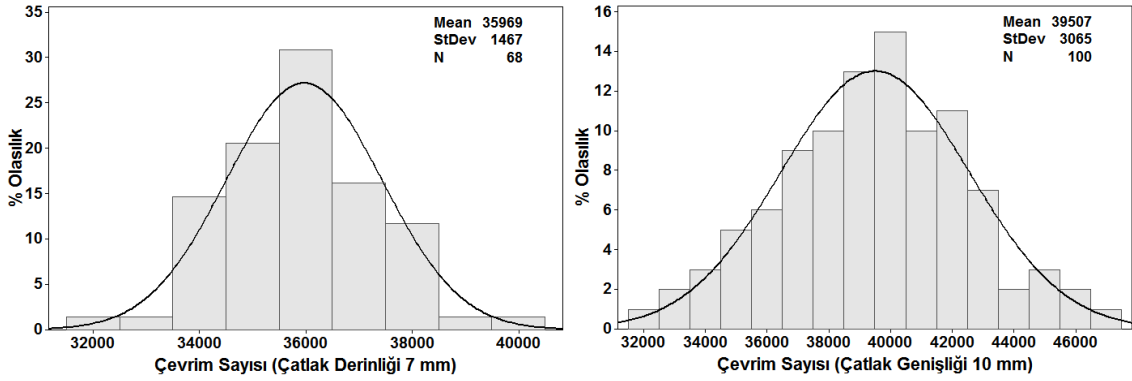
Şekil 3.6.126. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)



Şekil 3.6.127. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

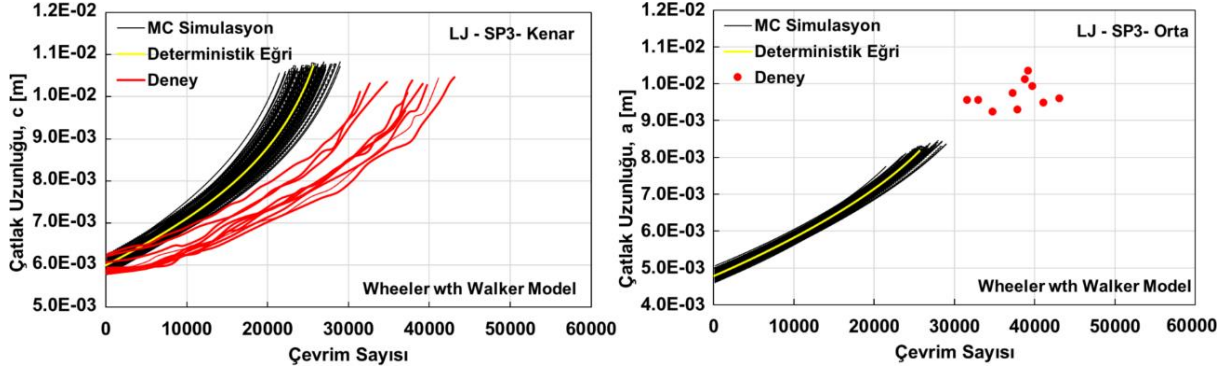


Şekil 3.6.128. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

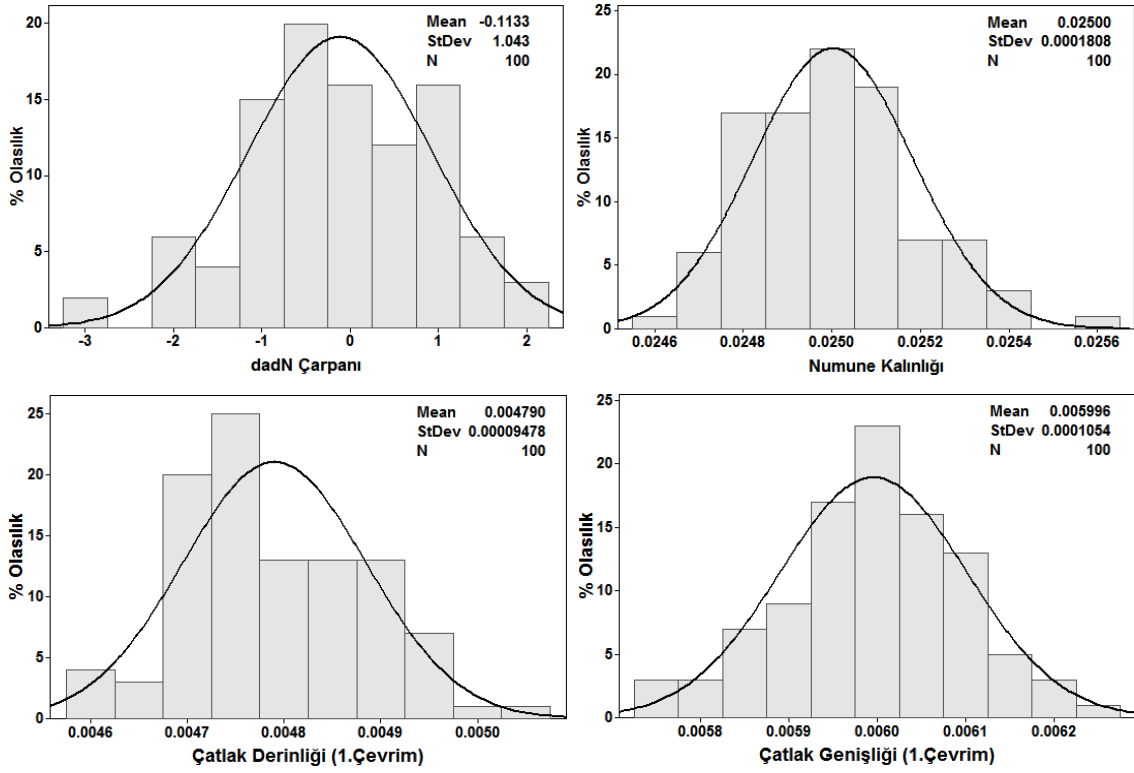


Şekil 3.6.129. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Forman modeli)

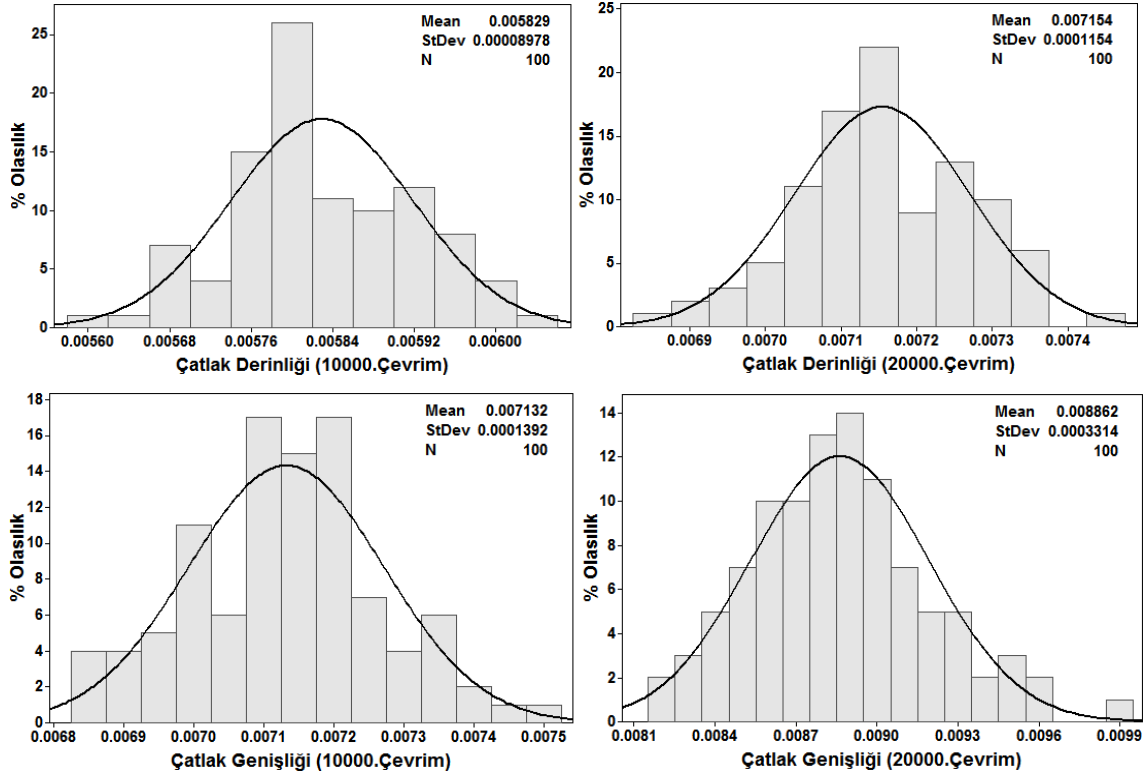




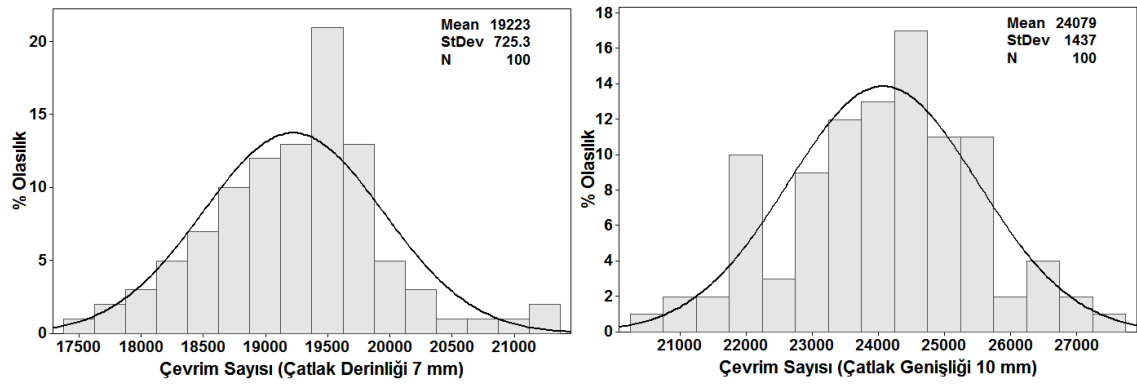
Şekil 3.6.130. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



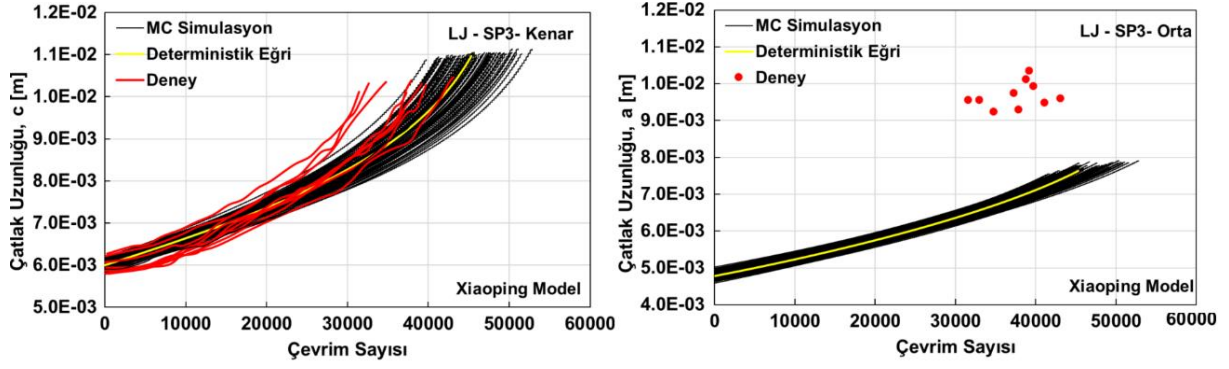
Şekil 3.6.131. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



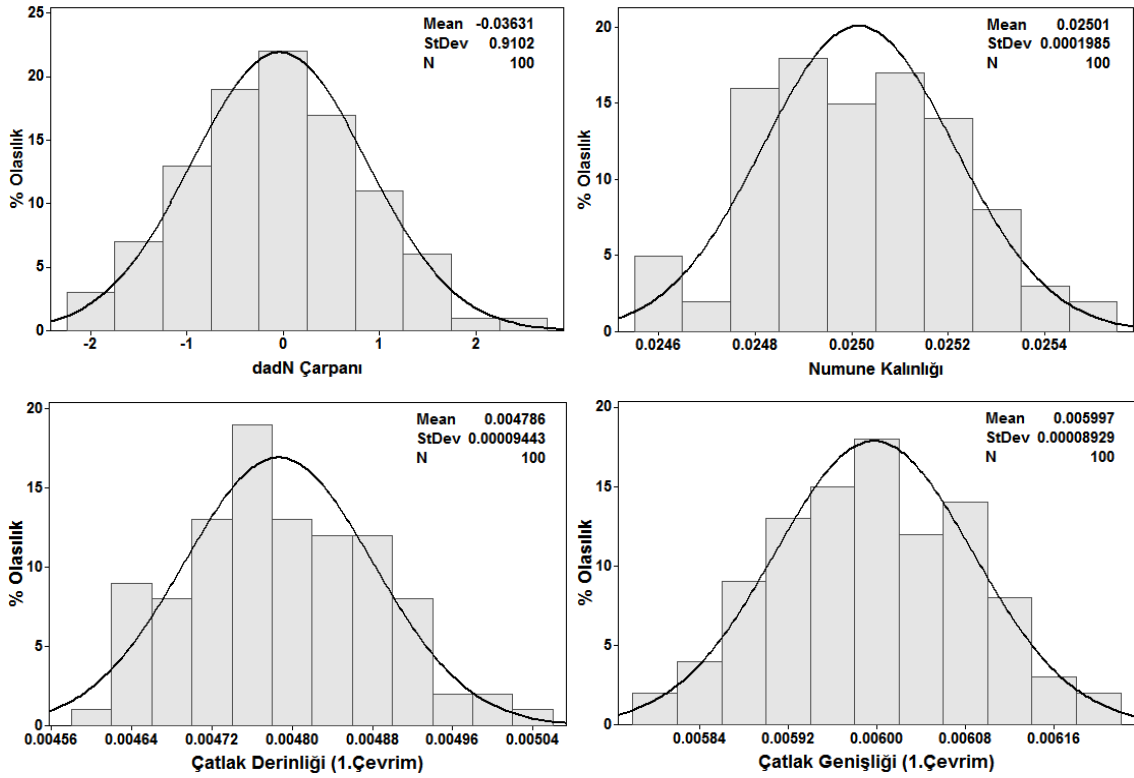
Şekil 3.6.132. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



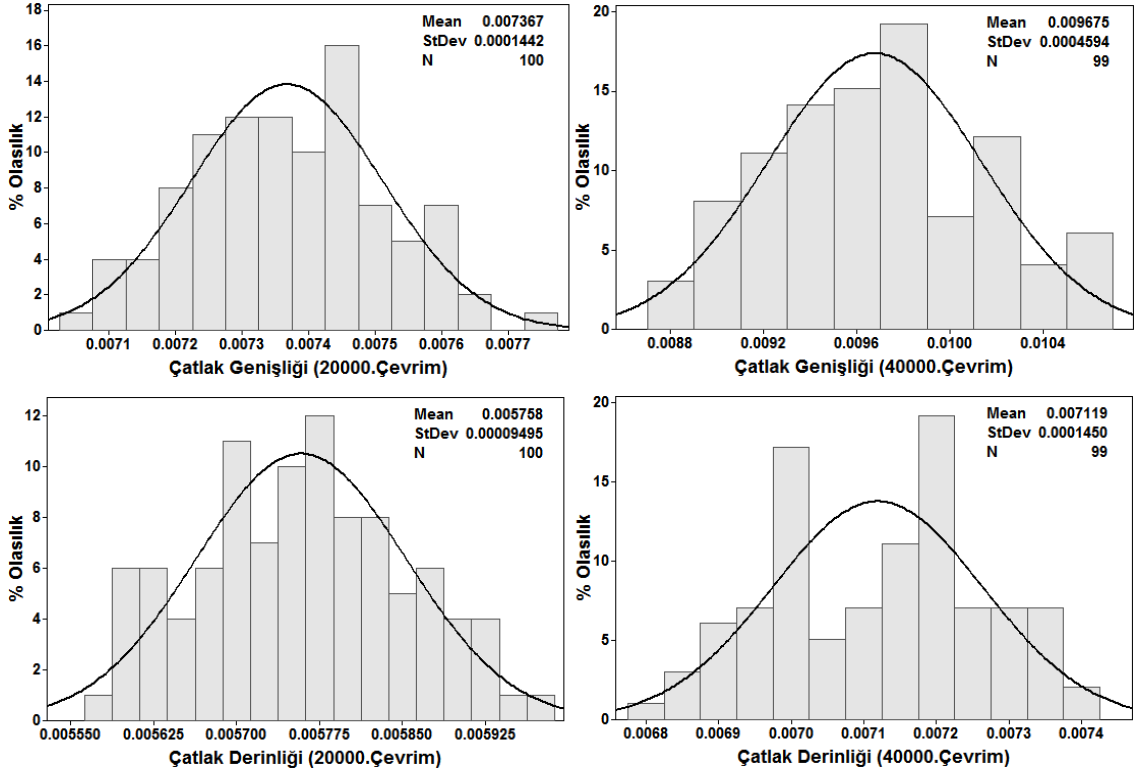
Şekil 3.6.133. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Wheeler modeli ve Walker modeli)



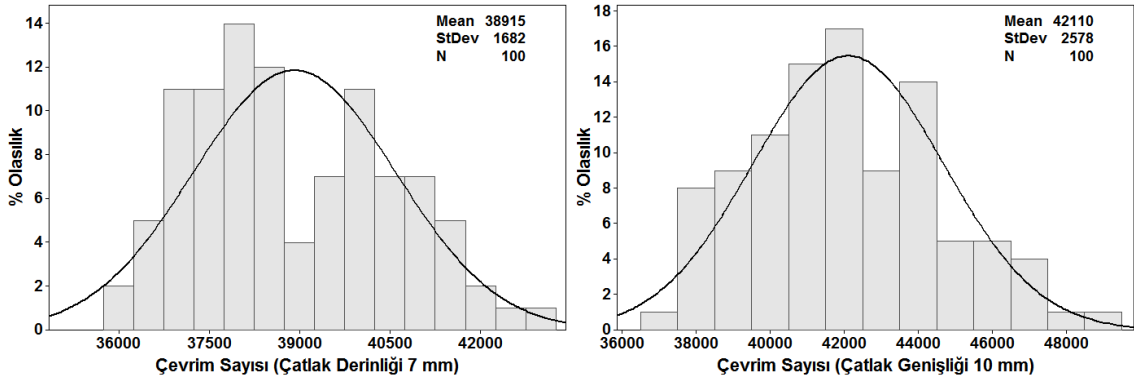
Şekil 3.6.134. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



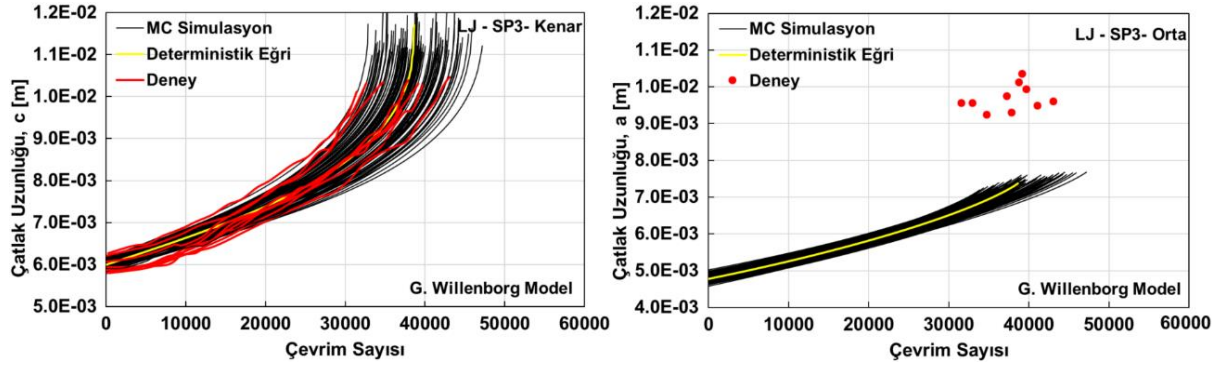
Şekil 3.6.135. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



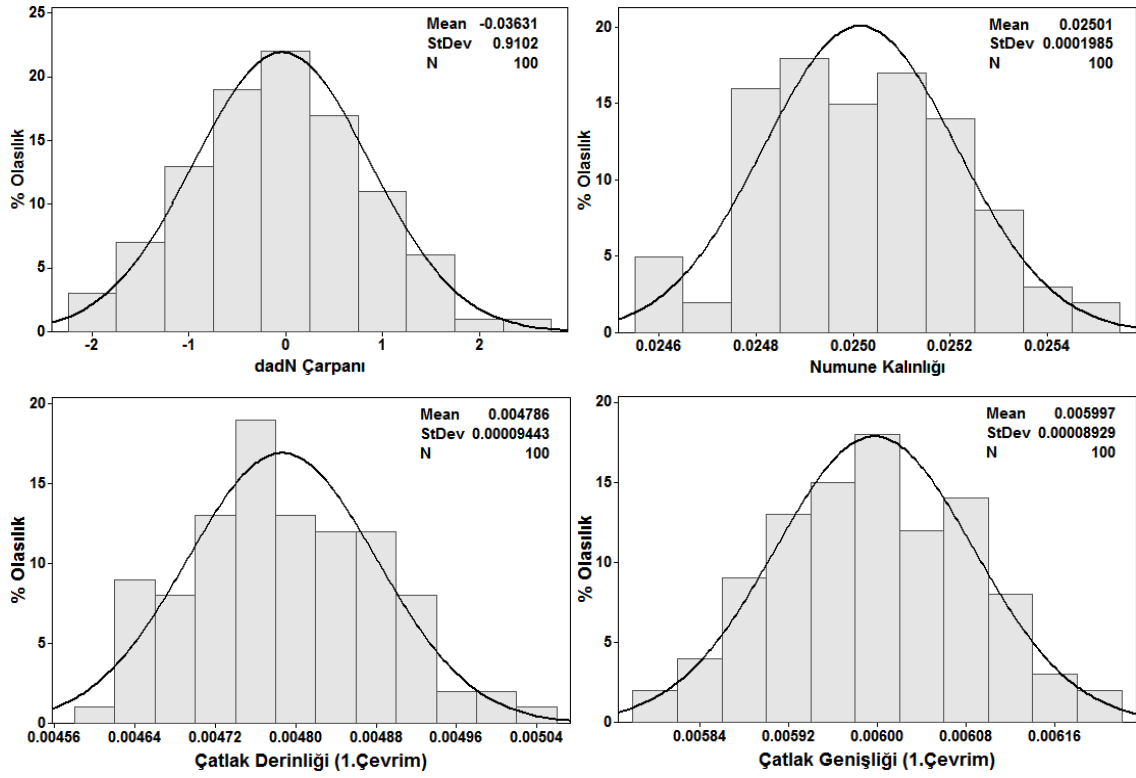
Şekil 3.6.136. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



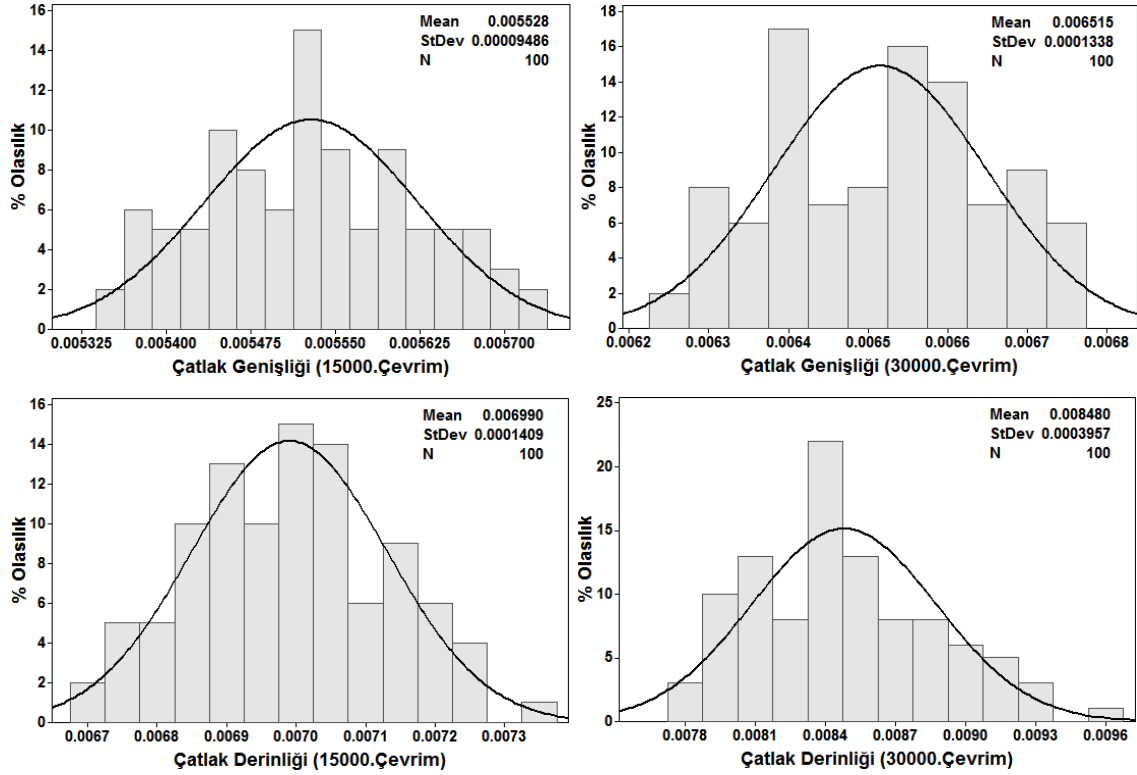
Şekil 3.6.137. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Xiaoping modeli)



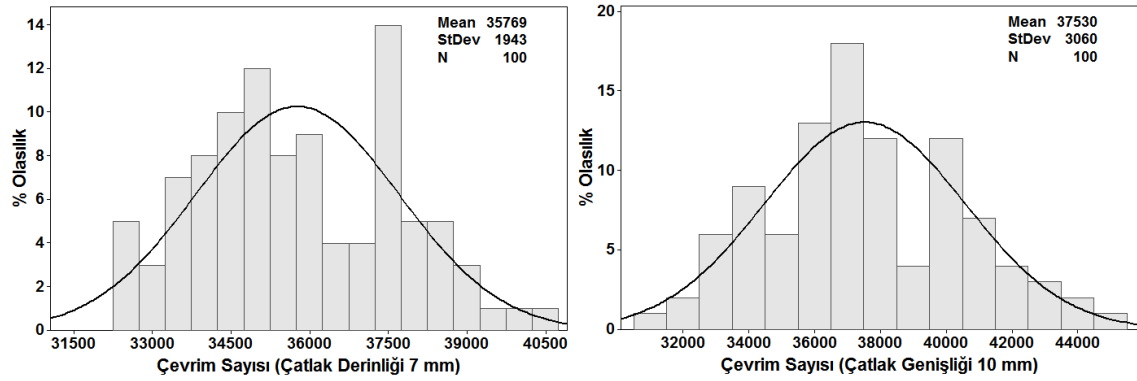
Şekil 3.6.138. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



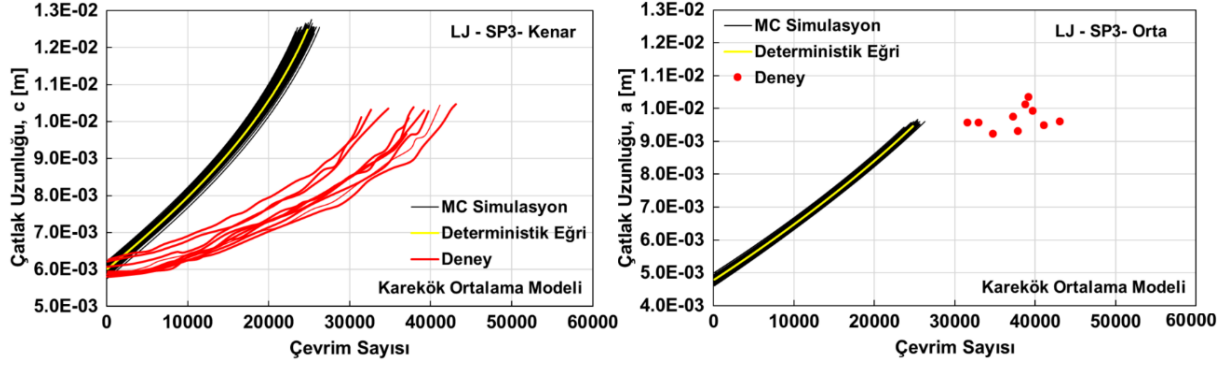
Şekil 3.6.139. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



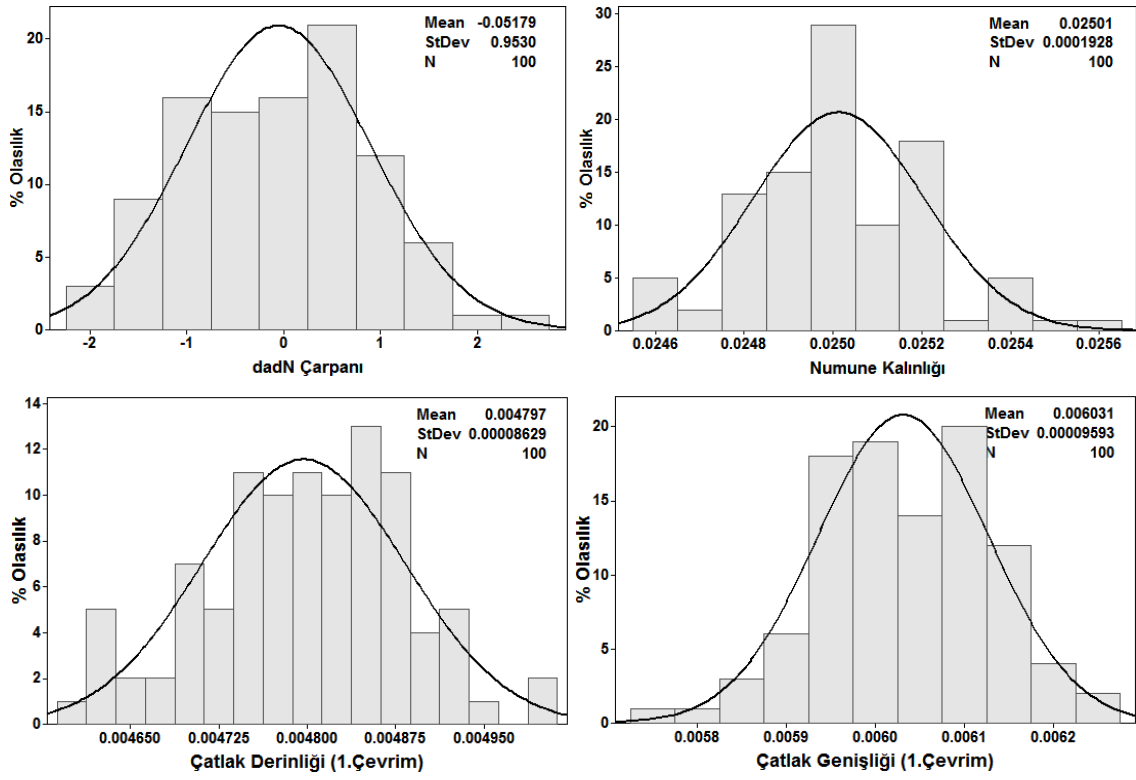
Şekil 3.6.140. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



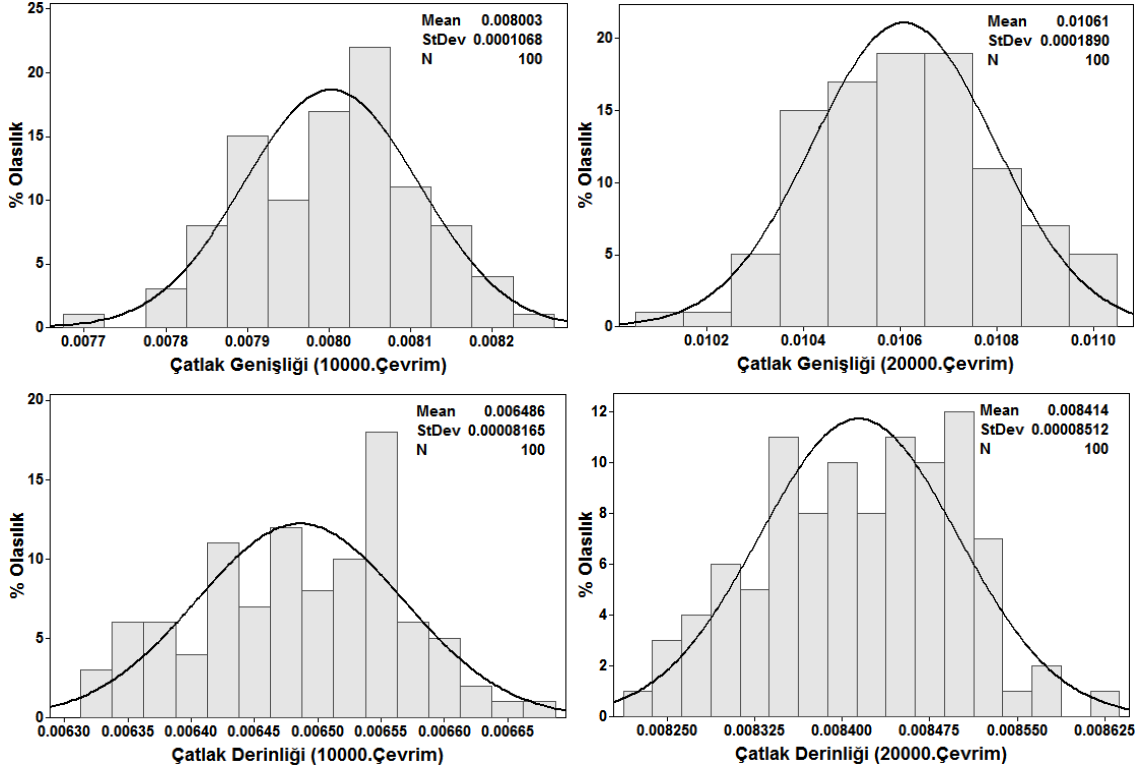
Şekil 3.6.141 Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Genelleştirilmiş Willenborg modeli)



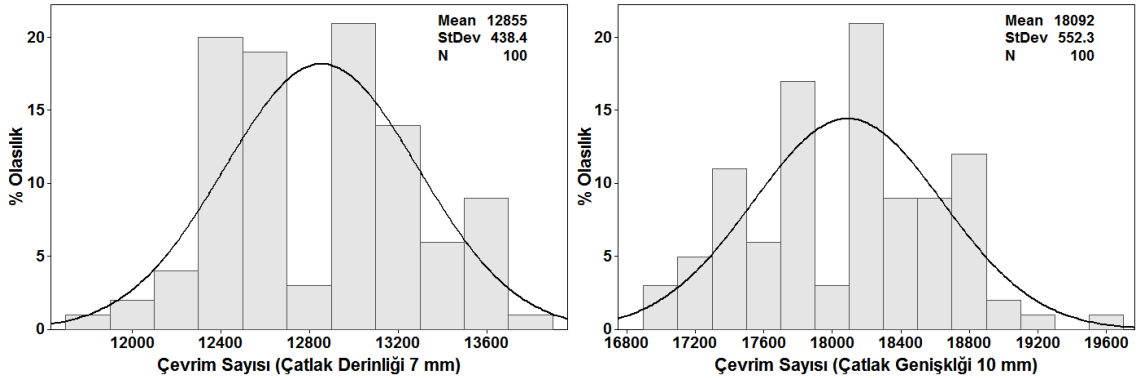
Şekil 3.6.142. Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür eğrileri ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



Şekil 3.6.143. Çatlak ilerleme ömür analizlerinde kullanılan girdilerin olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



Şekil 3.6.144. Belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen çatlak uzunluklarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)



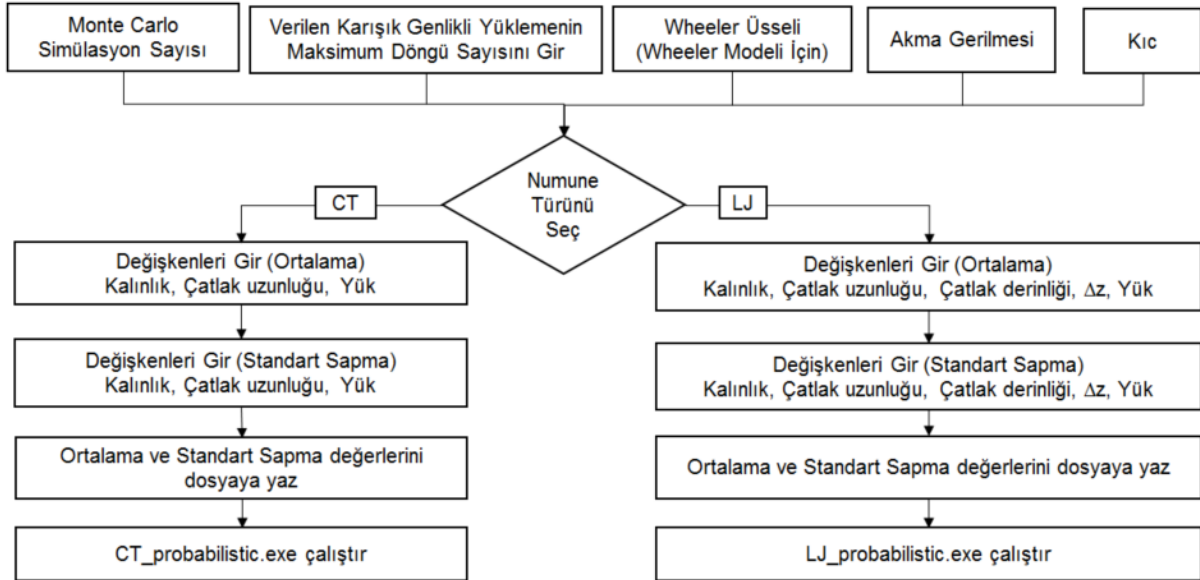
Şekil 3.6.145. Belirli bir çatlak uzunluğuna karşılık gelen çevrim sayılarının olasılık dağılımları (LJ numunesi, SP3 spektrum yükü, Karekök Ortalama modeli)

Yukarıda verilen detaylı grafiklerden görüldüğü üzere, SP3 yük profili için gerçekleştirilen olasılık temelli çatlak ilerleme simülasyonlarında Wheeler ve Forman modelinin beraber kullanılmasıyla elde edilen çatlak ilerleme ömür tahmin eğrilerinin, SP1 ve SP2 spektrum yük durumunda olduğu gibi, deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar verdiği teyit edilmiştir. Ayrıca, SP1 ve SP2 spektrumlarında da olduğu gibi, Xiaoping ve Genelleştirilmiş Willenborg modellerinin de üç-boyutlu mod-I çatlak ilerleme deneysel eğrilerine yakın tahminler verdiği görülmüştür.



### 3.7 FCPAS – Aşama 3 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Güncellenmesi

Bu kısımda, Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) arayüzüne yeni eklenen “Probabilistic FCG” modülü tanıtılmaktadır. Bu modül olasılık temelli çatlak ilerleme ömrünü tahmin etmek için geliştirilmiş olan FORTRAN programı için gerekli değişkenlerin başlangıç değerlerinin kullanıcı tarafından kolaylıkla tanımlanmasını sağlamaktadır. Bahsi geçen FORTRAN programında, proje kapsamında gerçekleştirilen deneylerde çatlak ilerleme ömrünü etkileyen parametrelerin değişkenlik/dağılımları göz önüne alınarak Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirilmekte ve analiz çıktısı olarak çatlak ilerleme ömür eğrilerindeki değişimler hesaplanabilmektedir. Program algoritmasının akış şeması ve ile ilgili detaylar Kısım 3.6’da verilmiştir.



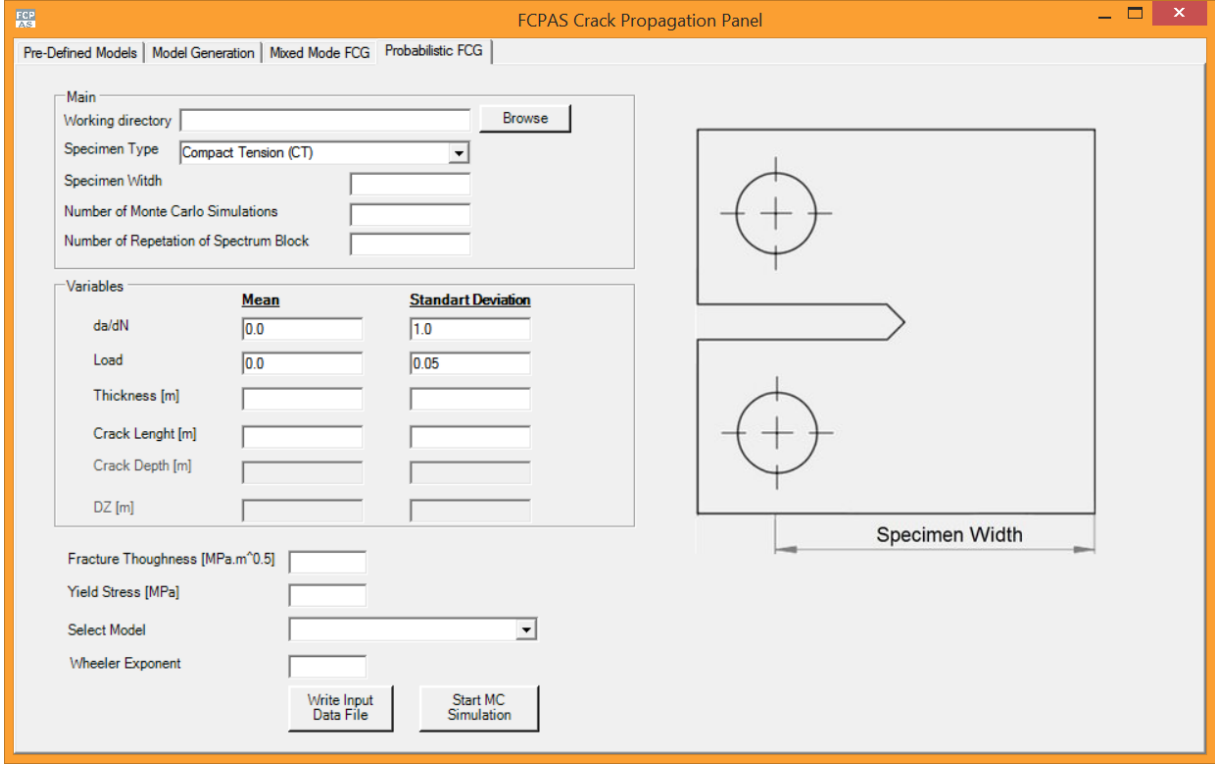
Şekil 3.7.1. FCPAS arayüzü “Probabilistic FCG” modülü işlem adımları

Şekil 3.7.1’de görüldüğü üzere Monte Carlo simülasyon sayısı, yük spektrumunun simülasyonda değerlendirileceği maksimum döngü sayısı, akma gerilmesi ve kırılma tokluğu değerleri numune türüne bağlı değildir.

İki boyutlu (CT) ve üç boyutlu (LJ) numuneler için olasılık temelli çatlak ilerleme ömür tahminleri için gerilme şiddet faktörü hesabında kullanılan denklem ve numunedeki geometrik değişkenlikler birbirinden farklı olduğundan dolayı hazırlanan alt programlar ve isterleri de farklıdır. Şekil 3.7.1.’de görüldüğü gibi numune türüne göre iş akışı iki kola ayrılmaktadır.

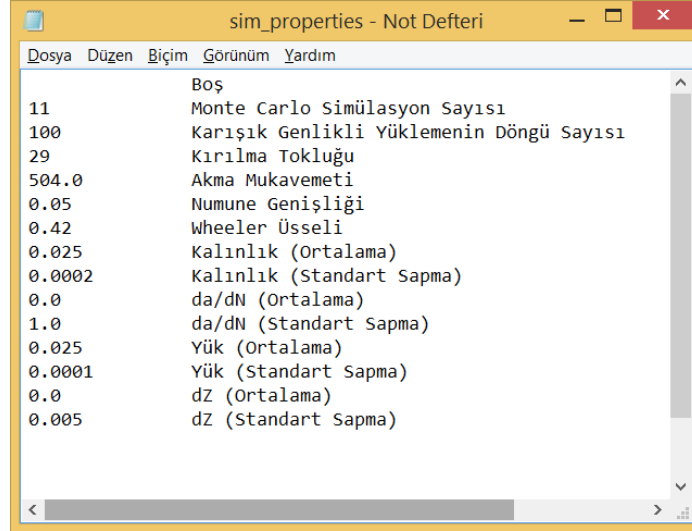
Şekil 3.7.2.’de görülen, proje kapsamında geliştirilen ara yüzün ekran alıntısında çalışma dizini belirlendikten sonra ilk olarak kullanıcının numune türünü belirlemesi istenmektedir. Ekrandaki

gri renkli yazı bölümlerinden anlaşılacağı gibi, seçilen numune türüne bağlı olarak kullanılmayacak değişkenlerin ekran giriş kısımları pasif hale getirilmektedir. Ayrıca bu aşamada yapılan numune seçimi, Monte Carlo simülasyonlarını gerçekleştirecek olan alt programın seçimini de sağlamaktadır.



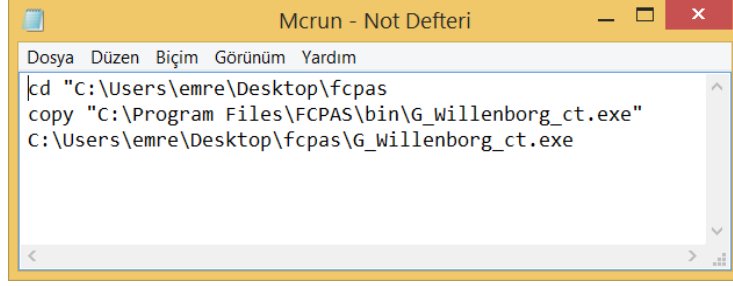
Şekil 3.7.2. “Probabilistic FCG” modülü ara yüzü

Şekil 3.7.2’de verilen ara yüzden görüldüğü üzere, problemi etkileyen değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri, malzemenin akma gerilmesi, kırılma tokluğu değerleri girildikten sonra hesaplama yapılacak model seçilmelidir. Seçilen model Wheeler yaklaşımını kullanan bir model ise Wheeler modelinde gerekli olan üs değeri de girilmelidir.



Şekil 3.7.3. “sim\_properties.txt” dosyası

“Write input Data File” butonuna basıldığında, “sim\_properties.txt” adlı ve analiz programının girdileri okuyacağı metin dosyası ile kendisi ile arka planda simülasyon programının çalıştırılacağı “Mcrun.bat” isimli bir toplu iş dosyası oluşturulmaktadır. “sim\_properties.txt” dosyası içerisinde, Monte Carlo simülasyon sayısı, karışık genlikli yüklemenin döngü sayısı, kırılma tokluğu, akma gerilmesi, numune genişliği, wheeler üsseli, ortalama kalınlık, kalınlık standart sapması, ortalama da/dN, da/dN standart sapması, ortalama yük, yük standart sapması, ortalama  $\Delta Z$  ve  $\Delta z$  standart sapması değerleri sırasıyla yazılmaktadır. Belirtilen bu değişkenler ve değerleri LJ numunesi içindir. CT numunesinde de “sim\_properties.txt” dosyası sıralaması değişmemekte, kullanılmayan satır boş bırakılmaktadır. Alt program içerisinde “sim\_properties.txt” dosyası okunurken boş satırların etkisi olmamaktadır. Şekil 3.7.4’te görüldüğü üzere, arka planda çalışan toplu iş dosyası komutları ile, çalışma klasörüne gidilmekte, Monte Carlo simülasyon programı dosyası FCPAS/bin klasöründen ilgili çalışma dizinine kopyalanmakta ve daha sonra çalıştırılmaktadır. “Start MC Simulation” butonu “Mcrun.bat” adlı toplu iş paketi dosyasını çalıştırmaktadır. Şekil 3.7.4 “Mcrun.bat” toplu iş paketi dosyasını göstermektedir.



```
cd "C:\Users\emre\Desktop\fcpas
copy "C:\Program Files\FCPAS\bin\G_willenborg_ct.exe"
C:\Users\emre\Desktop\fcpas\G_willenborg_ct.exe
```

Şekil 3.7.4. “Mcrun.bat” toplu iş paketi dosyası

“Start MC Simülasyon” butonu ile “Mcrun.bat” adlı toplu iş dosyası çalıştırıldığında, her defasında ilgili parametre dağılımlarından rastgele değer seçimleri yapılarak, programa girilen girdi parametrelerinin ortalama ve standart sapma değerleri ile analiz döngü sayısı vb. parametrelerin değerlerine göre girilen MC Simülasyon sayısı kadar çatlak ilerleme analizi otomatik olarak gerçekleştirilmekte ve ilgili sonuç dosyaları üretilmektedir. Daha sonra bu dosyalar, Excel veya başka bir grafik programında kullanılarak çatlak ilerleme ömür eğrileri grafikler halinde çizdirilebilmektedir.

## 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

1921 yılında Griffith'in çatlak içeren cam tüpler ile yaptığı deneylerden elde etmiş olduğu sonuçları, C. E. Inglis tarafından 1913 yılında geliştirilen delik ve çatlak içeren yapılardaki gerilmelerin matematiksel çözümü ile karşılaştırdığında, malzemenin dayanabileceği maksimum yük veya nominal gerilmenin çatlak uzunluğuna bağlı olduğu sonucunu çıkarmasıyla başlamış olan Kırılma Mekaniği Bilimi, İkinci Dünya Savaşının olduğu 1940'lı yıllara kadar dikkat çekmemiştir. 1940'lı yıllarda birçok kargo ve tanker gemisinin gövdelerinden kırılmaları ile Griffith tarafından yapılan çalışma anlaşılmaya başlanmış ve kırılma analizleri Makine, Havacılık ve Uzay ve Malzeme Mühendisliği gibi birçok farklı mühendislik disiplini için ilgili ürünün tasarım aşaması ve saha performans yönetimi çalışmalarında oldukça yoğun bir şekilde kullanılabilir hale gelmiştir. Adı geçen mühendislik alanları içerisinde Kırılma Mekaniğinin en fazla kullanıldığı alan Havacılık ve Uzay teknolojileridir. Örneğin, Havacılık ve Uzay alanında dünyada en ileri düzey kurum olan NASA'nın web sayfasındaki teknik dokümanlar veri tabanında "kırılma" ("fracture") kelimesi yazılarak doküman araması yapıldığında, binlerce doküman ile karşılaşmakta ve bunlar içerisinde ciddi sayıdaki dokümanın ise son yıllarda yapıldığı görülmektedir. Bu da, Kırılma Mekaniği'nin ileri düzey teknolojik alanlarda halen oldukça aktif olarak kullanılan bir bilim alanı olduğunu göstermektedir.

Gelişmiş modelleme ve analiz yöntemleri gerektiren üç-boyutlu çatlak ilerleme simülasyonlarının gerçekleştirildiği ve olasılık temelli modelleme ve deneysel yöntemlerin kapsamlı olarak geliştirildiği bu proje ile Kırılma Mekaniği alanında bilgi ve teknoloji birikimine katkıda bulunulması ve lisansüstü derecelerine sahip uzmanlaşmış araştırmacı yetiştirilmesi hedeflenmiştir. Aşağıdaki alt bölümlerde, bu proje çalışmaları ile elde edilen sonuçlar ve kazanımlar özetlenmekte ve bu 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 2 projesinde geliştirilen karışık mod çatlak ilerleme ve kırılma analiz kabiliyetlerinin enerji, havacılık ve savunma alanlarında veya literatürde bulunan pratik ve karmaşık geometri içeren problemlere uygulanarak doğrulanması, olasılık temelli iki-boyutlu kırılma mekaniği çalışmaları, olasılık temelli üç-boyutlu kırılma mekaniği çalışmaları ve FCPAS ara yüzünün olasılık temelli analiz programını içerecek şekilde güncellenmesidir. Aşağıda, belirtilen her bir ana grup için elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir.

##### 4.1.1 Karışık Mod Kırılma ve Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi

Bu ana iş paketi kapsamında, proje önergesinde üç adet uygulama ve doğrulamalarının yapılması planlanmış olmakla beraber, saha ziyaretleri ve literatür araştırmalarından bulunan ve doğru şekilde tanım ve modellenmesinin yapılabilmesi için gerekli geometri, yük bilgisi ve malzeme özelliklerini içeren toplam altı adet problem üzerinde üç-boyutlu çatlak ilerleme analizleri yapılmıştır. Bu analizlerden biri, saha ziyaretlerinden elde edilen ve bir motor parçası üzerinde gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizi olmuştur. Diğer beş analiz ise literatür araştırmalarından elde edilen bilgiler ile birebir modellenerek analiz edilmiş ve elde edilen yorulma çatlak ilerleme ömürlerinin ve çatlak ilerleme yüzeylerinin literatür verilerine oldukça yakın bir şekilde tahmin edildiği ispat edilmiştir.

Ayrıca, bu iş paketi için proje önergesine göre yeterli sayıda uygulama bulunamaması ihtimaline karşı önergede dâhil edilen risk planlaması da projenin erken döneminde devreye alınmış ve bu kapsamda literatürde çözümleri bulunmayan, üniform çekme ve eğilme yükleri altında bulunan yüzlerce eğik ve dönmüş yarı-eliptik yüzey çatlağı için kırılma analizleri yapılmış ve oldukça geniş bir gerilme şiddet faktörü (GŞF) çözüm kütüphanesi oluşturulmuştur. Elde edilen çözümler kullanılarak çok değişkenli regresyon yöntemi ile problemi tanımlayan parametreler olan çatlak şekil oranı ( $a/c$ ), çatlak derinlik oranı ( $a/t$ ) ve eğiklik/dönme açısı ( $\beta$  veya  $\alpha$ ) değişkenlerinin fonksiyonları olarak empirik denklemler geliştirilmiştir. Böylece, pratikte görülebilen ve eğik/dönmüş yüzey çatlağı içeren birçok problemin, uygun sınır ve geometrik şartlar altında indirgenebileceği levhada karışık mod yüzey çatlağı problemi için ilgili değişkenlerin sürekli fonksiyonu olarak çözümler elde edilmiştir.

#### **4.1.2 Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanikçi Çalışmaları**

Projenin temel hedefi, olasılık temelli üç-boyutlu mod-I yorulma çatlak ilerleme problemlerini analiz ederek, çatlak ilerleme ömürlerindeki değişimleri doğru seviyelerde tahmin edebilmektir. Ancak, standart testler ve sonlu eleman yöntemi kullanılarak bunun doğru bir şekilde yapılabilmesi için, önce iki-boyutlu modellemeler ve deneysel çalışmalardan elde edilmesi gereken kırılma tokluğu ve yorulma çatlak ilerlemesi gibi standart malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bir başka deyişle, aşağıdaki ana iş paketinde bulunan, oldukça detaylı ve zaman alıcı üç-boyutlu modelleme ve deneysel çalışmalar yapılmadan önce, bu çalışmalarda kullanılacak olan malzemelerin standart özelliklerinin karakterize edilmesi gerekmektedir. Projenin ana amacı yorulma çatlak ilerleme ömürlerindeki değişkenliği doğru şekilde belirlemektir. Bu bağlamda, diğer parametrelerin yanında bu değişkenliğe ciddi oranda etki edecek olan bir parametre de çatlak ilerleme oranları açısından malzeme özelliklerindeki sağılımlar olacağına göre, bu kategoride değişik yük türleri altında ve her biri için ciddi sayıda test yapılması gerekmektedir. Bu amaçla, bu iş paketi kapsamında spektrum değişken genlikli yükleme durumları dâhil olmak üzere, hem değişik yük türleri altında bireysel testler yapılarak literatürde bulunan birçok aşırı yükleme modeli ile karşılaştırmalar yapılmış ve model iyileştirmesi önerilmiş, hem de her bir yük durumu için bu deneylerden yaklaşık on adet yapılarak malzeme özelliklerindeki ve ilgili deneylerde görülen çatlak ilerleme ömürlerinin değişkenlik davranışları belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen malzeme özellikleri ve çatlak ilerleme model bilgileri, sonraki iş paketi olan olasılık temelli üç-boyutlu kırılma mekanikçi çalışmalarında kullanılmıştır.

#### **4.1.3 Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanikçi Çalışmaları**

Bu iş paketinde, yukarıdaki iş paketi çıktıları kullanılarak projenin temel amacı olan olasılık temelli üç-boyutlu çatlak ilerleme analizleri ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için, üç-boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile farklı geometriler üzerinde alternatif analizler yapılarak yarı eliptik çatlak içeren bir numune (değiştirilmiş LJ-numunesi) ve numunede çatlak başlatma prosedürü tasarlanmıştır. Bu prosedüre göre, elipsoit şekle sahip bir elektrot tasarlanarak, elektrik ark yöntemi (EDM) ile üç-boyutlu ön çentik oluşturulmuş, daha sonra kamera ile izlenerek ön yorulma testleri ile yarı-eliptik yüzey çatlağı içeren numune farklı yükleme şartları altında yapılacak olan deneylere hazır hale getirilmiştir. Adı geçen numunede, yorulma çatlak ilerlemesinin modellenmesi için, farklı şekil oranı ve çatlak derinliği/uzunluğu kombinasyonlarında birçok üç-boyutlu kırılma analizi yapılarak, uzunluk ve şekil oranı açısından numunede herhangi boyut değerlerinde bulunabilecek olan çatlak için gerilme şiddet faktörü transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Böylece, herhangi bir yük değerinde ve/veya

yükleme durumu profili için çatlak ilerleme simülasyonları yapılabilir hale gelmiştir. Girdi bilgileri olarak yorulma yük spektrumu, malzeme özellikleri ve problemi temsil eden GŞF transfer fonksiyonunu alan bağımsız bir çatlak ilerleme yazılımı da geliştirilmiştir. Bu yazılım, yapılan deneysel çalışmalar ve ilgili mukayeseler sonucu uygun görülen bir model aracılığı ile, yük spektrum profilinde aşırı yüklemekten dolayı oluşan çatlak ilerleme gecikmesinin modellenmesini de kapsamaktadır. Geliştirilen yazılıma, Monte Carlo olasılık temelli analiz ilkeleri kapsamında, çatlak ilerleme analizlerini istenen sayıda ve her defasında problemi etkileyen parametrelerin girdi değişkenlik dağılımlarından rastgele değer çekilebilecek ve bu değerler ile GŞF transfer fonksiyonunun tekrar değerlendirilerek çatlak ilerleme miktarı tekrar hesaplanabilecek şekilde ve böylece analiz sonucunda çatlak ilerleme eğrilerindeki değişkenliklerin belirlenebileceği analiz kabiliyeti de eklenmiştir. Böylece, projenin ana amacı olan olasılık temelli yorulma çatlak ilerleme simülasyon analiz kabiliyeti geliştirilmiştir. Ayrıca, her bir yükleme durumu için laboratuvarında gerçekleştirilen yaklaşık on adet iki- ve üç-boyutlu çatlak ilerleme testlerinin de birebir modellenmesi yapılmış, iyileştirilmiş model geliştirilmiş ve modellerin deneysel sonuçlar ile kalibrasyonu ve ilave bağımsız deneyler ile doğrulamaları yapılmıştır.

#### **4.1.4 FCPAS – Aşama 3 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Güncellenmesi**

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 kapsamında geliştirilen olasılık temelli yorulma çatlak ilerleme analiz programını da içerecek şekilde güncellenmiştir. Böylece, olasılık temelli çatlak ilerleme analizlerinin kullanıcı tarafından daha kolay ve tutarlı bir şekilde yapılabilmesi hedeflenmiştir.

## **4.2 Projede Kullanılan Özgün Yöntem ve Yaklaşımlar**

Proje çalışmalarında kullanılan özgün yöntem ve yaklaşımlar aşağıda özet olarak verilmektedir.

Olasılık temelli çatlak ilerleme ömür tahminleri için gerekli olan çatlak ilerlemesi ile ilişkili malzeme özellikleri değişkenlikleri sabit genlik altında gerçekleştirilen deneylerle belirlenmiştir. Karışık genlik altında iki boyutlu çatlak ilerlemesi için CT numunesi üzerinde iki farklı spektrum ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan modeller kullanılarak çatlak ilerleme ömür tahminleri yapılmıştır. Karışık genlikli yüklemeye altında deneysel sonuçların ve aynı deneyler



için simülasyon sonuçlarının bir arada verildiği çalışma literatürde oldukça azdır. Modelleme çalışmalarında genellikle literatürde sıklıkla kullanılan bazı spektrumlardan elde edilmiş hazır deney sonuçları kullanılmaktadır.

Wheeler modeli uygulaması basit ve pratik bir model olmasına rağmen değişken genlikli yük altında çatlak ilerleme davranışını tahmin etmek için Paris-Erdoğan denklemini kullanmaktadır. Bu denklemde, yükleme profilindeki gerilme oranları hesaba katılmamaktadır. Gerilme oranı denklemde yer almadığı için karışık genlik altında Wheeler modelinin kullanımı ile elde edilen sonuçlar fiziksel olarak uygun olmamaktadır. Literatürde Wheeler modeline yapılan bazı modifikasyonlarla bu eksiklik giderilmeye çalışılmıştır. Projemizde Wheeler modeli ile ilgili 4 farklı çalışma yapılmıştır. Tüm bu çalışmalardaki ortak amaç farklı gerilme oranlarında hesaplama kabiliyetinin Wheeler modeli ile birleştirilmesidir. Bunlardan birincisi Wheeler modelinde kullanılan Paris Erdoğan katsayılarının Walker prosedüründen elde edilen ortak  $da/dN$  eğrisini temsil eden C ve n katsayıları ile değiştirilmesidir. Bu durumda farklı gerilme oranlarındaki deneyler Walker prosedürü ile bir egride birleştirilmiş ve çatlak ilerleme katsayıları elde edilmiştir. Daha sonra bu katsayılar doğrudan doğruya Wheeler modelinde kullanılmıştır. İkinci olarak ise benzer bir yaklaşımla Forman katsayılarının Wheeler denkleminde doğrudan doğruya kullanılmasıdır. Üçüncü ve dördüncü olarak Forman veya Walker denklemi Wheeler çatlak ilerleme davranışı ile birleştirilerek çatlak ilerleme ömrü tahmin edilmiştir. Bu yaklaşımlar literatürde doğrudan doğruya görülmemiş olup özgün çözüm önerileridir. Ayrıca, karışık genlikli yükleme altında iki-boyutlu çatlak ilerleme problemleri için, yükleme profilindeki aşırı yük noktalarının yüzdesel olarak ağırlığını temsil eden ve çatlak ilerleme denklemlerinde gerilme şiddet faktörüne bir çarpan olarak katılan Spektrum Aşırı Yükleme (SOL) İndeksi kavramı geliştirilmiş, değişik profiller içeren yüklemelere uygulanarak sağlamaları yapılmıştır. Yük profilleri arasındaki ilişkiyi tanımlamayı amaçlayan çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar daha çok profillerin sırası ve her bir profilin bir sonraki profille ilişkisini açıklamaya çalışmaktadır. Gerilme şiddet faktörünün spektruma bağlı bir katsayı ile çarpılması ve ömür hesabında kullanılması şeklinde bir yaklaşıma daha önce rastlanmamıştır.

Düzlem gerilme durumunun numune yüzeyinde baskın olması dolayısıyla plastik bölgeye bağlı olarak çatlak ilerlemesinin yavaşlaması yüzeyde daha fazla olmaktadır. Bu nedenle numune orta kısmında çatlak ilerleme yavaşlama etkisi olmadığı kabul edilmiştir. Karışık genlikli çatlak ilerleme deneylerinde çatlağın iç kısımda ilerlemesi (crack tunneling) de bu kabulü desteklemektedir.

Standart CT numunesi ile iki boyutlu çatlak ilerleme ömür tahminleri yapıldıktan sonra üç boyutlu çatlak ilerlemesi için bir numune (LJ numunesi) tasarlanmıştır. Bu numune üzerinde gerilme şiddet faktörlerinin hesaplanabileceği bir transfer fonksiyonu elde edilmiştir. İki boyutlu çatlak ilerlemesi için kullanılan çatlak ilerleme ömür hesapları üç boyutlu numune için de yapılmıştır. Olasılığa dayalı ömür tahmini için Monte Carlo simülasyon yöntemini kullanan bir Fortran kodu hazırlanmış ve elde edilen analiz sonuçları deneysel çatlak ilerleme eğrileri ve ilgili ömürler ile doğrulanmıştır.

### **4.3 Proje Önergesinde Öngörülen Hedef ve Başarı Ölçütlerinin Değerlendirilmesi**

Proje önergesinde, ana iş paketleri için belirlenen hedefler, ilgili başarı ölçütleri ve proje çalışmaları sonucunda gerçekleşen başarı ölçütü seviyeleri detaylarıyla aşağıda verilmektedir.

#### **4.3.1 Karışık Mod Kırılma ve Yorulma Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç-Boyutlu Modellenmesi**

Proje Önergesindeki İş Paketi Hedefi: Tahmin edilen çatlak ilerleme ömürlerinin referans problemler ile azami %30, hesaplanan gerilme şiddet faktörlerinin ise temel/referans problemler ile azami %5 fark ile uyuşmasıdır.

Proje Önergesindeki İş Paketi Başarı Ölçütü ve Proje Başarısındaki Önemi (% oran): Ömür Tahmini Farkı: Azami %30, Gerilme Ş. Faktörü Farkı: Azami %5. Proje Başarısına Katkısı: % 15.

Değerlendirme: Proje kapsamında yapılan karışık mod çatlak ilerleme analizlerinden görüldüğü üzere çatlak ilerleme ömür tahminleri ilgili referans verileri ile yukarıda belirtilen değerlerden çok daha iyi oranlarda tahmin edilmiştir. İş paketi kapsamında, önergede üç adet olarak planlanan analizler toplam altı adet problemin birebir modellenmesi ile tamamlanmıştır. Ayrıca bu iş paketindeki çatlak ilerleme analizlerinin yapılamamasına karşın B planı olarak planlanan karışık mod kırılma analizleri de, toplam 480 adet karışık mod kırılma analizi olarak dört farklı problem için tamamlanmış, geniş bir GŞF çözüm kütüphanesi oluşturulmuş ve ilgili çözümler için empirik formüller geliştirilmiştir. Karışık mod çatlak ilerleme analizlerini gerçekleştiren doktora bursiyer öğrencisinin zaman açısından müsait olmasına istinaden, bu çalışmaların devamı niteliğinde olması gereken, doğrusal olmayan malzeme davranışı gösteren malzemelerin karışık mod kırılma analizleri için gerekli olan modlarına ayrıştırılmış üç-boyutlu enerji salıverme oranı hesaplanması için geliştirilen temel kabiliyetler de detaylarıyla iş paketi kapsamında bu raporda sunulmuştur. Özet olarak; iş paketi proje

önergesinde öngörülen hedef ve başarı ölçütlerinin çok daha üzerinde başarı oranları ile tamamlanmıştır.

#### **4.3.2 Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanığı Çalışmaları**

Proje Önergesindeki İş Paketi Hedefi: 3. iş paketinde kullanılacak olan çatlak ilerleme malzeme özelliklerindeki istatistiksel değişim özelliklerinin belirlenmesi ve değişken genlikli yük altında çatlak ilerleme hızındaki değişikliklerin literatürde bulunan modeller ile karşılaştırılması.

Proje Önergesindeki İş Paketi Başarı Ölçütü ve Proje Başarısındaki Önemi (% oran): Malzeme Özellikleri: Yükleme Oranı (R) başına minimum 10 test, değişken genlik yük durumu başına minimum 5 test. Proje Başarısına Katkısı: % 25.

Değerlendirme: Proje önergesinde, iki- ve üç-boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme deneyleri için toplam 150 test planlanmasına karşın, hem daha fazla veri elde etmek, hem de kullanılan Al-7075 malzemesinin haddelenme özelliğinden dolayı ortaya çıkarılan bazı gözlemlerin araştırılması sonucu yapılan ek deneyler ile toplam 209 adet test gerçekleştirilmiştir. Değişken genlikli yük altında (aşırı yüklemeleri içeren spektrum yüklemesi) gözlemlenen çatlak ilerleme verileri, literatürde bulunan modeller ile karşılaştırılmış, ilgili değerlendirmeler yapılmış ve iyileştirilmiş bir model de önerilmiştir. Böylece, iş paketi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

#### **4.3.3 Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanığı Çalışmaları**

Proje Önergesindeki İş Paketi Hedefi: Olasılık temelli kırılma mekanığı yöntem ve prosedürlerini oluşturmak ve doğrulamak.

Proje Önergesindeki İş Paketi Başarı Ölçütü ve Proje Başarısındaki Önemi (% oran): Deneysel olarak elde edilen çatlak ilerleme ömrünün, geliştirilecek olasılık temelli model ile tahmin edilen ömür aralığının içerisinde olması. Proje Başarısına Katkısı: % 50.

Değerlendirme: Bu raporda tüm detaylarıyla açıklandığı üzere, hem iki-boyutlu hem de üç-boyutlu olasılık temelli yorulma çatlak ilerleme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli analiz yöntemi geliştirilmiş ve içeriğinde bulunan tüm deneysel ve analiz adımlarının detayları sunulmuştur. Verilen bir yükleme profili için yapılan çoğul deneyler sonucu elde edilen çatlak ilerleme eğrilerinin, geliştirilen yöntem ile yapılan olasılık temelli çatlak ilerleme simülasyonları sonucu tahmin edilen çatlak ilerleme eğrilerinin içerisinde olduğu, birçok farklı durum için ispat

edilmiştir. Böylece, bu iş paketi için de öngörülen hedef ve ilgili ölçüt başarılı bir şekilde karşılanmıştır.

#### **4.3.4 FCPAS – Aşama 3 Ara Yüzü (Graphical User Interface – GUI) Güncellenmesi**

Proje Önergesindeki İş Paketi Hedefi: 1, 2 ve 3 numaralı iş paketlerinde yapılan çalışmalara uygun şekilde kullanıcı arayüzünün güncellenmesi.

Proje Önergesindeki İş Paketi Başarı Ölçütü ve Proje Başarısındaki Önemi (% oran): Grafik Kullanıcı Arayüzünün başarılı bir şekilde güncellenmesi. Proje Başarısına Katkısı: % 10.

Değerlendirme: 1. İş paketi kapsamında yapılan karışık mod yorulma çatlak ilerleme analizleri ve kırılma analizleri için kullanıcı ara yüzünde herhangi bir değişiklik yapılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. 2. ve 3. iş paketleri olan olasılık temelli iki- ve üç-boyutlu çatlak ilerleme çalışmaları kapsamında geliştirilen bağımsız analiz programı ayrı bir sekme ile kullanıcı ara yüzüne entegre edilmiş olup, bu iş paketi de başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

#### **4.4. Gelecekte Yapılabilecek Bilimsel Çalışmalar**

Mevcut halde 3. Aşaması (2018-2020) tamamlanan projelerin, Aşama 1 (2008-2011) ve Aşama 2 (2013-2016) safhalarında mod-I ve karışık mod 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 geliştirilmiş, gerçekleştirilen birçok sağlama uygulaması ile çatlak ilerleme ömür ve profillerinin doğru bir şekilde tahmin edildiği ispat edilmiştir. Bu rapor ile tüm detaylarının sunulduğu ve 2. Aşama projenin sonuç raporunda, gelecekte yapılabilecek çalışmalar arasında belirtilen olasılık temelli kırılma ve çatlak ilerleme analiz ve deneysel yöntemlerin araştırılması ve geliştirilmesi gerçekleştirilmiş ve farklı yükler altındaki farklı problemler için çatlak ilerleme eğrilerindeki değişkenlikler elde edilmiş bulunmaktadır. Bu kapsamda, izlenmesi gereken temel adımlar olan, sonlu eleman analizleri, transfer fonksiyonu geliştirilmesi, Monte Carlo yöntemi ile olasılık temelli yorulma çatlak ilerleme simülasyonları ve ilgili deneysel çalışmalar ile ilgili tüm detaylar bu raporda dâhil edilmiştir. Aşamalar halinde planlanan bu projeler sonucunda, doğrusal elastik kırılma sınırları içerisinde kalan üç-boyutlu kırılma ve yorulma çatlak ilerleme problemleri, olasılık temelli değişkenler de dâhil edilerek mod-I ve karışık mod yükler altında analiz edilebilir ve ilgili ömür

tahminleri yapılabilir konumuna ulaşılmıştır. Benzer çalışmaların milli olarak diğer araştırmacılar tarafından da yapılabilmesi ve daha ileriye götürebilmeleri için, gerçekleştirilen ilgili tüm adımlar kısaltmaya gidilmeden tüm detaylarıyla ilgili proje raporlarında dâhil edilmiştir. Mevcut kabiliyetleri de değerlendirerek, bu aşamadan sonra aşağıdaki ilintili alanlarda gelecek çalışmaların yapılabileceği düşünülmektedir.

Karışık Mod Yük Altında Üç-Boyutlu Elastik-Plastik Kırılma ve Çatlak İlerleme Problemleri için Analiz ve Deneysel Kabiliyetlerin Geliştirilmesi: Bu aşamaya kadar geliştirilen kabiliyetler, gerilme şiddet faktörünü (GŞF) temel almakta olup, doğrusal elastik kırılma ve yorulma çatlak ilerleme problemleri için direkt olarak kullanılabilen, bu projede olduğu gibi verimli şekilde analiz yöntemleri geliştirilebilmekte ve oldukça doğru sonuçlar vermektedir. Ancak, bazı mühendislik uygulamalarında, malzeme özelliklerine ve sıcaklık gibi parçanın çalışma ortam şartlarına bağlı olarak, malzeme davranışı doğrusal elastik sınırların dışına çıkabilmektedir. Bu durumda, bu proje dâhil olmak üzere şimdiye kadar kullanılmakta olan GŞF yaklaşımı geçerliliğini yitirmekte olup, ilgili problemin tüm detayları doğru şekilde modellenerek, kırılma modlarına ayrılmış şekilde birim şekil değişim oranı enerjisi salıverme oranlarının ve çatlak ucu açılma/kayma yer değiştirme veya açılarının doğru şekilde hesaplanarak ilgili birebir kırılma deneyleri ile bütünleşik şekilde kırılma kriterlerinin de geliştirilmesi gerekmektedir. Rapor da detayları ile açıklandığı üzere, son aylarda bu çalışma doktora tezi olarak başlatılmıştır.

Yüksek Sıcaklık Şartları Altında Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Kabiliyetlerinin Geliştirilmesi: Yukarıda belirtilen, doğrusal olmayan malzeme davranışı içeren kırılma problemlerinin modelleme ve deneysel olarak araştırılması ve ilgili kriterlerin oluşturulmasını takiben, oksidasyon vb. faktörlerin de etkin hale geleceği yüksek sıcaklık altında kırılma ve çatlak ilerleme problemlerinin, önce mod-I yükler altında, daha sonra karışık mod yükler altında deneysel ve sayısal analizlerinin yapılması planlanabilir. Bu proje kapsamında geliştirilmiş olan, yüksek sıcaklıktaki malzeme özellikleri başta olmak üzere, probleme etki eden parametrelerin değişkenliğini de dâhil ederek, olasılık temelli ve yüksek sıcaklık ortamında mod-I ve karışık mod yükleme içeren problemler için gerekli kabiliyetlerin geliştirilebilmesi istenen bir ilerleme olacaktır.

Teşhis (Diyagnoz) ve Kestirimli (Prognoz) Makine Sağlık Yönetim Sistemi: Doğrusal olmayan malzeme davranışları ve yüksek sıcaklık ortamındaki kırılma ve çatlak ilerleme tahminleri dâhil olmak üzere yukarıda belirtilen kabiliyetler geliştirildikten sonra, özellikle enerji üretimi ve havacılıkta kullanılan gaz türbini bazlı motorlarda veya zorlu şartlar altında çalışan diğer makinelerde emniyet açısından kritik ve/veya pahalı parçaların, tasarım aşamalarında ömür tahminleri, servis ve çalışma döneminde ise parçaların sahadaki ömür ve performanslarını

kestirmek ve yönetmek için olasılık temelli yaklaşımların da entegre edildiği, öncesinde laboratuvar deneyleri ile, ilerleyen aşamalarında ise saha verileri ile doğrulanmış bir Teşhis ve Kestirim Esaslı Makine Sağlık Yönetim Sistemi (Diagnostic and Prognostic Machine Health Management System) geliştirilmesi planlanabilir. Elbette, böyle bir sistemin geliştirilmesi için, yukarıda belirtildiği üzere birçok farklı kabiliyetin bir araya getirilmesi ve geliştirilmesi için ciddi zaman ve gayret gerekecektir. Ancak, yukarıda belirtilen makinelerin, günümüzde güncel ve teknolojik olarak rekabet edebilir şekilde tasarlanıp saha performanslarının da rekabetçi ve emniyetli şekilde yönetilebilmesi için bu geliştirmeler gereklidir.

## 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, Konferans Bildirileri, Sunum ve Seminerler, Tezler ve geliştirilen yazılımlar alt grupları ile aşağıda verilmektedir. Proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan gelecekte yapılması tamamlanması planlanan yayın ve tezlerin konu başlıkları da belirtilmiştir.

### 5.1 Uluslararası Dergi Yayınları – SCI Kapsamında

Ayhan, A. O., Yaren, M. F., 2019 " Effects of microstructural through-thickness non-uniformity and crack size on fatigue crack propagation and fracture of rolled Al-7075 alloy", Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures, 43 (9), 2071-2084.

Değişken genlikli yük altında çatlak ilerleme modellerinin değerlendirilmesi ve iyileştirilmiş model geliştirilmesi (Kırılma Mekaniği alanında yayın yapan bir dergiye gönderilmesi planlanmaktadır).

Olasılık temelli iki- ve üç-boyutlu yorulma çatlak ilerleme analizleri için yöntem geliştirilmesi ve doğrulamalar (Kırılma Mekaniği alanında yayın yapan bir dergiye gönderilmesi planlanmaktadır).

Karışık mod yorulma yükü altında çatlak ilerleme simülasyonları (yayınlanmamış olan, raporda sunulan ve literatür verileri karşılaştırmaları olan son iki uygulama uluslararası konferans ve dergi yayını olarak planlanmaktadır).

### 5.2 Uluslararası Konferans Bildirileri

Yaren, M.F., Ayhan, A. O., " Variation in Crack Growth Properties and Its Effect on Fatigue Crack Growth Life for Al 7075-T6", 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 2018, Alanya, TÜRKİYE, 1313-1320.

Kurt, E., Demir, O., Ayhan, A. O., "Applications on Three-Dimensional Mixed Mode Fatigue Crack Propagation Using Fracture and Crack Propagation Analysis System (FCPAS)", 1st International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials (IWPDF), 2019, Ankara, TÜRKİYE, 21-30.

Yaren, M. F., Ayhan, A. O., İriç, S., "Evaluation of Different Crack Growth Retardation Models Under Single Overloads Using Al-7075 Material", 1st International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials (IWPDF), 2019, Ankara, TÜRKİYE, 31-37.

Şahin, H., Ayhan, A. O., "Three-Dimensional Mixed Mode Stress Intensity Factors for Inclined Elliptical Surface Cracks in Plates under Uniform Tensile Load", 1st International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials (IWPDF), 2019, Ankara, TÜRKİYE, 38-45.

### **5.3 Sunum ve Seminerler**

Ayhan A.O., "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 3", Kurum ve Saha Ziyaretleri – TUSAŞ (TAI), Eylül 2018, Ankara, TÜRKİYE.

Ayhan A.O., "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 3", Kurum ve Saha Ziyaretleri - ASELSAN, Şubat 2019, Ankara, TÜRKİYE.

Ayhan A.O., "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi – Aşama 3", Kurum ve Saha Ziyaretleri – TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. (TEI), Mart 2019, Eskişehir, TÜRKİYE.

### **5.4 Tezler**

Şahin H., "Yayıllı Yük Altında Bulunan Levhalardaki Eliptik Karışık Mod Yüzey Çatlaklarının FCPAS ile Kırılma Analizleri", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2020.

Yaren, M. F., "Development And Application Of Probabilistic Fracture Mechanics Concepts Using FCPAS", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2021 (planlanan tez savunma tarihi).



Kurt, E. “ Karışık Mod Yük Altında Bulunan Elastik-Plastik Malzemelerin Üç Boyutlu Kırılma ve Yorulma Davranışları İçin Yöntem ve İlgili Kriterlerin Geliştirilmesi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2022 veya 2023 (planlanan tez savunma tarihi).

## **5.5 Geliştirilen Yazılımlar**

Proje kapsamında yapılan olasılık temelli yorulma çatlak ilerleme çalışmaları çerçevesinde iki-boyutlu CT numunesinde ve üç boyutlu LJ numunesinde mod-I yük altında, sırasıyla, düz ve yüzey çatlaklarının analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için, Monte Carlo temelli simülasyon programları geliştirilmiştir. Bu programlardan, Forman Modeli ve Wheeler Modelini entegre şekilde kullanan programların kaynak kodları 6. Bölüm’de ekler olarak verilmiştir.

Ayrıca, bu programların FCPAS ara yüzüne entegrasyonu için de FCPAS ara yüz programı güncellenmiş olup, ilgili detaylar 3. Bölüm’de verilmiştir.

## 6. OLASILIK TEMELLİ YORULMA ÇATLAK İLERME ANALİZ PROGRAMLARI KAYNAK KODLARI (EK)

Olasılık temelli iki- ve üç-boyutlu yorulma çatlak ilerleme analizleri için geliştirilen ve Forman ve Wheeler modellerini entegre şekilde içeren programların kaynak kodları aşağıdaki kısımlarda verilmektedir. Diğer modelleri içeren programların da kaynak kodları oldukça benzer olup, ortalama gerilme (R-ratio) ve çatlak ilerleme yavaşlama (crack retardation) modellerine göre kodun sadece ilgili kısımlarında farklılık göstermektedir.

Not: İlgili parametrelerin olasılık dağılımlarından, dağılımların tanımlayıcı değerlerine göre rastgele sayı üreten alt program modülleri, Richard Chandler ve Paul Northrop tarafından geliştirilmiş olan ve çevrimiçi olarak kullanıma açık olan aşağıda verilen adresten alınmış ve geliştirilen programlara uyarlanmıştır

(<https://www.ucl.ac.uk/~ucakarc/work/software/randgen.f>).

### 6.1 CT Numunesi için Olasılık Temelli Çatlak İlerleme Analiz Programı Kaynak Kodu (Forman Modeli ile Wheeler Modeli)

```
*****
***** CRACK PROPAGATION ANALYSIS PROGRAM*****
*****  AUTHORS: M.F.YAREN ve A.O.AYHAN  *****
*****
*****
***** RANDOM NUMBER GENERATOR
***** https://www.ucl.ac.uk/~ucakarc/work/software/randgen.f
*****  AUTHORS: Richard Chandler  *****
*****      (richard@stats.ucl.ac.uk)  *****
*****      Paul Northrop  *****
*****      (northrop@stats.ox.ac.uk)  *****
*****
BLOCK DATA ZBQLBD01
*
*   Initializes seed array etc. for random number generator.
*   The values below have themselves been generated using the
*   NAG generator.
*
COMMON /ZBQL0001/ ZBQLIX,B,C
DOUBLE PRECISION ZBQLIX(43),B,C
INTEGER I
INTEGER SEED
```

```

DATA (ZBQLIX(I),I=1,43) /8.001441D7,5.5321801D8,
+1.69570999D8,2.88589940D8,2.91581871D8,1.03842493D8,
+7.9952507D7,3.81202335D8,3.11575334D8,4.02878631D8,
+2.49757109D8,1.15192595D8,2.10629619D8,3.99952890D8,
+4.12280521D8,1.33873288D8,7.1345525D7,2.23467704D8,
+2.82934796D8,9.9756750D7,1.68564303D8,2.86817366D8,
+1.14310713D8,3.47045253D8,9.3762426D7 ,1.09670477D8,
+3.20029657D8,3.26369301D8,9.441177D6,3.53244738D8,
+2.44771580D8,1.59804337D8,2.07319904D8,3.37342907D8,
+3.75423178D8,7.0893571D7 ,4.26059785D8,3.95854390D8,
+2.0081010D7,5.9250059D7,1.62176640D8,3.20429173D8,
+2.63576576D8/
DATA B / 4.294967291D9 /
DATA C / 0.0D0 /

```

END

\*\*\*\*\*MAIN PROGRAM\*\*\*\*\*

```

program main
implicit double precision (a-h, o-z)
parameter (max_dim=1000000)
CHARACTER*80 JJUNK, File_Name, plot_file_name
CHARACTER*80 edge_plot_file_name
COMMON /ZBQL0001/ ZBQLIX,B,C
COMMON /TMP_VAR/ TMP_INIT
DOUBLE PRECISION ZBQLIX(43),B,C
INTEGER:: SEED
real(8), allocatable, dimension(:):: DeltaSIF, SIF
real(8), allocatable, dimension(:):: DeltaSIF_Edge, SIF_Edge
real(8), allocatable, dimension(:):: ASze, ASze_Edge
real(8), allocatable, dimension(:):: P_ZSze, a_plast
real(8), allocatable, dimension(:):: a_plast_edge, P_ZSze_Edge

dimension SPPI_LOAD(max_dim), SUM_LOAD(max_dim)
dimension SOL_index(2000)
SEED=1
ITER=0
ITER1=0
Sum_of_Max_Load=0.0
i_Percnt=0.0
Overload_Count=0.0
Num_of_Max_Load=0.0
SNum_of_overload=0.0
SOL_index=0.0

call zbqlini(seed)

OPEN (unit=21,file='Variables_Dist.txt',status='unknown')
write(21,*)"MC Sim, thk, ASze(1), RAND_NUM_dadN"
***** ***Reading variables from Sim_porproperties.txt*****
OPEN(11,FILE='Sim_properties.txt',STATUS='OLD',ERR=111)

```

```

GO TO 112
111 WRITE(*,*)'Sim_Properties File is not found !!!'
GO TO 600
112 continue

```

```

read(11,*)
read(11,*)Max_iter
read(11,*)Max_Block_Repeat
read(11,*)Fracture_Toughness
read(11,*)S_Yield
read(11,*)W
read(11,*)y
read(11,*)PAR_MU_Thk
read(11,*)PAR_SIG_Thk
read(11,*)PAR_MU_dadN
read(11,*)PAR_SIG_dadN
read(11,*)PAR_MU_Asze
read(11,*)PAR_SIG_Asze
read(11,*)PAR_MU_Load
read(11,*)PAR_SIG_Load

```

```

C print *,'Enter Number Monte Carlo Simulation Points:'
C read(*,*) Max_iter
C print *,'Enter Number for Repeations of Spectrum Load Blocks:'
C read(*,*) Max_Block_Repeat
C print *,'Enter Width of CT Specimen (Center of pin hole to back)'
C read(*,*) W
C print *,'Enter Wheeler exponent'
C read(*,*) y

```

```

y_edge=y

```

```

* *****Reading Load Spectrum*****
OPEN (unit=10,file='LoadSpec.txt')
Index=1
10 Read(10,*,end=11)SPPI_Load(index)
IF (SPPI_Load(index)>SPPI_Load(index-1)) THEN
Sum_of_Max_Load=Sum_of_Max_Load+SPPI_Load(index)
Num_of_Max_Load=Num_of_Max_Load+1
END IF
Index=Index+1
goto 10
11 continue
n_SPPI_Load=Index-1
CLOSE (10)

Spectrum_avg=Sum_of_Max_Load/(Num_of_Max_Load)
* *****SOL_index*****
Do Index2=1,n_SPPI_Load
IF (SPPI_Load(Index2)>Spectrum_avg) THEN
i_Percent=((SPPI_Load(Index2)-Spectrum_avg)/Spectrum_avg)*100

```

```

        Do index3=1,n_SPPI_Load
        IF (((SPPI_Load(index3)-Spectrum_avg)/Spectrum_avg)*100
&>= i_Percent) THEN
            SNum_of_overload=SNum_of_overload+1
            EndIF
        END DO

        IF (((SNum_of_overload/Num_of_Max_Load)*100)>=i_Percent)THEN
            SOL_index(index2)=i_Percent
        ENDIF

        SNum_of_overload=0.0
    ENDIF
End DO
SOL_index2=1+(maxval(SOL_index)/100)

```

```

IF (n_SPPI_Load<=0) THEN
print *,'Check the LoadSpec.txt file'
goto 600
END IF

```

C \*\*\*\*\*

```

allocate (DeltaSIF(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (DeltaSIF_Edge(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (SIF(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (SIF_Edge(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (ASze(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (ASze_Edge(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (P_ZSze(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (P_ZSze_Edge(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (a_plast(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (a_plast_Edge(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))

```

\* Input Distribution Parameters

```

C print *,' ...:Generating random values by distributions:... '
C print *,' Enter Mean Value for Distributions:'
C print *,' Thickness, dadN, CrackDepth'
C read(*,*) PAR_MU_Thk, PAR_MU_dadN, PAR_MU_Asze
C
C print *,' Enter Standat Deviation for Distributions:'
C print *,' Thickness, dadN, CrackDepth'
C read(*,*) PAR_SIG_Thk, PAR_SIG_dadN, PAR_SIG_Asze

```

\* PAR\_MU and PAR\_SIG are equals to Loc and Scale while  
\* calculating LogNormal Distrubition

\* Mean and Standart dev. of Load defines...

\* Their values (default) are taken Mean=XXX STD=XXX for Class 0.5.  
C PAR\_MU\_Load= 0.0

```

C   PAR_SIG_Load=0.005

C   Loop for Monte Carlo Sim.
Do ITER=1,max_iter
C   *****Open result file for every MC Point.*****
write(jjunk,*)iter
ncc=0
do mm=1,80
  if(jjunk(mm:mm).eq.' ') go to 4
  ncc=ncc+1
  jjunk(ncc:ncc)=jjunk(mm:mm)
4  end do

file_name=jjunk(1:ncc)//'.txt'
plot_file_name=jjunk(1:ncc)//'.plot_txt'
Edge_plot_file_name=jjunk(1:ncc)//'.edge_plot_txt'

OPEN(20,FILE=file_name,STATUS='UNKNOWN')
write(20,*)"MC Sim, I_block,I_SPPI,I_SPPI_GI,I_Cyc_GI,I_Cyc_Loc,
& dadN,ASze(I_SPPI_GI),SPPI_Load(I_SPPI),SIF(I_SPPI_GI),
&DeltaSIF(I_SPPI_GI),a_plast(I_SPPI_GI), P_ZSze(I_SPPI_GI), FI"

OPEN(22,FILE=plot_file_name,STATUS='UNKNOWN')
write(22,*)"MC Sim, I_block,I_SPPI,I_SPPI_GI,I_Cyc_GI,I_Cyc_Loc,
& dadN,ASze(I_SPPI_GI),SPPI_Load(I_SPPI),SIF(I_SPPI_GI),
&DeltaSIF(I_SPPI_GI),a_plast(I_SPPI_GI), P_ZSze(I_SPPI_GI), FI"

OPEN(23,FILE=edge_plot_file_name,STATUS='UNKNOWN')
write(23,*)"MC Sim, I_block,I_SPPI,I_SPPI_GI,I_Cyc_GI,I_Cyc_Loc,
& dadN,ASze(I_SPPI_GI),SPPI_Load(I_SPPI),SIF(I_SPPI_GI),
&DeltaSIF(I_SPPI_GI),a_plast(I_SPPI_GI), P_ZSze(I_SPPI_GI), FI"

C   *****
do i_zero=1,(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load)
  ASze(i_zero)=0
  ASze_Edge(i_zero)=0
  DeltaSIF(i_zero)=0
  DeltaSIF_Edge(i_zero)=0
  SIF(i_zero)=0
  SIF_Edge(i_zero)=0
  a_plast(i_zero)=0
  a_plast_Edge(i_zero)=0
  P_ZSze(i_zero)=0
  P_ZSze_Edge(i_zero)=0
  Sum_Load(i_zero)=0

end do

Valid_Plst_Z=0.0
Valid_Plst_Z_Edge=0.0

Do Load_index=1,(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load)
  RAND_NUM_Load=ZBQLNOR(PAR_MU_Load,PAR_SIG_Load)
C   Calculating of LOAD by adding Load Probabilty Distribution**

```

```

        Sum_Load(Load_index)=SPPI_LOAD(Load_index)
        &+(SPPI_LOAD(Load_index)*RAND_NUM_Load)
    end do
100    continue

        RAND_NUM_Thk=ZBQLNOR(PAR_MU_Thk,PAR_SIG_Thk)
        IF(RAND_NUM_Thk<(PAR_MU_Thk-3*PAR_SIG_Thk) .or.
&RAND_NUM_Thk>(PAR_MU_Thk+3*PAR_SIG_Thk)) THEN
            print *,'Thickness tekrar hesaplaniyor'
                goto 100
            END IF
            Thk=RAND_NUM_Thk

200    continue
        RAND_NUM_ASze=ZBQLNOR(PAR_MU_ASze,PAR_SIG_ASze)
        IF(RAND_NUM_ASze<(PAR_MU_ASze-3*PAR_SIG_ASze) .or.
& RAND_NUM_ASze>(PAR_MU_ASze+3*PAR_SIG_ASze)) THEN
            print *,'ASize tekrar hesaplaniyor'
                goto 200
            END IF
            ASze(1)=RAND_NUM_ASze
            ASze_Edge(1)=RAND_NUM_ASze

C*    Warning: da/dN distribution is Lognormal
300    continue
        RAND_NUM_dadN=ZBQLNOR(PAR_MU_dadN,PAR_SIG_dadN)
        IF(RAND_NUM_dadN<(-3.0) .or.
&RAND_NUM_dadN>(3.0)) THEN
            goto 300
        END IF

I_Cyc_GI=0

*****LOOP FOR A SPECIMEN*****
Do I_Block=1,Max_Block_Repeat

    I_Cyc_Loc=0
*****CALCULATE SIFs according to ASTM *****
    DO I_SPPI=1,n_SPPI_Load

        I_SPPI_GI=((I_Block-1)*n_SPPI_Load)+I_SPPI

        Ratio=Sum_Load(I_SPPI-1)/Sum_Load(I_SPPI)

        IF (I_SPPI.EQ.n_SPPI_Load)THEN
            ASze(I_SPPI_GI+1)=ASze(I_SPPI_GI)
            ASze_Edge(I_SPPI_GI+1)=ASze_Edge(I_SPPI_GI)

            dadN_retarded=0
            dadN_retarded_Edge=0

```

```

SIF(I_SPPI_GI)=SIF(I_SPPI_GI-1)
SIF_Edge(I_SPPI_GI)=SIF_Edge(I_SPPI_GI-1)

DeltaSIF(I_SPPI_GI)=DeltaSIF(I_SPPI_GI-1)
DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI)=DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI-1)

a_plast(I_SPPI_GI)=a_plast(I_SPPI_GI-1)
a_plast_Edge(I_SPPI_GI)=a_plast_Edge(I_SPPI_GI-1)
goto 500
END IF

A1=((Sum_Load(I_SPPI)-Sum_Load(I_SPPI-1))/1000)/(Thk*SQRT(W))
A11=(Sum_Load(I_SPPI)/1000)/(Thk*SQRT(W))

A2=(2+(ASze(I_SPPI_GI)/W))/((1-(ASze(I_SPPI_GI)/W))**(1.5))
A2_Edge=(2+(ASze_Edge(I_SPPI_GI)/W))
&/((1-(ASze_Edge(I_SPPI_GI)/W))**(1.5))

A3=(0.886+(4.64*(ASze(I_SPPI_GI)/W))-
&(13.32*(ASze(I_SPPI_GI)/W)**2)
&+(14.72*(ASze(I_SPPI_GI)/W)**3))-(5.6*(ASze(I_SPPI_GI)/W)**4)

A3_Edge=(0.886+(4.64*(ASze_Edge(I_SPPI_GI)/W))-
&(13.32*(ASze_Edge(I_SPPI_GI)/W)**2)
&+(14.72*(ASze_Edge(I_SPPI_GI)/W)**3))
&-(5.6*(ASze_Edge(I_SPPI_GI)/W)**4)

IF (A1<=0)THEN
ASze(I_SPPI_GI+1)=ASze(I_SPPI_GI)
ASze_Edge(I_SPPI_GI+1)=ASze_Edge(I_SPPI_GI)

dadN_retarded=0
dadN_retarded_Edge=0

SIF(I_SPPI_GI)=A11*A2*A3
SIF_Edge(I_SPPI_GI)=A11*A2_Edge*A3_Edge

DeltaSIF(I_SPPI_GI)=A1*A2*A3
DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI)=A1*A2_Edge*A3_Edge

a_plast(I_SPPI_GI)=a_plast(I_SPPI_GI-1)
a_plast_Edge(I_SPPI_GI)=a_plast(I_SPPI_GI-1)

FI=0
FI_Edge=0
goto 500
END IF

IF (A11<=0)THEN
ASze(I_SPPI_GI+1)=ASze(I_SPPI_GI)
ASze_Edge(I_SPPI_GI+1)=ASze_Edge(I_SPPI_GI)
goto 500

```



END IF

SIF(I\_SPPI\_GI)=A11\*A2\*A3  
SIF\_Edge(I\_SPPI\_GI)=A11\*A2\_Edge\*A3\_Edge

DeltaSIF(I\_SPPI\_GI)=A1\*A2\*A3  
DeltaSIF\_Edge(I\_SPPI\_GI)=A1\*A2\_Edge\*A3\_Edge

\*\*\*\*\*da/dN WITHOUT RETARADTION\*\*\*\*\*

\* dadN\_avg\_mean is approximate solution obtained by EXCEL for

Log(dadN)=Log(DK)

dadN\_avg\_mean=2.533e-9\*((SOL\_index2\*DeltaSIF(I\_SPPI\_GI))\*\*3.051)/  
&(((1-Ratio)\*Fracture\_Toughness)-DeltaSIF(I\_SPPI\_GI))

dadN\_avg\_mean\_log=LOG10(dadN\_avg\_mean)

dadN\_avg\_mean\_edge=  
&2.533e-9\*((SOL\_index2\*DeltaSIF\_edge(I\_SPPI\_GI))\*\*3.051)/  
&(((1-Ratio)\*Fracture\_Toughness)-DeltaSIF\_edge(I\_SPPI\_GI))

dadN\_avg\_mean\_edge\_log=LOG10(dadN\_avg\_mean\_edge)

Double\_Lognor\_SCALE = 0.001

Double\_Lognor\_SCALE\_Edge = 0.001

Double\_Log\_dadN\_actual = dadN\_avg\_mean\_log +  
&((Double\_Lognor\_SCALE)\*RAND\_NUM\_dadN)

Double\_Log\_dadN\_actual\_Edge = dadN\_avg\_mean\_Edge\_log +  
&((Double\_Lognor\_SCALE\_Edge)\*RAND\_NUM\_dadN)

dadN\_actual=10\*\*(Double\_Log\_dadN\_actual)

dadN\_actual\_Edge=10\*\*(Double\_Log\_dadN\_actual\_Edge)

\*\*\*\*\*

I\_Cyc\_GI=I\_Cyc\_GI+1  
I\_Cyc\_Loc=I\_Cyc\_Loc+1

IF (SIF(I\_SPPI\_GI)>Fracture\_Toughness)THEN  
  print \*,'SIF is greater than Fracture Toughness'  
  goto 600  
END IF

\*\*\*\*\*WHEELER PLASTIC ZONE AND RETARDATION\*\*\*\*\*

C\* Plastic zone size calculation and compatision.

P\_ZSze(I\_SPPI\_GI)=(1/(3.1415926535\*4\*SQRT(2.0)))  
&\*(((SIF(I\_SPPI\_GI))/S\_Yield)\*\*2)

P\_ZSze\_Edge(I\_SPPI\_GI)=  
&(1/(3.1415926535))\*(((SIF\_Edge(I\_SPPI\_GI))/S\_Yield)\*\*2)

```
a_plast(I_SPPI_GI)=P_ZSze(I_SPPI_GI)+ASze(I_SPPI_GI)
```

```
a_plast_Edge(I_SPPI_GI)=  
&P_ZSze_Edge(I_SPPI_GI)+ASze_Edge(I_SPPI_GI)
```

\* Check for Retardation effect and calculate

```
IF (Valid_Plst_Z_Edge>(2*P_ZSze_Edge(I_Cyc_GI))) THEN  
  y_edge=1.5*y  
ELSE  
  y_edge=y  
End IF
```

```
IF (Valid_Plst_Z<a_plast(I_SPPI_GI)) THEN  
  Valid_Plst_Z=a_plast(I_SPPI_GI)  
  FI=1.0  
ELSE  
  FI=((P_ZSze(I_SPPI_GI)/(Valid_Plst_Z-ASze(I_SPPI_GI)))**y)  
End IF
```

```
IF (Valid_Plst_Z_Edge<a_plast_Edge(I_SPPI_GI)) THEN  
  Valid_Plst_Z_Edge=a_plast_Edge(I_SPPI_GI)  
  FI_Edge=1.0  
ELSE  
  FI_Edge=((P_ZSze_Edge(I_SPPI_GI)/  
&(Valid_Plst_Z_Edge-ASze_Edge(I_SPPI_GI)))**y_edge)  
End IF
```

\*\*\*\*\*LIFE CALCULATION\*\*\*\*\*

```
dadN_retarded=(dadN_actual)  
dadN_retarded_Edge=(FI_Edge*dadN_actual_Edge)  
ASze(I_SPPI_GI+1)=ASze(I_SPPI_GI)+dadN_retarded  
ASze_Edge(I_SPPI_GI+1)=ASze_Edge(I_SPPI_GI)+dadN_retarded_Edge  
*****
```

```
500 write(20,120) lter, l_block, l_SPPI, l_SPPI_GI, l_Cyc_GI,  
&l_Cyc_Loc,dadN_retarded, ASze(I_SPPI_GI),  
&Sum_Load(l_SPPI),SIF(l_SPPI_GI),  
&DeltaSIF(l_SPPI_GI), a_plast(I_SPPI_GI), P_ZSze(I_SPPI_GI), FI
```

```
IF (l_SPPI_GL.eq.1) THEN  
write(21,*) iter, Thk, ASze(1), RAND_NUM_dadN  
END IF
```

```
IF (l_Cyc_Loc.eq.l_Cyc_Loc/100*100) THEN  
  write(22,120) lter, l_block, l_SPPI, l_SPPI_GI, l_Cyc_GI,  
&l_Cyc_Loc,dadN_retarded, ASze(I_SPPI_GI),  
&Sum_Load(l_SPPI),SIF(l_SPPI_GI),  
&DeltaSIF(l_SPPI_GI), a_plast(I_SPPI_GI), P_ZSze(I_SPPI_GI), FI  
  write(23,120) lter, l_block, l_SPPI, l_SPPI_GI, l_Cyc_GI,  
&l_Cyc_Loc,dadN_retarded_Edge, ASze_Edge(I_SPPI_GI),  
&Sum_Load(l_SPPI),SIF_Edge(I_SPPI_GI), DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI),  
&a_plast_Edge(I_SPPI_GI), P_ZSze_Edge(I_SPPI_GI), FI_Edge
```

```

END IF
      END DO
END DO
600  print *, Iter, '. MC Point is finished'
      End DO
120  format (6i8,8e12.4)
      CLOSE (20)
      End Program main

```

```

*****
*****
*****
SUBROUTINE ZBQLINI(SEED)
*****
*   To initialize the random number generator - either
*   repeatably or nonrepeatably. Need double precision
*   variables because integer storage can't handle the
*   numbers involved
*****
*
*   ARGUMENTS
*   =====
*   SEED (integer, input). User-input number which generates
*   elements of the array ZBQLIX, which is subsequently used
*   in the random number generation algorithm. If SEED=0,
*   the array is seeded using the system clock if the
*   FORTRAN implementation allows it.
*****
*
*   PARAMETERS
*   =====
*   LFLNO      (integer). Number of lowest file handle to try when
*   opening a temporary file to copy the system clock into.
*   Default is 80 to keep out of the way of any existing
*   open files (although the program keeps searching till
*   it finds an available handle). If this causes problems,
*   (which will only happen if handles 80 through 99 are
*   already in use), decrease the default value.
*****
INTEGER LFLNO
PARAMETER (LFLNO=80)

*****
*
*   VARIABLES
*   =====
*   SEED See above
*   ZBQLIX  Seed array for the random number generator. Defined

```





\* by a factor of about 3). This double precision version  
 \* has been tested against an integer implementation that  
 \* uses long integers (non-standard and, again, slow) -  
 \* the output was identical up to the 16th decimal place  
 \* after  $10^{10}$  calls, so we're probably OK ...  
 \*

```
DOUBLE PRECISION ZBQLU01,DUMMY,B,C,ZBQLIX(43),X,B2,BINV
INTEGER CURPOS,ID22,ID43
```

```
COMMON /ZBQL0001/ ZBQLIX,B,C
SAVE /ZBQL0001/
SAVE CURPOS,ID22,ID43
DATA CURPOS,ID22,ID43 /1,22,43/
```

```
B2 = B
```

```
BINV = 1.0D0/B
```

```
5 X = ZBQLIX(ID22) - ZBQLIX(ID43) - C
```

```
IF (X.LT.0.0D0) THEN
```

```
  X = X + B
```

```
  C = 1.0D0
```

```
ELSE
```

```
  C = 0.0D0
```

```
ENDIF
```

```
ZBQLIX(ID43) = X
```

\*  
 \* Update array pointers. Do explicit check for bounds of each to  
 \* avoid expense of modular arithmetic. If one of them is 0 the others  
 \* won't be  
 \*

```
CURPOS = CURPOS - 1
```

```
ID22 = ID22 - 1
```

```
ID43 = ID43 - 1
```

```
IF (CURPOS.EQ.0) THEN
```

```
  CURPOS=43
```

```
ELSEIF (ID22.EQ.0) THEN
```

```
  ID22 = 43
```

```
ELSEIF (ID43.EQ.0) THEN
```

```
  ID43 = 43
```

```
ENDIF
```

\*  
 \* The integer arithmetic there can yield  $X=0$ , which can cause  
 \* problems in subsequent routines (e.g. ZBQLEXP). The problem  
 \* is simply that X is discrete whereas U is supposed to  
 \* be continuous - hence if X is 0, go back and generate another  
 \* X and return  $X/B^2$  (etc.), which will be uniform on  $(0,1/B)$ .  
 \*

```
IF (X.LT.BINV) THEN
```

```
  B2 = B2*B
```

```
  GOTO 5
```

```
ENDIF
```

```
ZBQLU01 = X/B2
```

```
END
```

```

*****
FUNCTION ZBQLUAB(A,B)
*
*   Returns a random number uniformly distributed on (A,B)
*
DOUBLE PRECISION A,B,ZBQLU01,ZBQLUAB
*
*   Even if A > B, this will work as B-A will then be -ve
*
IF (A.NE.B) THEN
  ZBQLUAB = A + ( (B-A)*ZBQLU01(0.0D0) )
ELSE
  ZBQLUAB = A
  WRITE(*,1)
ENDIF
1  FORMAT(/5X,'****WARNING**** (function ZBQLUAB) Upper and ',
+'lower limits on uniform',/5X,'distribution are identical',/)
END
*****

FUNCTION ZBQLEXP(MU)
*
*   Returns a random number exponentially distributed with
*   mean MU
*
DOUBLE PRECISION MU,ZBQLEXP,ZBQLU01

ZBQLEXP = 0.0D0

IF (MU.LT.0.0D0) THEN
  WRITE(*,1)
  RETURN
ENDIF

ZBQLEXP = -DLOG(ZBQLU01(0.0D0))*MU

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLEXP',/)

END
*****

FUNCTION ZBQLNOR(MU,SIGMA)
*
*   Returns a random number Normally distributed with mean
*   MU and standard deviation |SIGMA|, using the Box-Muller
*   algorithm
*
DOUBLE PRECISION THETA,R,ZBQLNOR,ZBQLU01,PI,MU,SIGMA
DOUBLE PRECISION SPARE
INTEGER STATUS
SAVE STATUS,SPARE,PI
DATA STATUS /-1/

IF (STATUS.EQ.-1) PI = 4.0D0*DATAN(1.0D0)

```

```

IF (STATUS.LE.0) THEN
  THETA = 2.0D0*PI*ZBQLU01(0.0D0)
  R = DSQRT( -2.0D0*DLOG(ZBQLU01(0.0D0)) )
  ZBQLNOR = (R*DCOS(THETA))
  SPARE = (R*DSIN(THETA))
  STATUS = 1
ELSE
  ZBQLNOR = SPARE
  STATUS = 0
ENDIF

```

```
ZBQLNOR = MU + (SIGMA*ZBQLNOR)
```

```
END
```

```
*****
```

```
FUNCTION ZBQLBIN(N,P)
```

```
*
```

```
* Returns a random number binomially distributed (N,P)
```

```
*
```

```
DOUBLE PRECISION P,ZBQLBET1
DOUBLE PRECISION PP,PPP,G,Y,TINY
INTEGER N,ZBQLBIN,ZBQLGEO,IZ,NN
```

```
TINY = 1.0D-8
```

```
ZBQLBIN = 0
```

```
IF (.NOT.( (P.GE.0.0D0).AND.(P.LE.1.0D0) )) THEN
```

```
  WRITE(*,1)
```

```
  RETURN
```

```
ELSEIF(N.LE.0) THEN
```

```
  WRITE(*,1)
```

```
  RETURN
```

```
ENDIF
```

```
*
```

```

* First step: if NP > 10, say, things will be expensive, and
* we can get into the right ballpark by guessing a value for
* ZBQLBIN (IZ, say), and simulating Y from a Beta distribution
* with parameters IZ and NN-IZ+1 (NN starts off equal to N).
* If Y is less than PP (which starts off as P) then the IZth order
* statistic from NN U(0,1) variates is less than P, and we know
* that there are at least IZ successes. In this case we focus on
* the remaining (NN-IZ) order statistics and count how many are
* less than PP, which is binomial (NN-IZ,(PP-Y)/(1-Y)).
* Otherwise, if Y is greater than PP there must be less
* than IZ successes, so we can count the number of order statistics
* under PP, which is binomial (IZ-1,P/Y). When we've got NN*PP
* small enough, we go to the next stage of the algorithm and
* generate the final bits directly.
*

```

```
NN = N
```

```
PP = P
```

```
10 IZ = INT(DBLE(NN)*PP) + 1
```

```
IF ( (IZ.GT.10).AND.(IZ.LT.NN-10) ) THEN
```



```

Y = ZBQLBET1(DBLE(IZ),DBLE(NN-IZ+1))
IF (Y.LT.PP) THEN
  ZBQLBIN = ZBQLBIN + IZ
  NN = NN - IZ
  PP = (PP-Y) / (1.0D0-Y)
ELSE
  NN = IZ-1
  PP = PP/Y
ENDIF
GOTO 10
ENDIF
*
*   PP is the probability of the binomial we're currently
*   simulating from. For the final part, we simulate either number
*   of failures or number of success, depending which is cheaper.
*
20 IF (PP.GT.0.5) THEN
  PPP = 1.0D0-PP
ELSE
  PPP = PP
ENDIF

G = 0
IZ = 0
*
*   ZBQLGEO falls over for miniscule values of PPP, so ignore these
*   (tiny probability of any successes in this case, anyway)
*
IF (PPP.GT.TINY) THEN
30 G = G + ZBQLGEO(PPP)
  IF (G.LE.NN) THEN
    IZ = IZ + 1
    GOTO 30
  ENDIF
ENDIF

IF (PP.GT.0.5) IZ = NN - IZ
ZBQLBIN = ZBQLBIN + IZ

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
  +' ZBQLBIN',/)
  END
*****
  FUNCTION ZBQLGEO(P)
*
*   Returns a random number geometrically distributed with
*   parameter P ie. mean 1/P
*
DOUBLE PRECISION P,ZBQLU01,U,TINY
INTEGER ZBQLGEO

TINY = 1.0D-12
ZBQLGEO = 0

```

```

IF (.NOT.( (P.GE.0.0D0).AND.(P.LE.1.0D0) )) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF

IF (P.GT.0.9D0) THEN
10  ZBQLGEO = ZBQLGEO + 1
    U = ZBQLU01(0.0D0)
    IF (U.GT.P) GOTO 10
ELSE
    U = ZBQLU01(0.0D0)
*
*   For tiny P, 1-p will be stored inaccurately and log(1-p) may
*   be zero. In this case approximate log(1-p) by -p
*
IF (P.GT.TINY) THEN
    ZBQLGEO = 1 + INT( DLOG(U)/DLOG(1.0D0-P) )
ELSE
    ZBQLGEO = 1 + INT(-DLOG(U)/P)
ENDIF
ENDIF

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLGEO',/)
END
*****
FUNCTION ZBQLPOI(MU)
*
*   Returns a random number Poisson distributed with mean MU
*
DOUBLE PRECISION ZBQLU01,X,Y,MU,PI
DOUBLE PRECISION ZBQLLG,ZBQLGAM,MU1,TMP1,TMP2,T
INTEGER ZBQLPOI,ZBQLBIN,K,INIT
SAVE INIT,PI
DATA INIT /0/

IF (INIT.EQ.0) THEN
    PI = 4.0D0*DATAN(1.0D0)
    INIT = 1
ENDIF

ZBQLPOI = 0

IF (MU.LT.0.0D0) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF
*
*   For small MU, generate exponentials till their sum exceeds 1
*   (equivalently, uniforms till their product falls below e^-MU)
*
IF (MU.LE.1.0D3) THEN

```

```

MU1 = MU
*
*
* For values of MU less than 1000, use order statistics - the Kth
* event in a Poisson process of rate MU has a Gamma distribution
* with parameters (MU,K); if it's greater than 1 we know that there
* are less than K events in (0,1) (and the exact number is binomial)
* and otherwise the remaining number is another Poisson. Choose K so
* that we'll get pretty close to 1 in the first go but are unlikely
* to overshoot it.
*
19 IF (MU1.GT.1.0D1) THEN
    K = INT(MU1-DSQRT(MU1))
    Y = ZBQLGAM(DBLE(K),MU1)
    IF (Y.GT.1.0D0) THEN
        ZBQLPOI = ZBQLPOI + ZBQLBIN(K-1,(1.0D0/Y))
        RETURN
    ENDIF
    ZBQLPOI = ZBQLPOI + K
    MU1 = MU1 * (1.0D0-Y)
    GOTO 19
ENDIF
Y = DEXP(-MU1)
X = 1.0D0
20 X = X*ZBQLU01(0.0D0)
IF (X.GT.Y) THEN
    ZBQLPOI = ZBQLPOI + 1
    GOTO 20
ENDIF
*
* For really huge values of MU, use rejection sampling as in
* Press et al (1992) - large numbers mean some accuracy may be
* lost, but it caps the execution time.
*
ELSE
    TMP1 = DSQRT(2.0D0*MU)
    TMP2 = ZBQLLG(MU+1.0D0)-(MU*DLOG(MU))
30 Y = DTAN(PI*ZBQLU01(0.0D0))
    ZBQLPOI = INT(MU + (TMP1*Y))
    IF (ZBQLPOI.LT.0) GOTO 30
    X = DBLE(ZBQLPOI)
    T = (X*DLOG(MU)-ZBQLLG(X+1.0D0)) + TMP2
    IF (DABS(T).LT.1.0D2) THEN
        T = 0.9D0*(1.0D0+(Y*Y))*DEXP(T)
        IF (ZBQLU01(0.0D0).GT.T) GOTO 30
    ELSE
        T = DLOG(0.9D0*(1.0D0+(Y*Y))) + T
        IF (DLOG(ZBQLU01(0.0D0)).GT.T) GOTO 30
    ENDIF
ENDIF
ENDIF

1 FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+ ' ZBQLPOI',/)
END
*****

```

```

FUNCTION ZBQLGAM(G,H)
*
*   Returns a random number with a gamma distribution with mean
*   G/H and variance G/(H^2). (ie. shape parameter G & scale
*   parameter H)
*
DOUBLE PRECISION C,D,R,ZBQLGAM,ZBQLU01,G,H,A,z1,z2,B1,B2,M
DOUBLE PRECISION U1,U2,U,V,TEST,X
double precision c1,c2,c3,c4,c5,w

ZBQLGAM = 0.0D0

IF ( (G.LE.0.0D0).OR.(H.LT.0.0D0) ) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF

IF (G.LT.1.0D0) THEN
889  u=ZBQLU01(0.0d0)
    v=ZBQLU01(0.0d0)
    if (u.gt.exp(1.0d0)/(g+exp(1.0d0))) goto 891
    ZBQLGAM=((g+exp(1.0d0))*u/exp(1.0d0))**(1.0d0/g)
    if (v.gt.exp(-ZBQLGAM)) then
        goto 889
    else
        goto 892
    endif
891  ZBQLGAM=-log((g+exp(1.0d0))*(1.0d0-u)/(g*exp(1.0d0)))
    if (v.gt.ZBQLGAM**(g-1.0)) goto 889
892  ZBQLGAM=ZBQLGAM/h
    RETURN
ELSEIF (G.LT.2.0D0) THEN
M = 0.0D0
elseif (g.gt.10.0d0) then
c1=g-1.0d0
c2=(g-1.0d0/(6.0d0*g))/c1
c3=2.0d0/c1
c4=c3+2.0d0
c5=1.0d0/sqrt(g)
777  u=ZBQLU01(0.0d0)
    v=ZBQLU01(0.0d0)
    if (g.gt.2.50d0) then
        u=v+c5*(1.0d0-1.860d0*u)
    endif
    if (u.le.0.0d0.or.u.ge.1.0d0) goto 777
    w=c2*v/u
    if (c3*u+w+1.0d0/w.le.c4) goto 778
    if (c3*log(u)-log(w)+w.ge.1.0d0) goto 777
778  ZBQLGAM=c1*w/h
    return
ELSE
M = -(G-2.0D0)
ENDIF
R = 0.50D0

```

```

a = ((g-1.0d0)/exp(1.0d0))**((g-1.0d0)/(r+1.0d0))
C = (R*(M+G)+1.0D0)/(2.0D0*R)
D = M*(R+1.0D0)/R
z1 = C-DSQRT(C*C-D)
*
* On some systems (e.g. g77 0.5.24 on Linux 2.4.24), C-DSQRT(C*C)
* is not exactly zero - this needs trapping if negative.
*
IF ((Z1-M.LT.0.0D0).AND.(Z1-M.GT.-1.0D-12)) Z1 = M
z2 = C+DSQRT(C*C-D)
B1=(z1*(z1-M)**(R*(G-1.0D0)/(R+1.0D0)))*DEXP(-R*(z1-M)/(R+1.0D0))
B2=(z2*(z2-M)**(R*(G-1.0D0)/(R+1.0D0)))*DEXP(-R*(z2-M)/(R+1.0D0))
50 U1=ZBQLU01(0.0D0)
U2=ZBQLU01(0.0D0)
U=A*U1
V=B1+(B2-B1)*U2
X=V/(U**R)
IF (X.LE.M) GOTO 50
TEST = ((X-M)**((G-1)/(R+1)))*EXP(-(X-M)/(R+1.0D0))
IF (U.LE.TEST) THEN
  ZBQLGAM = (X-M)/H
ELSE
  GOTO 50
ENDIF
1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLGAM',/5X, '(both parameters must be positive)',/)

END
*****
FUNCTION ZBQLBET1(NU1,NU2)
*
* Returns a random number, beta distributed with degrees
* of freedom NU1 and NU2.
*
DOUBLE PRECISION NU1,NU2,ZBQLGAM,ZBQLBET1,ZBQLU01,X1,X2

ZBQLBET1 = 0.0D0

IF ( (NU1.LE.0.0).OR.(NU2.LE.0.0) ) THEN
  WRITE(*,1)
  RETURN
ENDIF
*
* If parameters are too small, gamma subroutine tends to return zero
* as all the probability goes to the origin and we get rounding
* errors, even with double precision. In this case, we use Johnk's
* method, suitably scaled to avoid rounding errors as much as possible.
*

IF ( (NU1.LT.0.9D0).AND.(NU2.LT.0.9D0) ) THEN
10 X1 = ZBQLU01(0.0D0)
X2 = ZBQLU01(0.0D0)
IF ( (X1**(1.0D0/NU1))+X2**(1.0D0/NU2)).GT.1.0D0) GOTO 10
X1 = (DLOG(X2)/NU2) - (DLOG(X1)/NU1)

```

```

ZBQLBET1 = (1.0D0 + DEXP(X1))**(-1)
IF (ZBQLBET1.GT.1.0D0) GOTO 10
ELSE
X1 = ZBQLGAM(NU1,1.0D0)
X2 = ZBQLGAM(NU2,1.0D0)
ZBQLBET1 = X1/(X1+X2)
ENDIF

```

```

RETURN

```

```

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLBET1',/5X,
+'(both degrees of freedom must be positive)',/)

```

```

END

```

```

*****

```

```

FUNCTION ZBQLWEI(A,B)

```

```

*

```

```

*   Returns a random number, Weibull distributed with shape parameter
*   A and location parameter B, i.e. density is
*    $f(x) = (A/(B**A)) * x**(A-1) * EXP(-(x/B)**A)$ 
*

```

```

DOUBLE PRECISION A,B,ZBQLU01,ZBQLWEI,U

```

```

ZBQLWEI = 0.0D0

```

```

IF ( (A.LE.0.0).OR.(B.LE.0.0) ) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF

```

```

U = ZBQLU01(0.0D0)
ZBQLWEI = B * ( (-DLOG(U))**(1.0D0/A) )

```

```

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLWEI',/5X,
+'(both parameters must be positive)',/)

```

```

END

```

```

*****

```

```

FUNCTION ZBQLNB(R,P)

```

```

*

```

```

*   Returns a pseudo-random number according to a Negative
*   Binomial distribution with parameters (R,P). NB these are
*   both DOUBLE - it copes with non-integer R as well. The
*   form of the distribution is *not* the no. of trials to
*   the Rth success - see documentation for full spec.
*

```

```

DOUBLE PRECISION R,P,ZBQLGAM,Y
INTEGER ZBQLNB,ZBQLPOI

```

```

ZBQLNB = 0

```

```

IF ( (R.LE.0.0D0).OR.(P.LE.0.0D0).OR.(P.GE.1.0D0) ) THEN
WRITE(*,1)

```

```

RETURN
ENDIF

Y = ZBQLGAM(R,1.0D0)
Y = Y*P/(1.0D0-P)
ZBQLNB = ZBQLPOI(Y)

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLNB')
END
*****
FUNCTION ZBQLPAR(A,B)
*
* Returns a random number, Pareto distributed with parameters
* A and B. The density is  $A*(B**A) / (B+X)**(A+1)$  for  $X > 0$ .
* (this is slightly nonstandard - see documentation in
* randgen.txt). The algorithm is straightforward - it uses the
* inverse CDF method.
*
DOUBLE PRECISION A,B,ZBQLPAR,ZBQLU01,U

ZBQLPAR = 0.0D0

IF ( (A.LE.0.0D0).OR.(B.LE.0.0D0) ) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF

U = ZBQLU01(0.0D0)
ZBQLPAR = B * (U**(-1.0D0/A)-1.0D0)

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLPAR',/5X,
+'(both parameters must be positive)',/)
END
*****
FUNCTION ZBQLLG(X)
*
* Returns  $\log(G(X))$  where G is the Gamma function. The algorithm is
* that given in Press et al (1992), Section 6.1, although this
* version also allows for arguments less than 1.
*
DOUBLE PRECISION X,Z,Z2,ZBQLLG,PI,RLN2P,C(0:6),TMP,SUM
INTEGER INIT,I
SAVE INIT,C,RLN2P,PI
DATA INIT /0/
DATA (C(I),I=0,6) /
+      1.000000000190015D0,76.18009172947146D0,
+      -86.50532032941677D0,24.01409824083091D0,
+      -1.231739572450155D0,0.1208650973866179D-2,
+      -0.5395239384953D-5/

IF (INIT.EQ.0) THEN
PI = 4.0D0*DATAN(1.0D0)

```

```

        RLN2P = 0.5D0*DLOG(2.0D0*PI)
        INIT = 1
    ENDIF
*
*   Compute for x > 1, then use transformation if necessary. Z is
*   our working argument.
*
    IF (X.GE.1.0D0) THEN
        Z = X
    ELSE
        Z = 2.0D0-X
        Z2 = 1.0D0-X
    ENDIF

    IF (DABS(Z-1.0D0).LT.1.0D-12) THEN
        ZBQLLG = 0.0D0
        RETURN
    ENDIF

    TMP = Z + 4.5D0
    TMP = ( (Z-0.5D0)*DLOG(TMP) ) - TMP + RLN2P

    SUM = C(0)
    DO 50 I=1,6
        SUM = SUM + (C(I)/(Z+DBLE(I-1)))
50 CONTINUE
    ZBQLLG = TMP + DLOG(SUM)
*
*   Transformation required if X<1
*
    IF (X.LT.1.0D0) THEN
        TMP = PI*Z2
        ZBQLLG = DLOG(TMP/DSIN(TMP)) - ZBQLLG
    ENDIF

    END

```

## 6.2 LJ Numunesi için Olasılık Temelli Çatlak İlerleme Analiz Programı Kaynak Kodu (Forman Modeli ile Wheeler Modeli)

```

*****
***** CRACK PROPAGATION ANALYSIS PROGRAM*****
*****  AUTHORS: M.F.YAREN ve A.O.AYHAN *****
*****
*****
***** RANDOM NUMBER GENERATOR
***** https://www.ucl.ac.uk/~ucakarc/work/software/randgen.f
*****  AUTHORS: Richard Chandler *****
***** (richard@stats.ucl.ac.uk) *****
***** Paul Northrop *****

```



\*\*\*\*\* (northrop@stats.ox.ac.uk) \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

BLOCK DATA ZBQLBD01

\*  
 \*     Initializes seed array etc. for random number generator.  
 \*     The values below have themselves been generated using the  
 \*     NAG generator.  
 \*

COMMON /ZBQL0001/ ZBQLIX,B,C  
 DOUBLE PRECISION ZBQLIX(43),B,C  
 INTEGER I  
 INTEGER SEED

DATA (ZBQLIX(I),I=1,43) /8.001441D7,5.5321801D8,  
 +1.69570999D8,2.88589940D8,2.91581871D8,1.03842493D8,  
 +7.9952507D7,3.81202335D8,3.11575334D8,4.02878631D8,  
 +2.49757109D8,1.15192595D8,2.10629619D8,3.99952890D8,  
 +4.12280521D8,1.33873288D8,7.1345525D7,2.23467704D8,  
 +2.82934796D8,9.9756750D7,1.68564303D8,2.86817366D8,  
 +1.14310713D8,3.47045253D8,9.3762426D7,1.09670477D8,  
 +3.20029657D8,3.26369301D8,9.441177D6,3.53244738D8,  
 +2.44771580D8,1.59804337D8,2.07319904D8,3.37342907D8,  
 +3.75423178D8,7.0893571D7,4.26059785D8,3.95854390D8,  
 +2.0081010D7,5.9250059D7,1.62176640D8,3.20429173D8,  
 +2.63576576D8/  
 DATA B / 4.294967291D9 /  
 DATA C / 0.0D0 /

END

\*\*\*\*\*MAIN PROGRAM\*\*\*\*\*

```

program main
implicit double precision (a-h, o-z)
parameter (max_dim=1000000)
CHARACTER*80 JJUNK, File_Name, plot_file_name
CHARACTER*80 edge_plot_file_name
COMMON /ZBQL0001/ ZBQLIX,B,C
COMMON /TMP_VAR/ TMP_INIT
DOUBLE PRECISION ZBQLIX(43),B,C
INTEGER:: SEED
real(8), allocatable, dimension(:):: DeltaSIF, SIF
real(8), allocatable, dimension(:):: DeltaSIF_Edge, SIF_Edge
real(8), allocatable, dimension(:):: ASze, CSze
real(8), allocatable, dimension(:):: P_ZSze, a_plast
real(8), allocatable, dimension(:):: a_plast_edge, P_ZSze_Edge

C   dimension DeltaSIF(max_dim), P_ZSze(max_dim)
C   dimension ASze(max_dim)
C   dimension SIF(max_dim), a_plast(max_dim)
dimension SPPI_LOAD(max_dim), SUM_LOAD(max_dim)
dimension SOL_index(2000)

```

```

SEED=1
ITER=0
ITER1=0
Sum_of_Max_Load=0.0
i_Percent=0.0
Overload_Count=0.0
Num_of_Max_Load=0.0
SNum_of_overload=0.0
SOL_index=0.0

```

```
call zbqlini(seed)
```

```

OPEN (unit=21,file='Variables_Dist.txt',status='unknown')
write(21,*)"MC Sim,thk,ASze(1),CSze(1), Dz RAND_NUM_dadN"
***** ***Reading variables from Sim_porproperties.txt*****
OPEN(11,FILE='Sim_properties.txt',STATUS='OLD',ERR=111)
GO TO 112
111 WRITE(*,*)'Sim_Properties File is not found !!!'
GO TO 600
112 continue

```

```

read(11,*)
read(11,*)Max_iter
read(11,*)Max_Block_Repeat
read(11,*)Fracture_Toughness
read(11,*)S_Yield
read(11,*)W
read(11,*)y
read(11,*)PAR_MU_Thk
read(11,*)PAR_SIG_Thk
read(11,*)PAR_MU_dadN
read(11,*)PAR_SIG_dadN
read(11,*)PAR_MU_Asze
read(11,*)PAR_SIG_Asze
read(11,*)PAR_MU_Load
read(11,*)PAR_SIG_Load
read(11,*)PAR_MU_DZ
read(11,*)PAR_SIG_DZ
read(11,*)PAR_MU_Csze
read(11,*)PAR_SIG_Csze

```

```

C print *,'Enter Number Monte Carlo Simulation Points:'
C read(*,*) Max_iter
C print *,'Enter Number for Repeations of Spectrum Load Blocks:'
C read(*,*) Max_Block_Repeat
C print *,'Enter Wheeler Exponent [0 means Const. Amplitude]'
C read(*,*) y

```

```

* *****Reading Load Spectrum*****
OPEN (unit=10,file='LoadSpec.txt')

```

```

          Index=1
10          Read(10,*,end=11)SPPI_Load(index)
          IF (SPPI_Load(index)>SPPI_Load(index-1)) THEN
          Sum_of_Max_Load=Sum_of_Max_Load+SPPI_Load(index)
          Num_of_Max_Load=Num_of_Max_Load+1
          END IF
          index=index+1
          goto 10
11          continue
n_SPPI_Load=index-1
CLOSE (10)

Spectrum_avg=Sum_of_Max_Load/(Num_of_Max_Load)
* *****SOL_index is calculated but not used for LJ**
Do index2=1,n_SPPI_Load
  IF (SPPI_Load(index2)>Spectrum_avg) THEN
    i_Percnt=((SPPI_Load(index2)-Spectrum_avg)/Spectrum_avg)*100

    Do index3=1,n_SPPI_Load
      IF (((SPPI_Load(index3)-Spectrum_avg)/Spectrum_avg)*100
&>= i_Percnt) THEN
        SNum_of_overload=SNum_of_overload+1
      EndIF
    END DO

    IF (((SNum_of_overload/Num_of_Max_Load)*100)>=i_Percnt)THEN
      SOL_index(index2)=i_Percnt
    ENDIF

    SNum_of_overload=0.0
  ENDIF
End DO
SOL_index2=1+(maxval(SOL_index)/100)

IF (n_SPPI_Load<=0) THEN
print *,'Check the LoadSpec.txt file'
goto 600
END IF

```

C \*\*\*\*\*

```

allocate (DeltaSIF(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (DeltaSIF_Edge(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (SIF(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (SIF_Edge(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (ASize(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (CSize(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (P_ZSize(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (P_ZSize_Edge(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (a_plast(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))
allocate (a_plast_Edge(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load))

```

\* Input Distribution Parameters

```

C  print *, ' ...:Generating random values by distributions::...'
C  print *, ' Enter Mean Value for Distributions:'
C  print *, ' Thickness, dadN, CrackLenght, CrackDepth, DZ'
C  read(*,*) PAR_MU_Thk, PAR_MU_dadN, PAR_MU_CSze, PAR_MU_Asze,
C  &PAR_MU_DZ
C
C  print *, ' Enter Standat Deviation for Distributions:'
C  print *, ' Thickness, dadN, CrackLenght, CrackDepth, DZ'
C  read(*,*) PAR_SIG_Thk, PAR_SIG_dadN, PAR_SIG_CSze, PAR_SIG_Asze,
C  &PAR_SIG_DZ

```

```

C  Loop for Monte Carlo Sim.
Do ITER=1,max_iter
C      *****Open result file for every MC Point. *****
write(jjunk,*)iter
ncc=0
do mm=1,80
  if(jjunk(mm:mm).eq.' ') go to 4
  ncc=ncc+1
  jjunk(ncc:ncc)=jjunk(mm:mm)
4  end do

```

```

file_name=jjunk(1:ncc)//'.txt'
plot_file_name=jjunk(1:ncc)//'.plot_txt'
Edge_plot_file_name=jjunk(1:ncc)//'.edge_plot_txt'

```

```

OPEN(20,FILE=file_name,STATUS='UNKNOWN')
write(20,*)"MC Sim, I_block,I_SPPI,I_SPPI_GI,I_Cyc_GI,I_Cyc_Loc,
& dadN,ASze(I_SPPI_GI),SPPI_Load(I_SPPI),SIF(I_SPPI_GI),
&DeltaSIF(I_SPPI_GI),a_plast(I_SPPI_GI), P_ZSze(I_SPPI_GI), FI"

```

```

OPEN(22,FILE=plot_file_name,STATUS='UNKNOWN')
write(22,*)"MC Sim, I_block,I_SPPI,I_SPPI_GI,I_Cyc_GI,I_Cyc_Loc,
& dadN,ASze(I_SPPI_GI),SPPI_Load(I_SPPI),SIF(I_SPPI_GI),
&DeltaSIF(I_SPPI_GI),a_plast(I_SPPI_GI), P_ZSze(I_SPPI_GI), FI"

```

```

OPEN(23,FILE=edge_plot_file_name,STATUS='UNKNOWN')
write(23,*)"MC Sim, I_block,I_SPPI,I_SPPI_GI,I_Cyc_GI,I_Cyc_Loc,
& dadN,ASze(I_SPPI_GI),SPPI_Load(I_SPPI),SIF(I_SPPI_GI),
&DeltaSIF(I_SPPI_GI),a_plast(I_SPPI_GI), P_ZSze(I_SPPI_GI), FI"

```

```

*****INITILIZE MATRICES*****

```

```

do i_zero=1,(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load)
  ASze(i_zero)=0
  CSze(i_zero)=0
  DeltaSIF(i_zero)=0
  DeltaSIF_Edge(i_zero)=0
  SIF(i_zero)=0
  SIF_Edge(i_zero)=0
  P_ZSze(i_zero)=0
  P_ZSze_Edge(i_zero)=0
  a_plast(i_zero)=0

```

```

a_plast_Edge(i_zero)=0
Sum_Load(i_zero)=0
end do

Valid_Plst_Z=0.0
Valid_Plst_Z_Edge=0.0

Do Load_index=1,(Max_Block_Repeat*n_SPPI_Load)
  RAND_NUM_Load=ZBQLNOR(PAR_MU_Load,PAR_SIG_Load)
C  Calculating of LOAD by adding Load Probabilty Distribution**
  Sum_Load(Load_index)=SPPI_LOAD(Load_index)
  &+(SPPI_LOAD(Load_index)*RAND_NUM_Load)
end do
100  continue

  RAND_NUM_Thk=ZBQLNOR(PAR_MU_Thk,PAR_SIG_Thk)
  IF(RAND_NUM_Thk<(PAR_MU_Thk-3*PAR_SIG_Thk) .or.
&RAND_NUM_Thk>(PAR_MU_Thk+3*PAR_SIG_Thk)) THEN
    print *,'Thickness tekrar hesaplaniyor'
    goto 100
  END IF
  Thk=RAND_NUM_Thk

200  continue
  RAND_NUM_CSze=ZBQLNOR(PAR_MU_CSze,PAR_SIG_CSze)
  IF(RAND_NUM_CSze<(PAR_MU_CSze-3*PAR_SIG_CSze) .or.
& RAND_NUM_CSze>(PAR_MU_CSze+3*PAR_SIG_CSze)) THEN
    print *,'C_Size tekrar hesaplaniyor'
    goto 200
  END IF
  CSze(1)=RAND_NUM_CSze

250  continue
  RAND_NUM_ASze=ZBQLNOR(PAR_MU_ASze,PAR_SIG_ASze)
  IF(RAND_NUM_ASze<(PAR_MU_ASze-3*PAR_SIG_ASze) .or.
& RAND_NUM_ASze>(PAR_MU_ASze+3*PAR_SIG_ASze)) THEN
    print *,'A_Size tekrar hesaplaniyor'
    goto 250
  END IF
  ASze(1)=RAND_NUM_ASze

275  continue
  RAND_NUM_DZ=ZBQLNOR(PAR_MU_DZ,PAR_SIG_DZ)
  IF(RAND_NUM_DZ<-1 .or. RAND_NUM_DZ>1) THEN
    print *,'DZ tekrar hesaplaniyor'
    goto 275
  END IF
  DZ=RAND_NUM_DZ

300  continue
  RAND_NUM_dadN=ZBQLNOR(PAR_MU_dadN,PAR_SIG_dadN)
  IF(RAND_NUM_dadN<(-3.0) .or.
&RAND_NUM_dadN>(3.0)) THEN

```

```
        goto 300
    END IF
```

```
I_Cyc_GI=0
```

```
*****LOOP FOR A SPECIMEN*****
```

```
    Do I_Block=1,Max_Block_Repeat
```

```
        I_Cyc_Loc=0
```

```
*****CALCULATE SIFs by TRANSFER FUNCTIONS*****
```

```
C*Transfer func. is obtained under 1kN axial force.
```

```
    DO I_SPPI=1,n_SPPI_Load
```

```
        I_SPPI_GI=((I_Block-1)*n_SPPI_Load)+I_SPPI
```

```
        Ratio=Sum_Load(I_SPPI-1)/Sum_Load(I_SPPI)
```

```
        IF (I_SPPI.EQ.n_SPPI_Load)THEN
```

```
            ASze(I_SPPI_GI+1)=ASze(I_SPPI_GI)
```

```
            CSze(I_SPPI_GI+1)=CSze(I_SPPI_GI)
```

```
            dadN_retarded=0
```

```
            dadN_retarded_Edge=0
```

```
            SIF(I_SPPI_GI)=SIF(I_SPPI_GI-1)
```

```
            SIF_Edge(I_SPPI_GI)=SIF_Edge(I_SPPI_GI-1)
```

```
            DeltaSIF(I_SPPI_GI)=DeltaSIF(I_SPPI_GI-1)
```

```
            DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI)=DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI-1)
```

```
            a_plast(I_SPPI_GI)=a_plast(I_SPPI_GI-1)
```

```
            a_plast_Edge(I_SPPI_GI)=a_plast_Edge(I_SPPI_GI-1)
```

```
        goto 500
```

```
    END IF
```

```
    IF ((Sum_Load(I_SPPI)-Sum_Load(I_SPPI-1))<=0)THEN
```

```
        ASze(I_SPPI_GI+1)=ASze(I_SPPI_GI)
```

```
        CSze(I_SPPI_GI+1)=CSze(I_SPPI_GI)
```

```
        dadN_retarded=0
```

```
        dadN_retarded_Edge=0
```

```
        SIF(I_SPPI_GI)=SPPI_LOAD(I_SPPI)*(0.33277+52.214*CSze(I_SPPI_GI)-  
&20.119*ASze(I_SPPI_GI)+7.86*DZ-36443*DZ**2)
```

```
        SIF_Edge(I_SPPI_GI)=SPPI_LOAD(I_SPPI)*  
&(1.1458-248.3*CSze(I_SPPI_GI)+69.66*ASze(I_SPPI_GI)-  
&94.7*DZ+17710*CSze(I_SPPI_GI)**2+36443*DZ**2)
```

```
        DeltaSIF(I_SPPI_GI)=(SPPI_LOAD(I_SPPI)-SPPI_LOAD(I_SPPI-1))*  
&(0.33277+52.214*CSze(I_SPPI_GI)-  
&20.119*ASze(I_SPPI_GI)+7.86*DZ-36443*DZ**2)
```

```

DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI)=(SPPI_LOAD(I_SPPI)-SPPI_LOAD(I_SPPI-1))*
&(1.1458-248.3*CSze(I_SPPI_GI)+69.66*ASze(I_SPPI_GI)-
&94.7*DZ+17710*CSze(I_SPPI_GI)**2+36443*DZ**2)

```

```

a_plast(I_SPPI_GI)=a_plast(I_SPPI_GI-1)
a_plast_Edge(I_SPPI_GI)=a_plast(I_SPPI_GI-1)

```

```

FI=0
FI_Edge=0
goto 500
END IF

```

```

IF ((Sum_Load(I_SPPI))<=0)THEN
  ASze(I_SPPI_GI+1)=ASze(I_SPPI_GI)
  CSze(I_SPPI_GI+1)=CSze(I_SPPI_GI)
  goto 500
END IF

```

```

SIF(I_SPPI_GI)=SPPI_LOAD(I_SPPI)*(0.33277+52.214*CSze(I_SPPI_GI)-
&20.119*ASze(I_SPPI_GI)+7.86*DZ-36443*DZ**2)

```

```

SIF_Edge(I_SPPI_GI)=SPPI_LOAD(I_SPPI)*
&(1.1458-248.3*CSze(I_SPPI_GI)+69.66*ASze(I_SPPI_GI)-
&94.7*DZ+17710*CSze(I_SPPI_GI)**2+36443*DZ**2)

```

```

DeltaSIF(I_SPPI_GI)=(SPPI_LOAD(I_SPPI)-SPPI_LOAD(I_SPPI-1))*
&(0.33277+52.214*CSze(I_SPPI_GI)-
&20.119*ASze(I_SPPI_GI)+7.86*DZ-36443*DZ**2)

```

```

DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI)=(SPPI_LOAD(I_SPPI)-SPPI_LOAD(I_SPPI-1))*
&(1.1458-248.3*CSze(I_SPPI_GI)+69.66*ASze(I_SPPI_GI)-
&94.7*DZ+17710*CSze(I_SPPI_GI)**2+36443*DZ**2)

```

```

a_plast(I_SPPI_GI)=a_plast(I_SPPI_GI-1)
a_plast_Edge(I_SPPI_GI)=a_plast(I_SPPI_GI-1)

```

\*\*\*\*\*da/dN WITHOUT RETARADTION\*\*\*\*\*

\* dadN\_avg\_mean is approximate solution obtained by EXCEL for Log(dadN)=Log(DK)  
 THK\_Effect=1+((THK-PAR\_MU\_Thk)/PAR\_MU\_Thk)

```

dadN_avg_mean=
&2.533e-9*(((THK_Effect)*DeltaSIF(I_SPPI_GI))**3.051))/
&(((1-Ratio)*Fracture_Toughness)-
&(THK_Effect)*DeltaSIF(I_SPPI_GI))

```

```

dadN_avg_mean_edge=
&2.533e-9*(((THK_Effect)*DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI))**3.051))/
&(((1-Ratio)*Fracture_Toughness)-
&(THK_Effect)*DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI))

```

```

dadN_avg_mean_log=LOG10(dadN_avg_mean)

```

```

dadN_avg_mean_edge_log=LOG10(dadN_avg_mean_edge)

Double_Lognor_SCALE = 0.001

Double_Lognor_SCALE_Edge = 0.001

Double_Log_dadN_actual = dadN_avg_mean_log +
&((Double_Lognor_SCALE)*RAND_NUM_dadN)

Double_Log_dadN_actual_Edge = dadN_avg_mean_Edge_log +
&((Double_Lognor_SCALE_Edge)*RAND_NUM_dadN)

dadN_actual=10**(Double_Log_dadN_actual)

dadN_actual_Edge=10**(Double_Log_dadN_actual_Edge)
*****

I_Cyc_GI=I_Cyc_GI+1
I_Cyc_Loc=I_Cyc_Loc+1

IF ( (SIF(I_SPPI_GI).GE.Fracture_Toughness).OR.
&(SIF_Edge(I_SPPI_GI).GE.Fracture_Toughness) ) THEN
  print *,'SIF is greater than Fracture Toughness'
  goto 600
END IF

*****WHEELER PLASTIC ZONE AND RETARDATION*****
C*   Plastic zone size calculation and compation.
P_ZSze(I_SPPI_GI)=(1/(3.1415926535*4*SQRT(2.0)))
&*(((SIF(I_SPPI_GI))/S_Yield)**2)

P_ZSze_Edge(I_SPPI_GI)=
&(1/(3.1415926535))*(((SIF_Edge(I_SPPI_GI))/S_Yield)**2)

a_plast(I_SPPI_GI)=P_ZSze(I_SPPI_GI)+ASze(I_SPPI_GI)

a_plast_Edge(I_SPPI_GI)=
&P_ZSze_Edge(I_SPPI_GI)+CSze(I_SPPI_GI)

*   Check for Retardadion effect and calculate
  IF (Valid_Plst_Z<a_plast(I_SPPI_GI)) THEN
    Valid_Plst_Z=a_plast(I_SPPI_GI)
    FI=1.0
  ELSE
    FI=((P_ZSze(I_SPPI_GI)/(Valid_Plst_Z-ASze(I_SPPI_GI)))**y)
  End IF

  IF (Valid_Plst_Z_Edge<a_plast_Edge(I_SPPI_GI)) THEN
    Valid_Plst_Z_Edge=a_plast_Edge(I_SPPI_GI)
    FI_Edge=1.0
  ELSE
    FI_Edge=((P_ZSze_Edge(I_SPPI_GI)/
&(Valid_Plst_Z_Edge-CSze(I_SPPI_GI)))**y)

```



End IF

\*\*\*\*\*LIFE CALCULATION\*\*\*\*\*

```
dadN_retarded=(dadN_actual)
dadN_retarded_Edge=(FI_Edge*dadN_actual_Edge)
ASze(I_SPPI_GI+1)=ASze(I_SPPI_GI)+dadN_retarded
CSze(I_SPPI_GI+1)=CSze(I_SPPI_GI)+dadN_retarded_Edge
```

```
IF (CSze(I_SPPI_GI+1)>(Thk/2)) THEN
print *,'C_Size has reached the Half of Thickness'
goto 600
END IF
```

\*\*\*\*\*

```
500 Continue
write(20,120) Iter, I_block, I_SPPI, I_SPPI_GI, I_Cyc_GI,
&I_Cyc_Loc,dadN_retarded_edge, ASze(I_SPPI_GI), CSze(I_SPPI_GI),
&SPPI_LOAD(I_SPPI),SIF_Edge(I_SPPI_GI),
&DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI), a_plast_edge(I_SPPI_GI),
&P_ZSze_Edge(I_SPPI_GI), FI

IF (I_SPPI_GL.eq.1) THEN
write(21,*) iter, Thk, ASze(1),CSze(1), DZ, RAND_NUM_dadN
END IF

IF (I_Cyc_Loc.eq.I_Cyc_Loc/100*100) THEN
write(22,120) Iter, I_block, I_SPPI, I_SPPI_GI, I_Cyc_GI,
&I_Cyc_Loc, dadN_retarded, ASze(I_SPPI_GI),
&SPPI_LOAD(I_SPPI),SIF(I_SPPI_GI),
&DeltaSIF(I_SPPI_GI), a_plast(I_SPPI_GI), P_ZSze(I_SPPI_GI), FI
write(23,120) Iter, I_block, I_SPPI, I_SPPI_GI, I_Cyc_GI,
&I_Cyc_Loc,dadN_retarded_Edge, CSze(I_SPPI_GI),
&SPPI_LOAD(I_SPPI),SIF_Edge(I_SPPI_GI), DeltaSIF_Edge(I_SPPI_GI),
&a_plast_Edge(I_SPPI_GI), P_ZSze_Edge(I_SPPI_GI), FI_Edge
END IF

END DO
END DO
600 print *, Iter, '. MC Point is finished'
End DO
120 format (6i8,9e12.4)
CLOSE (20)
End Program main
```

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

## SUBROUTINE ZBQLINI(SEED)

\*\*\*\*\*

\* To initialize the random number generator - either  
\* repeatably or nonrepeatably. Need double precision  
\* variables because integer storage can't handle the  
\* numbers involved

\*\*\*\*\*

### \* ARGUMENTS

\* =====

\* SEED (integer, input). User-input number which generates  
\* elements of the array ZBQLIX, which is subsequently used  
\* in the random number generation algorithm. If SEED=0,  
\* the array is seeded using the system clock if the  
\* FORTRAN implementation allows it.

\*\*\*\*\*

### \* PARAMETERS

\* =====

\* LFLNO (integer). Number of lowest file handle to try when  
\* opening a temporary file to copy the system clock into.  
\* Default is 80 to keep out of the way of any existing  
\* open files (although the program keeps searching till  
\* it finds an available handle). If this causes problems,  
\* (which will only happen if handles 80 through 99 are  
\* already in use), decrease the default value.

\*\*\*\*\*

INTEGER LFLNO  
PARAMETER (LFLNO=80)

\*\*\*\*\*

### \* VARIABLES

\* =====

\* SEED See above  
\* ZBQLIX Seed array for the random number generator. Defined  
\* in ZBQLBD01  
\* B,C Used in congruential initialisation of ZBQLIX  
\* SS,MM,} System clock secs, mins, hours and days  
\* HH,DD }  
\* FILNO File handle used for temporary file  
\* INIT Indicates whether generator has already been initialised

\*

INTEGER SEED,SS,MM,HH,DD,FILNO,I  
INTEGER INIT  
DOUBLE PRECISION ZBQLIX(43),B,C  
DOUBLE PRECISION TMPVAR1,DSS,DMM,DHH,DDD

COMMON /ZBQL0001/ ZBQLIX,B,C  
COMMON /TMP\_VAR/ TMP\_INIT

SAVE INIT

\*

\* Ensure we don't call this more than once in a program

\*

IF (INIT.GE.1) THEN



```

ELSE
  TMPVAR1 = DMOD(DBLE(SEED),B)
ENDIF
ZBQLIX(1) = TMPVAR1
DO 100 I = 2,43
  TMPVAR1 = ZBQLIX(I-1)*3.0269D4
  TMPVAR1 = DMOD(TMPVAR1,B)
  ZBQLIX(I) = TMPVAR1
100 CONTINUE

1  FORMAT(/5X,'****WARNING**** You have called routine ZBQLINI ',
+'more than',/5X,'once. I'm ignoring any subsequent calls.',/)
2  FORMAT(/5X,'**** ERROR **** In routine ZBQLINI, I couldn't',
+' find an',/5X,
+'available file number. To rectify the problem, decrease the ',
+'value of',/5X,
+'the parameter LFLNO at the start of this routine (in file ',
+'randgen.f)',/5X,
+'and recompile. Any number less than 100 should work.')
END
*****
FUNCTION ZBQLU01(DUMMY)
*
*   Returns a uniform random number between 0 & 1, using
*   a Marsaglia-Zaman type subtract-with-borrow generator.
*   Uses double precision, rather than integer, arithmetic
*   throughout because MZ's integer constants overflow
*   32-bit integer storage (which goes from -2^31 to 2^31).
*   Ideally, we would explicitly truncate all integer
*   quantities at each stage to ensure that the double
*   precision representations do not accumulate approximation
*   error; however, on some machines the use of DNINT to
*   accomplish this is *seriously* slow (run-time increased
*   by a factor of about 3). This double precision version
*   has been tested against an integer implementation that
*   uses long integers (non-standard and, again, slow) -
*   the output was identical up to the 16th decimal place
*   after 10^10 calls, so we're probably OK ...
*
DOUBLE PRECISION ZBQLU01,DUMMY,B,C,ZBQLIX(43),X,B2,BINV
INTEGER CURPOS,ID22,ID43

COMMON /ZBQL0001/ ZBQLIX,B,C
SAVE /ZBQL0001/
SAVE CURPOS,ID22,ID43
DATA CURPOS,ID22,ID43 /1,22,43/

B2 = B
BINV = 1.0D0/B
5  X = ZBQLIX(ID22) - ZBQLIX(ID43) - C
IF (X.LT.0.0D0) THEN
  X = X + B
  C = 1.0D0
ELSE

```

```

C = 0.0D0
ENDIF
ZBQLIX(ID43) = X
*
* Update array pointers. Do explicit check for bounds of each to
* avoid expense of modular arithmetic. If one of them is 0 the others
* won't be
*
CURPOS = CURPOS - 1
ID22 = ID22 - 1
ID43 = ID43 - 1
IF (CURPOS.EQ.0) THEN
  CURPOS=43
ELSEIF (ID22.EQ.0) THEN
  ID22 = 43
ELSEIF (ID43.EQ.0) THEN
  ID43 = 43
ENDIF
*
* The integer arithmetic there can yield X=0, which can cause
* problems in subsequent routines (e.g. ZBQLEXP). The problem
* is simply that X is discrete whereas U is supposed to
* be continuous - hence if X is 0, go back and generate another
* X and return X/B^2 (etc.), which will be uniform on (0,1/B).
*
IF (X.LT.BINV) THEN
  B2 = B2*B
  GOTO 5
ENDIF

ZBQLU01 = X/B2

END
*****
FUNCTION ZBQLUAB(A,B)
*
* Returns a random number uniformly distributed on (A,B)
*
DOUBLE PRECISION A,B,ZBQLU01,ZBQLUAB
*
* Even if A > B, this will work as B-A will then be -ve
*
IF (A.NE.B) THEN
  ZBQLUAB = A + ( (B-A)*ZBQLU01(0.0D0) )
ELSE
  ZBQLUAB = A
  WRITE(*,1)
ENDIF
1  FORMAT(/5X,'****WARNING**** (function ZBQLUAB) Upper and ',
+'lower limits on uniform',/5X,'distribution are identical',/)
END
*****
FUNCTION ZBQLEXP(MU)

```

```

*
*   Returns a random number exponentially distributed with
*   mean MU
*
DOUBLE PRECISION MU,ZBQLEXP,ZBQLU01

ZBQLEXP = 0.0D0

IF (MU.LT.0.0D0) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF

ZBQLEXP = -DLOG(ZBQLU01(0.0D0))*MU

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLEXP',/)

END
*****
FUNCTION ZBQLNOR(MU,SIGMA)
*
*   Returns a random number Normally distributed with mean
*   MU and standard deviation |SIGMA|, using the Box-Muller
*   algorithm
*
DOUBLE PRECISION THETA,R,ZBQLNOR,ZBQLU01,PI,MU,SIGMA
DOUBLE PRECISION SPARE
INTEGER STATUS
SAVE STATUS,SPARE,PI
DATA STATUS /-1/

IF (STATUS.EQ.-1) PI = 4.0D0*DATAN(1.0D0)

IF (STATUS.LE.0) THEN
THETA = 2.0D0*PI*ZBQLU01(0.0D0)
R = DSQRT( -2.0D0*DLOG(ZBQLU01(0.0D0)) )
ZBQLNOR = (R*DCOS(THETA))
SPARE = (R*DSIN(THETA))
STATUS = 1
ELSE
ZBQLNOR = SPARE
STATUS = 0
ENDIF

ZBQLNOR = MU + (SIGMA*ZBQLNOR)

END
*****
FUNCTION ZBQLBIN(N,P)
*
*   Returns a random number binomially distributed (N,P)
*
DOUBLE PRECISION P,ZBQLBET1

```

```
DOUBLE PRECISION PP,PPP,G,Y,TINY
INTEGER N,ZBQLBIN,ZBQLGEO,IZ,NN
```

```
TINY = 1.0D-8
ZBQLBIN = 0
```

```
IF (.NOT.( (P.GE.0.0D0).AND.(P.LE.1.0D0) )) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ELSEIF(N.LE.0) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF
```

```
*
* First step: if NP > 10, say, things will be expensive, and
* we can get into the right ballpark by guessing a value for
* ZBQLBIN (IZ, say), and simulating Y from a Beta distribution
* with parameters IZ and NN-IZ+1 (NN starts off equal to N).
* If Y is less than PP (which starts off as P) then the IZth order
* statistic from NN U(0,1) variates is less than P, and we know
* that there are at least IZ successes. In this case we focus on
* the remaining (NN-IZ) order statistics and count how many are
* less than PP, which is binomial (NN-IZ,(PP-Y)/(1-Y)).
* Otherwise, if Y is greater than PP there must be less
* than IZ successes, so we can count the number of order statistics
* under PP, which is binomial (IZ-1,P/Y). When we've got NN*PP
* small enough, we go to the next stage of the algorithm and
* generate the final bits directly.
```

```

NN = N
PP = P
10 IZ = INT(DBLE(NN)*PP) + 1
IF ( (IZ.GT.10).AND.(IZ.LT.NN-10) ) THEN
Y = ZBQLBET1(DBLE(IZ),DBLE(NN-IZ+1))
IF (Y.LT.PP) THEN
ZBQLBIN = ZBQLBIN + IZ
NN = NN - IZ
PP = (PP-Y) / (1.0D0-Y)
ELSE
NN = IZ-1
PP = PP/Y
ENDIF
GOTO 10
ENDIF
```

```
*
* PP is the probability of the binomial we're currently
* simulating from. For the final part, we simulate either number
* of failures or number of success, depending which is cheaper.
```

```
20 IF (PP.GT.0.5) THEN
PPP = 1.0D0-PP
ELSE
PPP = PP
ENDIF
```

```

G = 0
IZ = 0
*
* ZBQLGEO falls over for miniscule values of PPP, so ignore these
* (tiny probability of any successes in this case, anyway)
*
IF (PPP.GT.TINY) THEN
30  G = G + ZBQLGEO(PPP)
    IF (G.LE.NN) THEN
        IZ = IZ + 1
        GOTO 30
    ENDIF
ENDIF

IF (PP.GT.0.5) IZ = NN - IZ
ZBQLBIN = ZBQLBIN + IZ

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+ ' ZBQLBIN',/)
END
*****
FUNCTION ZBQLGEO(P)
*
* Returns a random number geometrically distributed with
* parameter P ie. mean 1/P
*

DOUBLE PRECISION P,ZBQLU01,U,TINY
INTEGER ZBQLGEO

TINY = 1.0D-12
ZBQLGEO = 0

IF (.NOT.( (P.GE.0.0D0).AND.(P.LE.1.0D0) )) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF

IF (P.GT.0.9D0) THEN
10  ZBQLGEO = ZBQLGEO + 1
    U = ZBQLU01(0.0D0)
    IF (U.GT.P) GOTO 10
ELSE
    U = ZBQLU01(0.0D0)
*
* For tiny P, 1-p will be stored inaccurately and log(1-p) may
* be zero. In this case approximate log(1-p) by -p
*

IF (P.GT.TINY) THEN
    ZBQLGEO = 1 + INT( DLOG(U)/DLOG(1.0D0-P) )
ELSE
    ZBQLGEO = 1 + INT(-DLOG(U)/P)
ENDIF

```



```

ENDIF

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
  +' ZBQLGEO',/)
  END
*****
FUNCTION ZBQLPOI(MU)
*
*   Returns a random number Poisson distributed with mean MU
*

DOUBLE PRECISION ZBQLU01,X,Y,MU,PI
DOUBLE PRECISION ZBQLLG,ZBQLGAM,MU1,TMP1,TMP2,T
INTEGER ZBQLPOI,ZBQLBIN,K,INIT
SAVE INIT,PI
DATA INIT /0/

IF (INIT.EQ.0) THEN
  PI = 4.0D0*DATAN(1.0D0)
  INIT = 1
ENDIF

ZBQLPOI = 0

IF (MU.LT.0.0D0) THEN
  WRITE(*,1)
  RETURN
ENDIF
*
*   For small MU, generate exponentials till their sum exceeds 1
*   (equivalently, uniforms till their product falls below e^-MU)
*

IF (MU.LE.1.0D3) THEN
  MU1 = MU
*
*   For values of MU less than 1000, use order statistics - the Kth
*   event in a Poisson process of rate MU has a Gamma distribution
*   with parameters (MU,K); if it's greater than 1 we know that there
*   are less than K events in (0,1) (and the exact number is binomial)
*   and otherwise the remaining number is another Poisson. Choose K so
*   that we'll get pretty close to 1 in the first go but are unlikely
*   to overshoot it.
*

19 IF (MU1.GT.1.0D1) THEN
  K = INT(MU1-DSQRT(MU1))
  Y = ZBQLGAM(DBLE(K),MU1)
  IF (Y.GT.1.0D0) THEN
    ZBQLPOI = ZBQLPOI + ZBQLBIN(K-1,(1.0D0/Y))
    RETURN
  ENDIF
  ZBQLPOI = ZBQLPOI + K
  MU1 = MU1 * (1.0D0-Y)
  GOTO 19
ENDIF

```

```

Y = DEXP(-MU1)
X = 1.0D0
20 X = X*ZBQLU01(0.0D0)
   IF (X.GT.Y) THEN
       ZBQLPOI = ZBQLPOI + 1
       GOTO 20
   ENDIF
*
* For really huge values of MU, use rejection sampling as in
* Press et al (1992) - large numbers mean some accuracy may be
* lost, but it caps the execution time.
*
ELSE
TMP1 = DSQRT(2.0D0*MU)
TMP2 = ZBQLLG(MU+1.0D0)-(MU*DLOG(MU))
30 Y = DTAN(PI*ZBQLU01(0.0D0))
   ZBQLPOI = INT(MU + (TMP1*Y))
   IF (ZBQLPOI.LT.0) GOTO 30
   X = DBLE(ZBQLPOI)
   T = (X*DLOG(MU)-ZBQLLG(X+1.0D0)) + TMP2
   IF (DABS(T).LT.1.0D2) THEN
       T = 0.9D0*(1.0D0+(Y*Y))*DEXP(T)
       IF (ZBQLU01(0.0D0).GT.T) GOTO 30
   ELSE
       T = DLOG(0.9D0*(1.0D0+(Y*Y))) + T
       IF (DLOG(ZBQLU01(0.0D0)).GT.T) GOTO 30
   ENDIF
ENDIF

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+ ' ZBQLPOI',/)
   END
*****
FUNCTION ZBQLGAM(G,H)
*
* Returns a random number with a gamma distribution with mean
* G/H and variance G/(H^2). (ie. shape parameter G & scale
* parameter H)
*
DOUBLE PRECISION C,D,R,ZBQLGAM,ZBQLU01,G,H,A,z1,z2,B1,B2,M
DOUBLE PRECISION U1,U2,U,V,TEST,X
double precision c1,c2,c3,c4,c5,w

ZBQLGAM = 0.0D0

IF ( (G.LE.0.0D0).OR.(H.LT.0.0D0) ) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF

IF (G.LT.1.0D0) THEN
889 u=ZBQLU01(0.0d0)
v=ZBQLU01(0.0d0)
if (u.gt.exp(1.0d0)/(g+exp(1.0d0))) goto 891

```

```

ZBQLGAM=((g+exp(1.0d0))*u/exp(1.0d0))**(1.0d0/g)
if (v.gt.exp(-ZBQLGAM)) then
  goto 889
else
  goto 892
endif
891 ZBQLGAM=-log((g+exp(1.0d0))*(1.0d0-u)/(g*exp(1.0d0)))
if (v.gt.ZBQLGAM**(g-1.0)) goto 889
892 ZBQLGAM=ZBQLGAM/h
RETURN
ELSEIF (G.LT.2.0D0) THEN
M = 0.0D0
elseif (g.gt.10.0d0) then
c1=g-1.0d0
c2=(g-1.0d0/(6.0d0*g))/c1
c3=2.0d0/c1
c4=c3+2.0d0
c5=1.0d0/sqrt(g)
777 u=ZBQLU01(0.0d0)
v=ZBQLU01(0.0d0)
if (g.gt.2.50d0) then
u=v+c5*(1.0d0-1.860d0*u)
endif
if (u.le.0.0d0.or.u.ge.1.0d0) goto 777
w=c2*v/u
if (c3*u+w+1.0d0/w.le.c4) goto 778
if (c3*log(u)-log(w)+w.ge.1.0d0) goto 777
778 ZBQLGAM=c1*w/h
return
ELSE
M = -(G-2.0D0)
ENDIF
R = 0.50D0
a = ((g-1.0d0)/exp(1.0d0))**((g-1.0d0)/(r+1.0d0))
C = (R*(M+G)+1.0D0)/(2.0D0*R)
D = M*(R+1.0D0)/R
z1 = C-DSQRT(C*C-D)
*
* On some systems (e.g. g77 0.5.24 on Linux 2.4.24), C-DSQRT(C*C)
* is not exactly zero - this needs trapping if negative.
*
IF ((Z1-M.LT.0.0D0).AND.(Z1-M.GT.-1.0D-12)) Z1 = M
z2 = C+DSQRT(C*C-D)
B1=(z1*(z1-M)**(R*(G-1.0D0)/(R+1.0D0)))*DEXP(-R*(z1-M)/(R+1.0D0))
B2=(z2*(z2-M)**(R*(G-1.0D0)/(R+1.0D0)))*DEXP(-R*(z2-M)/(R+1.0D0))
50 U1=ZBQLU01(0.0D0)
U2=ZBQLU01(0.0D0)
U=A*U1
V=B1+(B2-B1)*U2
X=V/(U**R)
IF (X.LE.M) GOTO 50
TEST = ((X-M)**((G-1)/(R+1)))*EXP(-(X-M)/(R+1.0D0))
IF (U.LE.TEST) THEN
ZBQLGAM = (X-M)/H

```

```

ELSE
  GOTO 50
ENDIF
1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLGAM',/5X, '(both parameters must be positive)',/)

END
*****
FUNCTION ZBQLBET1(NU1,NU2)
*
*   Returns a random number, beta distributed with degrees
*   of freedom NU1 and NU2.
*
DOUBLE PRECISION NU1,NU2,ZBQLGAM,ZBQLBET1,ZBQLU01,X1,X2

ZBQLBET1 = 0.0D0

IF ( (NU1.LE.0.0).OR.(NU2.LE.0.0) ) THEN
  WRITE(*,1)
  RETURN
ENDIF
*
*   If parameters are too small, gamma subroutine tends to return zero
*   as all the probability goes to the origin and we get rounding
*   errors, even with double precision. In this case, we use Johnk's
*   method, suitably scaled to avoid rounding errors as much as possible.
*

IF ( (NU1.LT.0.9D0).AND.(NU2.LT.0.9D0) ) THEN
10  X1 = ZBQLU01(0.0D0)
    X2 = ZBQLU01(0.0D0)
    IF ( (X1**(1.0D0/NU1))+X2**(1.0D0/NU2)).GT.1.0D0) GOTO 10
    X1 = (DLOG(X2)/NU2) - (DLOG(X1)/NU1)
    ZBQLBET1 = (1.0D0 + DEXP(X1))**(-1)
    IF (ZBQLBET1.GT.1.0D0) GOTO 10
ELSE
  X1 = ZBQLGAM(NU1,1.0D0)
  X2 = ZBQLGAM(NU2,1.0D0)
  ZBQLBET1 = X1/(X1+X2)
ENDIF

RETURN

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLBET1',/5X,
+'(both degrees of freedom must be positive)',/)

END
*****
FUNCTION ZBQLWEI(A,B)
*
*   Returns a random number, Weibull distributed with shape parameter
*   A and location parameter B, i.e. density is
*    $f(x) = ( A/(B**A) ) * x**(A-1) * EXP( -(x/B)**A )$ 

```

```

*
DOUBLE PRECISION A,B,ZBQLU01,ZBQLWEI,U

ZBQLWEI = 0.0D0

IF ( (A.LE.0.0).OR.(B.LE.0.0) ) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF

U = ZBQLU01(0.0D0)
ZBQLWEI = B * ( (-DLOG(U))**(1.0D0/A) )

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLWEI',/5X,
+'(both parameters must be positive)',/)
END
*****
FUNCTION ZBQLNB(R,P)
*
*   Returns a pseudo-random number according to a Negative
*   Binomial distribution with parameters (R,P). NB these are
*   both DOUBLE - it copes with non-integer R as well. The
*   form of the distribution is *not* the no. of trials to
*   the Rth success - see documentation for full spec.
*
DOUBLE PRECISION R,P,ZBQLGAM,Y
INTEGER ZBQLNB,ZBQLPOI

ZBQLNB = 0

IF ( (R.LE.0.0D0).OR.(P.LE.0.0D0).OR.(P.GE.1.0D0) ) THEN
WRITE(*,1)
RETURN
ENDIF

Y = ZBQLGAM(R,1.0D0)
Y = Y*P/(1.0D0-P)
ZBQLNB = ZBQLPOI(Y)

1  FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',
+' ZBQLNB')
END
*****
FUNCTION ZBQLPAR(A,B)
*
*   Returns a random number, Pareto distributed with parameters
*   A and B. The density is  $A*(B**A) / (B+X)**(A+1)$  for  $X > 0$ .
*   (this is slightly nonstandard - see documentation in
*   randgen.txt). The algorithm is straightforward - it uses the
*   inverse CDF method.
*
DOUBLE PRECISION A,B,ZBQLPAR,ZBQLU01,U

```

```
ZBQLPAR = 0.0D0
```

```
IF ( (A.LE.0.0D0).OR.(B.LE.0.0D0) ) THEN  
WRITE(*,1)  
RETURN  
ENDIF
```

```
U = ZBQLU01(0.0D0)  
ZBQLPAR = B * (U**(-1.0D0/A)-1.0D0)
```

```
1 FORMAT(/5X,'****ERROR**** Illegal parameter value in ',  
+' ZBQLPAR',/5X,  
+'(both parameters must be positive)',/)  
END
```

```
*****
```

```
FUNCTION ZBQLLG(X)
```

```
*
```

```
* Returns log(G(X)) where G is the Gamma function. The algorithm is  
* that given in Press et al (1992), Section 6.1, although this  
* version also allows for arguments less than 1.  
*
```

```
DOUBLE PRECISION X,Z,Z2,ZBQLLG,PI,RLN2P,C(0:6),TMP,SUM  
INTEGER INIT,I
```

```
SAVE INIT,C,RLN2P,PI
```

```
DATA INIT /0/
```

```
DATA (C(I),I=0,6) /
```

```
+ 1.000000000190015D0,76.18009172947146D0,  
+ -86.50532032941677D0,24.01409824083091D0,  
+ -1.231739572450155D0,0.1208650973866179D-2,  
+ -0.5395239384953D-5/
```

```
IF (INIT.EQ.0) THEN  
PI = 4.0D0*DATAN(1.0D0)  
RLN2P = 0.5D0*DLOG(2.0D0*PI)  
INIT = 1  
ENDIF
```

```
*
```

```
* Compute for x > 1, then use transformation if necessary. Z is  
* our working argument.  
*
```

```
IF (X.GE.1.0D0) THEN  
Z = X  
ELSE  
Z = 2.0D0-X  
Z2 = 1.0D0-X  
ENDIF
```

```
IF (DABS(Z-1.0D0).LT.1.0D-12) THEN  
ZBQLLG = 0.0D0  
RETURN  
ENDIF
```

```
TMP = Z + 4.5D0  
TMP = ( (Z-0.5D0)*DLOG(TMP) ) - TMP + RLN2P
```

```
SUM = C(0)
DO 50 I=1,6
  SUM = SUM + (C(I)/(Z+DBLE(I-1)))
50 CONTINUE
ZBQLLG = TMP + DLOG(SUM)
*
* Transformation required if X<1
*
IF (X.LT.1.0D0) THEN
  TMP = PI*Z2
  ZBQLLG = DLOG(TMP/DSIN(TMP)) - ZBQLLG
ENDIF

END
```

## KAYNAKLAR

Analyzing Digital Images – ADI16, 2016, <https://www.umassk12.net/adi/>

Andresen, P. L., Ayhan, A., Catlin, G., Catlin, B., & Miller, W. D. 2004. "Development and the Use of a Lee James Surface Cracked Specimen for Evaluating Chemistry and Flow Rate Effects in Realistic Cracks". In CORROSION 2004. NACE International.

ANSYS Version 12.0. 2009. Ansys Inc., Canonsburg, PA, USA.

Annis, C. 2004. "Probabilistic life prediction isn't as easy as it looks." In *Probabilistic aspects of life prediction*. ASTM International.

ASTM International, 2013. "E399-12, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials".

ASTM International, 2014. "E647 – 13, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates".

Avcı, A., Akdemir, A., Arıkan, H. 2005. "Mixed-mode fracture behavior of glass fiber reinforced polymer concrete". *Cem Concr Res*, 35(2):243–7.

Avram, J. 2006. "Round Robin Fatigue Crack Growth Testing Results" (No. USAFA-TR-2006-10). Air Force Academy Colorado Springs Co Center For Aircraft Structural Life Extension.

Ayatollahi, M. R., Saboori, B. 2015. "A new fixture for fracture tests under mixed mode I/III loading". *Eur J Mech A Solids*, 51:67–76.

Ayhan, A. O., Nied, H. F. 2002. "Stress intensity factors for three-dimensional surface cracks using enriched finite elements". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 54(6), 899-921.

Ayhan, A. O. 2004. "Mixed mode stress intensity factors for deflected and inclined surface cracks in finite-thickness plates". *Engineering fracture mechanics*, 71(7-8), 1059-1079.

Ayhan, A. O. 2007. "Mixed mode stress intensity factors for deflected and inclined corner cracks in finite-thickness plates". *International Journal of Fatigue*, 29(2), 305-317.

Ayhan AO. 2011. "Simulation of three-dimensional fatigue crack propagation using enriched finite elements". *Comp. Struct.* 89:801-812.

Ayhan, A. O. 2016. "Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi-Aşama 2" Proje No: 113M407, TÜBİTAK 1001, Proje Sonuç Raporu.

Ayhan, A. O., Demir, O. 2019. "A novel test system for mixed mode-I/II/III fracture tests–Part 1: Modeling and numerical analyses". *Engineering Fracture Mechanics*, 218, 106597.

Ayhan, A. O., ve Yaren, M.F. 2020. "Effects of microstructural through-thickness non-uniformity and crack size on fatigue crack propagation and fracture of rolled Al-7075 alloy." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 43.9. 2071-2084.



Barsom, J. M. 1976. "Fatigue crack growth under variable-amplitude loading in various bridge steels." In *Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads*. ASTM International.

Bergner, F., & Zouhar, G. 2020. "A new approach to the correlation between the coefficient and the exponent in the power law equation of fatigue crack growth". *International Journal of Fatigue*, 22(3), 229-239.

Chandler, R., and P. Northrop. "Documentation for file randgen.f." (2007). [www.ucl.ac.uk/~ucakarc/work/randgen.html](http://www.ucl.ac.uk/~ucakarc/work/randgen.html)

Chang, J., Xu, J. Q., Mutoh, Y. 2006. "A general mixed-mode brittle fracture criterion for cracked materials". *Eng Fract Mech*, 73(9):1249–63.

Chang, J. B. 1980. "The Sixth Quarterly Interim Report, Improved Methods for Predicting Spectrum Loading Effects." NA-78-491-6, Rockwell International, North American Aircraft Division, Los Angeles, California.

Chang, J. B., & Hudson, C. M. (Eds.). 1981. "Methods and models for predicting fatigue crack growth under random loading (No. 748)". ASTM International

Citarella, R., Lepore, M., Shlyannikov, V., Yarullin, R. 2014. "Fatigue surface crack growth in cylindrical specimen under combined loading". *Eng Fract Mech*, 131:439–53.

Citarella, R., Lepore, M., Maligno, A., Shlyannikov, V. 2015. "FEM simulation of a crack propagation in a round bar under combined tension and torsion fatigue loading". *Frattura ed Integrità Strutturale*, 31:138–47.

Citarella, R., Giannella, V., Lepore, M., Dhondt, G. 2018. "Dual boundary element method and finite element method for mixed-mode crack propagation simulations in a cracked hollow shaft". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41.1,84-98.

Coules, H. E. 2016. "Stress intensity interaction between dissimilar semi-elliptical surface cracks". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 146, 55-64.

Davidson, B. D., Sediles, F. O. 2011. "Mixed-mode I-II-III delamination toughness determination via a shear-torsion-bending test". *Composites Part A*, 42:589–603.

Demir, O., 2016. "Üç boyutlu karışık mod kırılma kriterlerinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi ve geliştirilmesi". Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.

Demir, O., Ayhan, A. O., İriç, S. 2019. "A novel test system for mixed mode-I/II/III fracture tests—Part 2: Experiments and criterion development". *Engineering Fracture Mechanics*, 220, 106671.

Dowling, Norman E. 2012. "Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue". Pearson.

Elber, W. 1971. "The significance of fatigue crack closure. In *Damage tolerance in aircraft structures*". ASTM International.

Erdogan, F., Sih, G. 1963. "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear". *J. Basic Eng.*, 85(4),519–525.

- Frangi, A., Novati, G., Springhetti, R., Rovizzi, M. 2002. "3D fracture analysis by the symmetric Galerkin BEM". *Computational Mechanics*, 28(3-4), 220-232.
- Forman, R. G. 1972. "Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory". *Engineering Fracture Mechanics*, 4(2), 333-345.
- Forman, R. G., ve Mettu, S. R. 1990. "Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy."
- Forman, R. G., Shivakumar, V., Mettu, S. R., ve Newman, J. C. 2000. "Fatigue crack growth computer program NASGRO version 3.0. Reference Manual", NASA JSC-22267B.
- Gallagher, J. P. 1974. "A generalized development of yield zone models" (No. AFFDL-TM-FBR-74-28). Air Force Flight Dynamics Lab Wright-Patterson Afb OH.
- Grasso, M., Xu, Y., Russo, R., Rosiello, V. 2018. "Mixed mode fatigue crack propagation behaviour of aluminium F357 alloy". *Engineering Failure Analysis*, 90,463-475.
- Guozhong, C., Kangda, Z., Dongdi, W. 1996. "Analyses of embedded elliptical cracks in finite thickness plates under uniform tension". *Engineering fracture mechanics*, 54(4), 579-588.
- Hannemann, R., Köster, P., Sander, M. 2017. "Investigations on crack propagation in wheelset axles under rotating bending and mixed mode loading". *Proc Struct Integ*, 5:861–8.
- Huang, X. P., vd. 2005. "Fatigue crack growth with overload under spectrum loading." *Theoretical and applied fracture mechanics* 44.2. 105-115.
- Huang, X., Torgeir, M., & Cui, W. 2008. "An engineering model of fatigue crack growth under variable amplitude loading." *International Journal of Fatigue*, 30(1), 2-10.
- Hudson, C. M. 1981. "A root-mean-square approach for predicting fatigue crack growth under random loading." In *Methods and models for predicting fatigue crack growth under random loading*. ASTM International.
- Hyde, T. H., Aksogan, O. 1994. "A specimen for determining fracture properties under combined modes I, II, and III crack tip conditions". *J Strain Anal Eng Design*, 29(1):1–6.
- Kamat, S. V. Hirth, J. P., Mehrabian, R. 1989. "Combined mode I-Mode III fracture toughness of alumina particulate-reinforced aluminum alloy-matrix composites". *Scripta Met*, 23(4):523–8.
- Iriç, S., ve Ayhan, A. O. 2017. "Dependence of Fracture Toughness on Rolling Direction in Aluminium 7075 Alloys". *Acta Physica Polonica A*, 132(3), 892-895.
- Khan, S. U., Alderliesten, R. C., Schijve, J., & Benedictus, R. 2007. "On the fatigue crack growth prediction under variable amplitude loading". *Computational and experimental analysis of damaged materials*, 77-105.
- Kamat, S. V., Hirth, J. P. 1996. "Effect of aging on mixed-mode I/III fracture toughness of 2034 aluminum alloys". *Acta Mater*, 44(3):1047–54.
- Karpour, A., Zarrabi, K. 2010. "Mixed-mode I/II/III fracture grip interface". *Recent Pat Mech Eng*, 3:131–9.

- Krueger, R. 2004. "Virtual crack closure technique: history, approach, and applications". *Appl. Mech. Rev.*, 57(2), 109-143.
- L.A. James and W.K. Wilson, 1994. "Development of a Surface Cracked Specimen", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 20, p.115-121.
- Liao, C. Y., Atluri, S. N. 1989. "Stress intensity factor variation along a semicircular surface flaw in a finite-thickness plate". *Engineering fracture mechanics*, 34(4), 957-976.
- Lin, B., Mear, M. E., Ravi-Chandar, K. 2010. "Criterion for initiation of cracks under mixed mode I+ III loading". *Int J Fract*, 165(2):175–88.
- Liu, S., Chao, Y. J., Zhu, X. 2004. "Tensile-shear transition in mixed mode I/III fracture". *Int J Solids Struct*, 41(22):6147–72.
- Livieri, P., Segala, F. 2016. "Stress intensity factors for embedded elliptical cracks in cylindrical and spherical vessels". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 86, 260-266.
- Manoharan, M., Hirth, J. P., Rosenfield, A. R. 1989. "Combined mode I-mode III fracture toughness of a high carbon steel". *Scripta Met*, 23(5):763–6.
- Manjunatha, C. M. 2006. "Fatigue crack growth prediction under spectrum load using crack driving force  $\Delta K$ ." *AIAA journal* 44.2 396-399.
- McDonald, V., & Daniewicz, S. R. 2002. "An experimental study of the growth of surface flaws under cyclic loading." In *Fatigue and Fracture Mechanics: 32nd Volume*. ASTM International.
- Meggiolaro, M. A., & Castro, J. T. P. 2001. "Comparison of load interaction models in fatigue crack propagation." In XVI Congresso Brasileiro de Eng. Mecânica (COBEM), ABCM, Uberlândia, MG.
- Minitab, 2014. I. MINITAB release 17: Statistical software for windows. State College, PA, USA.
- Microsoft Office 2013, Excel Version 15.0, Microsoft.
- Newman, J. 1981. "A crack-closure model for predicting fatigue crack growth under aircraft spectrum loading, Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading". ASTM International.
- Newman Jr, J. C., Raju, I. S. 1981. "An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack". *Engineering fracture mechanics*, 15(1-2), 185-192.
- Okada, H., Kawai, H., Tokuda, T., Fukui, Y. 2013. "Fully automated mixed mode crack propagation analyses based on tetrahedral finite element and VCCM (virtual crack closure-integral method)". *International Journal of Fatigue*, 50,33-39.
- Okada, H., Koya, H., Kawai, H., Li, Y., Osakabe, K. 2016. "Computations of stress intensity factors for semi-elliptical cracks with high aspect ratios by using the tetrahedral finite element (fully automated parametric study)". *Engineering Fracture Mechanics*, 158, 144-166.
- Paris, P., Erdogan, F. 1963. "A critical analysis of crack propagation laws". *Journal of basic engineering*, 85(4), 528-533.

- Porter, Theodore R. 1972. "Method of analysis and prediction for variable amplitude fatigue crack growth." *Engineering Fracture Mechanics* 4.4. 717-736.
- Raju, I. S., Newman Jr, J. C. 1979. "Stress-intensity factors for a wide range of semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates". *Engineering fracture mechanics*, 11(4), 817-829.
- Rao, B. C., Srinivas, M., Kamat, S. V. 2008. "The effect of mixed mode I/III loading on the fracture toughness of Timetal 834 titanium alloy". *Mater Sci Eng A*, 476(1):162–8.
- Razavi, S. M. J., Berto, F. 2019. "A new fixture for fracture tests under mixed mode I/II/III loading". *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1–15.
- Ren, X., Guan, X. 2017. "Three dimensional crack propagation through mesh-based explicit representation for arbitrarily shaped cracks using the extended finite element method". *Engineering Fracture Mechanics*, 177,218-238.
- Rice, James R. 1968. "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks." 379-386.
- Richard, H. A., Kuna, M. 1990. "Theoretical and experimental study of superimposed fracture modes I, II and III". *Eng Fract Mech*, 35:949–60.
- Richard, H. A., Fulland, M., Buchholz, F. G., Schöllmann, M. 2003. "3D fracture criteria for structures with cracks". *Steel Res*, 74:491–7.
- Richard, H. A., Schramm, B., Schirmeisen, N. H. 2014. "Cracks on mixed mode loading theories, experiments, simulations". *Int J Fat*, 62:93–103.
- Richard, H. A., Eberlein, A. 2016. "Material characteristics at 3D-mixed-mode-loadings". *Proc Struct Integ*, 2:1821–8.
- Richard, H. A., Eberlein, A., Kullmer, G. 2017. "Concepts and experimental results for stable and unstable crack growth under 3D-mixed-mode-loadings". *Eng Fract Mech*, 174:10–20.
- Rudd, J. L., & Engle, R. M. 1981. "Crack growth behavior of center-cracked panels under random spectrum loading." In *Methods and models for predicting fatigue crack growth under random loading*. ASTM International.
- Rybicki, E. F., & Kanninen, M. F. 1977. "A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral". *Engineering fracture mechanics*, 9(4), 931-938.
- Saboori, B., Ayatollahi, M. R. 2017. "Experimental fracture study of MWCNT/epoxy nanocomposites under the combined out-of-plane shear and tensile loading". *Polym Test*, 59:193–202.
- Safaei, S., Ayatollahi, M. R., Saboori, B. 2017. "Fracture behavior of GPPS brittle polymer under mixed mode I/III loading". *Theor Appl Fract Mech*, 91:103–15.
- Sahin, H. 2020. "Yayıllı yük altında bulunan levhalardaki eliptik karışık mod yüzey çatlaklarının FCPAS ile kırılma analizleri". *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Sander, M. 2004. "Comparison of fatigue crack growth concepts with respect to interaction effects". In *ECF15, Stockholm*.

- Sander, M., & Richard, H. A. 2006. "Fatigue crack growth under variable amplitude loading Part II: analytical and numerical investigations". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 29(4), 303-319.
- Schirmeisen, N-H., Richard, H. A. 2009. "Weiterentwicklung der AFM-probe zur experimentellen analyse räumlicher mixed-mode-beanspruchung von Rissen". DVM-Bericht 241. Berlin: Deutscher Verband für Materialforschung und–prüfung e.V., p. 211–20.
- Shah, R. C., Kobayashi, A. S. 1973. "Stress intensity factors for an elliptical crack approaching the surface of a semi-infinite solid". *International Journal of Fracture*, 9(2), 133-146.
- Shah, R. C. 1974. "Fracture under combined modes in 4340 steel". In: *Fracture analysis*, ASTM STP 560. Amer. Soc. for Test. Mat., p. 29–52.
- Sheu, B. C., Song, P. S., & Hwang, S. (1995). Shaping exponent in Wheeler model under a single overload. *Engineering fracture mechanics*, 51(1), 135-143.
- Shivakumar, K. N., Tan, P. W., Newman Jr, J. C. 1988. "A virtual crack-closure technique for calculating stress intensity factors for cracked three dimensional bodies".
- Shu, Y., Li, Y., Duan, M., Yang, F. 2017. "An X-FEM approach for simulation of 3-D multiple fatigue cracks and application to double surface crack problems". *International Journal of Mechanical Sciences*, 130,331-349.
- Srinivas, M., Kamat, S. V., Rao, P. R. 2006. "Influence of dynamic strain ageing on mixed mode I/III fracture toughness of Armco iron". *Mater Sci Eng: A*, 443(1):132–41.
- Suresh, S., Tschegg, E. K. 1987. "Combined mode I-mode III fracture of fatigue-precracked alumina". *J Am Ceram Soc*, 70(10):726–33.
- Suresh, S., Shih, C. F., Morrone, A., O'Dowd, N.P. 1990. "Mixed mode fracture toughness of ceramic materials". *J Am Ceram Soc*, 73(5):1257–67.
- Tanaka K. 1974. "Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis". *Engng Fract Mech*, 6:493–507.
- Uslu, M., Demir, O., Ayhan, A. O. 2014. "Surface cracks in finite thickness plates under thermal and displacement-controlled loads–Part 2: Crack propagation". *Engineering Fracture Mechanics*, 115, 255-269.
- Walker, K. 1970. "The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum". In *Effects of environment and complex load history on fatigue life*. ASTM International.
- Wang, X., Lambert, S. B. 1995. "Stress intensity factors for low aspect ratio semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates subjected to nonuniform stresses". *Engineering Fracture Mechanics*, 51(4), 517-532.
- Wang, J. T., & Raju, I. S. 1996. "Strain energy release rate formulae for skin-stiffener debond modeled with plate elements". *Engineering Fracture Mechanics*, 54(2), 211-228.
- Wheeler, O. E. 1972. "Spectrum loading and crack growth." *Journal of basic engineering*, 94(1), 181-186,

Willenborg, J., Engle, R. M., & Wood, H. A. 1971. "A crack growth retardation model using an effective stress concept (No. AFFDL-TM-71-1-FBR)". Air Force Flight Dynamics Lab Wright-Patterson Afb OH.

Wu, W. F., & Ni, C. C. 2007. Statistical aspects of some fatigue crack growth data. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(18), 2952-2963.

Yang JN, Manning SD. 1996. "A simple second order approximation for stochastic crack growth analysis." *Engng Fract Mech*; 53: 677–86.

Yuen, B. K. C., & Taheri, F. 2006. "Proposed modifications to the Wheeler retardation model for multiple overloading fatigue life prediction". *International journal of fatigue*, 28(12), 1803-1819.

Zeinedini, A. 2018. "A novel fixture for mixed mode I/II/III fracture testing of brittle materials". *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1–16.

Zhang, S., Marissen, R., Schulte, K., Trautmann, K. K., Nowack, H., & Schijve, J. 1987. "Crack propagation studies on Al 7475 on the basis of constant amplitude and selective variable amplitude loading histories." *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 10(4), 315-332.

Zhao, T., Zhang, J., & Jiang, Y. 2008. "A study of fatigue crack growth of 7075-T651 aluminum alloy". *International Journal of Fatigue*, 30(7), 1169-1180.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ALİ OSMAN AYHAN
Proje No:	217M690
Proje Başlığı:	Kırılma Ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) - Aşama 3
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	SEDAT İRİÇ, OĞUZHAN DEMİR
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/05/2018 - 15/11/2020
Onaylanan Bütçe:	360100.0
Harcanan Bütçe:	201431.92
Öz:	<p>Bu projenin ilk aşamasında (Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) - Aşama 1, 2008-2011), temel geometrilere sahip parçalarda mod-I çatlak ilerleme analiz kabiliyetleri geliştirilmiş ve kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. Aşama 2 projesinde (2013-2016), mod-I çatlak ilerleme analiz kabiliyetleri pratik saha problemlerine uygulanarak ilave sağlamalar yapılmış, karışık mod yük altında iki ve üç boyutlu çatlak ilerleme problemleri için deneysel ve analiz yöntemleri ile iyileştirilmiş kırılma kriterleri oluşturulmuştur. Yukarıda tanımlanan çalışmalar ile karmaşık geometri ve yük altında kırılma ve çatlak ilerleme analizlerinin yapılabilmesi için gerekli yöntem ve yazılım altyapısı oluşturulmuştur.</p> <p>Bu projede, geliştirilmiş olan karışık mod analiz yetenekleri, yeni endüstriyel ve literatür problemlerine uygulanmış ve olasılık temelli iki ve üç boyutlu çatlak ilerleme deney ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, aşağıda dört temel kategoride tanımlanmaktadır;</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1) FCPAS karışık mod yük altında analiz kabiliyetlerinin enerji, ulaştırma, havacılık ve savunma alanlarında karşılaşılan kırılma ve çatlak ilerleme problemlerine uygulanması ve doğrulamalarının yapılması. Bu kapsamda, değişik uygulamalar yapılmış, tahmin edilen düzlemsel olmayan üç boyutlu çatlak ilerleme yüzeyleri referans veriler ile doğrulanmıştır.</li><li>2) Olasılık Temelli İki-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Analiz ve Deneysel Çalışmaları: Alüminyum 7075 ve standart Compact Tension (CT) numunesi kullanılarak malzeme özelliklerindeki değişkenlikler belirlenmiş, analizler yapılarak sabit ve değişken genlikli yüklemeler için mevcut yorulma çatlak ilerleme modelleri değerlendirilmiş ve iyileştirilmiş bir model önerilmiştir. Elde edilen veriler aşağıdaki üç boyutlu çatlak ilerleme analizlerinde kullanılmıştır.</li><li>3) Olasılık Temelli Üç-Boyutlu Kırılma Mekanikliği Analiz ve Deneysel Çalışmaları: Alüminyum 7075 malzemesinden yapılmış standart olmayan ve üç boyutlu mod-I yüzey çatlakları içeren numuneler kullanılarak yukarıdaki iş paketinden elde edilen veriler ile sabit ve değişken genlikli yüklemeler altında yorulma çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile sağlamaları yapılmıştır. Bağımsız bir çatlak ilerleme analiz yazılımı geliştirilmiştir.</li><li>4) FCPAS grafiksel kullanıcı ara yüzünün (GUI) güncellenmesi. Yukarıda tanımlanan gelişmeler çerçevesinde kullanıcı ara yüzünde güncellemeler yapılmıştır.</li></ol> <p>Proje kapsamında yapılan çalışmalar ile FCPAS'in mod-I ve karışık mod yük şartları altındaki kırılma ve çatlak ilerleme problemlerine uygulanabilir bir program olduğunun ispatı yapılmış, olasılık temelli çatlak ilerleme analiz kabiliyetleri geliştirilerek sağlamaları yapılmıştır. Böylece, projenin 4. aşaması olarak planlanan, yüksek sıcaklık ve değişken şartlar altında gerçekleşen kırılma problemleri çalışmalarının zemini hazırlanmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Olasılık temelli yorulma çatlak ilerlemesi, kırılma mekanikliği, sonlu elemanlar yöntemi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Evet

Projeden Yapılan Yayınlar:	<ol style="list-style-type: none"><li>1- Effects of microstructural through-thickness non-uniformity and crack size on fatigue crack propagation and fracture of rolled Al-7075 alloy (Makale - Diğer Hakemli Makale),</li><li>2- Variation in Crack Growth Properties and Its Effect on Fatigue Crack Growth Life for Al 7075-T6 (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</li><li>3- Applications on Three-Dimensional Mixed Mode Fatigue Crack Propagation Using Fracture and Crack Propagation Analysis System (FCPAS) (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</li><li>4- Three-Dimensional Mixed Mode Stress Intensity Factors for Inclined Elliptical Surface Cracks in Plates under Uniform Tensile Load (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum),</li><li>5- Evaluation of Different Crack Growth Retardation Models Under Single Overloads Using Al-7075 Material (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum),</li><li>6- Yayılı Yük Altında Bulunan Levhalardaki Eliptik Karışık Mod Yüzey Çatlaklarının FCPAS ile Kırılma Analizleri (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi),</li></ol>
----------------------------	---

TÜBİTAK