T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARIŞIK MOD YÜK ALTINDA BULUNAN ELASTİK-PLASTİK MALZEMELERİN ÜÇ BOYUTLU KIRILMA DAVRANIŞLARI İÇİN YÖNTEM VE İLGİLİ KRİTERLERİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Emre KURT

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

HAZİRAN 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARIŞIK MOD YÜK ALTINDA BULUNAN ELASTİK-PLASTİK MALZEMELERİN ÜÇ BOYUTLU KIRILMA DAVRANIŞLARI İÇİN YÖNTEM VE İLGİLİ KRİTERLERİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Emre KURT

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Ali Osman AYHAN

HAZİRAN 2024

Emre Kurt tarafından hazırlanan "Karışık mod yük altında bulunan elastik-plastik malzemelerin üç boyutlu kırılma davranışları için yöntem ve ilgili kriterlerin geliştirilmesi" adlı tez çalışması 16.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	**Prof. Dr. Serkan DAĞ** Orta Doğu Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi :	**Prof. Dr. Ali Osman AYHAN** (Danışman) Sakarya Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi :	**Prof. Dr. Hüseyin LEKESİZ** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi :	**Doç. Dr. Serdar ASLAN** Sakarya Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi :	**Dr. Öğr. Üye Sunal Ahmet PARASIZ** Sakarya Üniversitesi	.....

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum "KARIŞIK MOD YÜK ALTINDA BULUNAN ELASTİK-PLASTİK MALZEMELERİN ÜÇ BOYUTLU KIRILMA DAVRANIŞLARI İÇİN YÖNTEM VE İLGİLİ KRİTERLERİN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(……/……/20…..).

(imza)

Emre KURT

Rahmetli Annemin Hatıraları için …

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve doktora tez süreçlerimde, kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile çalışma konusunun belirlenmesi, çalışmaların gerçekleşmesi için gerekli teorik bilgilerini paylaşması, hazırlanan tezlerin her aşamasında yönlendirmesi ile çalışmaların tamamlanmasına kadar yardımlarını esirgemeyen sayın danışman hocam Prof.Dr.Ali Osman AYHAN'a teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez sürecim boyunca kırılma tokluğu deneylerinin gerçekleşmesi, deneylerin yorumlanması ve tez boyunca verdiği fikir desteğinden dolayı sayın Dr.Öğr Üyesi Mehmet Faruk Yaren'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen kırılma tokluğu deneylerini 2022-7-25-25 numaralı proje kapsamında finansal olarak destekleyen Sakarya Üniversiyesi BAPK kurumuna teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez sürecindeki desteklerinden dolayı Doç.Dr. Oğuzhan Demir ve Doç.Dr. Sedat İriç'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez süreci boyunca her dönem dikkatli ve özverili bir şekilde tezimi değerlendiren kıymetli tez izleme komitesi üyeleri, Prof.Dr.Cuma Bindal, Doç.Dr. Serdar Aslan ve Dr. Öğr Üyesi Sunal Ahmet Parasız hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez hazırlama sürecim boyunca, çalışmamı gerçekleştirmem için tanıdıkları zaman, gösterdikleri anlayış ve doğrulama testleri için sağladıkları Al-5083 malzemesi sebebiyle TIRSAN TREYLER A.Ş kurumuna, başta Ferhat Yiğit ve Bülent Yeğenoğlu olmak üzere TIRSAN TREYLER A.Ş kurumunda görev alan tüm ekip arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Her koşulda yanımda olan desteklerini ve dualarını bir gün olsun eksik etmeyen kıymetli aile fertlerime teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca bilgi ve tecrübeleri ile rehber edindiğim kıymetli kuzenim Öğr.Grv Nezih Kaya abime teşekkürlerimi sunarım.

Emre KURT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ v
TEŞEKKÜR ix
İÇİNDEKİLER xi
KISALTMALAR xv
SİMGELER xvii
TABLO LİSTESİ xix
ŞEKİL LİSTESİ xxi
ÖZET xxxix
SUMMARY xliii
1. GİRİŞ 1
1.1. Kırılma Mekaniğinin Tarihçesi ve Gelişimi 1
1.2. Kırılmada Enerji Dengesi ve Şekil Değişimi Enerji Salınım Oranı 3
1.3. Kohezif Bölge Teorisi 5
1.4. Kırılma Analizlerinin Önemi ve Analiz Yöntemleri 6
1.4.1. Yerdeğiştirme korelasyon yöntemi (DCT) 7
1.4.2. Sanal Çatlak Kapatma Yöntemi (VCCT) 8
1.4.3. Zenginleştirilmiş Elemanlar Yöntemi 10
1.4.4. J-İntegral Yöntemi 12
1.4.5. Çatlak ucu açılma yerdeğiştirmesi (CTOD) yöntemi 13
1.4.6. Sünek malzemelerde kırılma mekaniği problemleri için literatürde yapılan çalışamalar 14
2. ÜÇ-BOYUTLU KIRILMA ANALİZLERİ İÇİN ANALİZ KABİLİYETİ GELİŞTİRME 17
2.1. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) Analizleri için Kullanılan Yöntemler 17
2.1.1. ANSYS CINT komutu ile mod-I J-integral hesabı 17
2.1.2. ANSYS CINT komutu ile karışık mod yükleme içeren problemler için toplam J-Integral Hesabı 19
2.1.3. FCPAS ile Mod-I GŞF ve enerji salınım oranı hesabı 20
2.1.4. FCPAS ile karışık mod GŞF ve enerji salınım oranı hesabı 23
2.1.5. VCCT Yöntemi ile mod-I enerji salınım oranı hesabı 25
2.1.6. VCCT yöntemi ile karışık mod enerji salınım oranı hesabı 26
2.1.7. VCCT yöntemi sonuçlarının CINT ve FCPAS ile doğrulanması 27
2.2. Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) Problemleri İçin Yöntem Geliştirilmesi 29
2.2.1. Sünek malzemelerin kırılması için yapay kırılma süreci enerji oranı (AFPER) ve yapay tersinebilir yük boşaltım enerji oranı (ARUER) hesaplanması 30
2.2.2. AFPER/ARUER yöntemi için ağ yapısı hassasiyet analizleri 36
2.2.3. AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan kırılma parametrelerinin literatür verileri ile karşılaştırılması 40

2.3. Düğüm Noktası Salınım ve Yük Boşaltma Yöntemi İle Enerji Salınım Oranı Hesaplanması 46
3. AL-2024 MALZEMESİ İÇİN MEKANİK VE KARIŞIK MOD KIRILMA TOKLUĞU TESTLERİ 53
3.1. Al-2024 T351 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi 53
3.2. Mod-I Test Sistemi, Numune özellikleri ve Kırılma Tokluğu Testleri 56
3.3. Mod-I/II Test Sistemi, Numune Özellikleri Ve Kırılma Tokluğu Testleri 62
3.4. Mod-I/III Test Sistemi Numune Özellikleri ve Kırılma Tokluğu Testleri 68
3.5. Mod-I/II/III Test Sistemi, Numune Özellikleri ve Kırılma Tokluğu Testleri . 73
4. VCCT YÖNTEMİYLE GERÇEKLEŞTİRİLEN LEKM ANALİZLERİ VE KIRILMA YÜKÜ TAHMİNİ 83
4.1. Mod-I Kırılma Analizleri ve Gerilme-Şiddet Faktörü Sonuçları 83
4.2. Mod-I/II Kırılma Analizleri ve GŞF Sonuçları 85
4.3. Mod-I/III Kırılma Analizleri ve GŞF Sonuçları 94
4.4. Mod-I/II/III Kırılma Analizleri ve GŞF Sonuçları 104
5. AFPER/ARUER YÖNTEMİ İLE EPKM ANALİZLERİ 131
5.1. Mod-I Kırılma Analizleri ve AFPER ve ARUER Sonuçları 131
5.2. Mod-I/II Kırılma Analizleri ve AFPER ve ARUER Sonuçları 134
5.3. Mod-I/III Kırılma Analizleri AFPER ve ARUER Sonuçları 149
5.3.1. Mod-I/III Analizleri için Çatlak Sapma Açısı Hesaplama [57] 164
5.4. Mod-I/II/III Kırılma Analizleri AFPER ve ARUER Sonuçları 165
6. KIRILMA KRİTERİ GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI. 213
6.1. Mod-I Kırılma için Bileşik Kriter Denklemi 213
6.2. Mod-I/II Bileşik Denklem 218
6.3. Polinom Denklem Doğrulama 222
6.4. Mod-I AFPER/ARUER oranına bağlı kriter çalışması 224
6.5. Mod-I/II AFPER/ARUER Oranına Bağlı Kriter Çalışması 225
6.6. Mod-I/III AFPER/ARUER Oranına Bağlı Denklem Kriter Geliştirilmesi ... 228
6.7. Mod-I/II/III Deneyleri ile AFPER/ARUER Oranına Bağlı Denklem Doğrulama Çalışmaları. 230
6.8. AFPER/ARUER Metodu Akış Diyagramı 232
7. KIRILMA YÜKÜ TAHMİNLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI 235
7.1. Mod-I Yüklemesi İçin LEKM Analizleri ve AFPER/ARUER Oranına Bağlı Tahmin Edilen Kırılma Yükleri 235
7.2. Mod-I/II Yüklemesi İçin LEKM Analizleri ve AFPER/ARUER Oranına Bağlı Tahmin Edilen Kırılma Yükleri 237
7.3. Mod-I/III Yüklemesi İçin LEKM Analizleri ve AFPER/ARUER Oranına Bağlı Tahmin Edilen Kırılma Yükleri 243
7.4. Mod-I/II/III Yüklemesi İçin LEKM Analizleri ve AFPER/ARUER Oranına Bağlı Tahmin Edilen Kırılma Yükleri 247
8. DAHA SÜNEK BİR MALZEME İLE YÖNTEM DOĞRULAMA VE LEKM ANALİZLERİ İLE KARŞILAŞTIRMA VE MİKROYAPI ANALİZLERİ ... 255
8.1. Al-5083 Malzeme Özellikleri ve Çekme Deneyleri 255
8.2. Mod-I Kırılma Testleri 256
8.3. Mod-I/II Kırılma Testleri 256
8.4. Mod-I/III Kırılma Testleri 257
8.5. Mod-I/II/III Kırılma Testleri 257
8.6. Mod-I, Mod-I/II, Mod-I/III, Mod-I/II/III LEKM ve Elastik-Plastik Kırılma Analizleri 258

8.7. Mod-I, Mod-I/II, Mod-I/III, Mod-I/II/III Yükleri Altında LEKM GŞF ve EPKM AFPER/ARUER Oranları Kullanılarak Kırılma Yükü Tahminleri ve Deneyler ile Karşılaştırıları 272
8.8. Kırılma Yüzeylerinin Makro ve Mikro Seviye İncelenmesi 274
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 277
9.1. Sonuçlar ve değerlendirme 277
9.2. Öneriler ve Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar 278
KAYNAKLAR 279
ÖZGEÇMİŞ 283

KISALTMALAR

GŞF : Gerilme-şiddet faktörü

AFPER : Artificial fracture process energy release rate (Yapay kırılma süreci enerji salınım oranı)

$AFPER_I$: Mod-I yüklemesi sonucu oluşan artificial fracture process energy release rate (yapay kırılma süreci enerji salınım oranı)

$AFPER_{II}$: Mod-II yüklemesi sonucu oluşan artificial fracture process energy release rate (yapay kırılma süreci enerji salınım oranı)

$AFPER_{III}$: Mod-III yüklemesi sonucu oluşan artificial fracture process energy release rate (yapay kırılma süreci enerji salınım oranı)

ARUER : Artificial recoverable unloading energy release rate (Yapay tersinebilir boşaltım enerji salınım oranı)

$ARUER_I$: Mod-I yüklemesi sonucu oluşan artificial recoverable unloading energy release rate (yapay tersinebilir boşaltım enerji salınım oranı)

$ARUER_{II}$: Mod-II yüklemesi sonucu oluşan artificial recoverable unloading energy release rate (yapay tersinebilir boşaltım enerji salınım oranı)

$ARUER_{III}$: Mod-III yüklemesi sonucu oluşan artificial recoverable unloading energy release rate (yapay tersinebilir boşaltım enerji salınım oranı)

CTOD : Crack tip opening displacement (Çatlak ucu açılma miktarı)

CTCD : Crack tip combine displacement (Çatlak ucu toplam yerdeğiştirme miktarı)

FCPAS : Fracture and crack propagation analysis system (Kırılma ve çatlak ilerleme analiz sistemi)

SİMGELER

a	: Çatlak uzunluğu
K	: Gerilme-şiddet faktörü
K_I	: Mod-I yüklemesi altında oluşan gerilme şiddet faktörü
K_{II}	: Mod-II yüklemesi altında oluşan gerilme şiddet faktörü
K_{III}	: Mod-II yüklemesi altında oluşan gerilme şiddet faktörü
$K_{eş}$	: Eşdeğer gerilme şiddet faktörü
N	: Yük çevrim sayısı
σ_Y	: Akma gerilmesi
ν	: Poisson's oranı
u,v	: Yer değiştirme vektörü bileşenleri
α	: yükleme açısı
E	: Elastisite modülü
σ	: gerilme
ε	: Şekil değiştirme
R_P	: Plastik bölge yarıçapı

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Mod-I kırılma tokluğu testleri sonucu elde edilen kırılma yükleri. 61
Tablo 3.2 Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri. 67
Tablo 3.3 Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri..... 71
Tablo 3.4 Mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri. 76
Tablo 4.1. Mod-I kırılma analizleri sonucu çatlak ucu orta noktası için elde edilen en yüksek GŞF değerleri. 85
Tablo 4.2 Richard ve Demir-Ayhan kriterlerine göre Mod-I/II kırılma analizleri sonucu elde edilen en yüksek Keş değerleri 94
Tablo 4.3. Richard ve Demir-Ayhan kriterlerine göre Mod-I/III kırılma analizleri sonucu elde edilen en yüksek Keş değerleri 104
Tablo 4.4. Mod-I/II/III kırılma analizleri sonucu elde edilen Richard ve Demir-Ayhan kriterlerine göre en yüksek Keş değerleri. 129
Tablo 5.1 Mod-I kırılma analizleri sonucu elde edilen en yüksek AFPER ve ARUER değerleri..... 134
Tablo 5.2 Mod-I/II kırılma analizleri sonucu çatlak önü boyunca elde edilenen yüksek AFPER ve ARUER değerleri. 148
Tablo 5.3 Mod-I/III kırılma analizleri sonucu çatlak önü boyunca elde edilen en yüksek AFPER ve ARUER değerleri. 163
Tablo 5.4 Mod-I/II/III kırılma analizleri sonucu çatlak önü boyunca elde edilen en yüksek AFPER ve ARUER değerleri. 211
Tablo 6.1 Mod-I kırılma analizleri sonucu kırılma kriteri geliştirme aşamasında kullanılan parametreler..... 216
Tablo 6.2 Mod-I/II kırılma analizleri sonucu kırılma kriteri geliştirme aşamasında kullanılan parametreler..... 219
Tablo 6.3 Mod-I AFPER, ARUER değerleri ve AFPER/ARUER oranları. 224
Tablo 6.4 Mod-I AFPER/ARUER oran değerleri ile kritik AFPER/ARUER oranları arasındaki yüzde farklar. 225
Tablo 6.5 Mod-I/II AFPER,ARUER değerleri ve AFPER/ARUER oranları. 226
Tablo 6.6 Mod-I AFPER/ARUER oran değerleri ile kritik AFPER/ARUER oranı arasındaki fark. 227
Tablo 6.7 Mod-I/III AFPER/ARUER oranları ve kritik AFPER/ARUER oranı arasındaki fark. 229
Tablo 6.7 Mod-I/II/III AFPER/ARUER oranları ve kritik AFPER/ARUER oranı arasındaki fark. 231
Tablo 7.1 LEKM kuralları ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri ve test yükleri ile karşılaştırmaları. 236
Tablo 7.2. AFPER/ARUER yöntemi ile tahmin edilen kırılma yükü ve test yükleri ile karşılaştırmaları. 237
Tablo 7.3 Mod-I/II deneyleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I ve mod-II gerilme-şiddet faktörü değerleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörleri değerleri. 239

Tablo 7.4. LEKM kuralları ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri ve test yükü ile arasındaki fark. 240
Tablo 7.5. Sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan 12. adım ve 11. adım $(AFPER/ARUER)_{I/II}$ değerleri. 241
Tablo 7.6. AFPER/ARUER yöntemi kırılma yükü tahminleri ve test yükleri ile arasındaki yüzde farklar. 242
Tablo 7.7. Mod-I/III deneyleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I, mod-II ve mod-III gerilme-şiddet faktörü değerleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri. 245
Tablo 7.8 LEKM kuralları ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri ve yükleri ile yüzde farklar. 245
Tablo 7.9. Sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan 12.adım ve 11. adım $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerleri. 246
Tablo 7.10. AFPER/ARUER yöntemi kırılma yükü tahminleri ve test yükü ile arasındaki fark. 246
Tablo 7.11. Mod-I/II/III deneyleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I ,mod-II ve mod-III gerilme-şiddet faktörü değerleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri. 248
Tablo 7.12 LEKM kuralları ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri ve test yükü ile arasındaki yüzde farklar. 250
Tablo 7.13 Sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan 12. adım ve 11. adım $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerleri. 251
Tablo 7.14. AFPER/ARUER yöntemi kırılma yükü tahminleri, test yükleri ve yüzde farklar. 253
Tablo 8.1. AL-5083 H111 mod-I kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri. . 256
Tablo 8.2. AL-5083 H111 mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri. 256
Tablo 8.3. AL-5083 H111 mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri. 257
Tablo 8.4. AL-5083 H111 mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri sonucu kopma yükleri. 258
Tablo 8.5 AL-5083 kırılma tokluğu testleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I ,mod-II ve mod-III gerilme-şiddet faktörü ve eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri. 271
Tablo 8.6 Sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan 12.adım ve 11. adım $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerleri. 271
Tablo 8.7 LEKM kuralları ve AFPER/ARUER ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri. 273
Tablo 8.8 LEKM kuralları ve AFPER/ARUER ile tahmin edilen kırılma yükleri ile test yükleri arasındaki yüzde farklar. 273

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Dış kuvvetler altındaki çatlaklı bir parçanın perspektif resmi. 3
Şekil 1.2. Dış kuvvetler altındaki çatlaklı bir numunenin perspektif resmi ve çatlak ucundaki kohezif bölge. 5
Şekil 1.3. Kohezif bölge modeli türleri. 6
Şekil 1.4. Çatlak ucu bölgesinde sonlu elamanlar ağ yapısı. 7
Şekil 1.5. İki boyutlu (2-B) ve dört düğüm noktalı eleman için çatlak ucu bölgesi şematik resmi [11]. 8
Şekil 1.6. İki boyutlu (2-B) ve sekiz düğüm noktalı eleman için çatlak ucu bölgesi şematik resmi [11]. 9
Şekil 1.7. Üç boyutlu (3-B) ve yirmi düğüm noktalı eleman için çatlak ucu bölgesi şematik resmi [17]. 10
Şekil 1.8. Çatlak ucu bölgesinde zenginleştirilmiş elemanlar ve geçiş elemanları. .. 11
Şekil 1.9. J-integral.hesaplamaları için çatlak ucunda tanımlı yoldan bağımsız kapalı eğri. 12
Şekil 1.10. Çentik darbe deneyi numunesi. 13
Şekil 1.11. CTOD metodu 90 derece kesişme yöntemi. 14
Şekil 2.1. ANSYS CINT komutu çalışma komut satırları [41]. 18
Şekil 2.2. CTST numunesi için ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda). 18
Şekil 2.3. CTST numunesi CINT komutu ile hesaplanan Mod-I J-integral değerleri. 19
Şekil 2.4. Karışık mod yüke maruz CTST numunesi için ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda). 19
Şekil 2.5. CTST numunesi CINT komutu ile karışık mod yük altında hesaplanan J-integral değerleri 20
Şekil 2.6. FCPAS v2.2'nin arayüzü [14]. 21
Şekil 2.7. FCPAS arayüzünden "Fracture Analysis using ANSYS FE Model" butonu seçilmesi ile açılan pencere [43]. 22
Şekil 2.8. CTST numunesi ile FCPAS için ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda). 23
Şekil 2.9. CTST numunesi için FCPAS ile hesaplanan mod-I enerji salınım oranı değerleri. 23
Şekil 2.10. CTST numunesi ile FCPAS için ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda). 24
Şekil 2.11. CTST numunesi için karışık modlu problem yüklü için FCPAS ile hesaplanan enerji salınım oranı (G) değerleri. 24
Şekil 2.12. VCCT yöntemi için hazırlanan 10 kN mod-I mod-I yükü, CTST numunesi ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda). 25
Şekil 2.13. VCCT yöntemi ile hesaplanan mod-I enerji salınım oranı (G) değerleri. 25
Şekil 2.14. VCCT için CTST numunesi ile hazırlanan ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda). 26

Şekil 2.15. VCCT yöntemi ile hesaplanan karışık mod enerji salınım oranı (G) değerleri. 26
Şekil 2.16. 10 kN mod-I yükü altındaki CTST numunesi için VCCT metodu ile hesaplanan enerji salınım oranı (G) değerlerinin CINT ve FCPAS ile doğrulanması. 28
Şekil 2.17. 10 kN karışık mod yük altındaki CTST numunesi için VCCT metodu ile hesaplanan enerji salınım oranı (G) değerlerinin CINT ve FCPAS ile doğrulanması. 28
Şekil 2.18. Elastik-plastik analizler için Newton-Raphson iterasyon yöntemi. 29
Şekil 2.19. Çatlaklı bir numune için çatlak ucu civarının şematik resmi. 31
Şekil 2.20. Kırılma tokluğu testi sırasında pim yükü (P) ile B noktasındaki reaksiyon kuvvet (P_B) arasındaki ilişki. 32
Şekil 2.21. Kırılma tokluğu testi sırasında pim yükü (P) ile A noktasındaki yer değiştirme (V_A) arasındaki ilişki. 32
Şekil 2.22. Kırılma tokluğu testi sırasında B noktasındaki reaksiyon kuvvet (P_B) ile A noktasındaki yer değiştirme (V_A) arasındaki ilişki. 33
Şekil 2.23. Kırılma tokluğu testi sırasında Mi indisindeki reaksiyon kuvvet ile Ml indisindeki yer değiştirmeden dolayı oluşan AFPER değerleri. 34
Şekil 2.24. Kırılma tokluğu testi sırasında B noktasındaki reaksiyon kuvvet (P_B) ile A noktasındaki yer değiştirme (V_A) arasındaki ilişki ve ARUER tanımı. 35
Şekil 2.25. Bölüntü duyarlıklık analizleri için kullanılan malzeme özellikleri. 37
Şekil 2.26. AFPER/ARUER hesaplamaları için kullanılan ağ yapısı. 37
Şekil 2.27. CINT hesaplamaları için kullanılan ağ yapısı. 38
Şekil 2.28. AFPER/ARUER yöntemi için sonlu elemanlar analizi sonucu çatlak ucu gerilme dağılımları. 38
Şekil 2.29, Ağ hassasiyet analizleri sonucu farklı eleman boyutları için elde edilen Mod-I/II/III AFPER ve J-integral değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi. 39
Şekil 2.30. AFPER/ARUER hesaplamaları için CT numunesi sonlu elemanlar modeli. 40
Şekil 2.31. J-integral hesaplamaları için CT numunesi problemi sonlu elemanlar modeli. 41
Şekil 2.32. AFPER doğrulama çalışmaları kapsamında, CT numunesi için analiz sonuçları [45]. 41
Şekil 2.33. 25 mm çatlak içeren CT numunesi için malzeme özellikleri. 42
Şekil 2.34. CINT komutu ile J-integral metodu için hazırlanan ağ yapısı. 43
Şekil 2.35. CINT komutu ile çatlak ucu yer değiştirme miktarı (CTOD) hesabı. 43
Şekil 2.36. AFPER hesaplamaları için hazırlanan ağ yapısı. 43
Şekil 2.37. Sonlu elemanlar analizi sonucu farklı yöntemlerle hesaplanan J-integral ve AFPER değerlerinin referans ile karşılaştırılması [47]. 44
Şekil 2.38. Çatlaklı levha problemi için kullanılan gerilme – şekil değişimi diyagramı. 45
Şekil 2.39. Çatlaklı levha problemi için kullanılan sonlu elemanlar modeli. 45
Şekil 2.40. Çatlaklı levha problemi için hesaplanan AFPER değerinin referans çalışma ile hesaplanan J-integral değerleri ile karşılaştırılması [47]. 46
Şekil 2.41. Düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesaplanması sırasında yükleme ve boşaltma adımları sınır şartları [48]. 47
Şekil 2.42. Düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesaplanması için kullanılan gerilme-gerinim diyagramı. 48

Şekil 2.43. Düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesaplanması için hazırlanan sonlu elemanlar modeli..... 48
Şekil 2.44. Düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesaplanması için boşaltım sırasındaki yerdeğiştirme-reaksiyon kuvvet ilişkisi. 49
Şekil 2.45. Lineer Elastik koşullarda gerçekleştirilen bir analiz için VCCT yöntemi ve düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı yöntemi için köşe düğüm noktasının çatlak ilerleme sırasındaki yer değiştirme - reaksiyon kuvvet ilişkisi 50
Şekil 2.46. Lineer Elastik koşullarda gerçekleştirilen bir analiz için VCCT yöntemi ve düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı yöntemi için orta düğüm noktasının çatlak ilerleme sırasındaki yer değiştirme - reaksiyon kuvvet ilişkisi. 50
Şekil 2.47. Elastik –plastik koşullarda gerçekleştirilen bir analiz için AFPER yöntemi ve düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı yöntemi için köşe düğüm noktasının çatlak ilerleme sırasındaki yer değiştirme - reaksiyon kuvvet ilişkisi. 50
Şekil 2.48. Elastik –plastik koşullarda gerçekleştirilen bir analiz için AFPER yöntemi ve düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı yöntemi için orta düğüm noktasının çatlak ilerleme sırasındaki yer değiştirme - reaksiyon kuvvet ilişkisi 51
Şekil 3.1. AL 2024 T351 malzemesinin kimyasal analizi için kullanılan numune. .. 53
Şekil 3.2. AL 2024 T351 numunesi kimyasal analiz sonuçları. 54
Şekil 3.3. AL 2024 Çekme testi sonrası kırılan numune görüntüleri. 55
Şekil 3.4. AL 2024 Çekme testi sonrası gerilme – şekil değişimi diyagramları..... 55
Şekil 3.5. CT numunesi teknik resmi..... 56
Şekil 3.6. CT numunesi mod-I kırılma tokluğu testi kurulumu..... 57
Şekil 3.7. Kamera ile çekilen çatlak ilerleme görüntüsü resmi..... 58
Şekil 3.8. Mod-I kırılma tokluğu testi boyunca, yükleme pimi kuvvet – yer değiştirme grafiği. 59
Şekil 3.9. Mod-I kırılma tokluğu testi sonrası kırılma yüzeyleri. 60
Şekil 3.10. Kırılma tokluğu testi sonrası görüntü işleme programı ile çatlak boyu belirlenmesi [51]. 60
Şekil 3.11. Kırılma tokluğu testi sonrası 5 mm kalınlıklı mod-I numunelerinin görüntüleri. 61
Şekil 3.12. Kırılma tokluğu testi sonrası 10 mm kalınlıklı mod-I numunelerinin görüntüleri. 62
Şekil 3.13. Kırılma tokluğu testi sonrası 25 mm kalınlıklı mod-I numunelerinin görüntüleri. 62
Şekil 3.14. T-numune teknik resmi [52]. 63
Şekil 3.15. T-numune ve tutucusunun teknik resmi ve yükleme açıları [52]. 63
Şekil 3.16. Mod-I/II testleri için kullanılan T-numune ve T-numune tutucusunun model resimleri [52]. 64
Şekil 3.17. T-numune (solda) ve T-numune tutucusunun görüntüsü (sağda). 64
Şekil 3.18. Mod-I/II kırılma tokluğu testi sırasında farklı zaman aralıklarında çekilen çatlak ucu kamera görüntüleri. 65
Şekil 3.19. Mod-I/II kırılma tokluğu testi sırasında, yükleme pimi kuvvet-yerdeğiştirme grafiği (numune kalınlığı= 10 mm, çatlak boyu= 31.15 mm, yükleme açısı = 45^o)..... 66
Şekil 3.20. Kırılma tokluğu testi sonrası 5 mm kalınlıklı mod-I/II numunelerinin görüntüleri. 68

Şekil 3.21. Kırılma tokluğu testi sonrası 10 mm kalınlıklı mod-I/II numunelerinin görüntüleri. 68
Şekil 3.22. Kırılma tokluğu testi sonrası 20 mm kalınlıklı mod-I/II numunelerinin görüntüleri. 68
Şekil 3.23. Mod-I/III testleri için kullanılan CTT numunesi teknik resmi [53]. 69
Şekil 3.24. Mod-I/III testleri için kullanılan CTT tutucusunun teknik resmi. 69
Şekil 3.25. Mod-I/III test sistemi bileşenleri. 70
Şekil 3.26. Mod-I/III kırılma tokluğu testi sırasında farklı zaman aralıkları için çekilen çatlak ucu kamera görüntüleri. 72
Şekil 3.27. Mod-I/III kırılma tokluğu testi, yükleme pimi kuvvet-yer değiştirme grafiği (numune kalınlığı= 10 mm, çatlak boyu= 27.5 mm, yükleme açısı = 45^o) 72
Şekil 3.28. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrası gevrek [42] ve sünek kırılma yüzeylerinin eğimleri (numune sırt görüntüleri). 73
Şekil 3.29. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrası 10 mm kalınlıktaki numunelerin görüntüleri. 73
Şekil 3.30. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrası 25 mm kalınlıktaki numunelerin görüntüleri. 73
Şekil 3.31. Mod-I/II/III testlerinde kullanılan CTST numunesinin boyutları [54]. ... 74
Şekil 3.32. Mod-I/II/III test sistemi ve bileşenleri [55]. 74
Şekil 3.33. Mod-I/II/III test sistemi ve mod-I/III ve mod-III/III yükleme açıları. 75
Şekil 3.34. Mod-I/II/III kırılma tokluğu testi, yükleme pimi kuvvet-yer değiştirme grafiği (numune kalınlığı= 10 mm, çatlak boyu= 24.79 mm, mod-I/III yükleme açısı = 75^o, mod-II/III yükleme açısı =60^o). 79
Şekil 3.35. Mod-I/II/III kırılma tokluğu testi sonrası 10 mm kalınlıklı numunelerin görüntüleri. 80
Şekil 3.36. Mod-I/II/III kırılma tokluğu testi sonrası 25 mm kalınlıklı numunelerin görüntüleri. 81
Şekil 4.1. Mod-I Açılma modu problemi için hazırlanan sonlu elemanlar ağ yapısı. 84
Şekil 4.2. Mod-I Açılma modu problemi için hesaplanan GŞF değerleri. 85
Şekil 4.3. Mod-I/II kırılma analizleri için hazırlanan sonlu elemanlar ağ yapısı. 87
Şekil 4.4. Mod-I/II T numune kırılma analizleri için hazırlanan sonlu elemanlar ağ yapısı. 87
Şekil 4.5. Mod-I/II T numune problemi analiz sonucu y ekseni yer değiştirme sonuçları. 88
Şekil 4.6. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.. 88
Şekil 4.7. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 89
Şekil 4.8. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 89
Şekil 4.9. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 90
Şekil 4.10. Farklı çatlak boylarındaki, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 90
Şekil 4.11. Farklı çatlak boylarındaki, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 91
Şekil 4.12. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 91

Şekil 4.13. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.92
Şekil 4.14. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 92
Şekil 4.15. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.93
Şekil 4.16. Mod-I/III problemi sonlu elemanlar modeli ve CTT numunesinin yakın görüntüsü. 96
Şekil 4.17. Mod-I/III CTT numunesi sonlu elemanlar modeli ve çatlak ucu yakın görüntüsü. 96
Şekil 4.18. Mod-I/III CCT numunesi problemi analiz sonucu y ekseni yer değiştirme sonuçları. 97
Şekil 4.19. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.97
Şekil 4.20. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 98
Şekil 4.21. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 98
Şekil 4.22. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.99
Şekil 4.23. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 99
Şekil 4.24. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 100
Şekil 4.25. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 100
Şekil 4.26. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 101
Şekil 4.27. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 101
Şekil 4.28. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 102
Şekil 4.29. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 102
Şekil 4.30. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 103
Şekil 4.31. Mod-I/II/III problemi sonlu elemanlar modeli ve CTST numunesinin yakın görüntüsü. 107

Şekil 4.32. Mod-I/II/III CTST mod=II/III = 45^o koşulu altında mod-I/III açısının değişiminin kırılma analiz sonucu Y ekseni yer değiştirme dağılımları (mm). 107
Şekil 4.33. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 108
Şekil 4.34. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 108
Şekil 4.35. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.. 109
Şekil 4.36. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 109
Şekil 4.37. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 110
Şekil 4.38. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, kalınlıklı mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 110
Şekil 4.39. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 111
Şekil 3.40. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 111
Şekil 4.41. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 112
Şekil 4.42. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 112
Şekil 4.43. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 113
Şekil 4.44. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 113
Şekil 4.45. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, kalınlıklı mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 114
Şekil 4.46. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, kalınlıklı mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 114
Şekil 4.47. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 115

Şekil 4.48. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 115
Şekil 4.49. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 116
Şekil 4.50. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 116
Şekil 4.51. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 117
Şekil 4.52. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 117
Şekil 4.53. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 118
Şekil 4.54. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 118
Şekil 4.55. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 119
Şekil 4.56. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 119
Şekil 4.57. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 120
Şekil 4.58. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 120
Şekil 4.59. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 121
Şekil 4.60. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 121
Şekil 4.61. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 122
Şekil 4.62. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 122
Şekil 4.63. Çatlak uzunluğu yaklaşık 27 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 123

Şekil 4.64. Çatlak uzunluğu yaklaşık 27 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 123
Şekil 4.65. Çatlak uzunluğu yaklaşık 27 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 124
Şekil 4.66. Çatlak uzunluğu yaklaşık 32 mm, kalınlığı 25 mm, kalınlıklı mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 124
Şekil 4.67. Çatlak uzunluğu yaklaşık 32 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 125
Şekil 4.68. Çatlak uzunluğu yaklaşık 32 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 125
Şekil 4.69. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 126
Şekil 4.70. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 126
Şekil 4.71. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 127
Şekil 4.72. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 127
Şekil 4.73. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 128
Şekil 4.74. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları. 128
Şekil 5.1. Mod-I Açılma modu problemi için hazırlanan sonlu elemanlar ağ yapısı. 132
Şekil 5.2. Mod-I açılma modu problemleri için hesaplanan AFPER değerleri. 133
Şekil 5.3. Mod-I açılma modu problemleri için hesaplanan ARUER değerleri. 133
Şekil 5.4. Mod-I/II kırılma analizleri için hazırlanan model ve sonlu elemanlar ağ yapısı. 136
Şekil 5.5. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.. 136
Şekil 5.6. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.. 137
Şekil 5.7. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 137
Şekil 5.8. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 138
Şekil 5.9. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 138

Şekil 5.10. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 139
Şekil 5.11. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_{I}$ dağılımları. 139
Şekil 5.12. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 140
Şekil 5.13. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_{I}$ dağılımları..... 140
Şekil 5.14. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 141
Şekil 5.15. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_{I}$ dağılımları..... 141
Şekil 5.16. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 142
Şekil 5.17. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_{I}$ dağılımları..... 142
Şekil 5.18. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 143
Şekil 5.19. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_{I}$ dağılımları..... 143
Şekil 5.20. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 144
Şekil 5.21. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_{I}$ dağılımları..... 144
Şekil 5.22. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 145
Şekil 5.23. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_{I}$ dağılımları..... 145
Şekil 5.24. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 146
Şekil 5.25. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_{I}$ dağılımları..... 146
Şekil 5.26. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_{II}$ dağılımları..... 147
Şekil 5.27. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_{I}$ dağılımları..... 147
Şekil 5.28. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_{II}$ dağılımları..... 148
Şekil 5.29. Mod-I/III problemi sonlu elemanlar modeli ve CTT numunesinin yakın görüntüsü..... 151
Şekil 5.30. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_{I}$ dağılımları. 151
Şekil 5.31. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 152
Şekil 5.32. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 152
Şekil 5.33. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_{I}$ dağılımları. 153
Şekil 5.34. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 153

Şekil 5.35. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 154
Şekil 5.36. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_{I}$ dağılımları. 154
Şekil 5.37. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 155
Şekil 5.38. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 155
Şekil 5.39. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_{I}$ dağılımları. 156
Şekil 5.40. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 156
Şekil 5.41. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 157
Şekil 5.42. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_{I}$ dağılımları. 157
Şekil 5.43. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları..... 158
Şekil 5.44. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 158
Şekil 5.45. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_{I}$ dağılımları..... 159
Şekil 5.46. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 159
Şekil 5.47. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 160
Şekil 5.48. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_{I}$ dağılımları..... 160
Şekil 5.49. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları..... 161
Şekil 5.50. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 161
Şekil 5.51. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_{I}$ dağılımları..... 162
Şekil 5.52. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 162
Şekil 5.53. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 163
Şekil 5.54. Çatlak ucu yerdeğiştirmelerin ve çatlak sapma açısı hesaplaması için kullanılan terimlerin gösterimi [58]. 165
Şekil 5.54. Çatlak sapma açısı hesaplamaları [58]..... 165
Şekil 5.55. Mod-I/II/III kırılma problemi sonlu elemanlar modeli ve CTST numunesinin yakın görüntüsü. 169
Şekil 5.56. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^{o} olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_{I}$ dağılımları. 169
Şekil 5.57. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^{o} olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 170

Şekil 5.58. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 170
Şekil 5.59. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 171
Şekil 5.60. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 171
Şekil 5.61. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 172
Şekil 5.62. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 172
Şekil 5.63. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 173
Şekil 5.64. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 173
Şekil 5.65. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 174
Şekil 5.66. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 174
Şekil 5.67. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 175
Şekil 5.68. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 175
Şekil 5.69. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 176
Şekil 5.70. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 176
Şekil 5.71. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 177
Şekil 5.72. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 177
Şekil 5.73. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 178

Şekil 5.74. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 178
Şekil 5.75. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 179
Şekil 5.76. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 179
Şekil 5.77. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 180
Şekil 5.78. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 180
Şekil 5.79. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 181
Şekil 5.80. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 181
Şekil 5.81. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 182
Şekil 5.82. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 182
Şekil 5.83. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 183
Şekil 5.84. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 183
Şekil 5.85. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 184
Şekil 5.86. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 184
Şekil 5.87. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 185
Şekil 5.88. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 185
Şekil 5.89. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 186

Şekil 5.90. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 186
Şekil 5.91. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 187
Şekil 5.92. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 187
Şekil 5.93. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 188
Şekil 5.94. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 188
Şekil 5.95. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 189
Şekil 5.96. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 189
Şekil 5.97. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 190
Şekil 5.98. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 190
Şekil 5.99. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 191
Şekil 5.100. 3 Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 191
Şekil 5.101. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 192
Şekil 5.102. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 192
Şekil 5.103. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 193
Şekil 5.104. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 193
Şekil 5.105. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 194

Şekil 5.106. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 194
Şekil 5.107. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 195
Şekil 5.108. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 195
Şekil 5.109. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 196
Şekil 5.110. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 196
Şekil 5.111. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 197
Şekil 5.112. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 197
Şekil 5.113. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 198
Şekil 5.114. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 198
Şekil 5.115. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 199
Şekil 5.116. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 199
Şekil 5.117. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 200
Şekil 5.118. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 200
Şekil 5.119. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 201
Şekil 5.120. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 201
Şekil 5.121. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.. 202

Şekil 5.122. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.. 202
Şekil 5.123. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 203
Şekil 5.124. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 203
Şekil 5.125. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 204
Şekil 5.126. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 204
Şekil 5.127. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 205
Şekil 5.128. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 205
Şekil 5.129. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II AFPERII dağılımları. 206
Şekil 5.130. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 206
Şekil 5.131. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 207
Şekil 5.132. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 207
Şekil 5.133. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 208
Şekil 5.134. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları. 208
Şekil 5.135. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları. 209
Şekil 5.136. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları. 209
Şekil 5.127. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları. 210

Şekil 5.138. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları. 210
Şekil 5.139. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları. 211
Şekil 6.1. Görüntü işleme programı yardımıyla çatlak ucu plastik bölge alanı ve eşdeğer plastik yarıçap hesaplanması [51]. 214
Şekil 6.2. Mod-I problemleri için hesaplanan plastik bölge eşdeğer yarıçap değerleri değerleri. 215
Şekil 6.3. Karışık mod kırılma analizleri için çatlak ucu açılma miktarı ($CTOD_I$), çatlak ucu kayma yerdeğiştirme miktarı ($CTSD_{II}$) ve çatlak ucu yırtılma yerdeğiştirmesi hesaplanması ($CTTD_{III}$). 215
Şekil 6.4. Polinom kriter geliştirme çalışmaları için AFPER/ARUER ve $CTOD/R_P$ oranına bağlı mod-I kırılma tokluğu analizleri ile geliştirilen denklem.. 216
Şekil 6.5. Mod-I bileşik kriter denklemi sonuçları 217
Şekil 6.6. Mod-I entegre denklem arttırımlı yükleme adım sonuçları. 218
Şekil 6.7. Numune kalınlığı 5 mm, çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm olan mod-I/II problemleri için hesaplanan plastik bölge alanları değerleri. 220
Şekil 6.8. Polinom kriter geliştirme çalışmaları için AFPER/ARUER ve $CTCD/R_P$ oranına bağlı mod-I/II kırılma tokluğu analizleri ile geliştirilen denklem. 220
Şekil 6.9. Mod-I/II Entegre polinom denklem kriter sonuçları. 221
Şekil 6.10. Mod-I ve Mod-I/II Entegre polinom denklem kriter sonuçları karşılaştırmaları. 221
Şekil 6.12. Mod-I/II bileşik kriter denkleminin doğrulama deneyleri dahil tüm mod-I kırılma deneylerin uygulaması ile elde edilen kriter değerleri. 223
Şekil 6.13. Mod-I/II Entegre polinom denklem kriter sonuçları doğrulama sonuçları ile karşılaştırmaları. 223
Şekil 6.14. Bir mod-I/II problemi için farklı yükleme adımlarında AFPER/ARUER oran kriteri sonuçları. 228
Şekil 6.15. Mod-I/III problemi farklı yükleme adımları için AFPER/ARUER oran kriteri sonuçları. 230
Şekil 6.16. Mod-I/II/III problemi farklı yükleme adımları için AFPER/ARUER oran kriteri sonuçları. 232
Şekil 6.17. AFPER/ARUER yöntemi akış diyagramı. 233
Şekil 7.1. Mod-I problemleri için AFPER/ARUER , GŞF ve ASTM E399 ile hesaplanan kırılma yükü tahminlerinin test yükü ile arasındaki ortalama farklar. 237
Şekil 7.2. Farklı kalınlıklarda mod-I/II problemleri için AFPER/ARUER , Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü ile tahmin edilen kırılma yükü tahminlerinin test yükü ile arasındaki ortalama farklar. 243
Şekil 7.3. Farklı kalınlıklarda mod-I/III problemleri için AFPER/ARUER , Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü ile tahmin edilen kırılma yükü tahminlerinin test yükü ile arasındaki ortalama farklar. 247
Şekil 7.4. Farklı kalınlıklarda mod-I/II/III problemleri için AFPER/ARUER , Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü ile

tahmin edilen kırılma yükü tahminlerinin test yüklerine göre ortalama yüzde farkları. 254
Şekil 8.1. AL 2024 Çekme testi sonrası gerilme-şekil değişimi diyagramları. 255
Şekil 8.2. AL-5083 Mod-I GŞF sonuçları. 259
Şekil 8.3. AL-5083 Mod-I/II GŞF sonuçları. 259
Şekil 8.4. AL-5083 Mod-I/III K_I GŞF sonuçları. 260
Şekil 8.5. AL-5083 Mod-I/III K_{II} GŞF sonuçları 260
Şekil 8.6. AL-5083 Mod-I/III KIII GŞF sonuçları 261
Şekil 8.7. AL-5083 Mod-I/II/III K_I GŞF sonuçları. 261
Şekil 8.8. AL-5083 Mod-I/II/III KII GŞF sonuçları 262
Şekil 8.9. AL-5083 Mod-I/II/III K_{III} GŞF sonuçları. 262
Şekil 8.10. AL-5083 Mod-I AFPER sonuçları. 263
Şekil 8.11. AL-5083 Mod-I ARUER sonuçları. 263
Şekil 8.12. AL-5083 Mod-I/II AFPER sonuçları. 264
Şekil 8.13. AL-5083 Mod-I/II ARUER sonuçları. 264
Şekil 8.14. AL-5083 Mod-I/III $AFPER_I$ sonuçları. 265
Şekil 8.15. AL-5083 Mod-I/III $AFPER_{II}$ sonuçları. 265
Şekil 8.16. AL-5083 Mod-I/III AFPERIII sonuçları 266
Şekil 8.17. AL-5083 Mod-I/III ARUERI sonuçları 266
Şekil 8.18. AL-5083 Mod-I/III $ARUER_{II}$ sonuçları. 267
Şekil 8.19. AL-5083 Mod-I/III $ARUER_{III}$ sonuçları. 267
Şekil 8.20. AL-5083 Mod-I/II/III $AFPER_I$ sonuçları. 268
Şekil 8.21. AL-5083 Mod-I/II/III $AFPER_{II}$ sonuçları. 268
Şekil 8.22. AL-5083 Mod-I/II/III $AFPER_{III}$ sonuçları. 269
Şekil 8.23. AL-5083 Mod-I/II/III $ARUER_I$ sonuçları. 269
Şekil 8.24. AL-5083 Mod-I/II/III $ARUER_{II}$ sonuçları 270
Şekil 8.25. AL-5083 Mod-I/II/III $ARUER_{III}$ sonuçları. 270
Şekil 8.26. Farklı kalınlıklarda AL-5083 numuneleri kullanılarak mod-I ve karışık mod kırılma problemleri için AFPER/ARUER , Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü ile tahmin edilen kırılma yükü tahminlerinin test yükleri ile ortalama yüzde farkları. 274
Şekil 8.27. AL-7075 [51], Al-2024 ve Al-5083 malzemeleri ile gerçekleştirilen mod-I/III kırılma tokluğu testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri. 275

KARIŞIK MOD YÜK ALTINDA BULUNAN ELASTİK-PLASTİK MALZEMELERİN ÜÇ BOYUTLU KIRILMA DAVRANIŞLARI İÇİN YÖNTEM VE İLGİLİ KRİTERLERİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Kırılma mekaniği, savunma, havacılık ve denizcilik gibi yüksek teknoloji ve güvenlik ihtiyacı olan alanlarda hayati öneme sahiptir. Mühendislik yapıları gibi çeşitli alanlarda kullanılan malzemelerin ömürlerini artırmak için malzemelerin çatlak başlangıcı ve ilerlemesi üzerine yapılan çalışmalar, katı cisimler mekaniği ve malzeme biliminin temel bir alanı olan kırılma mekaniği ile gerçekleştirilmektedir. Bu alanda yapılan analizlerde, malzemelerin mekanik davranışları çalışılarak elde edilen bilgiler kullanılmakta ve yapısal bütünlük tahmin edilmektedir. Kırılma mekaniği kullanımıyla, gevrek malzemeler için çatlak uçlarındaki eşik gerilme şiddet faktörü ve kırılma tokluğu hesabı ile çatlağın ilerleme hızını ve ani kopma kuvvetini tahmin etmek için matematiksel modeller geliştirilmekte, sünek malzemelerde ise çatlak ucundaki davranışı karakterize etmek için J-integral, çatlak ucu açılma miktarı (CTOD) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Yüksek teknoloji alanlarında kullanılan malzemelerin genellikle yüksek mukavemet ve tokluk özelliklerine sahip olması beklenmektedir. Bu malzemelerin kırılma davranışlarının doğru bir şekilde anlaşılması, muhtemel kırılma ve hasar sürecinin karakterize edilmesi için kırılma mekaniği kuralları yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde, sonlu elemanlar metodu gibi sayısal analiz yöntemleri kullanılarak yapılan modern kırılma mekaniği uygulamaları çeşitli çatlak geometrileri için çözümler ortaya koymaktadır. Böylece, çeşitli alanlardaki tasarım süreçlerinde malzeme ve geometri seçimleri yapılarak ilgili alana yönelik optimum tasarımlar gerçekleştirilebilmektedir.

Literatürde, düzlemsel gerilme, düzlem şekil değişimi ve genel üç-boyutlu yükleme koşullarında çalışan çatlaklı malzemeler için başarılı tahminsel modeller ortaya çıkaran çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazıları, küçük-ölçekli akma şartlarını içeren lineer-elastik kırılma mekaniği kurallarını kullanırken, bazı çalışmalar da elastik-plastik kırılma mekaniği alanında bulunmaktadır. Pratikte kullanılan birçok mühendislik yapısal ve makine elemanlarında yüksek tokluk gerektiğinden ve bu elemanlar genel karışık mod yüklere de maruz olduğu için, mevcut lineer-elastik kırılma mekaniği kuralları sünek malzemelerden yapılmış belirtilen elemanlar için çözüm üretememektedir. Literatürde bulunan elastik-plastik kırılma mekaniği alanındaki deneysel ve analiz odaklı çalışmalar çok büyük oranda mod-I yükleme şartları altındaki probleme odaklanmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada gerek düzlem-içi gerekse genel üç-boyutlu karışık mod yüklemeler altında bulunan ve çatlak ucunda küçük-ölçekli akmanın ötesinde daha büyük plastik deformasyon bölgesi içeren sünek metalik malzemelerin kırılma davranışları detaylı bir şekilde incelenmektedir. Çalışma kapsamında karışık mod değişik yükleme koşulları altındaki malzemelerin kırılma davranışları deneysel olarak ve lineer olmayan kapsamlı analizler ile detaylı şekilde incelenmiş ve elde edilen bilgiler ışığında doğruluğu ispat edilmiş kırılma kriterleri ve ilgili analiz yöntemi geliştirilmiştir.

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında, lineer-elastik kırılma mekaniği ve lineer olmayan elastik-plastik kırılma mekaniği uygulamalarında ortak olarak kullanılan yöntemler incelenmiş ve çıktıları karşılaştırılmıştır. İlk aşamada J-integral yöntemi ile hesaplamalar yapılmış, düzlemsel yük altında yer alan çatlakların lineer elastik analizleri açısından farklı yöntemlerden elde edilen birbirlerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ancak J-integral, sadece toplam enerji salınım oranını hesaplamaktadır. Dolayısıyla karışık mod yük altında yer alan çatlaklar için özel bir mod ayrıştırma yöntemi çalışılması gerekmektedir. Böyle bir çalışma çok kapsamlı bir bölüntü ve yüksek düzeyde formülasyon gerektirdiğinden, bu çalışmada denklem yapısı çok daha basit ve uygulanabilir olan sanal çatlak kapatmayönteminin (VCCT) elastik-plastik analizler için uyarlanmış yeni bir versiyonu kullanılmıştır. Bu yöntem, ek bir çalışma ile mod ayrıştırmasına (mode decomposing) gerek kalmaksızın çatlak ucundaki farklı deformasyon modlarına bağlı enerji salınım oranlarını lineer-elastik problemler için direkt olarak hesaplamaya izin vermektedir. Bu çalışmada elastik-plastik kırılma problemleri için uyarlanmış bir VCCT yöntemi tatbik edilmiş ve aşağıda da belirtildiği üzere AFPER (Artificial Fracture Process Energy Rate - Yapay Kırılma Süreci Enerji Oranı) olarak adlandırılmıştır.

VCCT yönteminin uygulanması amacıyla, çatlak ucundaki düğüm noktalarının, analiz sonucu yer değiştirme ve reaksiyon kuvvetleri ANSYS 12.1 programı kullanılarak hesaplanmakta ve bu değerler ile C# kullanılarak enerji salınım oranları, açılma modu (G_I), kayma modu (G_{II}) ve yırtılma modu (G_{III}) için hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji salınım oranı değerleri lineer-elastik kırılma mekaniği problemleri için başarılı sonuçlar veren FCPAS programı ile karşılaştırılmıştır. Diğer bir karşılaştırma çalışması, J-integral uygulaması ile hesaplanan toplam enerji salınım oranı değerlerinin VCCT metodu çıktısı ile karşılaştırılmasıdır. İki yöntem ile de, VCCT metodu ile hesaplanan değerlerin lineer elastik malzemeler için düşük fark ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. VCCT metodunun temel çalışma ilkesi, basit olarak çatlak ucundaki reaksiyon kuvvet – yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanı hesaplamaya odaklanmaktadır. Bu eğri, lineer elastik kırılma problemleri için doğrusaldır. Bu alanın hesabı için doğrudan üçgenin alan formülü kullanılmaktadır. VCCT yönteminin uyarlanarak, lineer olmayan elastik-plastik kırılma problemlerine uygulanabilmesi için artırımlı yükleme adımları ile lineer olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve her adımın ilgili düğüm noktaları için reaksiyon kuvvetleri ve yer değiştirmeleri hesaplanmıştır. Bu eğri adımlara bölündüğünde, ilk adımı üçgen, diğer adımları ise yamuk şeklindedir. Herbir adımın oluşturduğu alanlar ayrı ayrı hesaplanıp toplanarak, lineer olmayan elastik-plastik malzemeler için lineer olmayan reaksiyon kuvvet – yer değiştirme eğrisinin alanı hesaplanmış ve 'yapay kırılma süreci enerji oranı' (artificial fracture process energy release rate), kısaca AFPER olarak isimlendirilmiştir. Literatürde yer alan bazı mod-I J-integral çalışmaları ile AFPER sonuçları karşılaştırıldığında değerlerin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Böylece, AFPER'in sünek malzemelerin kırılma yüklerinin karakterizasyonunda kullanılabileceğine karar verilmiştir. Ancak, sünek malzemelerde kalınlık, çatlak boyu gibi değişkenler, numunenin kırılmaya karşı direncini etkilediği için, direkt olarak AFPER değerini de etkilemektedir. Dolayısıyla gevrek malzemelerde kritik gerilme şiddet faktörü (GŞF) hesaplamalarında olduğu gibi bir hesaplama ile kırılma yükü sünek malzemelerde hesaplanamaz ve bir polinom denklem veya bir ilişki bulunabilmesi için ise başka parametrelerin kullanılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu doğrultuda, çatlağın son adımındaki reaksiyon kuvvet – yer değiştirme ilişkisini lineer olarak sıfır-kuvvet ve sıfır-yer değiştirme konumuna boşaltılması varsayımı ile yeni bir parametre

geliştirilmiş ve ‘yapay tersinebilir yük boşaltım enerji oranı’ (artificial recoverable unloading energy rate), kısaca ARUER ismi verilmiştir.

Tez çalışması kapsamında farklı kalınlık, çatlak boyu ve farklı karışık mod yükleme açılarında AL-2024 T351 malzemesi ile kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen çatlak boyu ve kırılma yükleri referans alınarak hazırlanan sonlu elemanlar modelleriyle AFPER, ARUER, çatlak ucu plastik bölge yarıçapı (RP) ve çatlak ucu açılma miktarı (CTOD) değerleri hesaplanmıştır. Kırılma yüklerinin tahmin edilebilmesi adına bu dört parametre ile polinom denklemler geliştirilmiş, her ne kadar mod-I ve mod-I/II testlerinin kırılma yükü değerlerini kabul edilebilir farklar ile doğru tahmin etse de mod-III yönünde yüklerin yer aldığı problemler için dört-parametreli denklem başarısız olmuştur. Kriter geliştirme çalışmalarına direkt olarak AFPER/ARUER oranı ile devam edilmiştir. Bu bağlamda, mod-I analizlerinden hesaplanan AFPER/ARUER oranlarının ortalaması kritik AFPER/ARUER oranı olarak isimlendirilmiştir. AFPER/ARUER oranını en çok değiştiren parametre ise etkisi altında karışık mod testlerin yapıldığı yükün yönüdür. Deneylerin mod-I analizlerinde birbirine yakın olan AFPER/ARUER değerleri, mod-I/II analizlerinde de birbirine yakın ancak mod-I ortalama değerinden uzak, mod-I/III analizlerinde birbirine yakın olan oran değerleri ise mod-I ve mod-I/II ortalama değerlerinden uzaktır. Dolayısıyla mod-I/II ve mod-I/III değerleri ile regresyon analizleri yapılmış diğer mod yüklemelerinde de AFPER/ARUER değerlerinin mod-I'de hesaplanan ortalama değere yakın olması amaçlanmıştır. Hesaplanan denklem ile bağımsız mod-I/II/III testlerinin sonuçları incelenmiş ve geliştirilen kriterin tüm testler için düşük ve kabul edilebilir farklar ile kırılma yüklerini doğru tahmin ettiği görülmüştür.Yöntemin kabul edilebilir oranda Al-2024 için kırılma yükünü tahmin edebildiği teyit edildikten sonra daha sünek başka bir malzeme ile uyumluluğunun araştırılması aşamasına geçilmiştir. Bu doğrultuda Al-5083 H111 malzemesi kullanılarak bazı testler tekrarlanmış ve yöntemin daha sünek ve farklı bir malzeme için de doğru bir şekilde kullanılabilirliği gösterilmiştir. Sünek malzemeler için kırılma yükü hesaplamalarında kullanılmak üzere oluşturulan AFPER/ARUER metodu, LEKM tahminsel yöntemleri kullanılarak elde edilen kırılma yükü sonuçları ile de karşılaştırılmış ve sonuçlar arasındaki farklar değerlendirilmiştir. Özellikle daha sünek bir malzeme olan Al-5083 testleri için LEKM yöntemleri kullanılarak elde edilen kırılma yükleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında çok yüksek fark ve hatalar elde edilmiştir. Diğer yandan, deneysel kırılma yükleri AFPER/ARUER yöntemi kullanılarak ortalama %10 seviyesi içerisinde kalan farklar ile tahmin edilebilmiştir. Tezin son aşamasında ise Al-2024 malzemesinden yapılmış numunelerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntülerinin gevrek bir malzeme olan Al-7075 ve daha sünek bir malzeme olan Al-5083 ile karşılaştırmaları sunulmaktadır.

DEVELOPMENT OF METHODS AND RELATED CRİTERİA FOR THE THREE-DİMENSİONAL FRACTURE BEHAVİOR OF ELASTİC-PLASTİC MATERİALS UNDER MİXED MODE LOADİNG

SUMMARY

Fracture mechanics is of critical importance in high-tech and safety-demanding fields such as defense, aerospace, and maritime industries. Studies on the initiation and propagation of cracks in materials used in various fields, such as engineering structures, are conducted through fracture mechanics, a fundamental area of solid mechanics and materials science. In these analyses, the mechanical behaviors of materials are studied to obtain information that is used to predict structural integrity. Using fracture mechanics, mathematical models are developed to estimate the crack propagation rate and the sudden fracture force by calculating the threshold stress intensity factor and fracture toughness at crack tips for brittle materials. For ductile materials, methods such as the J-integral and Crack Tip Opening Displacement (CTOD) are used to characterize the behavior at the crack tip.

Materials used in high-tech fields are generally expected to have high strength and toughness. An accurate understanding of the fracture behavior of these materials is crucial for characterizing potential fracture and damage processes, making intensive use of the principles of fracture mechanics. Modern applications of fracture mechanics using numerical analysis methods, such as the finite element method, provide solutions for various crack geometries. This allows for the selection of materials and geometries in the design processes across various fields, leading to optimal designs specific to each application.

The literature includes studies that have produced successful predictive models for cracked materials under plane stress, plane strain, and general three-dimensional loading conditions. Some of these studies employ linear-elastic fracture mechanics principles that include small-scale yielding conditions, while others focus on elastic-plastic fracture mechanics. Since many practical engineering structural and machine elements require high toughness and are subjected to mixed-mode loads, existing linear-elastic fracture mechanics principles cannot provide solutions for elements made of ductile materials. Experimental and analysis-focused studies in the field of elastic-plastic fracture mechanics found in the literature predominantly address problems under mode-I loading conditions. Therefore, this study comprehensively examines the fracture behaviors of ductile metallic materials under mixed-mode in-plane and general three-dimensional loadings, containing larger plastic deformation regions beyond small-scale yielding at the crack tip. The study includes experimental and detailed nonlinear analyses of the fracture behaviors of materials under various mixed-mode loading conditions and develops validated fracture criteria and related analysis methods based on the obtained data.

In the scope of the thesis, methods commonly used in both linear-elastic fracture mechanics and nonlinear elastic-plastic fracture mechanics applications were examined and their outputs compared. Initially, calculations were performed using the

J-integral method, resulting in similar outcomes obtained from different methods for linear-elastic analyses of cracks under plane loading. However, the J-integral only calculates the total energy release rate. Therefore, a specific mode decomposition method is needed for cracks under mixed-mode loading. Since such a study requires a comprehensive partitioning and high-level formulation, a newly adapted version of the virtual crack closure technique (VCCT) for elastic-plastic analyses, with a much simpler and more applicable equation structure, was used in this study. This method allows direct calculation of energy release rates related to different deformation modes at the crack tip for linear-elastic problems without requiring additional mode decomposition work. The adapted VCCT method for elastic-plastic fracture problems is named AFPER (Artificial Fracture Process Energy Rate).

To apply the VCCT method, the displacements and reaction forces at the nodes at the crack tip were calculated using ANSYS 12.1 software. These values were then used to calculate the energy release rates for the opening mode (GI), sliding mode (GII), and tearing mode (GIII) using C#. The calculated energy release rate values were compared with the successful results provided by the FCPAS program for linear-elastic fracture mechanics problems. Another comparison involved the total energy release rate values calculated by the J-integral application and the output of the VCCT method. Both methods showed that the values calculated by the VCCT method were consistent with linear-elastic materials with minimal differences. The basic working principle of the VCCT method focuses on calculating the area under the reaction force-displacement curve at the crack tip. This curve is linear for linear-elastic fracture problems, and the area is calculated using the triangle area formula. To adapt the VCCT method for nonlinear elastic-plastic fracture problems, incremental loading steps with nonlinear analyses were performed, and reaction forces and displacements were calculated for each step's relevant nodes. When this curve is divided into steps, the first step forms a triangle, and subsequent steps form trapezoids. The areas formed by each step were calculated separately and summed, calculating the area under the nonlinear reaction force-displacement curve for nonlinear elastic-plastic materials, named the 'artificial fracture process energy rate' (AFPER). The results were compared with some mode-I J-integral studies in the literature, showing that the values were close to each other. Thus, AFPER was determined to be usable for characterizing the fracture loads of ductile materials. However, since variables such as thickness and crack length affect the resistance to fracture and directly impact the AFPER value in ductile materials, additional parameters are needed for a polynomial equation or relationship. Therefore, a new parameter was developed, called the 'artificial recoverable unloading energy rate' (ARUER), based on the assumption of unloading the reaction force-displacement relationship at the final step of the crack linearly to the zero-force and zero-displacement position.

Fracture toughness tests were conducted with AL-2024 T351 material with different thicknesses, crack lengths, and mixed-mode loading angles within the thesis study. Finite element models prepared based on the crack lengths and fracture loads obtained from these tests calculated AFPER, ARUER, the plastic zone radius at the crack tip (RP), and Crack Tip Opening Displacement (CTOD) values. Polynomial equations were developed with these four parameters to predict fracture loads, which accurately estimated fracture loads for mode-I and mode-I/II tests within acceptable differences, but failed for problems with mode-III loading. Criterion development studies continued directly with the AFPER/ARUER ratio. In this context, the average of the AFPER/ARUER ratios calculated from mode-I analyses was named the critical

AFPER/ARUER ratio. The load direction under which mixed-mode tests are performed is the parameter that most changes the AFPER/ARUER ratio. While AFPER/ARUER values in mode-I analyses are close to each other, values in mode-I/II analyses are also close but distant from the mode-I average value, and values in mode-I/III analyses are close to each other but distant from the mode-I and mode-I/II average values. Regression analyses were performed with mode-I/II and mode-I/III values, aiming to have AFPER/ARUER values close to the mode-I average value in other mode loadings. Independent mode-I/II/III tests' results were examined with the calculated equation, and it was observed that the developed criterion accurately predicted fracture loads for all tests with low and acceptable differences. After confirming that the method could predict fracture loads for Al-2024 within an acceptable range, the next step was to investigate its compatibility with a more ductile material. Therefore, some tests were repeated using Al-5083 H111 material, demonstrating that the method could be correctly used for a more ductile and different material. The AFPER/ARUER method developed for calculating fracture loads of ductile materials was compared with fracture load results obtained using LEFM predictive methods, and the differences were evaluated. Especially for the more ductile Al-5083 tests, fracture loads calculated using LEFM methods showed very high differences and errors when compared with experimental results. On the other hand, experimental fracture loads were predicted within differences of approximately 10% using the AFPER/ARUER method. In the final stage of the thesis, SEM images of the fracture surfaces of specimens made of Al-2024 material were compared with those of Al-7075, a brittle material, and Al-5083, a more ductile material.

1. GİRİŞ

1.1. Kırılma Mekaniğinin Tarihçesi ve Gelişimi

Mühendislik yapıları ve makine parçaları, en ince ayrıntısına kadar planlanarak tasarlanmış ve hatasız olmasına özen gösterilerek üretilmiş olsalar da, üretim aşamasında veya kullanım sırasında ortaya çıkabilen çeşitli kusurlar veya çatlaklar içerebilmektedirler. Makine elemanları, çevresel yüklerin etkisi altında, bu tür çatlaklar ve benzeri kusurların, zaman içinde yüklerin etkisiyle ilerlediği ve nihayetinde ani kırılma biçiminde hasarlara yol açabileceği bir sürece maruz kalabilir. Tasarım sırasında çeşitli emniyet faktörleri ile yapıya etkiyecek yükler dikkate alınarak en uygun malzeme seçimi ile optimum tasarım gerçekleştirilse bile malzemenin içerisinde yer alan hatalar veya imalat sırasında oluşan bazı kusurlar düşük değerlerdeki tekrarlı gerilmeler altında bile büyüyerek tasarlanan parça veya yapının kırılması gerçekleşebilir. Böyle bir problem için yapının içerisinde oluşan kusurlar iyi şekilde tahlil edilmeli, çatlak olarak değerlendirilebilecek bu kusurların hangi seviyelerdeki kuvvet etkisinde ilerlemeye başlayacağı, çatlağın ilerleme hızı ve ömrünün hesaplanması ve ani kırılma kuvvetinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda ilgili bilim dalına "kırılma mekaniği" adı verilmektedir. Yapıda oluşan çatlağın davranışının tahmin edilememesi beklenmeyen ani kırılmaların oluşması ile can ve mal kayıplarına neden olabilir. Kırılma mekaniği hesaplamaları mühendislik faaliyetlerin neredeyse tamamında kullanılabildiği gibi, yatırım maliyetlerinin çok yüksek olduğu savunma sanayi, uzay ve havacılık , enerji ve ulaştırma alanlarında kullanımı daha yoğundur. Özellikle gelişmiş ülkelerde bu bilim dalına ayırılan bütçeler yüksek seviyelerdedir. Kırılma mekaniği bilimi gerek malzeme güvenilirliği, gerekse oluşan kusurlara karşı değerlendirilecek servis ömürlerinin belirlenmesi gibi konulara cevap verebilmesi ile günümüzde oldukça yüksek seviyede ilerleme kaydetmiş ve halen çok geniş araştırma alanları bulunmaktadır. Gelecekte uzay ve havacılık, savunma sanayi ve enerji sektörlerinde kat edilen gelişmeler ile birlikte günümüzde olduğu gibi öneminin daha da artması beklenmektedir.

Kırılma mekaniği biliminin ilk izleri Leonardo da Vinci'nin (1452-1519) çalışmalarında görülebilir. Da Vinci, kırılma mekaniği bilimi için ilk bilgileri üretmiş ve bu alanda temel kavramları geliştirmiş bir öncü olarak kabul edilmektedir. Da Vinci'nin malzeme bilimi üzerine yaptığı çalışmalardan en çok bilineni, tel uzunlukları ve onların mukavemetleri arasındaki ilişki üzerine yaptığı gözlemlerdir. Da Vinci, farklı uzunluklardaki tellerin farklı yükler altında nasıl davrandığını incelemiş ve telin uzunluğunun artmasıyla mukavemetinin azaldığını gözlemlemiştir. Bu, modern mühendislikte malzeme yorulma ve kırılma mekaniğiyle ilgili çalışmaların öncüsü olarak kabul edilebilir. Sonraki yüzyılda ise Galileo Galilei (1564-1642) ve Robert Hooke (1635-1703) elastik malzemelerin kırılma davranışları için çeşitli kırılma deneyleri yapmışlardır [1].

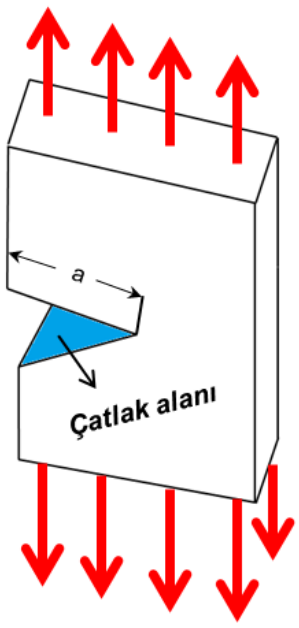
Kırılma mukevemeti ile çatlak boyutu arasındaki ilk analitik bağlantı 1920 yılında Griffith tarafından kurulmuştur [2]. Griffith termodinamiğin ilk yasasını kullanarak bir enerji dengesi modeli kurmuştur. Bu teoriye göre çatlak kararsız hale geldiğinde kırılma gerçekleşir. Bu teori cam malzemeler için oldukça doğru sonuçlar vermesine rağmen sünek davranış gösteren metallerde olan uygulamaları başarısız olmuştur. Bu nedenle bu dönemde kırılma mekaniğine gerekli önem verilememiştir [3]

İkinci dünya savaşı sırasında savaş gemilerinin kaynak bölgelerinde oluşan kusurlar ilerleyerek ani kırılmalara sebep vermiştir. Bu gemilerde yaşanan kırılma problemleri sebebiyle kırılma mekaniği bilimi popüler hale gelmeye başlamıştır. Savaş sonrasında Irwin, çatlak ucundaki plastik deformasyondan dolayı oluşan enerjiyi de hesaplamalara ekleyerek Griffith'in teorisini genişletmiştir [4]. Benzer şekilde Irwinden bağımsız olarak Orowan da benzer değişikliği Griffith teorisine uygulamıştır [5]. İlerleyen yıllarda Irwin, Griffth teorisini kullanarak enerji salınım oranı kavramını geliştirmiştir. Böylece Griffth teorisi mühendislik problemleri için daha kullanışlı hale gelmiştir [6]. Kısa bir zaman sonrasında Irwin'in meslektaşları, 1938 yılında Westergaard'ın yazmış olduğu bir çalışmayı Irwine sunmuştur. Wertergaard, keskin bir çatlağın önündeki gerilmeleri hesaplamak için bir teknik geliştirmiştir [7]. Irwin bu yaklaşımı kullanarak bugünlerde gerilme-şiddet faktörü ismini verdiğimiz bir parametre geliştirmiştir [6]. Sonrasında, Paris ve arkadaşları, gerilme-şiddet faktörünü yorulma çatlak ilerlemesi için uygulamıştır [8]. İlerleyen yıllarda Rice, çatlak önünde oluşan plastik deformasyonu karekterize etmek için J-integral ismini verdiği bir paremetre geliştirmiştir [9,10].

Kırılma mekaniği bilim alanında kullanılan sayısal yöntemler ise son 30-40 yıl içerisinde oldukça gelişmiştir. Özellikle bilgisayar yeteneklerinin ilerlemesi ile birlikte çatlak içeren problemler için karmaşık matematiksel modeller kurulabilir ve çözülebilir hale gelmiştir. Günümüzde, çatlak içeren gevrek malzemeler için çatlağın hangi yük altında ilerleyeceği, sabit veya değişken yükler altında çatlak ilerleme ömürlerinin hesaplanması ve ani kırılma kırılma yükü tahmini bazı ticari yazılımlar kullanılarak hesaplanabilmektedir. Sünek malzemeler için çatlaklı modeller hazırlanabilmekte ve J-integral değerleri hesaplanabilmektedir.

1.2. Kırılmada Enerji Dengesi ve Şekil Değişimi Enerji Salınım Oranı

Termodinamiğin birinci yasasına göre, dengesiz durumdaki bir sistem denge durumuna geçtiğinde sistemdeki toplam enerjide bir miktar azalma meydana gelir. Bu enerji çevre tarafından alınmış olabilir. Griffth bu yaklaşımı kırılma mekaniğine uygulamıştır. Çatlak ilerlemesi sırasında sistemde var olan şekil değişimi enerjisinde bir miktar azalma olacaktır. Griffth, sistemde kaybolan bu enerjinin çatlak ilerlemesi sırasında yeni yüzeyler oluşturmak için harcanan enerji ile arasındaki ilişkiyi tanımlanmıştır [3].



Şekil 1.1. Dış kuvvetler altındaki çatlaklı bir parçanın perspektif resmi.

Şekil 1.1'de dış yüke maruz bir çatlaklı bir yapının şematik görüntüsü verilmektedir. Çatlaklı bir sisteme etkiyen dış kuvvetler sonucu sistemin enerji dengesi denklem 1.1 de verilmektedir. Denklem içerisinde, malzemenin iç enerjisindeki değişim oranı (Ė),

malzemedeki kinetik enerjinin değişim oranı (K̇) ve çatlak alanının birim zamanda ilerlemesine harcanan enerji oranlarının (Γ̇) toplamı, birim zamanda uygulanan kuvvetler tarafından yapılan iş oranına (Ẇ) eşittir. Sünek malzemelerde, malzemenin iç enerjisindeki değişim oranı elastik (U^e) ve plastik (U^p) toplamı olarak hesaplanmaktadır. Denklem 1.2 ise malzemenin iç enerjilerin toplam değişim oranını vermektedir.

$$(\dot{W}) = (\dot{E}) + (\dot{K}) + (\dot{\Gamma}) \tag{1.1}$$

$$E = U^e + U^p \tag{1.2}$$

Çatlak barındıran levha problemi statik veya yarı-statik koşullar ile incelenebilir. Dolayısıyla (K̇) ihmal edilebilir. Aynı zamanda denklemin çatlak alanının değişimine göre türevi alınırsa denklem 1.3 elde edilir.

$$\frac{\partial W}{\partial A} = \left(\frac{\partial U^e}{\partial A} + \frac{\partial U^p}{\partial A}\right) + \frac{\partial \Gamma}{\partial A} \tag{1.3}$$

Gevrek bir malzeme ele alınırsa, plastik deformasyon da ihmal edilebilir. Böylece denklem 1.4 elde edilmiş olur. Denklem içerisinde G, şekil değişimi enerji salınım oranıdır. Griffith'in baş harfi 'G' ise gösterilmektedir. γ ise yüzey enerjisidir. Çatlak ilerlemesi sırasında iki yeni yüzey meydana geldiği için 2 ile çarpılmıştır.

$$G = \frac{\partial W}{\partial A} - \frac{\partial U^e}{\partial A} = \frac{\partial \Gamma}{\partial A} = 2\gamma \tag{1.4}$$

Çatlak ilerlemesinin başladığı ve sonsuz küçük ilerlemenin tamamlandığı anda yükte bir değişim yoktur ve yük noktasının yer değiştirmesi de sıfıra yakındır. Dolayısıyla birim zamanda yapılan iş ihmal edilebilir. Böylece denklem 1.5 elde edilmiş olur.

$$G = -\frac{\partial U^e}{\partial A} = \frac{\partial \Gamma}{\partial A} = 2\gamma \tag{1.5}$$

Denklem 1.6'da U^e nin formülasyonu verilmektedir. Bu formülün denklem 1.5'e uygulanması ile denklem 1.7 elde edilir. Denklem 1.7 içerisinde, μ ise kayma modülüdür. κ ise düzlem gerilme durumu için $\kappa = 3 - 4\nu$, düzlem gerinme durumu için ise $\kappa = (3-4)/(1+\nu)$ olarak alınmalıdır. κ yerine koyulduğunda düzlem gerinme durumu (Plane Strain) için denklem 1.7'de, düzlem gerilme (Plane Stress) durumu için ise denklem 1.8'de verilmektedir [11].

$$U^e = \frac{\pi . a^2 . \sigma^2}{8.\mu} (\kappa + 1) \tag{1.6}$$

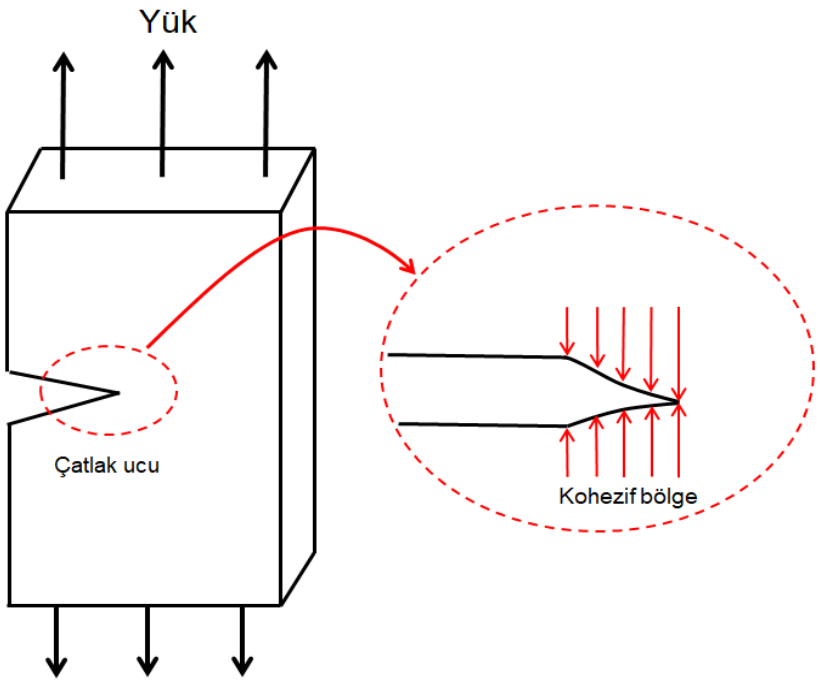
$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2.E.\gamma}{\pi * a.(1-\nu^2)}} \quad \text{(Düzlem Gerinme)} \tag{1.7}$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2.E.\gamma}{\pi * a}} \quad \text{(Düzlem Gerilme)} \tag{1.8}$$

Yukarıda verilen denklemlerden görüldüğü üzere, çatlağın kararsız ilerlemesi için gerekli olan kritik gerilme değeri, σ_c, çatlak uzunluğunun karekökü ile ters orantılıdır.

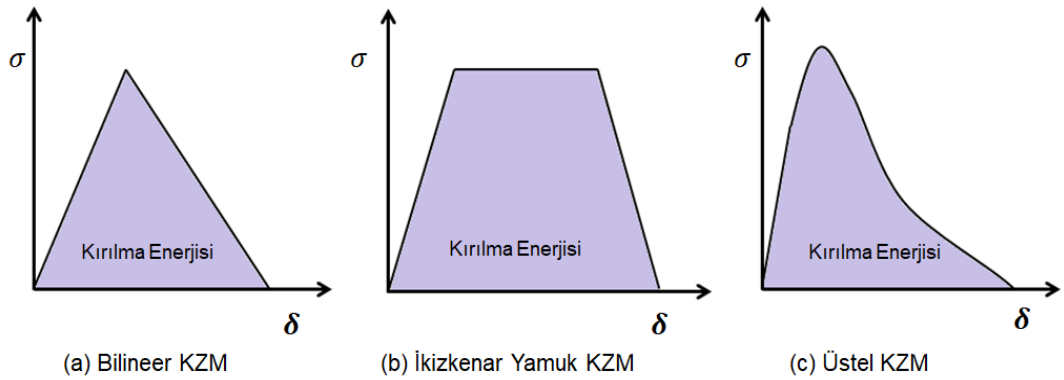
1.3. Kohezif Bölge Teorisi

Kohezif bölge modeli, katı malzemelerde çatlak ucundaki hasar sürecini karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 1.2). Kohezif bölge modeli ilk olarak elastik-plastik malzemeler için çatlak ucunda ve çatlak uçunun önündeki doğrusal olmayan davranışı açıklamak amacıyla Barenblatt [12,13] ve Dugdale [14] tarafından ortaya konulmuştur. Kohezif bölge metodunun kırılma mekaniğine uyarlanması aşamasında, çatlak ucunda doğrusal olmayan bir deformasyon bölgesi tanımlanır. Böylece, çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin modellenmesindeki süreç basitleştirilebilir. Kohezif bölge modelinin sonlu elemanlar yöntemine entegrasyonu ile çatlak başlangıcı ve ilerleme simülasyonları daha basit hale gelmiştir.



Şekil 1.2. Dış kuvvetler altındaki çatlaklı bir numunenin perspektif resmi ve çatlak ucundaki kohezif bölge.

Kohezif bölge modeli, çatlak ucundaki lineer olmayan akma bölgesi dışında, tüm yapının elastik olduğu problemler için uygulanabilir. Çatlak ucundaki akma bölgesinin büyüklüğü ve yönü ise dış yükler ve malzeme özellikleri ile ilişkilidir. Kohezif bölge modeli çatlak ucundaki gerilme-yer değiştirme ilişkisini inceler. Çatlak ucundaki gerilme-yer değiştirme ilişkisi bilineer, ikizkenar yamuk veya üstel şekilde olabilir. Şekil 1.3'te oluşabilecek bu ilişkiler grafik olarak verilmektedir [15].

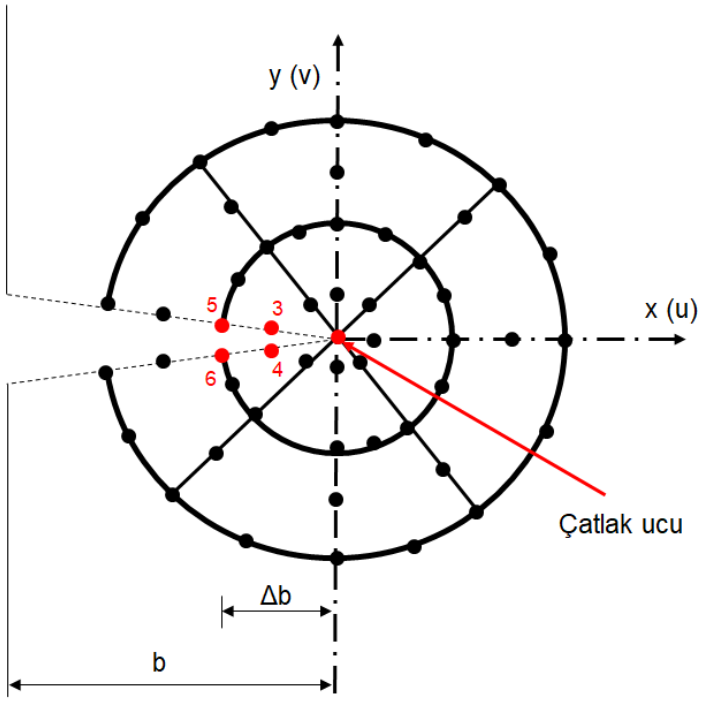


Şekil 1.3. Kohezif bölge modeli türleri.

1.4. Kırılma Analizlerinin Önemi ve Analiz Yöntemleri

Kırılma analizleri, malzeme bilimi ve yapısal mühendislikte kritik bir öneme sahiptir. Bu analizler, malzemelerin kırılma davranışlarını anlamak ve yapısal bileşenlerin ne zaman ve nasıl başarısız olacağını tahmin etmek için kullanılır. Kırılma mekaniği, malzemelerin yorulma, çatlak ilerlemesi ve ani kırılma gibi durumlar altında nasıl davrandıklarını inceleyen bir bilim dalıdır.

1.4.1. Yerdeğiştirme korelasyon yöntemi (DCT)



Şekil 1.4. Çatlak ucu bölgesinde sonlu elamanlar ağ yapısı.

Yer değiştirme korelasyon yöntemi, sonlu elamanlar analizi sonuçlarına göre hesaplanan çatlak ucundaki yerdeğiştirmeler ile gerilme-şiddet faktörü (GŞF) hesaplanması için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin kullanılabilmesi için çatlak ucunda özel bir ağ yapısı tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 1.4'te bu yöntem için kullanılan bir ağ yapısı örneğinin resmi verilmektedir. Denklem 1.9 ve 1.10'da ise gerilme-şiddet faktörü hesaplamak için kullanılan formülasyonlar verilmektedir. Denklem 1.9 ve 1.10 içerisinde μ_1 ve μ_2 denklem kökleri, S_{ij} ise kompliyans matrisidir. Denklem 1.9'da yer alan A,B,C ve D sabitlerinin hesaplanma formülü ise denklem 1.11-1.14'de verilmektedir. Bu denklemlerde yer alan $\boldsymbol{\rho}$ ve q değerleri ise denklem 1.15 ve 1.16'da verilmektedir [16].

$$K_I = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{2.\pi}{\Delta b}}\left[\frac{D(4\Delta u_{34}-\Delta u_{56})-B(4\Delta v_{34}-\Delta v_{56})}{AD-BC}\right] \tag{1.9}$$

$$K_I = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{2.\pi}{\Delta b}}\left[\frac{A(4\Delta u_{34}-\Delta u_{56})-C(4\Delta v_{34}-\Delta v_{56})}{AD-BC}\right] \tag{1.10}$$

$$A = Re\left[\frac{i}{\mu_1-\mu_2}(\mu_1.\rho_2-\mu_2.\rho_1)\right] \tag{1.11}$$

$$B = Re\left[\frac{i}{\mu_1-\mu_2}(\rho_2-\rho_1)\right] \tag{1.12}$$

$$C = Re[\frac{i}{\mu_1-\mu_2}(\mu_1.q_2 - \mu_2.q_1)] \quad (1.13)$$

$$D = Re[\frac{i}{\mu_1-\mu_2}(q_2 - q_1)] \quad (1.14)$$

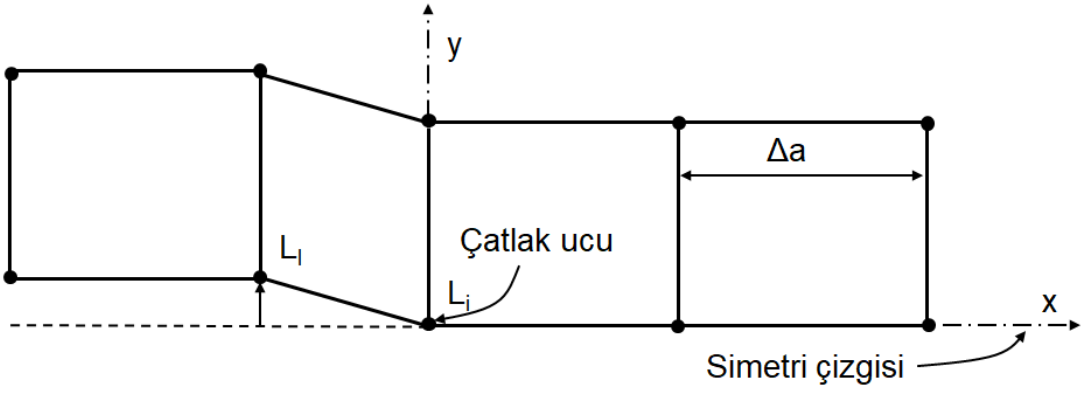
$$\rho_k = S_{11}.(\mu_k)^2 + S_{12} - S_{16}.\mu_k \quad (1.15)$$

$$q_k = S_{12}.(\mu_k)^2 + \frac{S_{22}}{\mu_k} - S_{26} \quad (1.16)$$

Gerilme-şiddet faktörünün (K) direkt olarak hesaplanabiliyor olması DCM yöntemini öne çıkarmaktadır. Formüller içerisindeki tüm veriler sonlu elemanlar analizinden alınabilmekte ve GŞF hesabı yapılabilmektedir [16].

1.4.2. Sanal Çatlak Kapatma Yöntemi (VCCT)

Elastik çatlak ilerleme problemleri için, çatlağın ilerlemesi esnasında ortaya çıkan şekil değişim enerjisi, ilerlemiş çatlağın geri kapatılması için gerekli olan enerjiye eşittir. Sanal çatlak kapatma yöntemi (Virtual crack closure technique) iki boyutlu kabuk ve üç boyutlu katı problemler için sonlu elemanlar analizlerindeki deplasman ve reaksiyon kuvvetleri kullanarak enerji salınım oranı hesaplamasını sağlayan bir yöntemdir. VCCT yönteminde direk olarak G_1, G_2 ve G_3 enerji salınım oranı değerleri herhangi ayrıştırma yöntemine gerek duymadan sonlu elemanlar analizlerinden alınan bilgiler ile hesaplanabilmektedir. Şekil 1.5'te iki boyutlu ve dört düğüm noktasına sahip elemanın resmi verilmektedir. Denklem 1.17, 1.18 ve 1.19 ise G_I, G_{II} ve G_{III} değerlerinin hesaplanmasıda dair formülleri vermektedir [17].



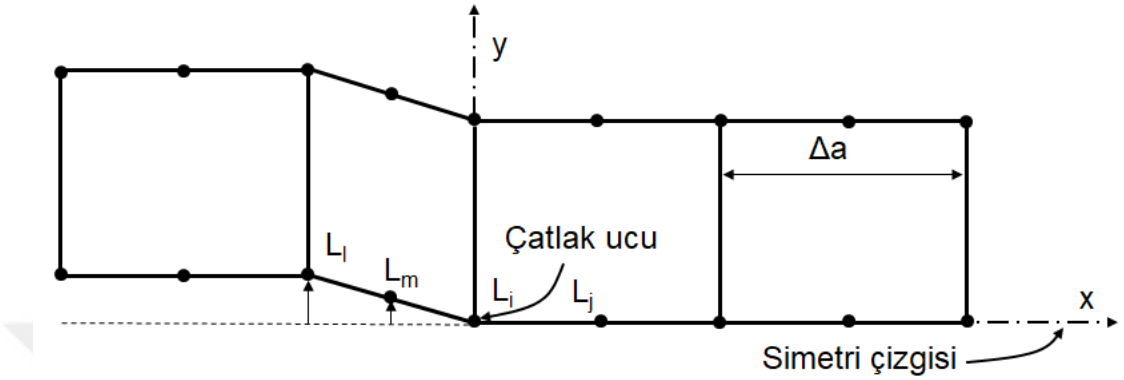
Şekil 1.5. İki boyutlu (2-B) ve dört düğüm noktalı eleman için çatlak ucu bölgesi şematik resmi [11].

$$G_I = \frac{1}{2\Delta a} F_{Li_1} \frac{\Delta L_{l_1}}{2} \quad (1.17)$$

$$G_{II} = \frac{1}{2\Delta a} F_{Li_2} \frac{\Delta L_{l_2}}{2} \quad (1.18)$$

$$G_{III} = \frac{1}{2\Delta a} F_{Li_3} \frac{\Delta L_{l_3}}{2} \quad (1.19)$$

İki boyutlu ve sekiz düğüm noktalı elaman için şematik resim şekil 1.6'da verilmektedir. Denklem 1.20, 1.21 ve 1.22 ise G_I, G_{II} ve G_{III} değerlerinin hesaplanmasıda dair formülleri vermektedir [17].



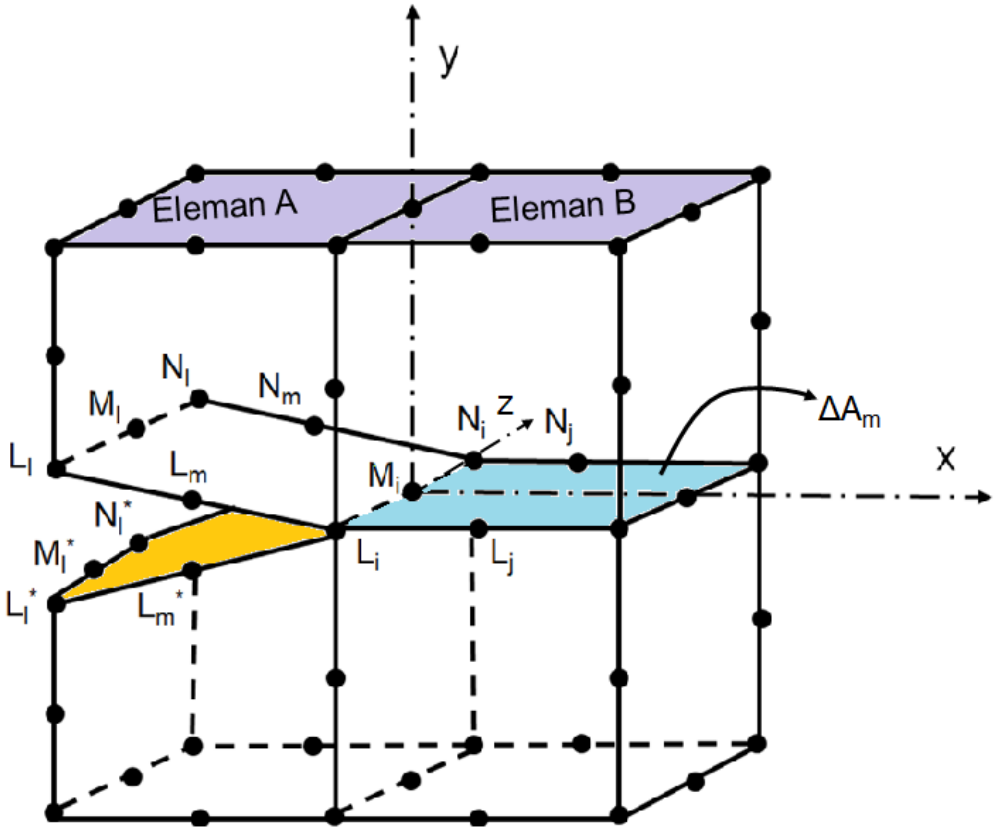
Şekil 1.6. İki boyutlu (2-B) ve sekiz düğüm noktalı eleman için çatlak ucu bölgesi şematik resmi [11].

$$G_I = \frac{1}{2\Delta a}\left(F_{Li_y} \frac{\Delta L_{l_y}}{2} + F_{Lj_y} \frac{\Delta L_{m_y}}{2}\right) \quad (1.20)$$

$$G_{II} = \frac{1}{2\Delta a}\left(F_{Li_y} \frac{\Delta L_{l_y}}{2} + F_{Lj_y} \frac{\Delta L_{m_y}}{2}\right) \quad (1.21)$$

$$G_{III} = \frac{1}{2\Delta a}\left(F_{Li_z} \frac{\Delta L_{l_z}}{2} + F_{Lj_z} \frac{\Delta L_{m_z}}{2}\right) \quad (1.22)$$

Üç boyutlu ve yirmi düğüm noktalı elaman için şematik resim şekil 1.7'de verilmektedir. Denklem 1.23, 1.24 ve 1.25 ise G_I, G_{II} ve G_{III} değerlerinin hesaplanmasıda dair formülleri vermektedir [17].



Şekil 1.7. Üç boyutlu (3-B) ve yirmi düğüm noktalı eleman için çatlak ucu bölgesi şematik resmi [17].

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta A_m}[F_{Li_y}\left(\Delta_{Ll_y} - \Delta_{Ll^*_y}\right) + F_{Lj_y}\left(\Delta_{Lm_y} - \Delta_{Lm^*_y}\right) + F_{Mi_y}\left(\Delta_{Ml_y} - \Delta_{Ml^*_y}\right) + F_{Ni_y}\left(\Delta_{Nl_y} - \Delta_{Nl^*_y}\right) + F_{Nj_y}(\Delta_{Nm_y} - \Delta_{Nm^*_y}) \quad (1.23)$$

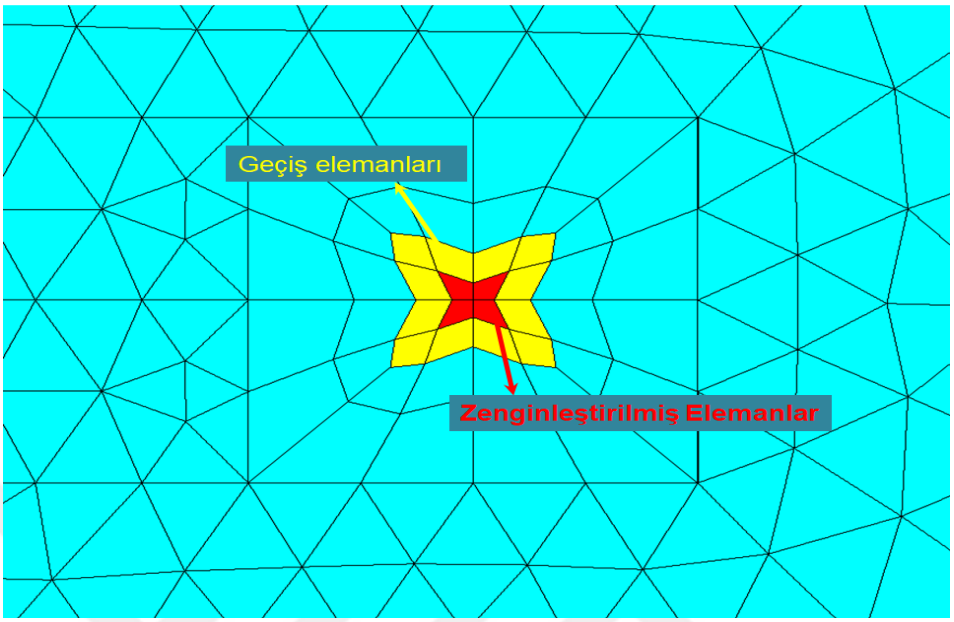
$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta A_m}[F_{Li_x}(\Delta_{Ll_x} - \Delta_{Ll^*_x}) + F_{Lj_x}(\Delta_{Lm_x} - \Delta_{Lm^*_x}) + F_{Mi_x}(\Delta_{Ml_x} - \Delta_{Ml^*_x}) + F_{Ni_x}(\Delta_{Nl_x} - \Delta_{Nl^*_x}) + F_{Nj_x}(\Delta_{Nm_x} - \Delta_{Nm^*_x}) \quad (1.24)$$

$$G_{III} = -\frac{1}{2\Delta A_m}[F_{Li_z}(\Delta_{Ll_z} - \Delta_{Ll^*_z}) + F_{Lj_z}(\Delta_{Lm_z} - \Delta_{Lm^*_z}) + F_{Mi_z}(\Delta_{Ml_z} - \Delta_{Ml^*_z}) + F_{Ni_z}(\Delta_{Nl_z} - \Delta_{Nl^*_z}) + F_{Nj_z}(\Delta_{Nm_z} - \Delta_{Nm^*_z}) \quad (1.25)$$

1.4.3. Zenginleştirilmiş Elemanlar Yöntemi

Lineer elastik kırılma mekaniği problemleri için gerilme-şiddet faktörü hesaplamalarında zenginleştirilmiş elemanlar yöntemi (Enriched Elements) kullanılabilmektedir. Bu yöntem ile, sonlu eleman analizi çözüm aşamasında direkt olarak gerilme şiddet faktörleri hesaplanabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemindeki deplasman formülasyonuna, çatlak ucu elemanları için gerilme-şiddet faktörünü de içeren çatlak ucu yer değiştirme alanları/ifadeleri eklenmiştir. Böylece analiz çözümü

ile birlikte direkt olarak gerilme-şiddet faktörü hesaplanabilmektedir. Şekil 1.8 zenginleştirilmiş ve geçiş elemanlarını göstermektedir. Denklem 1.26 zenginleştirilmiş elemanlar yöntemi yer değiştirme formülasyonunu vermektedir [18].



Şekil 1.8. Çatlak ucu bölgesinde zenginleştirilmiş elemanlar ve geçiş elemanları.

$$u^k(\xi,\eta,\rho)=\sum_{j=1}^{m}N_j(\xi,\eta,\rho)u_j^k+Z_0(\xi,\eta,\rho)\left(f^k(\xi,\eta,\rho)-\sum_{j=1}^{m}N_j(\xi,\eta,\rho)f_j^k\right)\left(\sum_{i=1}^{ntip}N_i(\Gamma)K_I^i\right)$$
$$+Z_0(\xi,\eta,\rho)\left(g^k(\xi,\eta,\rho)-\sum_{j=1}^{m}N_j(\xi,\eta,\rho)g_j^k\right)\left(\sum_{i=1}^{ntip}N_i(\Gamma)K_{II}^i\right) \qquad (1.26)$$
$$+Z_0(\xi,\eta,\rho)\left(h^k(\xi,\eta,\rho)-\sum_{j=1}^{m}N_j(\xi,\eta,\rho)h_j^k\right)\left(\sum_{i=1}^{ntip}N_i(\Gamma)K_{III}^i\right)$$

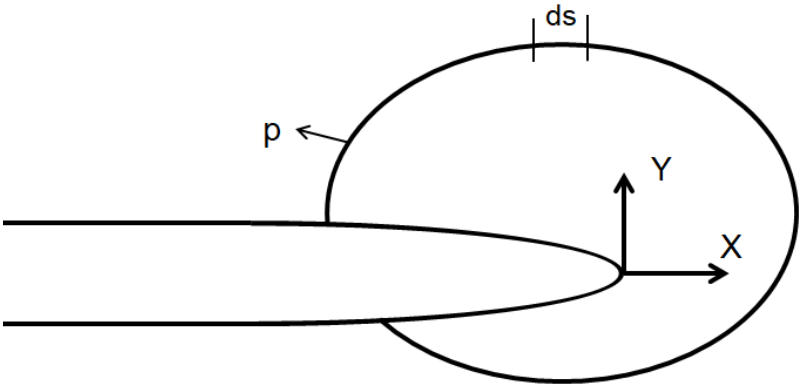
Denklem 1.26'da düğüm noktaları için verilen yer değiştirme fonksiyonlarına (u_j^k) K_1^i, K_2^ive K_3^i gerilme-şiddet faktörü denklemleri de eklenmiştir. Formül içerisinde Z_0 sıfırlama fonksiyonudur. Z_0 fonksiyonu denklem içerisinde 0 veya 1 değerini almaktadır. Çatlak ucunda ve çevresinde yer alan zenginleştirilmiş elemanların düğüm noktaları, geçiş elemanlarının düğüm noktaları ve zenginleştirilmiş elemanların komşusu olan elemanların düğüm noktalarında 1 değerini almaktadır. Geçiş elemanlarının, normal elemanlara komşu olan düğüm noktalarında ise 0 değerini almaktadır. u_j^k düğüm noktalarından hesaplanan deplasman değerlerini, Nj ise elemanın düğüm noktalarına dair şekil fonksiyonlarını temsil etmektedir. .f_j^k, g_j^k ve h_j^k terimleri lokal koordinat sisteminden global koorinat sistemine transfer edilen çatlak ucu yer değiştirme bileşenleridir. Γ ise 3-B çatlak önü boyunca eleman kenarında tanımlı izoparametrik koordinattır ve -1 ile 1 arasında değişmektedir [19].

1.4.4. J-İntegral Yöntemi

J-İntegral metodu lineer olmayan elastik malzemelerin kırılma mekaniği hesaplamaları için geliştirilmiş bir yöntemdir. Yük boşaltımı olmamak kaydıyla, orantılı yükleme şartlarını sağlayan ve elastik-plastik deformasyon içeren malzemelerin kırılma davranışlarının analizlerinde de kullanılabilmektedir. Çatlak ilerlemesi sırasında potansiyel enerji değişiminin tespit edilmesini sağlamaktadır. Enerjinin korunumu yasasına göre kaybolan enerjinin çatlak ilerleme sırasında harcandığını kabul etmektedir. Fiziksel olarak ise çatlak yüzeyinin bir birim artması için harcanan enerji olarak kabul edilebilir. Hutchinson, Rice ve Rosengren (HRR), J-integral ile sünek malzemelerde bulunan çatlak ucu gerilmelerini ve şekil değişimlerini hesaplanabildiğini göstermiştir [20,21]. Çatlaklı malzemenin çatlak ucunda gerçekleşen plastik deformasyonu da içeren enerjinin eğrisel (eğri boyunca alınan) integrali J.Rice tarafından Şekil 1.9'deki gibi çatlak ucunda keyfi olarak alınan yoldan bağımsız olarak bu yöntem ile hesaplanabilmektedir. Denklem 1.27 ise hesaplama formülasyonunu vermektedir [10].

$$J = \int_p w dy - T \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) ds \tag{1.27}$$

Eşitlik içerisinde p çatlağın etrafını çevreleyen herhangi bir kontur, w birim şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu diğer bir ifade ile σ-ε eğrisinin altında kalan alan, T ise p konturu boyunca oluşan traksiyon vektörü, ds diferansiyel eleman boyu, u ise şekil değişimi vektörüdür.



Şekil 1.9. J-integral.hesaplamaları için çatlak ucunda tanımlı yoldan bağımsız kapalı eğri.

Sünek bir malzeme için J-İntegral değeri elastik (J_{el}) ve plastik (J_p) bileşenin toplamı olarak isimlendirilebilir (denklem 1.28). Eğer problem gevrek bir malzemeye ait ise J-

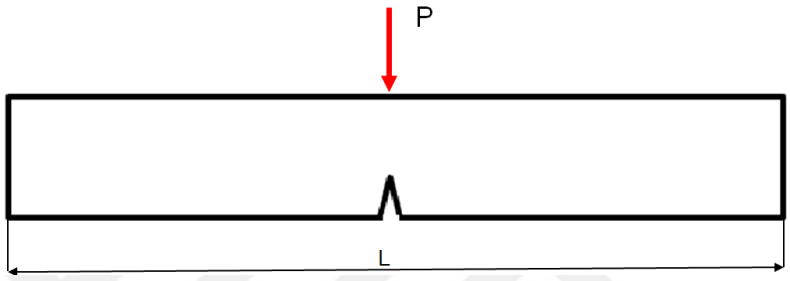
integral (J) ile gerilme-şiddet faktörü (K) arasındaki ilişki elastiklik modulünü (E) de içeren bir formül ile sağlanmaktadır (denklem 1.29).

$$J = J_e + J_p \tag{1.28}$$

$$J = G = \frac{K^2}{E} \tag{1.29}$$

1.4.5. Çatlak ucu açılma yerdeğiştirmesi (CTOD) yöntemi

Çatlak ucu açılma yerdeğiştirmesi metodu (Crack Tip Opening Displacement) bir çentik-darbe numunesinde sünek malzemeler için kritik çatlak ucu açılma yer değiştirmesi uzunluğunun hesaplanmasında kullanılan bir yöntemdir (Şekil 1.10).

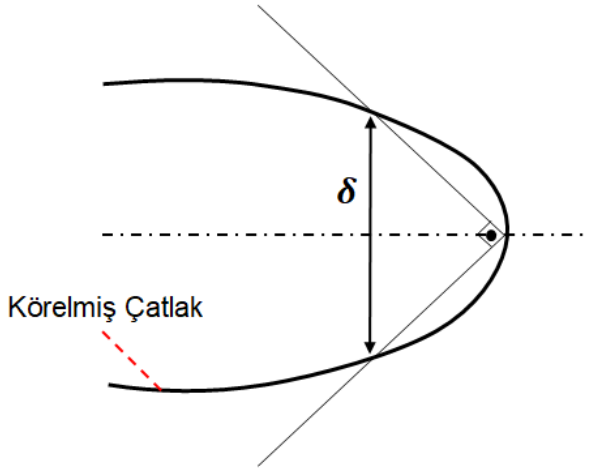


Şekil 1.10. Çentik darbe deneyi numunesi.

Sünek davranış gösteren metal malzemelerin kırılma davranışlarını inceleyen Wells, çatlak ucunda oluşan plastik deformasyon sebebiyle bu malzemelerin kırılma yükü tahminlerinin lineer elastik kırılma mekaniği metodları ile karaterize edilemeyeceği sonucuna varmıştır. Yüksek tokluğa sahip sünek malzemeler tasarımcılar için oldukça elverişlidir. Ancak bu malzemelerin büyük bir kısmı için kırılma mekaniği hesaplamaları o dönemin güncel yöntemleri ile mümkün değildi. Wells, üç nokta eğme numunesi kullanarak yaptığı kırılma tokluğu deneylerinde, test numunelerinin ayrılan yüzeylerinin hareket ettiğini ve başlangıçta keskin olan çatlak ucunun plastik deformasyon sebebiyle köreldiğini tespit etmiştir. Wells, bu deneylerle çatlak ucundaki plastik deformayonun artması ile kırılma tokluğunun arttığını gözlemlemiştir. Böylece çatlak ucu açılma yer değiştirmesi (CTOD)'nin kırılma mekaniği hesaplamalarında kullanılabileceğini belirlemiştir. Günümüzde CTOD kırılma mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır ve gerilme şiddet faktörü (K) ve enerji salınım oranı (G) ile arasındaki ilişki denklem 1.30'da verilmektedir. Denklem içerisinde m birimsiz bir sabittir. E, elastik modulü, σ_y ise akma mukavemetidir [22].

$$\delta = \frac{K^2}{m\sigma_y E} = \frac{G}{m\sigma_y} \tag{1.30}$$

CTOD farklı biçimlerde tanımlanmaktadır. En sık olarak kullanılanlardan biri 90 derece kesişim olarak adlandırılan yöntemdir. Bu yöntemde körelmiş çatlak ucundan aralarında 90 derece açı olan iki doğru çizilir ve bu doğruların çatlak kenarlarını kestiği noktalar arasındaki mesafe CTOD olarak adlandırılır.



Şekil 1.11. CTOD metodu 90 derece kesişme yöntemi.

1.4.6. Sünek malzemelerde kırılma mekaniği problemleri için literatürde yapılan çalışamalar

Elastik-plastik deformasyon davranışı gösteren sünek malzemeler için kırılma yükünü öngören sayısal simülasyonlar, tam ölçekli deneylerin çok maliyetli veya uygulanamaz olduğu durumlar için büyük önem arz etmektedir. Özellikle gaz boru hatları, basınçlı kaplar ve uçak gövdesi gibi sünek kırılma davranışı gösteren parçalarda hasarı önlemek için bu tür analiz ve tahminsel kabiliyetler çok önemlidir [23,24]. Çatlak ucunda, küçük-ölçekli akmanın ötesinde daha fazla plastik deformasyonun olduğu sünek malzemeler için mevcut LEKM kuralları ile yapılan yaklaşımlar kırılma yükünün tahmin edilmesi için yetersizdir ve elastik-Plastik yöntemler ile hesaplamalar yapmak gereklidir. Diğer yandan, aynı malzeme olsa dahi, malzemenin farklı kalınlık değeri, değişik çatlak boyları veya farklı yükleme yönleri için çatlak ucunda oluşan plastik deformasyon boyutu değişecektir. Geçtiğimiz on yıllar boyunca, sünek malzemelerde çatlak ilerlemesini tahmin edebilmek amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiş olup, günümüzde de geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu yöntemlerin arasında en yaygın olanları, çatlak ucu açılma açısı/ çatlak ucu yer değiştirme miktarı (CTOA/CTOD), J-integral yöntemi, kohezif bölge modeli ve enerji salınım oranı

kriterleridir. CTOA/CTOD, metal malzemeler için çatlak ucu civarındaki yer değiştirmeleri ve deformasyonu ölçen ve sünek malzemeler için karşımıza çıkan en eski yöntemlerden biridir [25,26]. Bu yöntem için kritik CTOA'nin ölçümü ASTM E2472 ile sınıflandırılmaktadır [27]. Deneysel çalışmalar, çatlak başlangıcı için kritik CTOA'nın, stabil çatlak ilerlemesi için olan değerden daha büyük olduğunu ve birkaç milimetrelik stabil çatlak ilerlemesinden sonra sabit bir değer aldığını göstermiştir [28,29].

Diğer bir yöntem olan J-integral yöntemi sünek malzemeler için oldukça ilgi çekmiştir. Bu yöntemde, çatlak ucu civarındaki gerilme ve deplasman alanları tek bir parametre olarak J-integral ile tanımlanabilir. Çatlağın ilerleyip ilerlemeyeceğinin tahmin edilmesi için J-integral yöntemi de kullanılabilir. Ancak çatlak ilerledikçe, çatlak ucundaki plastik bölge de büyür ve orantılı yükleme bölgesi çatlak ucundan uzaklaşır ve bu yoldan bağımsızlık kuralını ihlal eder [30,31]. Ayrıca J-integral metodu ile sadece toplam J değeri hesaplanabilmektedir. Mod-I problemler için bu çözüm yeterli olsada karışık mod yük altındaki problemler için toplam J değerinin ayrıştırılmasına ihtiyaç vardır.

Kohezif bölge modelinde ise çatlak ucundaki plastik deformasyondan dolayı hasara uğramış bölgeyi temel alarak kırılma mekaniği hesaplamaları yapılmaktadır. Barenblatt (1962) ve sonrasında Chorin ve Bazant (2022) tarafından önerilmiştir [13,32]. Ungsuwarangsri ve Knauss (1987) ve daha sonra Needleman (1990) tarafından yapılan bazı çalışmalardan bu yana, kohezif bölge modeli çeşitli çatlak problemlerini analiz etmek için sonlu eleman yöntemi ile yaygın olarak kullanılmıştır [33,34]. Geçtiğimiz on yıllar boyunca büyük ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, sünek malzeme için kohezif bölge modelinin öngördüğü davranışların deneysel olarak incelenmesi üzerine bir fikir birliği sağlanamamıştır [35]. Daha sünek malzemeler için, özellikle elastik-mükemmel plastik malzeme için, simüle edilen kırılma davranışı analiz modellerindeki ufak değişkenliklere karşı çok hassastır [36,37].

Kırılma mekaniği, başlangıçta Griffith tarafından enerji korunumu temeline dayanılarak geliştirilmiştir. Griffith tarafından önerilen enerji salım oranı orijinal olarak gevrek malzeme için kullanılmıştır. Daha sonra, enerji salım oranı kavramı Irwin ve Orowan tarafından sünek malzemeye genişletilmiş, yüzey enerjisi yeni yüzey enerjisi ve plastik dağılma işinin toplamı ile değiştirilmiştir. Griffith'in öncü

çalışmasından bu yana, enerji dağılma oranı kavramı birçok araştırmacı tarafından savunulmuştur. Enerji salınım oranı kriteri kavramsal olarak basittir. Enerji salınım oranı kriterinin ana tartışma konusu kritik enerji salınım oranının numune tipine, boyutuna ve çatlak büyümesinin boyutuna bağlı olmasıdır [38-40].

Sünek malzemelerin kırılma davranışlarının tahmini için çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Ancak, sınırlı koşulların dışında kırılma yükünü hesaplayabilen bir yöntem veya kriter, özellikle karışık mod-yüklere maruz üç-boyutlu kırılma problemleri için henüz geliştirilememiştir.

2. ÜÇ-BOYUTLU KIRILMA ANALİZLERİ İÇİN ANALİZ KABİLİYETİ GELİŞTİRME

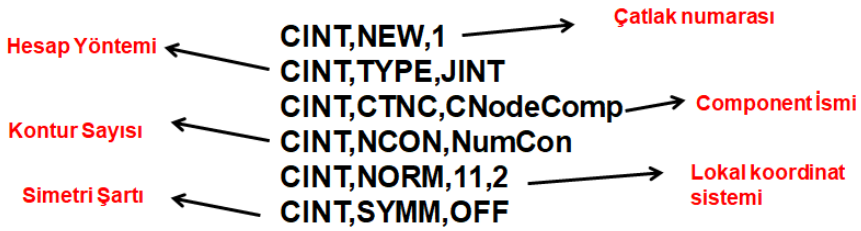
Tezin bu bölümünde kırılma problemlerinin çözümü için mevcut bazı yöntemler özetlenmekte, bu yöntemlerin eksik yönleri tartışılarak yeni bir yöntem belirleme çalışmaları anlatılmaktadır.

2.1. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) Analizleri için Kullanılan Yöntemler

Bu çalışma, sünek malzemelerin kırılma davranışlarını karakterize etmeyi amaçlamıştır. Ancak ileriki bölümlerde geliştirilecek yöntem ve kriter çıktılarının LEKM çözümleri ile karşılaştırılması ve ortak kullanılan yöntemlerin çıktılarının doğrulanması amacıyla LEKM yöntemleri de araştırılmış ve bazı problemler için sonuçlar paylaşılmıştır.

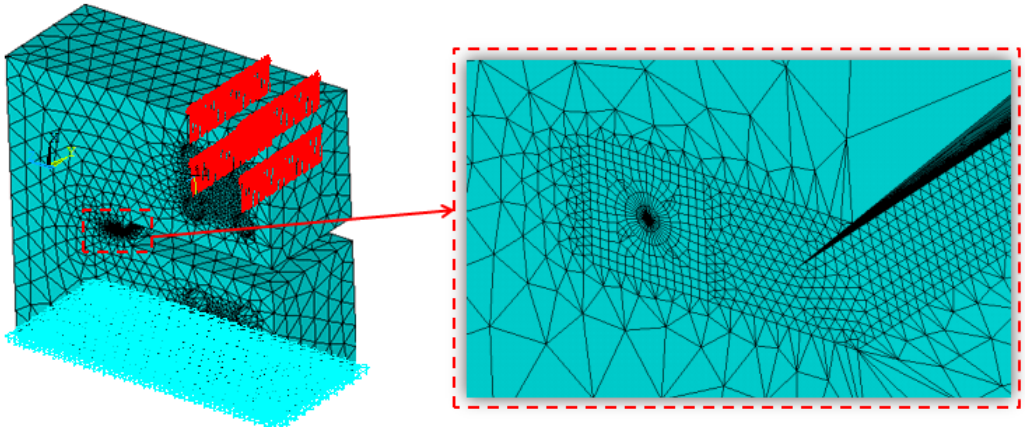
2.1.1. ANSYS CINT komutu ile mod-I J-integral hesabı

Ansys [41] sonlu elemanlar yazılımı bir çok mühendislik problemi için kullanılan önemli bir yazılımdır. Bu programın APDL çözüsü ile kırılma mekaniği hesaplamaları yapılabilmektedir. Bu bölüm içerisinde Ansys CINT komutunun çalışma prensibi anlatılacak ve LEKM yöntemi ile hesaplanan J-integral değerleri sunulacaktır. CINT komutunun kullanılabilmesi için çatlak içeren bir sonlu elemanlar modelinin hazırlanması gereklidir. Bu model çatlak ucunda özel bir ağ yapısına gereksinim duymaktadır. Bu ağ yapısı DCT yönteminde kullanılan ağ yapısı ile aynıdır (Şekil 1.4). Çatlak ucundaki düğüm noktaları seçilerek komponent olarak tanımlanmalıdır. Ayrıca çatlak ucunda lokal bir koordinat sistemi tanımlamak gereklidir. Bu adımlar tamamlandıktan sonra komut satırına Şekil 2.1'de belirtilen kod yazılarak çatlak tanımlanmış olur. Analiz çözdürüldüğünde ise PRCINT,1 komutu ile çatlak ucundaki her bir düğüm noktası için J-integral değerleri hesaplanır.

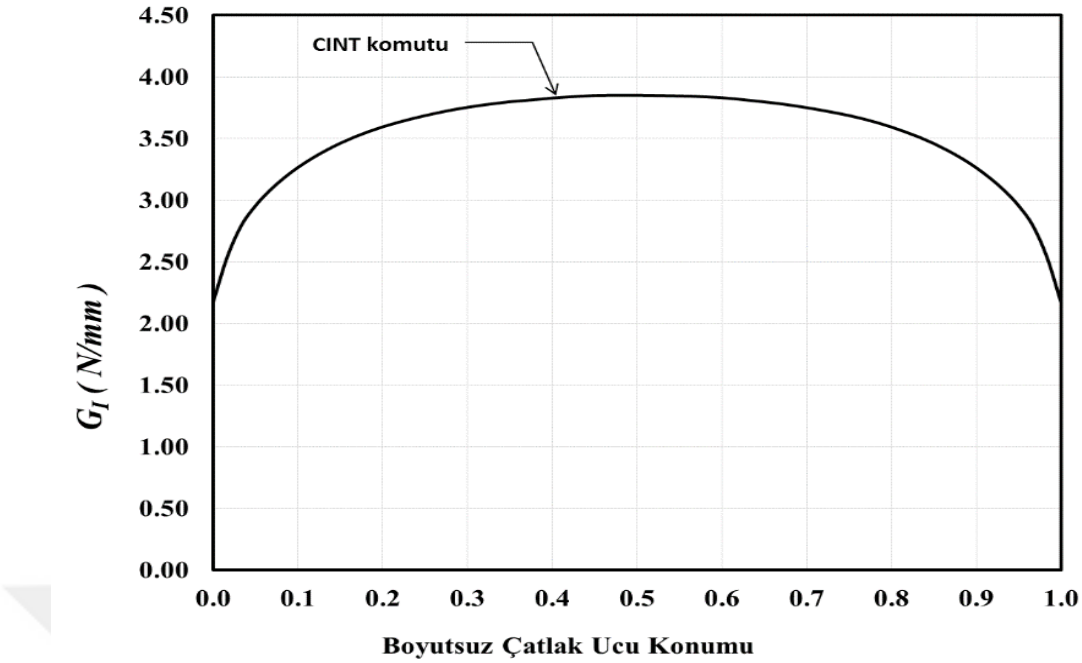


Şekil 2.1. ANSYS CINT komutu çalışma komut satırları [41].

Şekil 2.2'de 25 mm uzunluğunda çatlak içeren bir CTST (Compact Tension Shear Tearing) numunesi için sonlu elemanlar ağ yapısı görüntüsü ve sınır şartları verilmektedir. CTST numunesi, Compact Tension (CT) numunesi ile aynı boyutlara sahip olup, farklı olarak tek yükleme deliği yerine dört adet cıvata bağlantı deliği içermektedir [42]. Analiz edilen CTST numunesinin kalınlığı da 25 mm'dir.. Numune alt yüzeyinden U_x= 0, U_y= 0, U_z= 0 sınır şartları tanımlanmıştır. Üst pim deliklerinden ise toplam 10 kN eksenel dikey yük uygulanmıştır. Yük değerlendirildiğinde problemin Mod-1 (Açılma modu) yönünde yüke maruz olduğu anlaşılmaktadır. Çatlak ucundaki düğüm noktaları komponent olarak tanımlanmış ve çatlak ucunda bir lokal koordinat sistemi tanımlanmıştır. Şekil 2.1'de belirtilen komutlar yardımıyla analiz ve çözüm yapılmış, sonuçlar ve sonuçlar şekil 2.3'te verilmiştir.



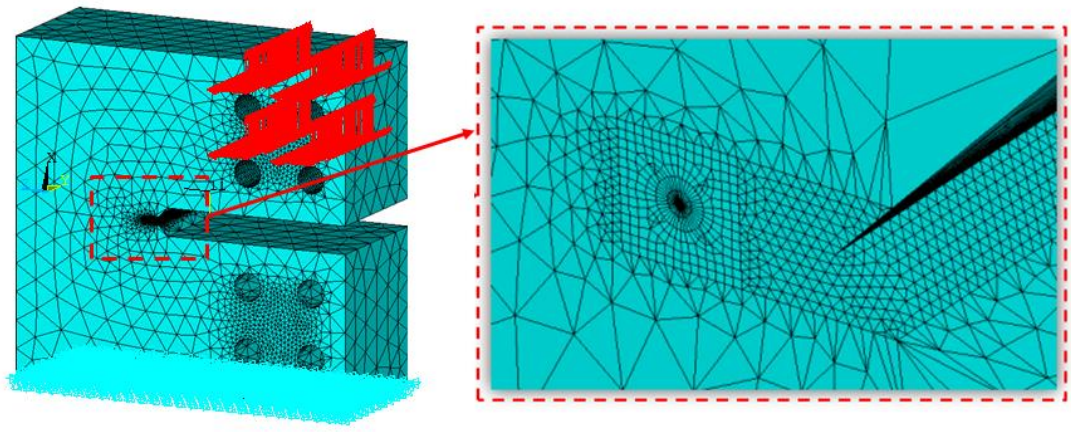
Şekil 2.2. CTST numunesi için ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda).



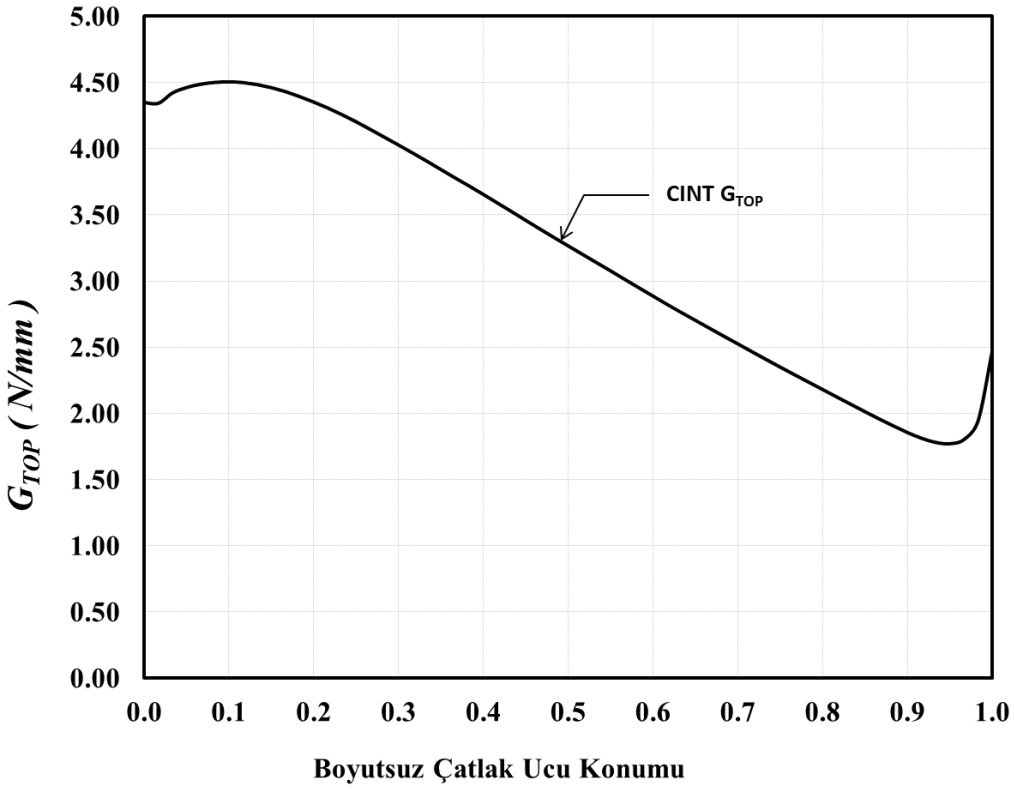
Şekil 2.3. CTST numunesi CINT komutu ile hesaplanan Mod-I J-integral değerleri.

2.1.2. ANSYS CINT komutu ile karışık mod yükleme içeren problemler için toplam J-Integral Hesabı

Şekil 2.4 ise toplam 10 kN karışık mod yüklemeye (F_X = 5.74, FY = 5.74, F_Z = 5.74) maruz bir CSTS numunesinin resmini vermektedir. Şekil 2.5'te ise analiz sonucu çatlak ucu boyunca hesaplanan toplam J-integral değerleri verilmektedir. Karışık mod problemler için G_I, G_{II} ve G_{III} değerlerinin de hesaplanması gerekmektedir. Ancak Ansys CINT komutu sadece toplam G değerinin sonucunu hesaplamaktadır.



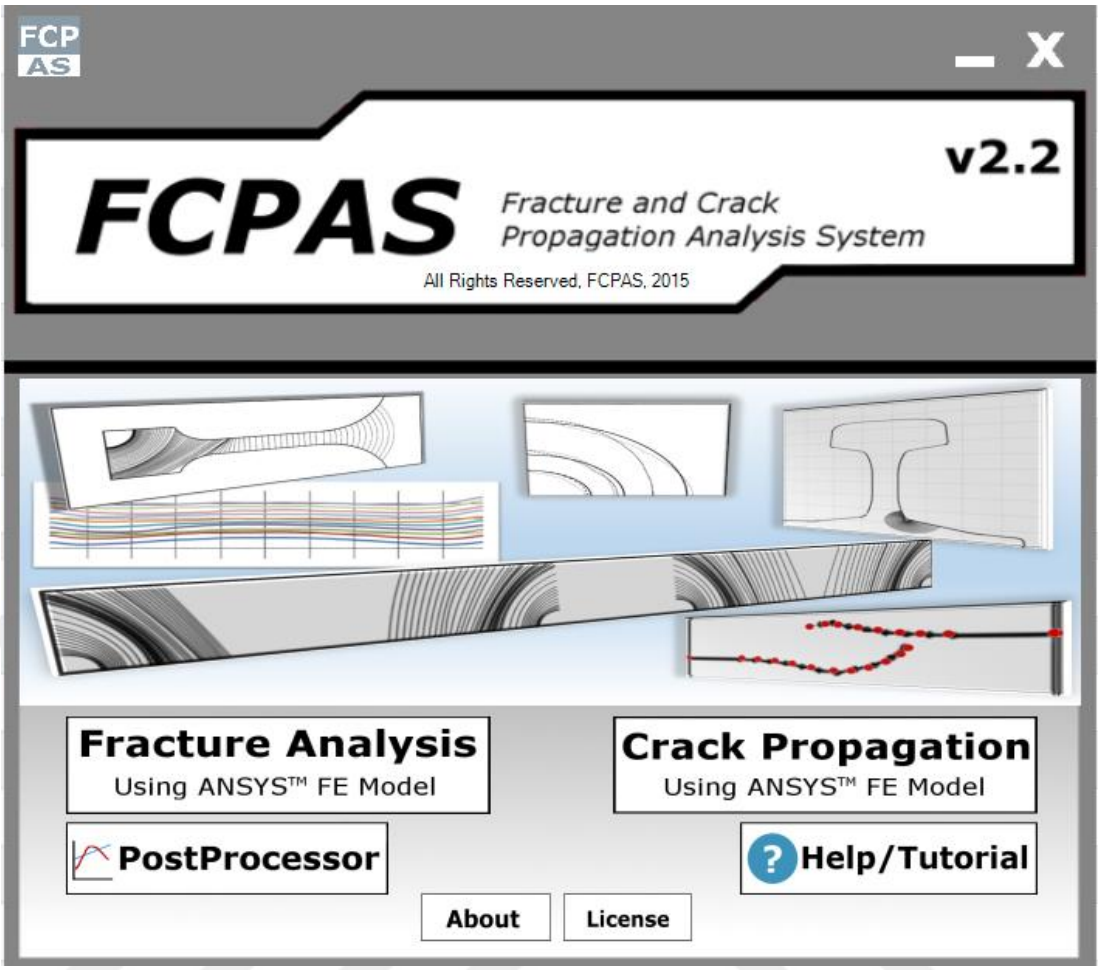
Şekil 2.4. Karışık mod yüke maruz CTST numunesi için ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda).



Şekil 2.5. CTST numunesi CINT komutu ile karışık mod yük altında hesaplanan J-integral değerleri

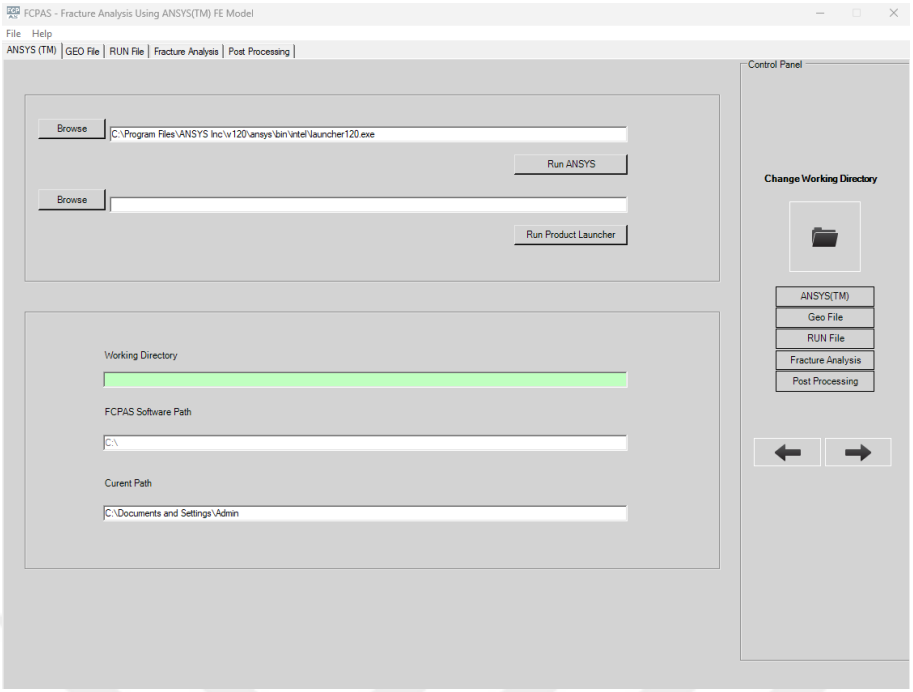
2.1.3. FCPAS ile Mod-I GŞF ve enerji salınım oranı hesabı

FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System – Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi), programında geometrik modelleyici veya bölüntüleme kabiliyeti bulunmamaktadır. FCPAS ile yapılacak kırılma mekaniği hesaplamalarında bir alternatif modelleyici program kullanılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında modelleme aşamasında ANSYS [41] sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Modelleme aşamasında ANSYS ortamında çatlaklı geometri hazırlanır. Bölüntüleme ve sınır şartları uygulandıktan sonra gerekli bilgiler FCPAS programına aktarılır. FCPAS üç boyutlu geometrilerdeki kırılma ve çatlak ilerleme analizi çözümleri sunan bir sonlu elemanlar yazılımıdır. FCPAS v2.2 açıldığında aşağıdaki ekran görüntüsü görülebilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. FCPAS v2.2'nin arayüzü [14].

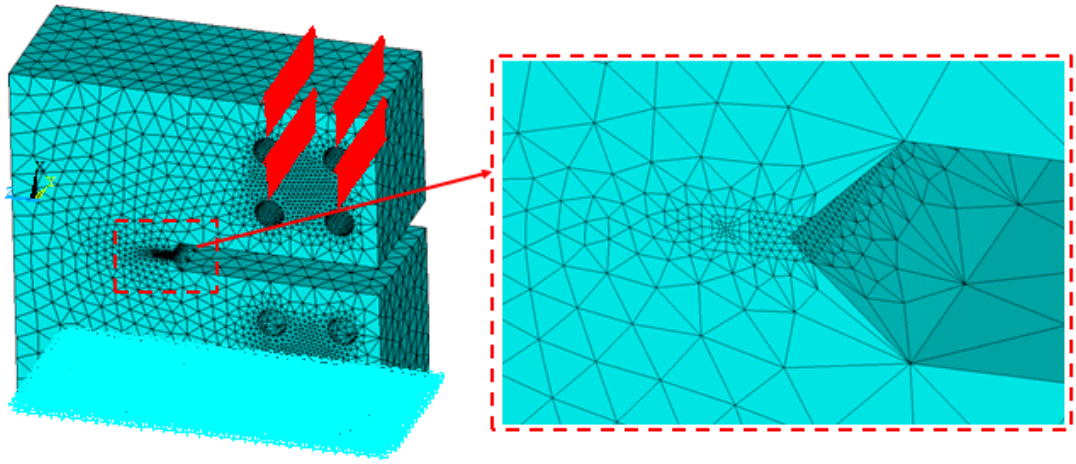
FCPAS kullanarak kırılma analizleri gerçekleştirmek için modelleme aşamasında bir sonlu elemanlar programından yardım almak gereklidir. Bu doğrultuda ANSYS programı ile çatlak içeren sonlu elemanlar modelleri oluşturulmakta ve FCPAS için gerekli olan düğüm noktası listesi, eleman listesi , sınır şartları gibi bilgiler aktarılmaktadır. "Fracture Analysis Using ANSYS™ FE Model" sekmesi tıklandığında açılan pencere şekil 2.7'de verilmektedir.



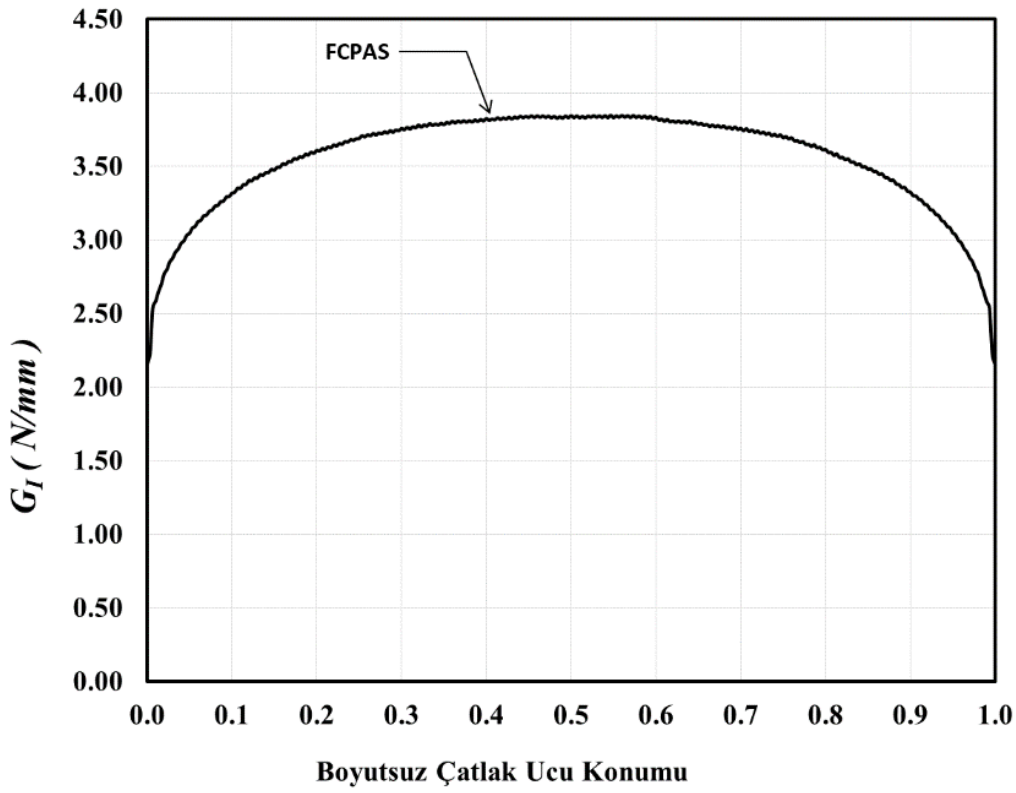
Şekil 2.7. FCPAS arayüzünden "Fracture Analysis using ANSYS FE Model" butonu seçilmesi ile açılan pencere [43].

Şekil 2.7'deki pencerede üst kısımda yer alan "ANSYS^{TM}" sekmesi seçildiğinde çalışma klasörü bilgisini tanımlanmaktadır "Geo File" sekmesi ile de model hazırlama ve FCPAS biçimine çevirme işlemleri gerçekleştirilmektedir. "RUN File" sekmesi ise malzeme ve analiz bilgilerinin tanımlandığı kısımdır. FCPAS formatına çevirilen bu model "FRAC3D" isimli bir çözücü program ile çözdürülmekte ve gerilme-şiddet faktörü değerleri hesaplanmaktadır. Sonuçları listelemek için ise "Post Processing" sekmesi kullanılmaktadır. Elde edilen gerilme-şiddet faktörü değerleri denklem 1.29 kullanılarak enerji salınım oranına dönüştürülebilir.

Bölüm 2.1.1 de CINT komutu ile çözümlenen problem bu bölümde FCPAS ile de çözdürülmüştür. FCPAS'de çatlak ucunda zenginleştirilmiş elemanlar kullanılmaktadır. Bu yönüyle ihtiyaç duyulan ağ yapısı CINT yönteminden farklıdır. Problemdeki çatlak boyu, yük ve sınır şartları tamamen aynıdır. Şekil 2.8'de FCPAS için hazırlanan ağ yapısı, şekil 2.9'da ise analiz sonucu hesaplanan enerji salınım oranı (G) değerleri verilmektedir.



Şekil 2.8. CTST numunesi ile FCPAS için ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda).

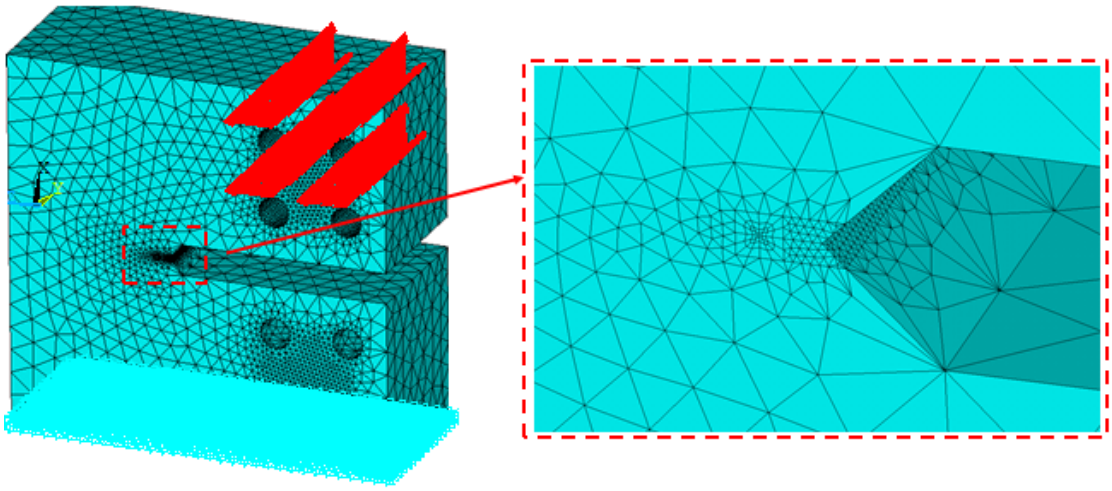


Şekil 2.9. CTST numunesi için FCPAS ile hesaplanan mod-I enerji salınım oranı değerleri.

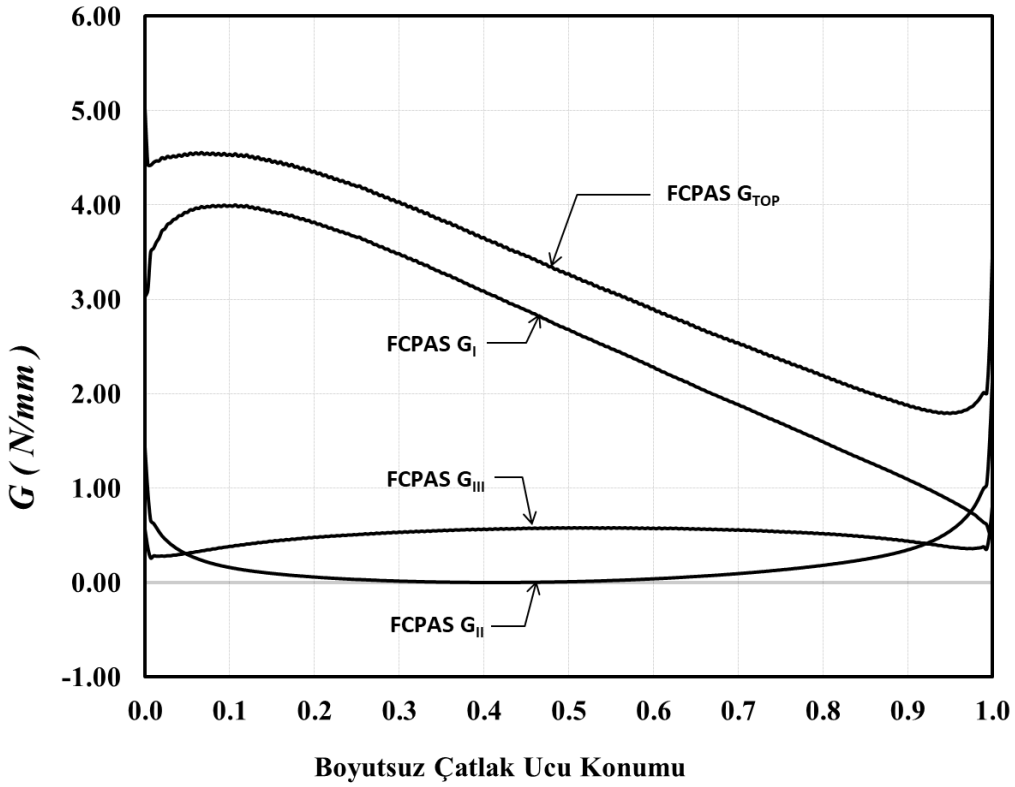
2.1.4. FCPAS ile karışık mod GŞF ve enerji salınım oranı hesabı

Şekil 2.10'de ise toplam 10 kN karışık mod yüklemeye (F_X = 5.74, FY = 5.74, F_Z = 5.74) maruz bir CSTS numunesinin resmini gösterilmektedir. Şekil 2.11'de ise analiz sonucu çatlak ucu boyunca hesaplanan toplam enerji salınım oranı (G) değerlerini

gösterilmektedir. Karışık mod problemler için G_I, G_{II} ve G_{III} değerleri ve toplam G değeri hesaplanmıştır.



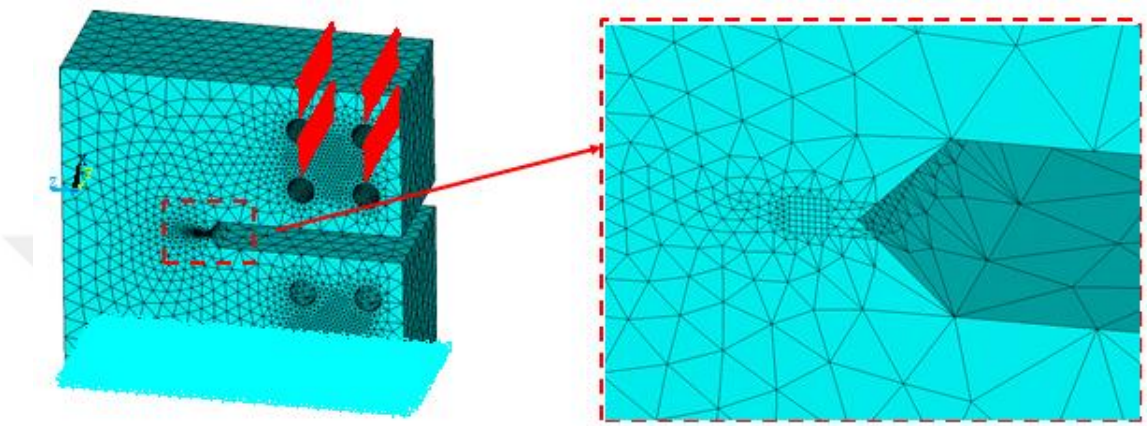
Şekil 2.10. CTST numunesi ile FCPAS için ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda).



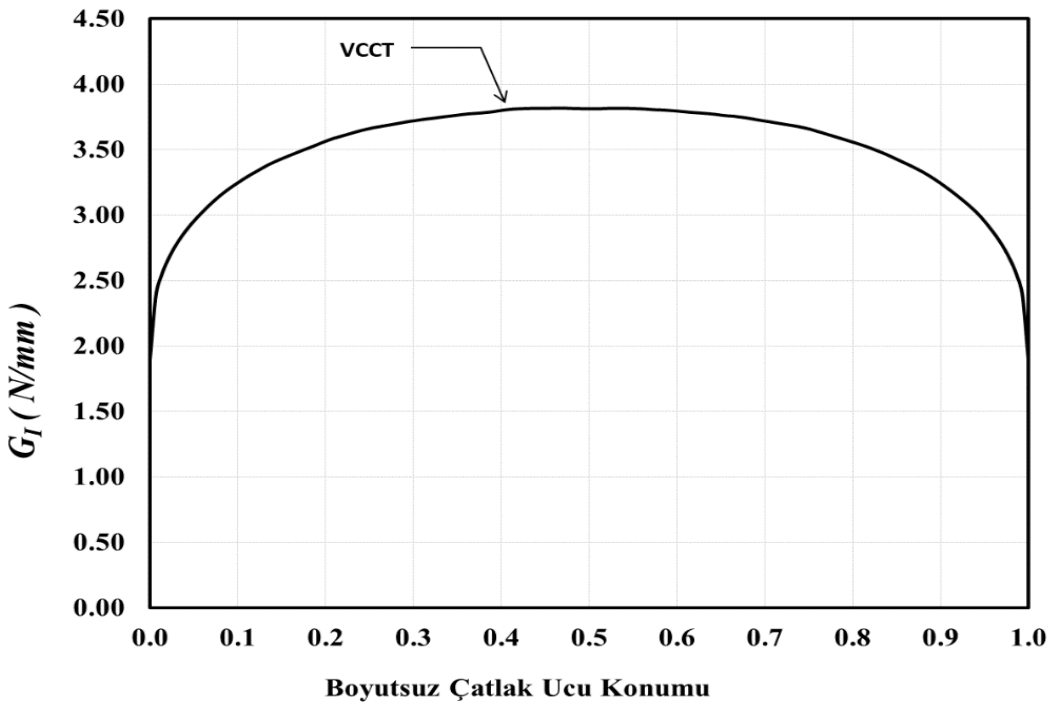
Şekil 2.11. CTST numunesi için karışık modlu problem yüklü için FCPAS ile hesaplanan enerji salınım oranı (G) değerleri.

2.1.5. VCCT Yöntemi ile mod-I enerji salınım oranı hesabı

Bu tez çalışması kapsamında ANSYS 12.1 versiyonu kullanılmıştır. VCCT metodu bölüntü aşamasında küp elemanlara ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla J-integral ve FCPAS için hazırlanan ağ yapısı bu kısımda kullanılamamıştır. VCCT metodu hesaplamaları için hazırlanan ağ yapısı şekil 2.12'de verilmektedir. Şekil 2.13'te ise VCCT yöntemi ile hesaplanan mod-I enerji salınım oranı değerleri verilmektedir.



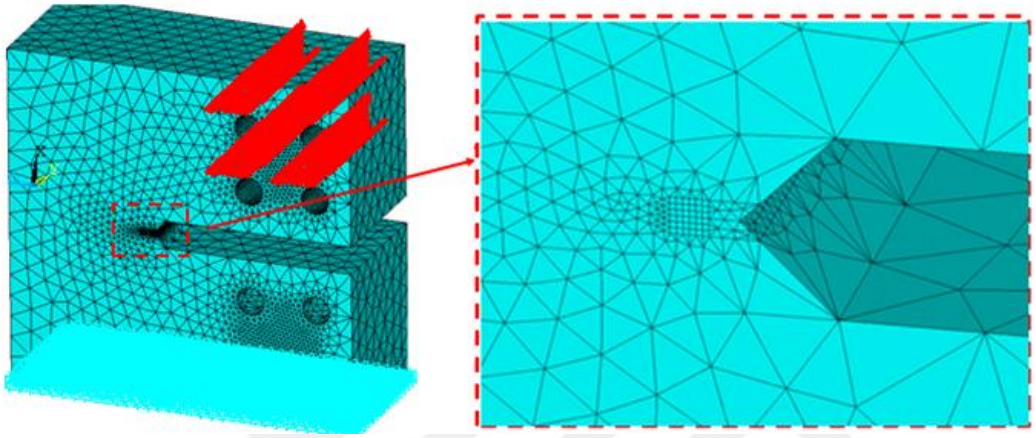
Şekil 2.12. VCCT yöntemi için hazırlanan 10 kN mod-I mod-I yükü, CTST numunesi ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda).



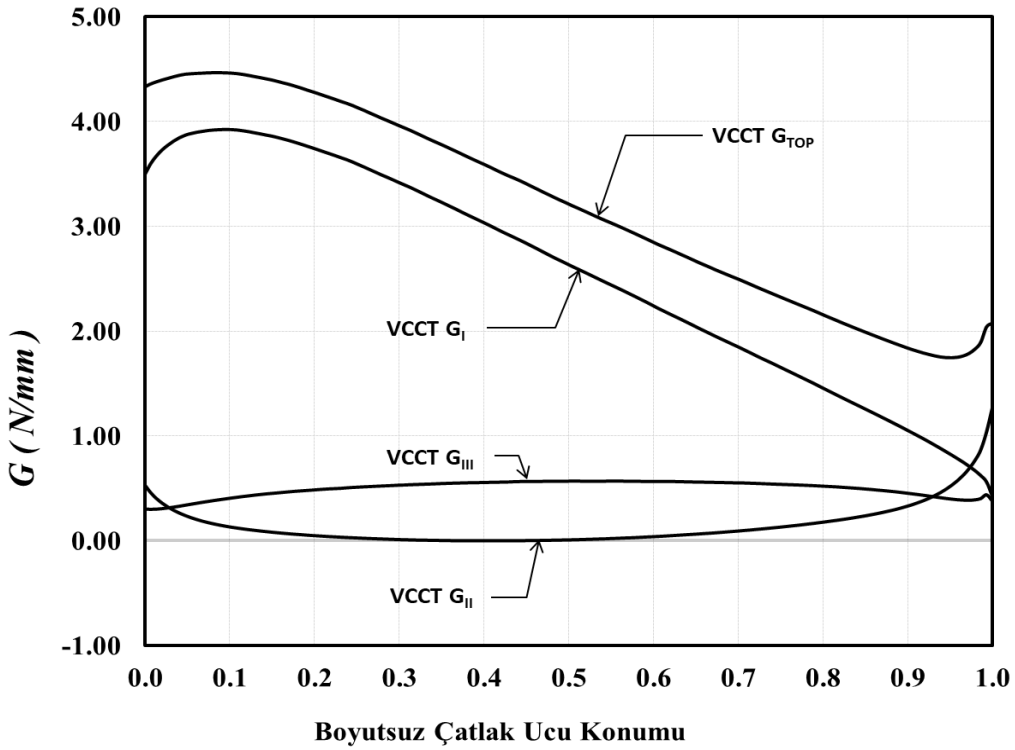
Şekil 2.13. VCCT yöntemi ile hesaplanan mod-I enerji salınım oranı (G) değerleri.

2.1.6. VCCT yöntemi ile karışık mod enerji salınım oranı hesabı

Şekil 2.14'de toplam 10 kN karışık mod yüklemeye maruz (F_X = 5.74, FY = 5.74, F_Z = 5.74) bir CSTS numunesinin ağ yapısı görüntüsünü verilmektedir. Şekil 2.15 ise analiz sonucu çatlak önü boyunca hesaplanan toplam enerji salınım oranı (G) değerlerini vermektedir. Karışık mod problemler için G_I, G_{II} ve G_{III} değerleri ve toplam G değeri hesaplanmıştır.



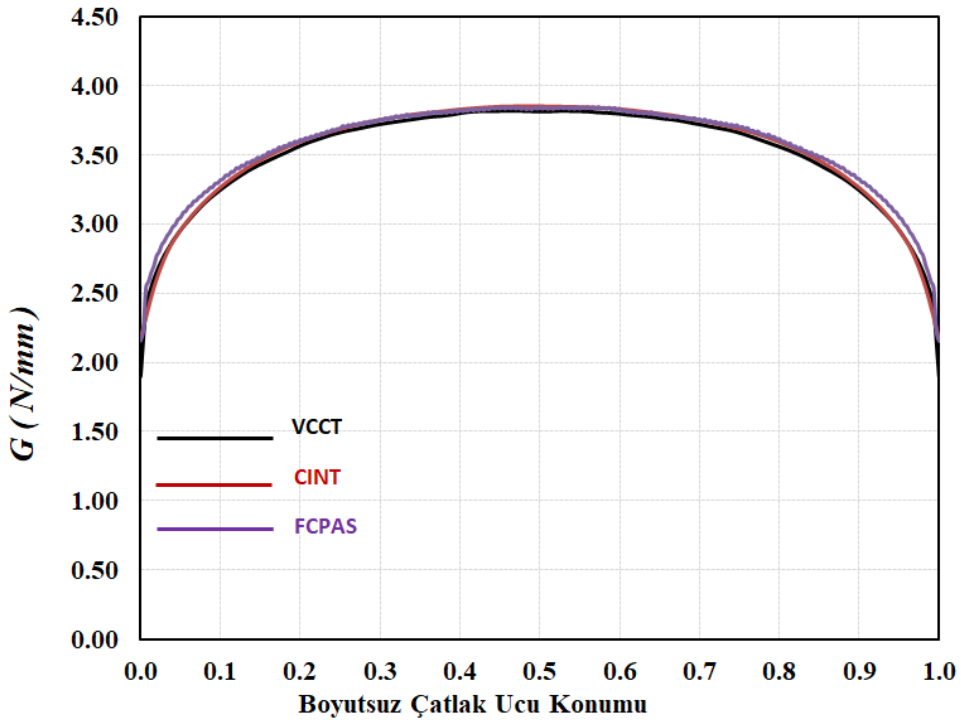
Şekil 2.14. VCCT için CTST numunesi ile hazırlanan ağ yapısı görüntüsü (solda), çatlak ucu yakınlaştırılmış görüntü (sağda).



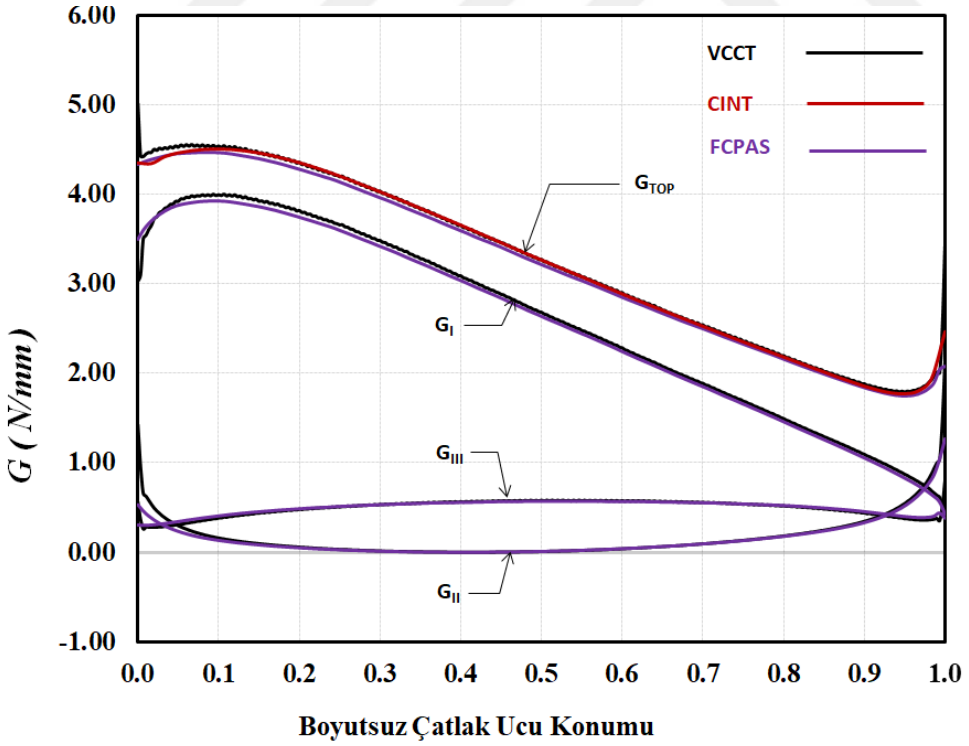
Şekil 2.15. VCCT yöntemi ile hesaplanan karışık mod enerji salınım oranı (G) değerleri.

2.1.7. VCCT yöntemi sonuçlarının CINT ve FCPAS ile doğrulanması

VCCT metodu lineer elastik malzemelerin kırılma analizlerinde oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem direkt olarak G_I (Açılma modu), G_{II} (Kayma modu) ve G_{III} (Yırtılma modu) değerlerini hesaplayabilmesi ile öne çıkmaktadır. VCCT yöntemi uygulamaları için çatlak ucunda karesel eleman tanımlanmıştır. Bu problemin ağ yapısı hazırlanırken çatlak ucundaki elemanlar küp eleman olarak hazırlanmıştır. CINT komutu ise ANSYS içerisinde J-integral hesaplamaları yapılmasına imkan veren bir komuttur. J-integral yöntemi ile elastik ve elastik-plastik özellik gösteren malzemelerin kırılma analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Çatlak ucunda özel bir ağ yapısı gereksinimi duymaktadır (Şekil 1.4.) Bu yöntemin bir eksikliği ise sadece toplam J-integral değerini hesaplayabilmesidir. Karışık mod bir problem için G_I, G_{II} ve G_{III} değerlerinin ayrıştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. FCPAS ise lineer elastik malzemeler için kırılma ve çatlak ilerleme analizler yapabilen bir programdır. Direkt olarak sonlu elemanlar analizi ile gerilme-şiddet faktörü hesaplayabilmektedir. Denklem 1.29 kullanılarak lineer elastik malzemeler için enerji salınım oranı (G) hesaplanabilir. Şekil 2.16'da 10 kN mod-I yönünde yüke maruz bir problem için VCCT yöntemi ile hesaplanan mod-I enerji salınım oranı (G_I) değerlerinin FCPAS ve CINT komutu ile doğrulaması sunulmaktadır. Aynı problem için farklı ağ yapıları kullanılarak, farklı üç yöntem ile enerji salınım oranı (G) değerleri hesaplanmış ve birbirine çok yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür. Şekil 2.17 ise 10 kN karışık mod yük altındaki bir problem için VCCT metodu ile hesaplanan G_I ,G_{II}, G_{III} enerji salınım oranı değerlerinin FCPAS ile, G_{TOP} değerinin ise FCPAS ve CINT komutu ile doğrulamasını sunmaktadır. Bu kısımda da mod-I problemlerinde olduğu gibi oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2.16. 10 kN mod-I yükü altındaki CTST numunesi için VCCT metodu ile hesaplanan enerji salınım oranı (G) değerlerinin CINT ve FCPAS ile doğrulanması.

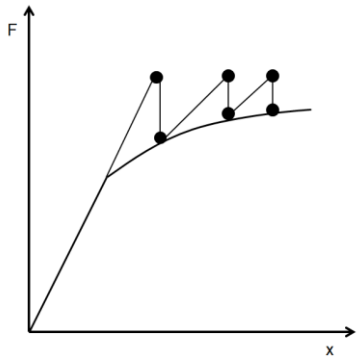


Şekil 2.17. 10 kN karışık mod yük altındaki CTST numunesi için VCCT metodu ile hesaplanan enerji salınım oranı (G) değerlerinin CINT ve FCPAS ile doğrulanması.

2.2. Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) Problemleri İçin Yöntem Geliştirilmesi

Önceki bölümlerde gösterildiği üzere, VCCT metodu lineer elastik malzemelerde başarılı sonuçlar vermiştir. Direkt olarak G_I, G_{II} ve G_{III} enerji salınım oranı değerlerini hesaplayabilmesi sebebi ile diğer yöntemlere kıyasla üstün noktaları bulunmaktadır. FCPAS ile elastik-plastik problemler için hesaplama yapılamamaktadır. CINT komutu ise toplam enerji salınım oranı değerini hesapladığı için sadece mod-I problemleri için kullanılabilmektedir. VCCT metodu ile tezin bu aşamasına kadar sonuçları paylaşılan örnekler lineer-elastik problemlerdir. Ancak hesaplama yönteminin diğer yöntemlere kıyasla uygulanabilir seviyede basit olması sebebi ile elastik-plastik malzemelere uyarlanmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda ilk aşama lineer olmayan malzeme özelliklerinin tanımlanmasıdır. Tez kapsamında kullanılan ANSYS 12.1 programında 'multilinear isotropic hardening' malzeme kartı içerisine mühendislik gerilme-şekil değişimi eğrisi girilerek lineer olmayan analiz çözdürülebilmektedir. Denklem 2.1 doğrusal olmayan çözümleyici için temel formül görevini görmektedir. Bu denklemin çözümü sıfır değerine ulaşıncaya kadar iterasyon gerçekleştirilerek çözüm sağlanabilir (Şekil 2.18).

$$\Psi(x) = K.x - F = 0 \tag{2.1}$$



Şekil 2.18. Elastik-plastik analizler için Newton-Raphson iterasyon yöntemi.

Bu yaklaşım bir iterasyon gerektirmektedir. Bu iterasyon aşaması newton-raphson metodu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Denklem 2.2 newton-raphson iterasyonu için kullanılan formülü vermektedir. Denklem içerisinde K^T ; yapının toplam teğetsel rijitlik matrisi, Δx; yer değiştirme arttırım vektörü, F^{UYG} ; düğüm noktası yük vektörünü, F^{NR}; eleman gerilmeleri ile hesaplanan newton-raphson yük vektörünü, F^{UYG} - F^{NR} = ε ise fark vektörünü simgelemektedir. Belirli bir fark değerine gelindiğinde iterasyona son verilmekte ve düğüm noktası üzerindeki reaksiyon kuvvet

hesaplanmaktadır. Böylece, verilen yük artırımı için denge halindeki yer değiştirme ve düğüm noktası kuvvetleri hesaplanmış olmaktadır.

$$K^T.\Delta x = F^{UYG} - F^{NR} \tag{2.2}$$

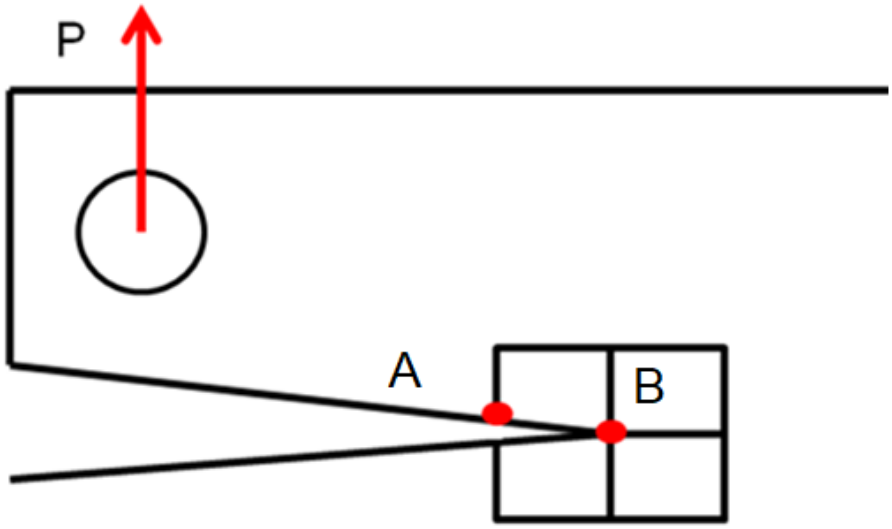
Plastisite teorisinde, plastik deformasyonun nasıl hesaplanacağını belirleyen temel problem, gerilmenin akma yüzeyini aştığı durumlardır. Plastik deformasyonun belirlenmesinde kullanılan en yaygın yöntem, plastik birim uzama hızının (plastic strain rate) formüle edilmesidir. Bu, genellikle ilişkilendirilmiş akma kuralı kullanılarak formüle edilir. İlişkilendirilmiş akma kuralına göre plastik birim uzama hızı, akma yüzeyinin gerilme durumunun türeviyle orantılıdır. Matematiksel olarak bu ilişki denklem 2.3'te verilmektedir. Burada $\dot{\varepsilon}^p$, plastik birim uzama hızını, λ, bir skaler çarpanı, f, akma yüzeyini tanımlayan fonksiyonu, σ ise gerilme tensörünü temsil etmektedir.

$$\dot{\varepsilon}^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \tag{2.3}$$

Bu formülasyon, malzemenin plastik akışının yönünü ve büyüklüğünü belirlemek için kullanılmaktadır. Akma yüzeyi fonksiyonu $f(\sigma)$, belirli bir gerilme durumunda malzemenin akıp akamayacağını belirleyen bir yüzey olarak tanımlanmaktadır ve genellikle gerilme tensorunun belirli bir değeri için sıfıra eşittir. Bu kural, özellikle metaller gibi elastik-plastik özellik gösteren malzemeler için iyi çalışır, çünkü plastik deformasyonun yönünü doğrudan akma yüzeyinin normali ile belirlemektedir [44].

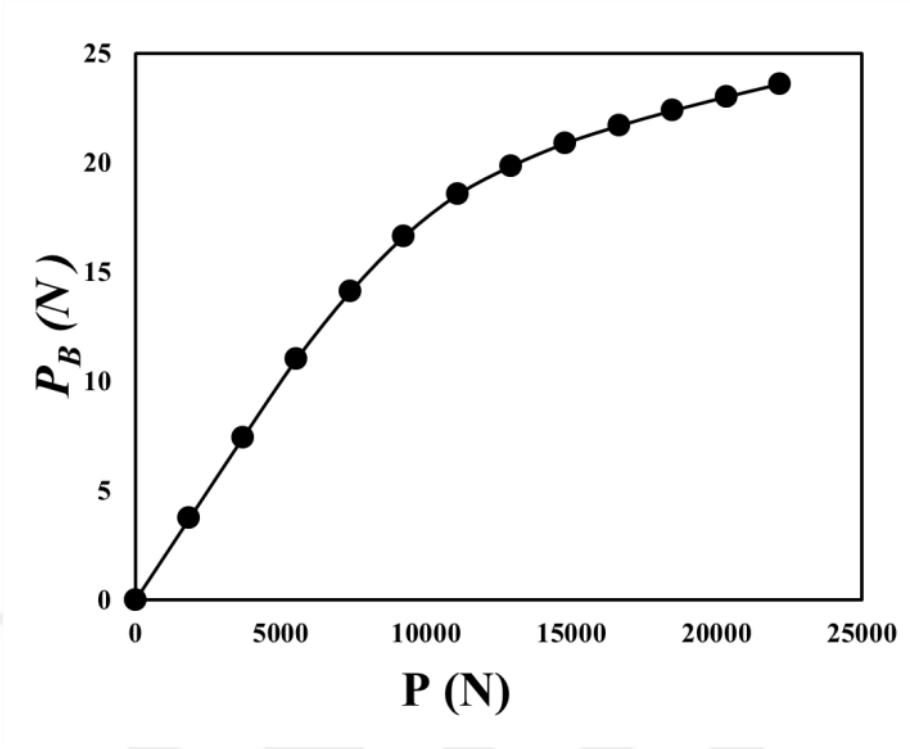
2.2.1. Sünek malzemelerin kırılması için yapay kırılma süreci enerji oranı (AFPER) ve yapay tersinebilir yük boşaltım enerji oranı (ARUER) hesaplanması

Tezin bu aşamasında lineer-elastik problemlerde iyi sonuç veren VCCT metodunun elastik-plastik analizlere uyarlaması anlatılacaktır. Şekil 2.19 eksenel yük altındaki çatlaklı bir numune ve çatlak ucundaki elemanları şematik olarak göstermektedir. B noktası çatlak ucu , A noktası çatlak ucundan birim uzaklıktaki düğüm noktasıdır. Problem lineer-elastik olduğunda çatlak ucundaki B noktasındaki reaksiyon kuvvet ile A noktasındaki yer değiştirme değeri P dış yük değeri ile lineer olarak artmaktadır. Ancak problem elastik-plastik olarak değerlendirildiğinde çatlak ucu civarındaki plastik deformasyon sebebi ile belirtilen noktalardaki yer değiştirme ve yük değerleri ile dış yük ilişkileri doğrusal olmayacaktır.

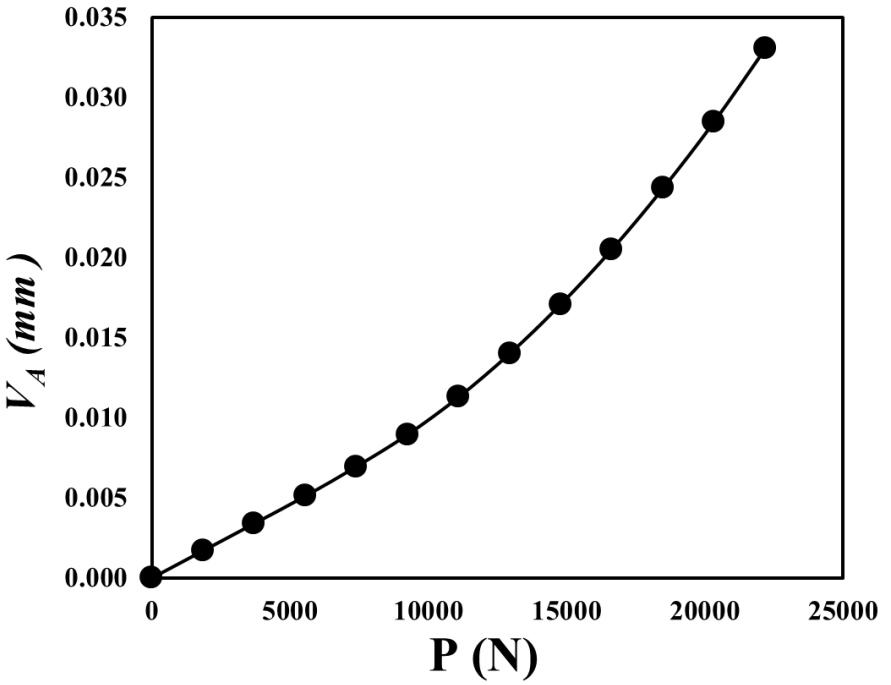


Şekil 2.19. Çatlaklı bir numune için çatlak ucu civarının şematik resmi.

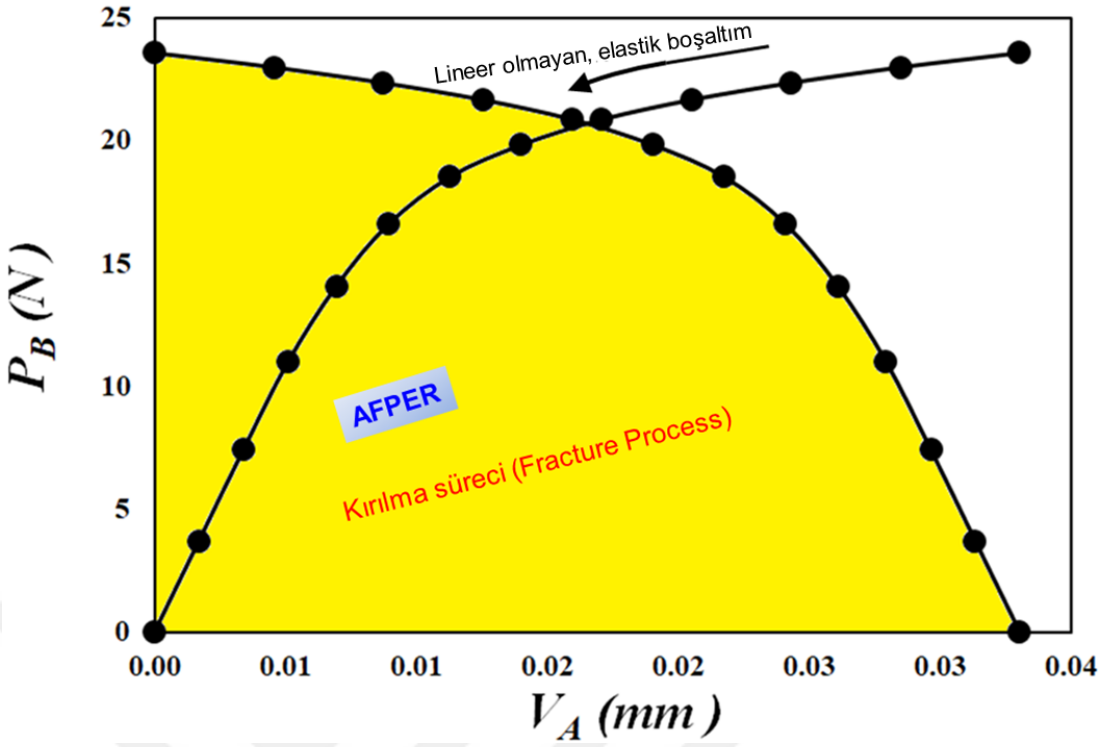
Kırılma tokluğu gerçekleştirilen 25 mm kalınlığa ve 25.58 mm çatlağa sahip, Al-2024 malzemesinden yapılmış numune için elastik-plastik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre pime yüklenen kuvvet (P) ve B noktasındaki reaksiyon kuvvet ilişkisi Şekil 2.20.'de , pimdeki kuvvet (P) ile A noktasındaki yerdeğiştirme ilişkisi (V_A) Şekil.2.21'de ve B noktasındaki reaksiyon kuvvet (P_B) ile A noktasındaki yer değiştirme ilişkisi eğrisi Şekil. 2.22'de verilmektedir. (P_B) ile A noktasındaki yer değiştirme eğrisi kohezif bölge teorisinde olduğu gibi aynalanarak grafik oluşturulmuş ve eğri altında kalan alan ise AFPER olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 2.20. Kırılma tokluğu testi sırasında pim yükü (P) ile B noktasındaki reaksiyon kuvvet (P_B) arasındaki ilişki.



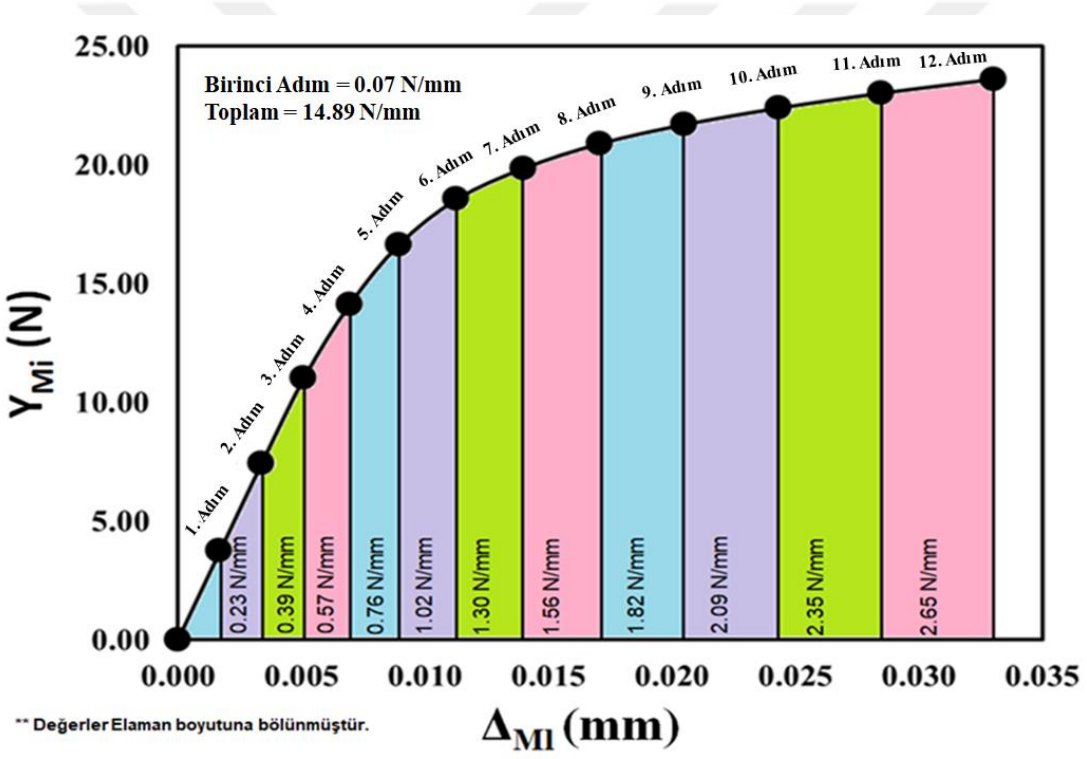
Şekil 2.21. Kırılma tokluğu testi sırasında pim yükü (P) ile A noktasındaki yer değiştirme (V_A) arasındaki ilişki.



Şekil 2.22. Kırılma tokluğu testi sırasında B noktasındaki reaksiyon kuvvet (P_B) ile A noktasındaki yer değiştirme (V_A) arasındaki ilişki.

Şekil 2.22 elastik-plastik olarak modellenmiş bir analiz için hesaplanmış çatlak ucu (A) ve çatlak ucundan bir birim uzaklıktaki bir düğüm noktasının yer değiştirme sonuçlarını vermektedir. Şekil 2.22'de görülen eğrinin altında kalan alan bize kırılma sürecinde harcanan enerjiyi vermektedir. Bu eğriyi birkaç parçaya bölerek kolayca hesap yapılabilmektedir. İlk adım yine bir üçgen şeklinde olacaktır. Denklem 1.23 kullanılarak ilk adım için hesaplama yapılabilir. Sonraki adımlar için ise düzgün yamuk alanı hesaplama formülünü kullanabiliriz. Son adıma kadar tüm değerlerin sayısal toplamı ise bize eğrinin altında kalan alanı verecektir. Bu alan kırılma sürecinde harcanan enerji olmamakla beraber, VCCT yönteminde olduğu gibi çatlak ucu ve komşu düğüm noktasındaki kuvvet ve yer değiştirme büyüklüklerinin lineer olmayan problem için kullanılması dolayısıyla uyarlanmış (yapay) bir kırılma süreci enerji oranı olarak değerlendirilebilir. Lineer-elastik problemlerde bu enerjinin tamamı çatlak ilerlemeye harcanırken, elastik-plastik problemlerde bu enerjinin içerisinde plastik şekil değişimine harcanan enerji de yer almaktadır. Dolayısı ile P_B-V_A eğrisi altında kalan alana elastik-plastik problemlerde enerji salınım oranı olarak isimlendirmek doğru olmayacaktır. Bu doğrultuda P_B-V_A eğrisi altında kalan alan yapay kırılma süreci enerji salınım oranı (Artificial Fracture Process Enerji Release

Rate) olarak isimlendirilmektedir. Şekil 1.27'de verilen 20 düğüm noktalı karesel elemanların herhangi biri için Yapay Kırılma Süreci Enerji Salınım Oranı (AFPER) değerlerinin hesaplanmasında kullanılan formüller sırasıyla $AFPER_1$ (Açılma modu) için Denklem 2.4'te , $AFPER_2$ (Kayma modu) için Denklem 2.5'te ve $AFPER_3$ (Yırtılma modu) için ise Denklem 2.6'da verilmektedir. Denklem içerisinde i adım sayısını belirtmektedir. Örnek olarak 2. adım sonundan 3. adım başlangıcına kadar toplanan enerji miktarının hesaplanması için 2. adım ve 3. adımın denklemde belirtilen indislerdeki reaksiyon kuvvet ve yer değiştirme değerlerinin denkleme girilmesi gerekmektedir. Şekil 2.23'te Mi indisindeki reaksiyon kuvvet ile Ml indisindeki yer değiştirmeden dolayı oluşan AFPER değerlerinin elastik-plastik analiz için hesaplama değerleri sunulmaktadır. Diğer indislerdeki eğilimlerde Mi-Ml indisleri ile benzerdir.

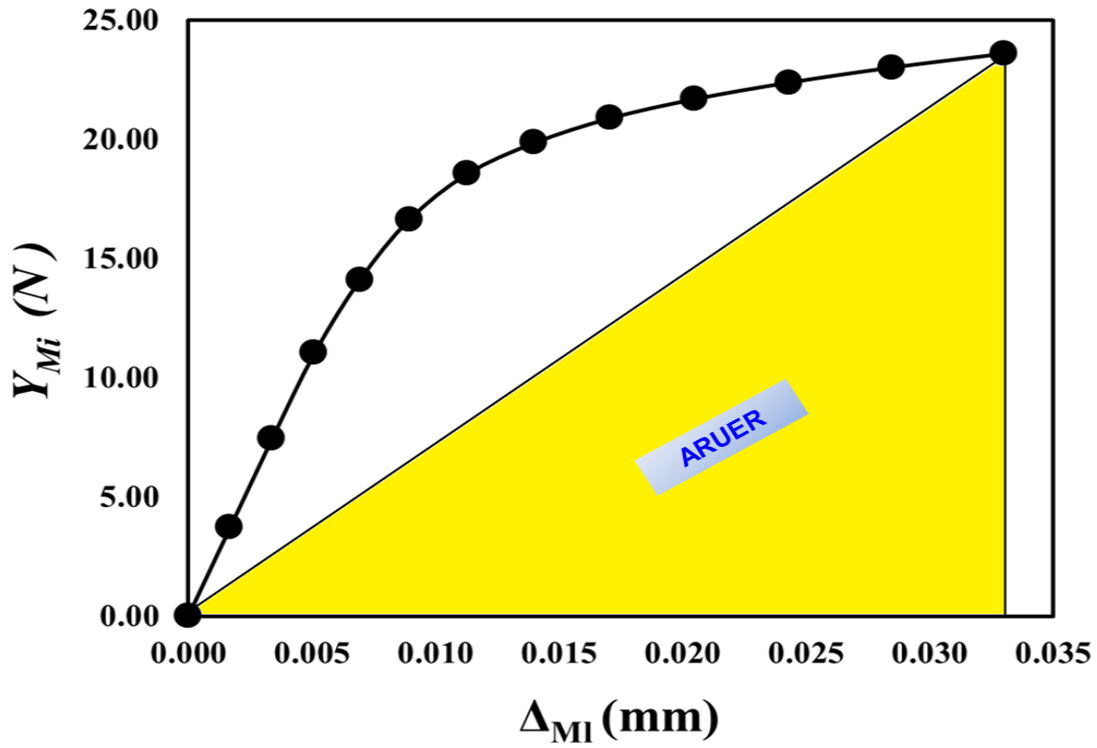


Şekil 2.23. Kırılma tokluğu testi sırasında Mi indisindeki reaksiyon kuvvet ile Ml indisindeki yer değiştirmeden dolayı oluşan AFPER değerleri.

$$AFPER_1{}^{(i),(i+1)} = -\frac{1}{2\Delta A_m}[\{\left(F_{Li_y}{}^{i+1} + F_{Li_y}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Ll_y}{}^{i+1} - \Delta_{Ll*_y}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Ll_y}{}^{i} - \Delta_{Ll*_y}{}^{i}\right]\right\}$$
$$+ \{\left(F_{Lj_y}{}^{i+1} + F_{Lj_y}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Lm_y}{}^{i+1} - \Delta_{Lm*_y}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Lm_y}{}^{i} - \Delta_{Lm*_y}{}^{i}\right]\right\}$$
$$+ \{\left(F_{Mi_y}{}^{i+1} + F_{Mi_y}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Ml_y}{}^{i+1} - \Delta_{Ml*_y}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Ml_y}{}^{i} - \Delta_{Ml*_y}{}^{i}\right]\right\} \quad (2.4)$$
$$+ \{\left(F_{Ni_y}{}^{i+1} + F_{Ni_y}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Nl_y}{}^{i+1} - \Delta_{Nl*_y}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Nl_y}{}^{i} - \Delta_{Nl*_y}{}^{i}\right]\right\}$$
$$+ \{\left(F_{Nj_y}{}^{i+1} + F_{Nj_y}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Nm_y}{}^{i+1} - \Delta_{Nm*_y}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Nm_y}{}^{i} - \Delta_{Nm*_y}{}^{i}\right]\right\}]$$

$$AFPER_2{}^{(i),(i+1)} = -\frac{1}{2\Delta A_m}[\{\left(F_{Li_x}{}^{i+1} + F_{Li_x}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Ll_x}{}^{i+1} - \Delta_{Ll*_x}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Ll_x}{}^{i} - \Delta_{Ll*_x}{}^{i}\right]\right\}$$
$$+ \{\left(F_{Lj_x}{}^{i+1} + F_{Lj_x}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Lm_x}{}^{i+1} - \Delta_{Lm*_x}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Lm_x}{}^{i} - \Delta_{Lm*_x}{}^{i}\right]\right\}$$
$$+ \{\left(F_{Mi_x}{}^{i+1} + F_{Mi_x}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Ml_x}{}^{i+1} - \Delta_{Ml*_x}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Ml_x}{}^{i} - \Delta_{Ml*_x}{}^{i}\right]\right\} \quad (2.5)$$
$$+ \{\left(F_{Ni_x}{}^{i+1} + F_{Ni_x}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Nl_x}{}^{i+1} - \Delta_{Nl*_x}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Nl_x}{}^{i} - \Delta_{Nl*_x}{}^{i}\right]\right\}$$
$$+ \{\left(F_{Nj_x}{}^{i+1} + F_{Nj_x}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Nm_x}{}^{i+1} - \Delta_{Nm*_x}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Nm_x}{}^{i} - \Delta_{Nm*_x}{}^{i}\right]\right\}]$$

$$AFPER_2{}^{(i),(i+1)} = -\frac{1}{2\Delta A_m}[\{\left(F_{Li_z}{}^{i+1} + F_{Li_z}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Ll_z}{}^{i+1} - \Delta_{Ll*_z}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Ll_z}{}^{i} - \Delta_{Ll*_z}{}^{i}\right]\right\}$$
$$+ \{\left(F_{Lj_z}{}^{i+1} + F_{Lj_z}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Lm_z}{}^{i+1} - \Delta_{Lm*_z}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Lm_z}{}^{i} - \Delta_{Lm*_z}{}^{i}\right]\right\}$$
$$+ \{\left(F_{Mi_z}{}^{i+1} + F_{Mi_z}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Ml_z}{}^{i+1} - \Delta_{Ml*_z}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Ml_z}{}^{i} - \Delta_{Ml*_z}{}^{i}\right]\right\} \quad (2.6)$$
$$+ \{\left(F_{Ni_z}{}^{i+1} + F_{Ni_z}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Nl_z}{}^{i+1} - \Delta_{Nl*_z}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Nl_z}{}^{i} - \Delta_{Nl*_z}{}^{i}\right]\right\}$$
$$+ \{\left(F_{Nj_z}{}^{i+1} + F_{Nj_z}{}^{i}\right).\left(\left[\Delta_{Nm_z}{}^{i+1} - \Delta_{Nm*_z}{}^{i+1}\right] - \left[\Delta_{Nm_z}{}^{i} - \Delta_{Nm*_z}{}^{i}\right]\right\}]$$



Şekil 2.24. Kırılma tokluğu testi sırasında B noktasındaki reaksiyon kuvvet (P_B) ile A noktasındaki yer değiştirme (V_A) arasındaki ilişki ve ARUER tanımı.

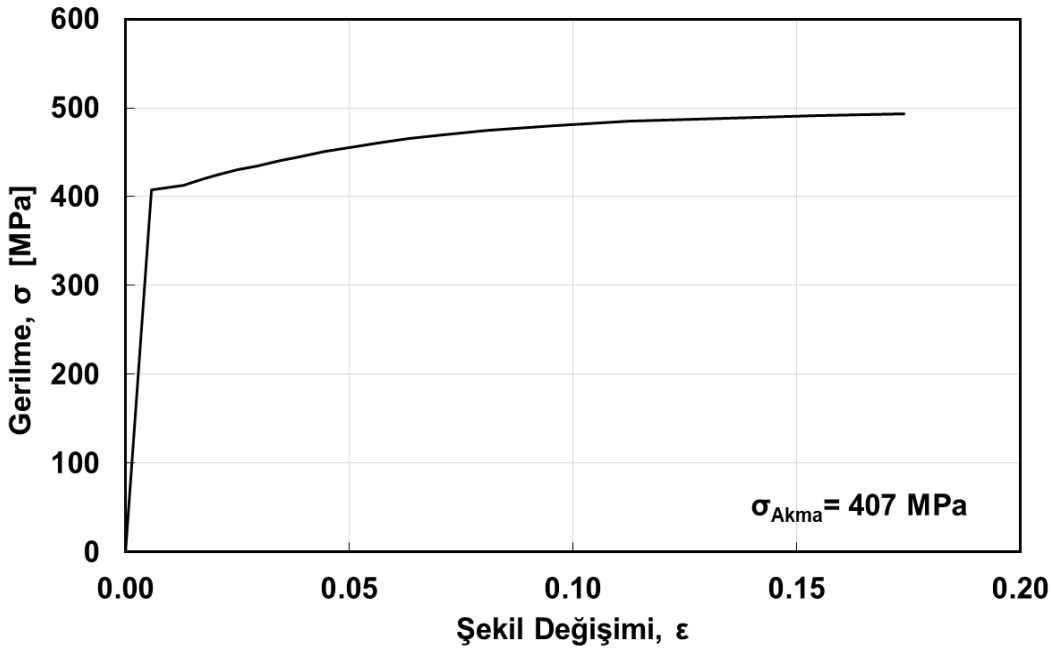
Malzemenin kalınlığı, çatlak uzunluğu gibi değişkenler çatlak ucundaki plastik deformasyonu, dolayısıyla kaybolan enerji miktarını değiştirecektir. AFPER hesaplamalarında sayısal değerlerin büyük kısımının bu harcanan enerji olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla kırılma analizlerinin karekterize edilebilmesi için bir parametreye daha ihtiyaç vardır. Lineer-elastik malzemelerde yükleme ve enerji salınım oranının eşit olduğu bilinmektedir. Elastik-plastik malzemelerde ise yükleme lineer olarak değişmemektedir. Ancak enerji salınımı lineer olarak gerçekleşmekte ve bu iki değer birbirine eşit olmamaktadır. Kırılma analizinde son adımdaki reaksiyon kuvvet ve yerdeğiştirme değerinin sıfır noktasına kadar salınacağı kabülü ile yeni parametre ekleyebilir ve bu alanın sayısal değerine ise yapay tersinebilir yük boşaltım enerji oranı (Artificial Recorable Unloading Enerji Release Rate) olarak isimlendirilmiştir (şekil 2.24). Yapay Tersinebilir Yük Boşaltım Enerji Oranı (ARUER) hesaplama formülü ise lineer elastik problem için VCCT metodunda kullanılan formülasyon ile aynıdır. Lineer olmayan analizlerden hesaplanan son adımın reaksiyon kuvvet ve yer değiştirme sonuçları Denklem 1.24-1.26'e girerek enerji salınım oranı değeri hesaplanabilir. Denklem 2.4-2.6'ya göre hesaplanan AFPER ve denklem 1.24-1.26 ile hesaplanan ARUER değerlerinde, reaksiyon kuvvetlerin birimi N, yer değiştirmelerin birimi ise mm'dir. Denklemde yer alan ΔA_m ise kuvvet ve yer değiştirmelerin hesaplandığı düğüm noktasının bağlı olduğu elemanın alanıdır ve birimi mm^2'dir. Böylece AFPER ve ARUER değerinin birimi ilgili denklemlere göre N/mm olarak hesaplanmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen analizlerin modelleri ANSYS sonlu elamanlar yazılımı ile hazırlanmıştır. Program üzerinden çatlak ucundaki düğüm noktalarının yer değiştirme ve reaksiyon kuvveti değerleri hazırlanan makrolar ile okunarak AFPER ve ARUER hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu değerlerin okunması ve denklemlere yerleştirilmesi aşaması ise C# ile hazırlanan bir kod yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

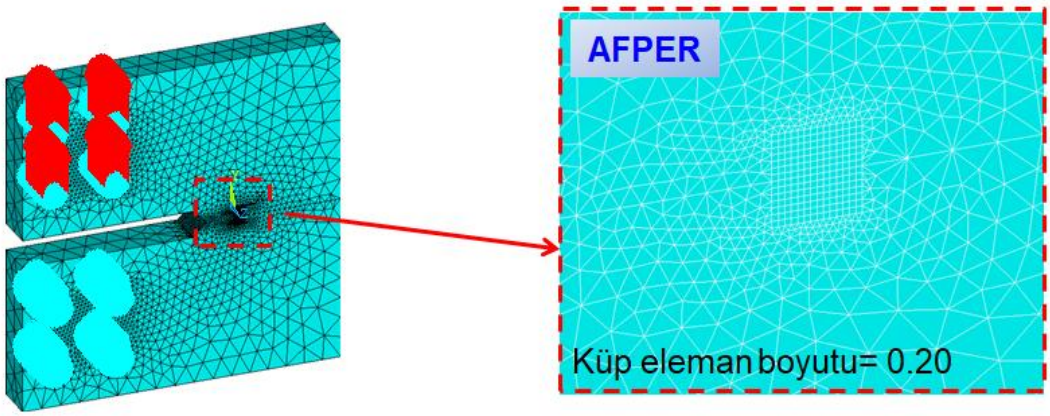
2.2.2. AFPER/ARUER yöntemi için ağ yapısı hassasiyet analizleri

Bu bölüm içerisinde AFPER/ARUER yöntemi için 30 mm çatlak içeren 8 mm kalınlıklı bir CTST numunesi modellenerek gerçekleştirilen bölüntü duyarlılık analizleri sunulacaktır. Analizler için AL-2024 malzeme özellikleri kullanılmıştır. Şekil 2.25'te literatürden alınan gerilme – birim şekil değiştirme grafiği gösterilmektedir. Şekil 2.26'te AFPER/ARUER hesaplamaları için kullanılan sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir. Duyarlılık analizleri kapsamında CTST numunesi

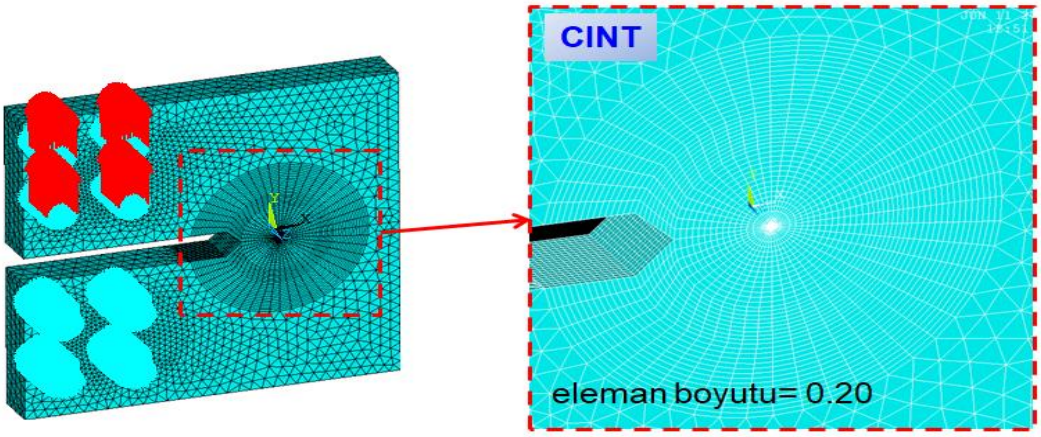
kullanılmıştır. Numune alt pim deliklerinden sabitlenmiş (Ux=0, Uy=0, Uz =0), üst pim deliklerinden ise X ve Z ekseninde sabitlenmiş (Ux=0, Uz =0) ve dikey yönde 10 kN yük uygulanmıştır. Numunenin çatlak ucu civarındaki ağ yapısı için 20 düğüm noktalı küp elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların boyutları 0.5mm ile 0.05 mm arasında değiştirilerek duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca model doğrulamaları için yukarıdaki analizlerin bazıları CINT ile de modellenmiştir (Şekil 2.26).



Şekil 2.25. Bölüntü duyarlıklık analizleri için kullanılan malzeme özellikleri.

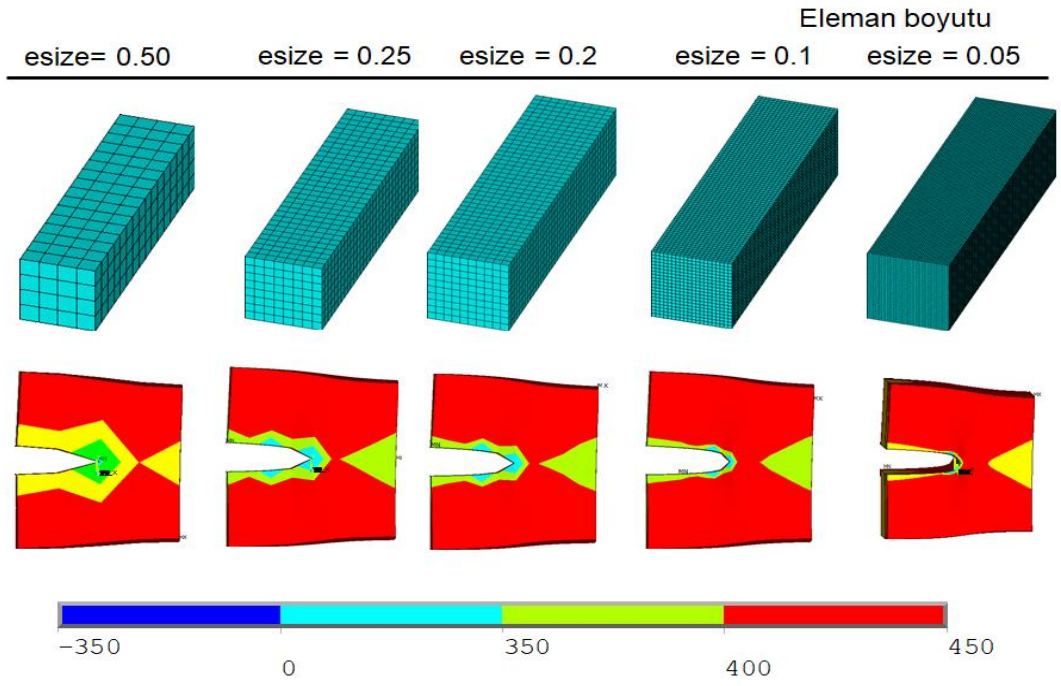


Şekil 2.26. AFPER/ARUER hesaplamaları için kullanılan ağ yapısı.



Şekil 2.27. CINT hesaplamaları için kullanılan ağ yapısı.

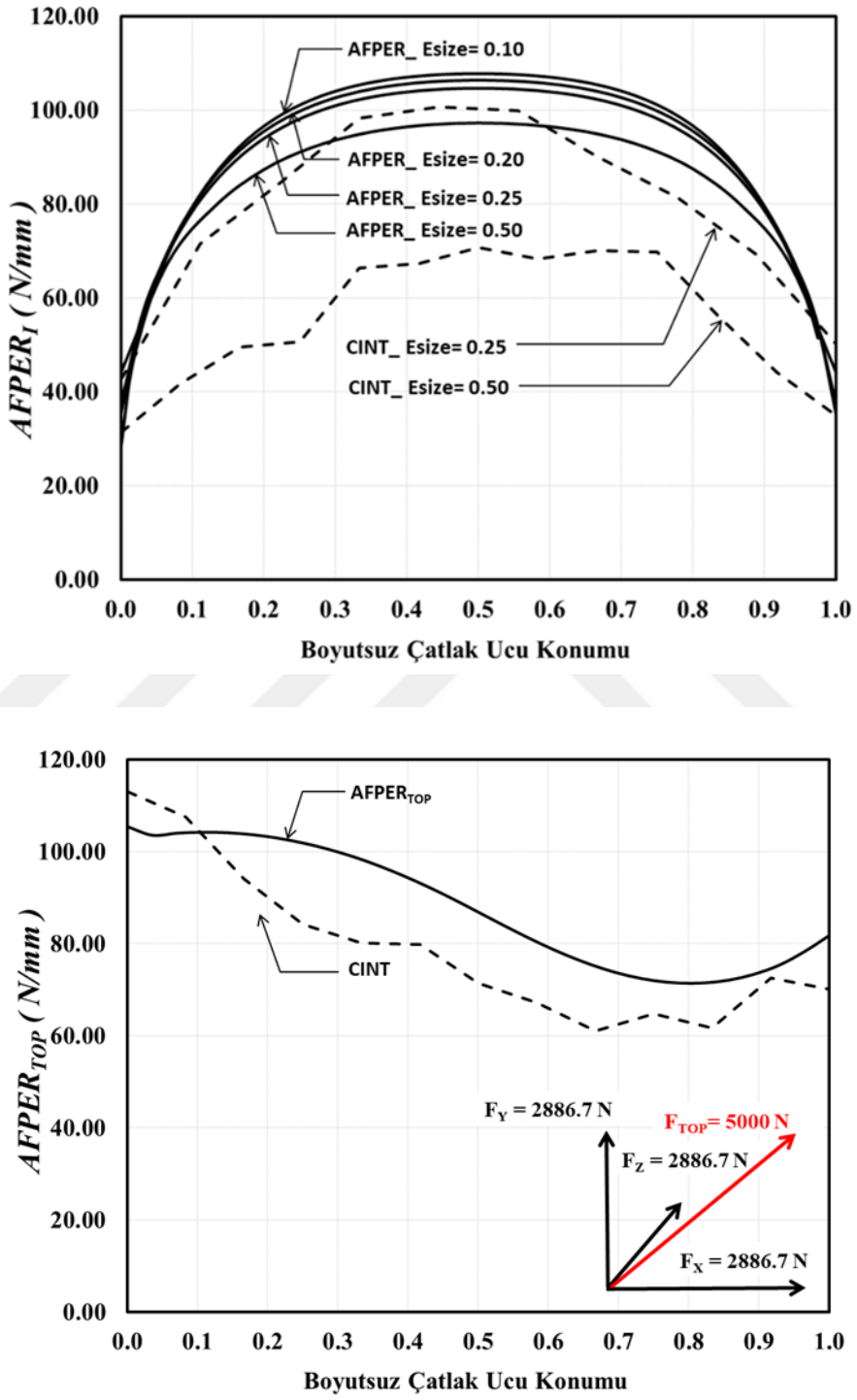
Çatlak ucundaki ağ yapısına bağlı olarak çatlak ucu ve civarındaki gerilme değerleri de değişmektedir. Şekil 2.28 çatlak ucundaki elemanların farklı eleman boyutu için görüntülerini ve sonlu elamanlar analizi sonucu elde edilen gerilme dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 2.28. AFPER/ARUER yöntemi için sonlu elemanlar analizi sonucu çatlak ucu gerilme dağılımları.

Şekil 2.29'da mod-I ve ve mod-I/II/II bölüntü duyarlılık analizleri sonucu elde edilen AFPER değerlerini ve CINT komutu ile hesaplanan J-integral değerlerini gösterilmektedir. Eleman boyutunun 0.20 mm ve daha düşük olduğu değerler için AFPER sonuçları birbirine çok yakındır. Elde edilen bu sonuçlara göre tez çalışması

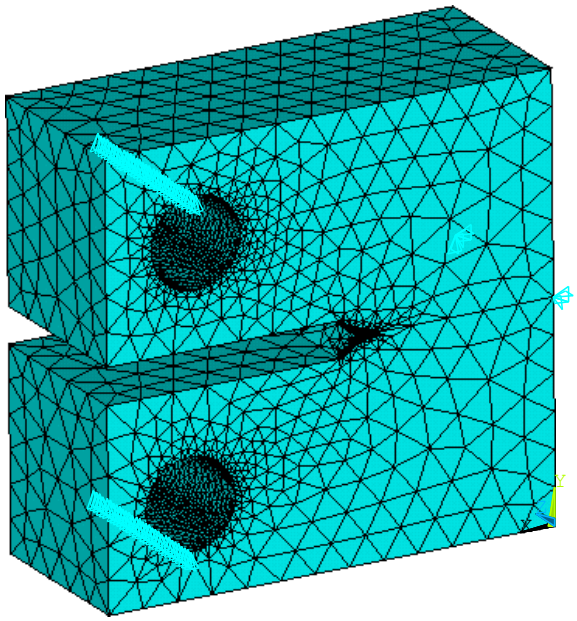
kapsamında gerçekleştirilecek tüm AFPER/ARUER analizleri için eleman boyutu 0.20 mm olarak seçilmiştir. Bu değer, numune çatlak uzunluğunun 1/125'ne karşılık gelmektedir.



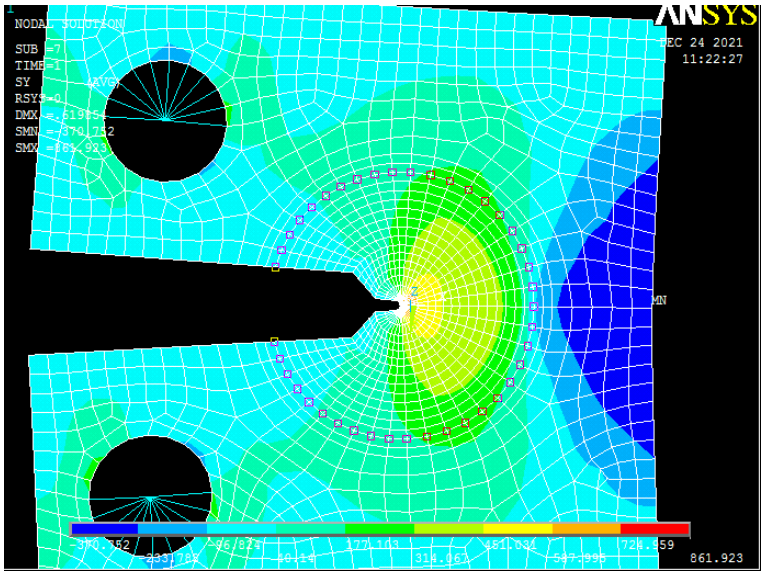
Şekil 2.29. Ağ hassasiyet analizleri sonucu farklı eleman boyutları için elde edilen Mod-I/II/III AFPER ve J-integral değerlerinin çatlak ucu boyunca değişimi.

2.2.3. AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan kırılma parametrelerinin literatür verileri ile karşılaştırılması

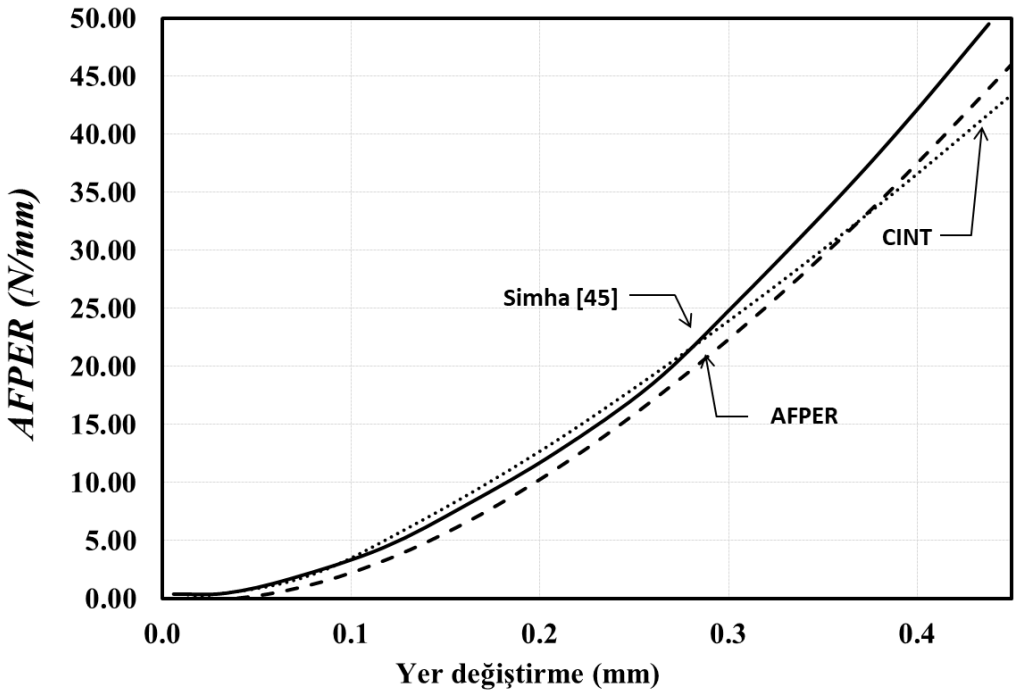
Bu bölümde AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan AFPER değerlerinin literatürde yer alan bazı çalışmalarda hesaplanan J-integral değerleri ile karşılaştırılması sunulacaktır. Bu kapsamda ilk olarak Simha ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma [45] ele alınarak elde edilen sonuçların kıyaslaması verilmiştir. Analiz için kullanılan malzeme özellileri; elastiklik modülü E = 207 GPa, poisson oranı v = 0.3, Akma Mukavemeti $\sigma_{Ak} =$ 270 MPa, çekme mukavemeti $\sigma_{Ç} =$ = 426 MPa'dir. Sonlu elemanlar analizi Voce kuralı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sabitleri ise, R_0 = 355.50 Mpa, R_{inf} = 368.72 Mpa ve b = -31.75'dir. Şekil 2.30 ise 25 mm çatlak içeren, et kalınlığı 25 mm olan bir CT numunesi için ANSYS'te hazırlanan sonlu elemanlar modelini vermektedir. Analiz yer değiştirme kontrollü yapılmış ve maksimum dikey yer değiştirme pim deliğinde 0.45 mm olarak uygulanmıştır. Doğrulama amacıyla aynı problem CINT komutu ile çözdürülmüştür. Şekil 2.31'te J-integral çözümü için kullanılan ağ yapısını gösterilmektedir. Şekil 2.32'te ise sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan AFPER, J-integral metodu ile referans makalenin karşılaştırma sonuçlarını gösterilmektedir. Değerler arasındaki maksimum fark %10 seviyesindedir.



Şekil 2.30. AFPER/ARUER hesaplamaları için CT numunesi sonlu elemanlar modeli.



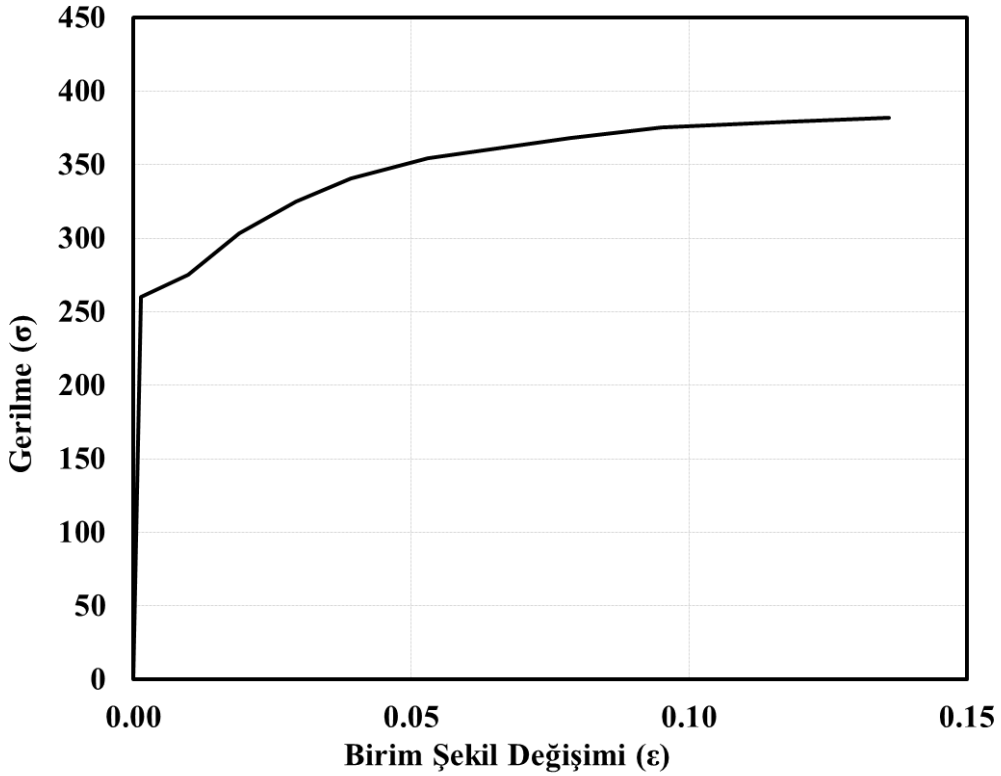
Şekil 2.31. J-integral hesaplamaları için CT numunesi problemi sonlu elemanlar modeli.



Şekil 2.32. AFPER doğrulama çalışmaları kapsamında, CT numunesi için analiz sonuçları [45].

Doğrulama çalışmaları kapsamında ele alınan diğer bir problem ise Jandejsek ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmadır [46]. Bu çalışma içerisinde 25 mm çatlak içeren 5 mm kalınlıklı bir CT numunesi iki boyutlu olarak modellenmiş ve çatlak ucu yerdeğiştirme miktarı (CTOD) ve J-integral hesaplamaları yapılmıştır.

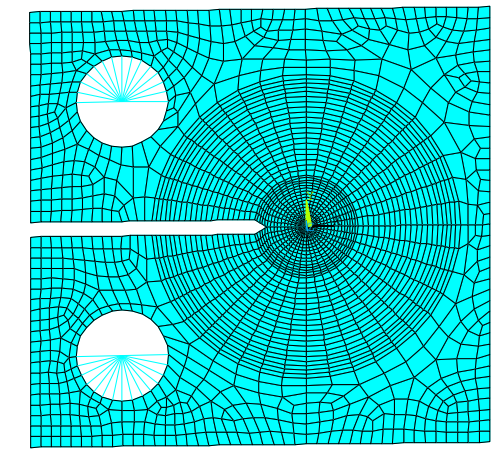
Analiz için kullanılan malzemenin elastik modülü E = 206 Gpa, poisson oranı v = 0.3, Akma Mukavemeti $\sigma_{Ak} =$ 260 Mpa, çekme mukavemeti $\sigma_{Ç} =$ = 380 Mpa'dır. Referans çalışmada gerçek gerilme-şekil değişimi diyagramı kullanılmıştır. Bu çalışmada ise bu diyagram mühendislik gerilme-gerinim diyagramına dönüştürülerek analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.33'da analizler için kullanılan gerilme-gerinim diyagramı verilmektedir.



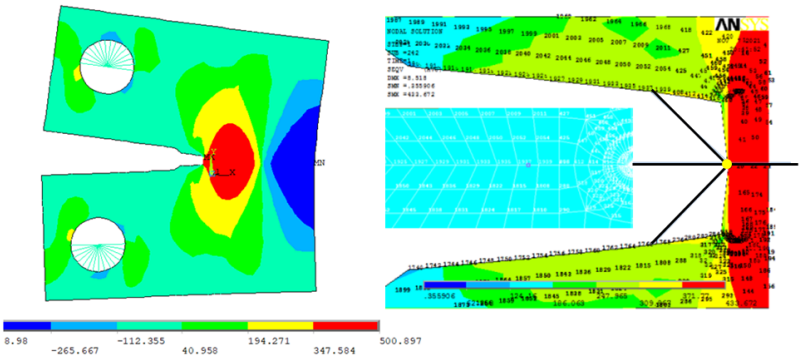
Şekil 2.33. 25 mm çatlak içeren CT numunesi için malzeme özellikleri.

Problem CINT komutu ile J-integral hesaplamaları için iki boyutlu olarak modellenmiştir. Şekil 2.34, hazırlanan sonlu elamanlar modelini göstermektedir. J-integral hesaplamaları CINT komutu ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çatlak ucu yer değiştirme miktarı ve enerji salınım oranı arasındaki ilişkiyi veren denklem (1.30) kullanılarak, CTOD yöntemi aracılığı ile enerji salınım oranı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 2.35, 90 derece kesişim yöntemiyle CTOD hesaplanan bölgeyi göstermektedir. AFPER hesaplamaları için ise üç boyutlu model oluşturulmuş ve AFPER değerleri hesaplanmıştır. Şekil 2.36'te AFPER yöntemi için hazırlanan ağ yapısını, şekil 2.37 ise sonlu elamanlar analizleri sonrası karşılaştırma grafikleri gösterilmektedir. CTOD temelli olarak hesaplanan yöntemler arasındaki fark %1 mertesinde fark ile uyum içerisindedir. Referans makaledeki problem CINT komutu ve AFPER yöntemi ile de

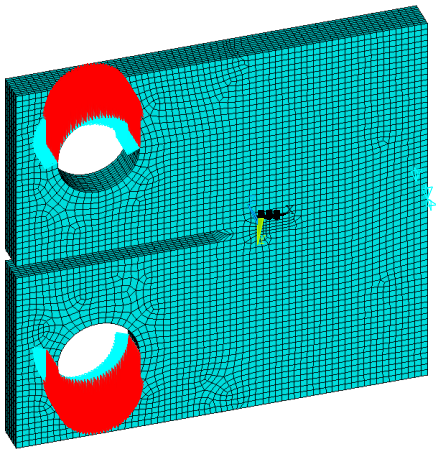
hesaplanmış ve değerler %1 mertebesinde uyuşmaktadır. J-integral ve CTOD temelli olarak ayrı ayrı hesaplanan yöntemler arasında ise %15 civarında bir fark bulunmaktadır. Bir denklemin empirik bir denklem ile diğerinin ise analizler ile hesaplandığı bilinmektedir. Dolayısı ile yöntemler arasındaki fark makul seviyededir.



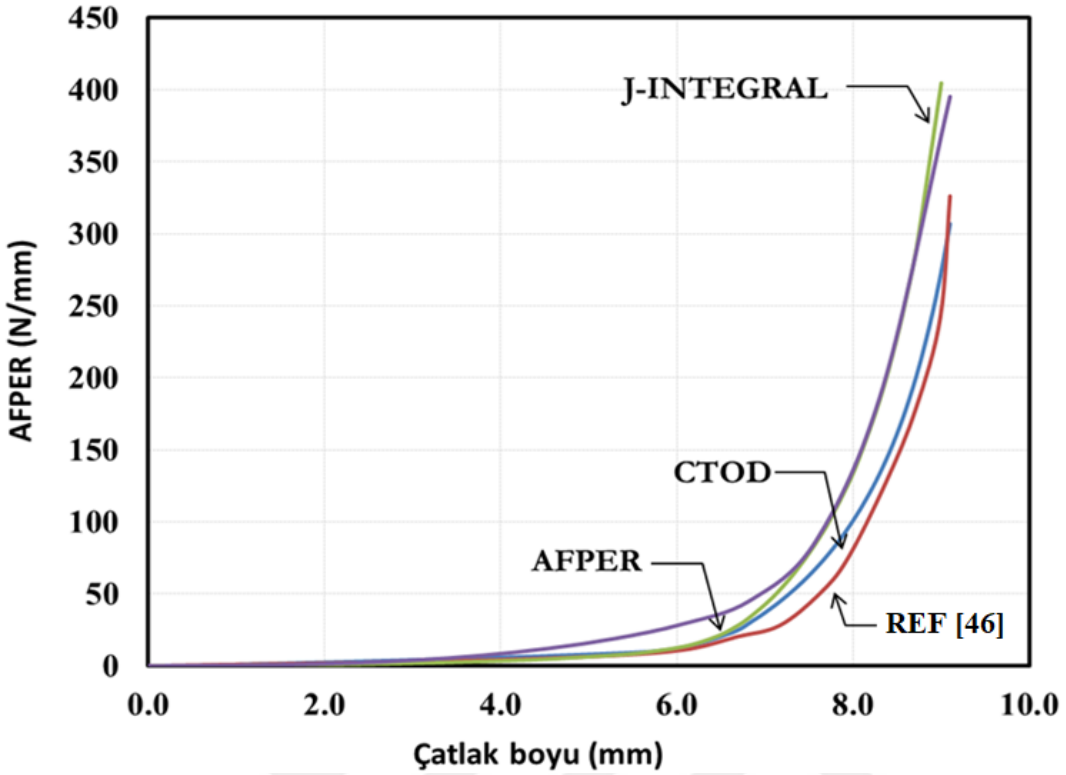
Şekil 2.34. CINT komutu ile J-integral metodu için hazırlanan ağ yapısı.



Şekil 2.35. CINT komutu ile çatlak ucu yer değiştirme miktarı (CTOD) hesabı.

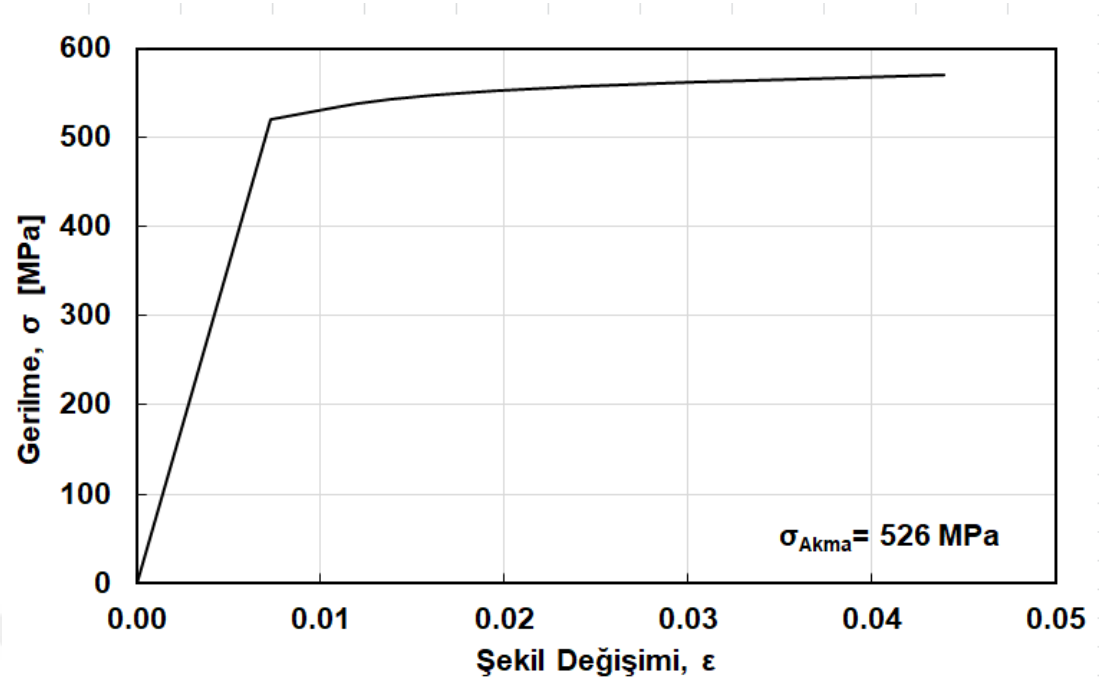


Şekil 2.36. AFPER hesaplamaları için hazırlanan ağ yapısı.

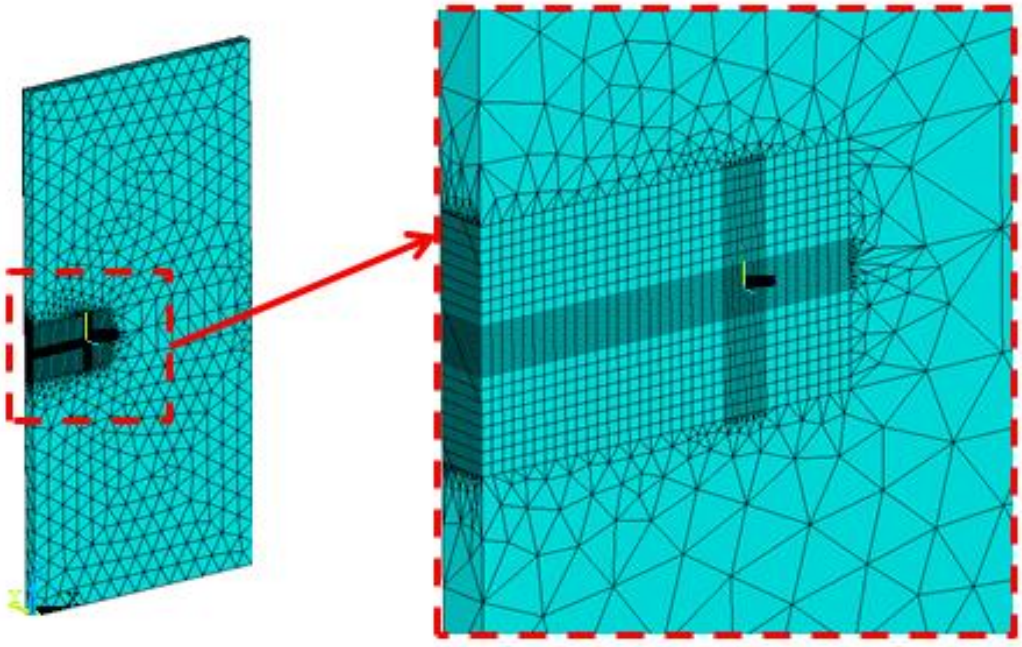


Şekil 2.37. Sonlu elemanlar analizi sonucu farklı yöntemlerle hesaplanan J-integral ve AFPER değerlerinin referans ile karşılaştırılması [46].

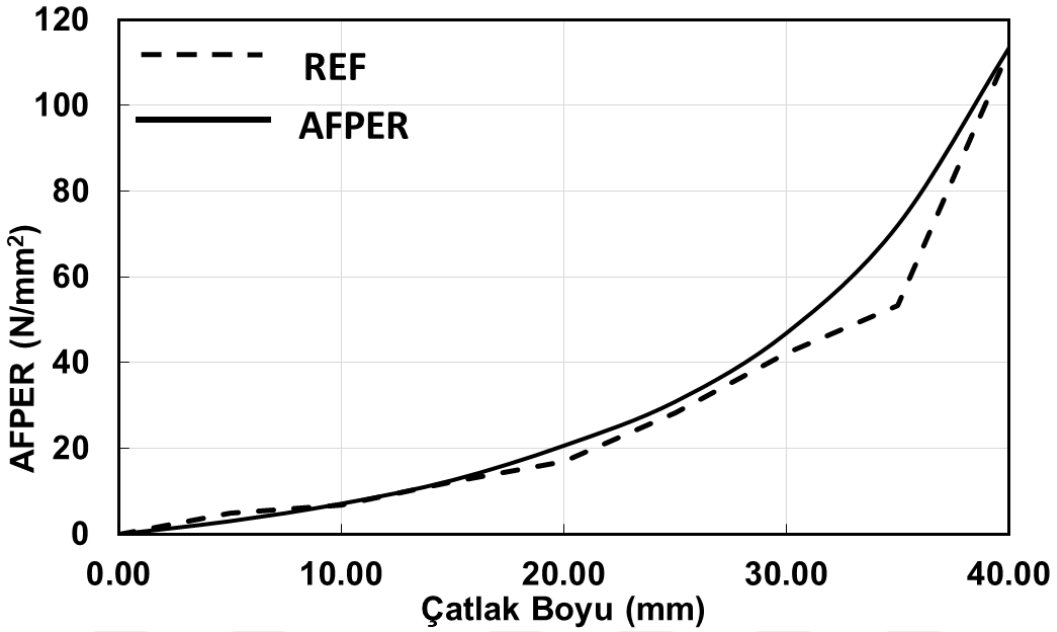
Bu kısımdaki son problem ise Gajjar ve Pathak tarafından gerçekleştirilen bir çalışmadır [47]. Çalışma içerisinde farklı çatlak boylarına sahip levhaların analizleri gerçekleştirilmiş ve J-integral hesaplamaları yapılmıştır. Doğrulama analizleri kapsamında referans çalışmadaki modeller hazırlanmış ve AFPER hesaplamaları yapılmıştır. Analizlerde kullanılan malzemenin elastiklik modülü E = 71,6 Gpa, poisson oranı v = 0.3, Akma Mukavemeti σ_{Ak} = 526 Mpa, çekme mukavemeti $\sigma_{Ç}$ = 570 Mpa'dır. Şekil 2.38'te malzemenin gerilme - şekil değişimi diyagramı verilmektedir. Şekil 2.39, hazırlanan sonlu elemanlar modelini, Şekil 2.40 ise farkı çatlak boyları için hesaplanan AFPER değerlerinin referans makaledeki J-integrali değerleri ile karşılaştırmasını sunmaktadır. Hesaplanan değerler arasında maksimum fark %4 mertebesindedir.



Şekil 2.38. Çatlaklı levha problemi için kullanılan gerilme – şekil değişimi diyagramı.



Şekil 2.39. Çatlaklı levha problemi için kullanılan sonlu elemanlar modeli.



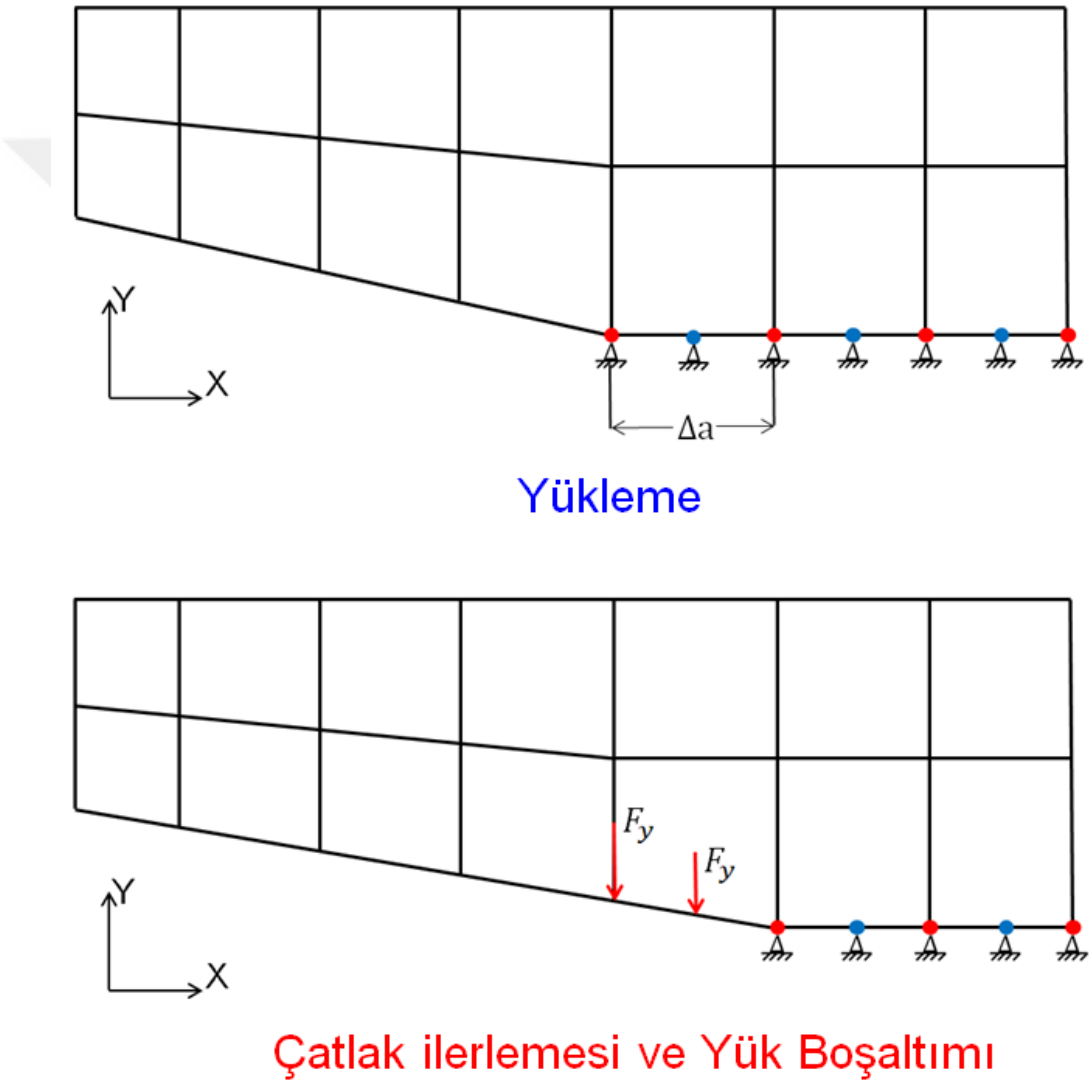
Şekil 2.40. Çatlaklı levha problemi için hesaplanan AFPER değerinin referans çalışma ile hesaplanan J-integral değerleri ile karşılaştırılması [47].

Bu kısımda üç farklı çalışma referans alınarak AFPER sonuçlarının J-integral ile uyumluluğu incelenmiştir. Sonuçlar arasındaki maksimum fark yüzde 10 mertebesindedir. Malzeme modelleri, ağ yapısı ve yöntem farklılıkları sebebiyle bu farkın makul olduğu kabul edilebilir.

2.3. Düğüm Noktası Salınım ve Yük Boşaltma Yöntemi İle Enerji Salınım Oranı Hesaplanması

Bu kısımda, çatlak ilerlemesi sırasında yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesaplanması anlatılacaktır. Önceki bölümlerde anlatılan AFPER ve ARUER değerleri kararsız kırılma çatlak ilerleme sürecinde kırılma süreci enerjisini temsil etmek üzere tanımlanmış ve uyarlanmış (yapay) değerlerdir ve tam olarak enerji salınım oranını temsil etmemektedir. AFPER malzemenin uğradığı plastik deformasyonu da içermesi sebebiyle, müstakil olarak çatlak ilerleme ve ömür tahminlerinde kullanılamayacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda Ren ve arkadaşları tarafından hazırlanan makale [48] incelenmiş ve benzer simülasyonun gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu yöntemde iki aşamada lineer olmayan analiz gerçekleştirilir. Birinci aşama yükleme aşaması ve ikinci aşama ise çatlağın ilerletilerek çatlak ucundaki yükün kademeli olarak boşaltılması aşamasıdır. aşamasıdır. Yükleme aşamasında, ikinci aşamada çatlak ilerlemesi gerçekleştirilecek elemanın düğüm noktalarının yer değiştirmeleri sınırlanır (Uy =0) ve pim deliklerine arttırımlı olarak yük uygulanır. Yükleme aşamasında çatlak

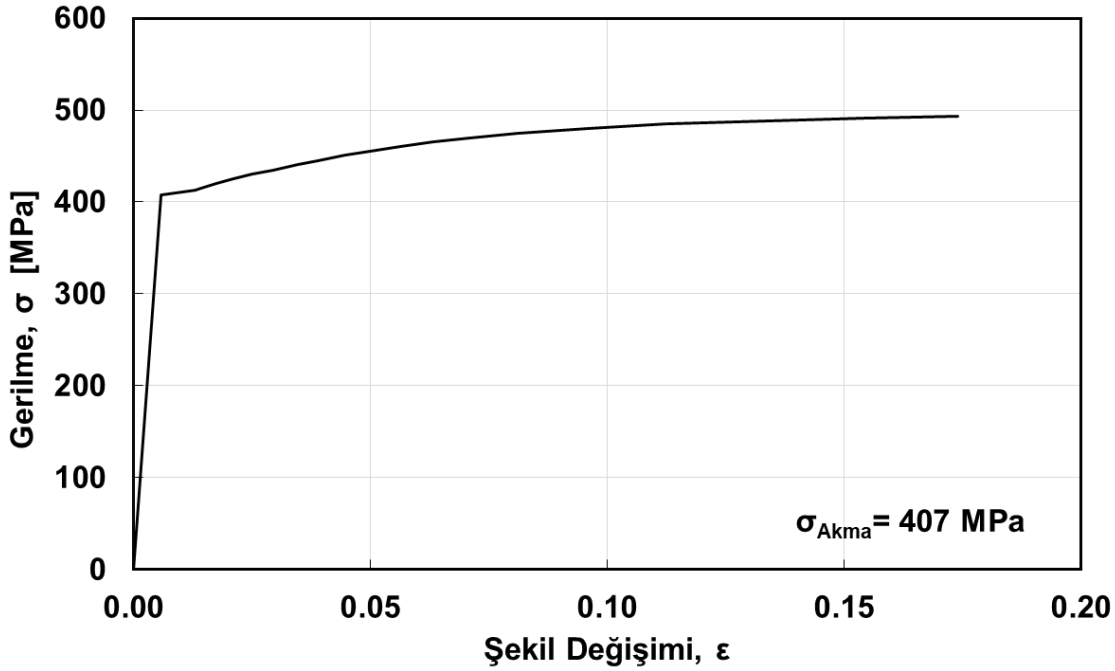
ucunda oluşan reaksiyon kuvvetler sonlu elemanlar analizi ile hesaplanır ve ikinci aşama olan çatlak ilerletilmesi aşamasına geçilir. İkinci aşamada, pim deliğine uygulanan yük birinci aşama analizinin son kademesindeki sabit değerinde tutulur. Ancak çatlak ucundaki yerdeğiştirme sınır şartı kaldırılır. Yükleme aşamasının son adımında çatlak ucunda oluşan reaksiyon kuvvetleri belirli sabit oranlarda azaltılarak serbest bırakılan çatlak ucu düğüm noktalarına uygulanır. Çatlak ilerleme aşamasının son adımında ise çatlak ucunda reaksiyon kuvvetler sıfıra ulaşmış olur. Şekil 2.41'te yükleme ve boşaltma aşamasındaki sınır şartları gösterilmektedir.



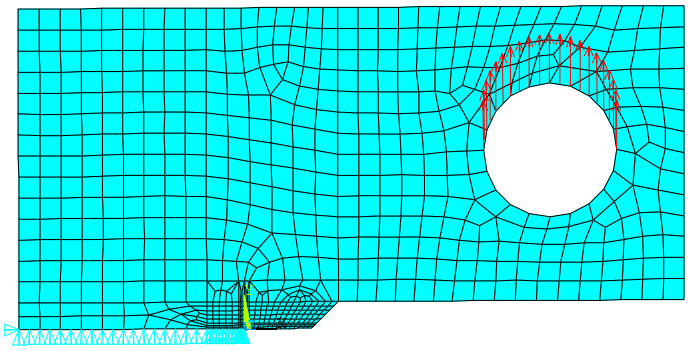
Şekil 2.41. Düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesaplanması sırasında yükleme ve boşaltma adımları sınır şartları [48].

Analizde kullanılan malzemenin elastiklik modülü E = 71,3 Gpa, poisson oranı v = 0.3, Akma Mukavemeti σ_{Ak} = 407 Mpa, çekme mukavemeti $\sigma_{Ç}$ = = 492 Mpa'dır. Şekil 2.42'da analizde kullanılan malzemenin gerilme-gerinim diyagramı

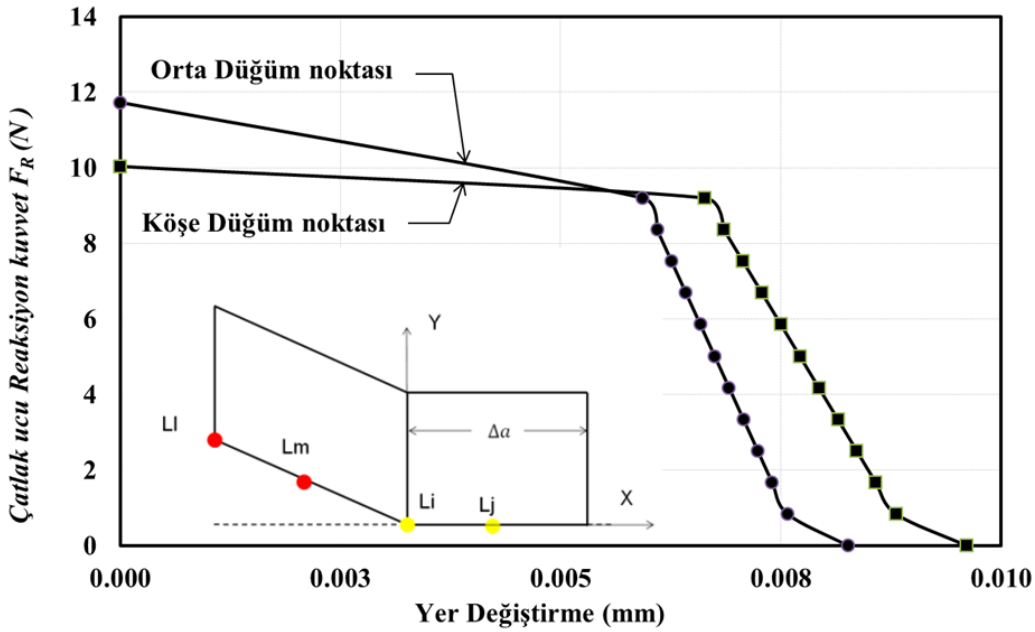
verilmektedir.Şekil 2.43 iki boyutlu ve simetrik olarak hazırlanan 0.2 mm kalınlığa sahip bir CT numunesinin sonlu elemanlar modelini göstermektedir. Model plane-183 elemanı ile hazırlanmış ve eleman kartı içerisinden kalınlık ile düzlemsel gerilme koşulları seçilmiştir. Şekil 2.43'te hazırlanan sonlu elemanlar modelini gösterilmektedir. Pim deliğinden 220N yük uygulanmış ve simetri şartları modele eklenmiştir. Şekil 2.44 ise analiz sonucu yer değiştirmeye karışılık hesaplanan reaksiyon kuvvet grafiğini vermektedir.



Şekil 2.42. Düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesaplanması için kullanılan gerilme-gerinim diyagramı.

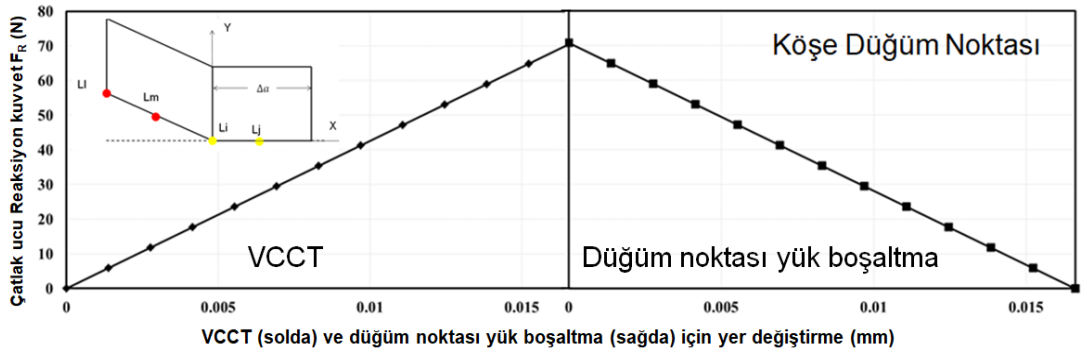


Şekil 2.43. Düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesaplanması için hazırlanan sonlu elemanlar modeli.

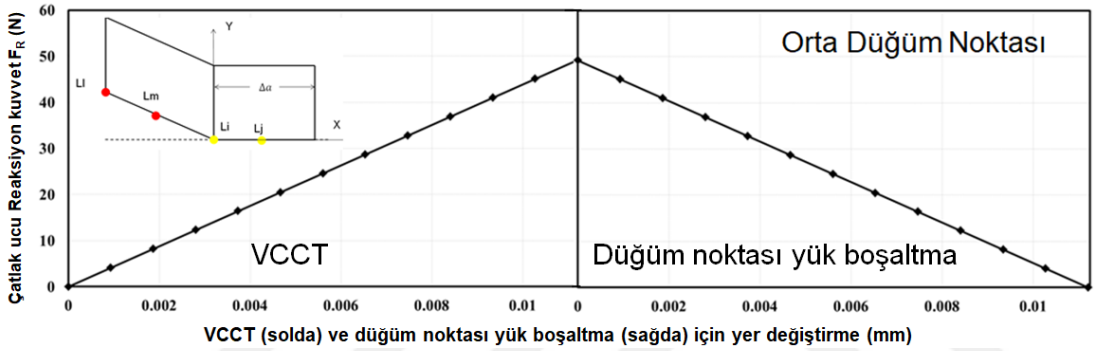


Şekil 2.44. Düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesaplanması için boşaltım sırasındaki yerdeğiştirme-reaksiyon kuvvet ilişkisi.

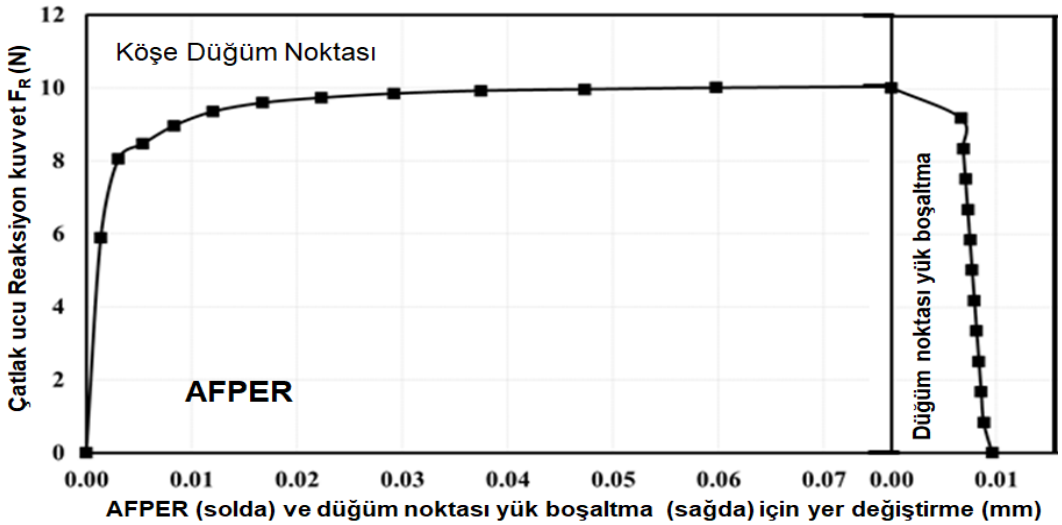
Diğer yandan, aynı problem lineer elastik deformasyon şartları altında gerçekleştirildiğinde VCCT'den elde edilen değerler ile aynı sonucu vermelidir. Bu doğrultuda aynı model VCCT hesaplamaları için hazırlanmış olup şekil 2.45'te bu analizden elde edilen reaksiyon kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi verilmektedir. Şekil 2.45'te lineer-elastik koşullarda modellenen bir analizin, düğüm noktası yük boşaltma yöntemi ile köşe düğüm noktası için, şekil 2.46 ise orta düğüm noktası için hesaplanan reaksiyon kuvvet - yer değiştirme ilişkisinin, VCCT yöntemi ile karşılaştırmasını sunmaktadır. VCCT ve yük boşaltma ile enerji salınım oranı değerleri birbirlerine eşit olduğu görülmektedir. Şekil 2.47'te elastik - plastik koşullarda modellenen bir analizin, düğüm noktası yük boşaltma yöntemi ile köşe düğüm noktası için, şekil 2.48 ise orta düğüm noktası için hesaplanan reaksiyon kuvvet - yer değiştirme ilişkisinin, AFPER hesaplamaları ile karşılaştırmasını sunmaktadır. Değerler arasında yaklaşık 5 kat fark yer almaktadır. Burada düğüm noktası salınımı ile yük boşaltma enerji salınım oranı hesaplamaları plastik deformasyonu içermeyen sadece çatlak ilerlemesi için harcanan enerji olarak yorumlanabilir. AFPER analizinde yükleme aşaması sonucunda elde edilen değerler ise yükleme aşamasında plastik deformasyona harcanan enerjiyi de içermektedir.



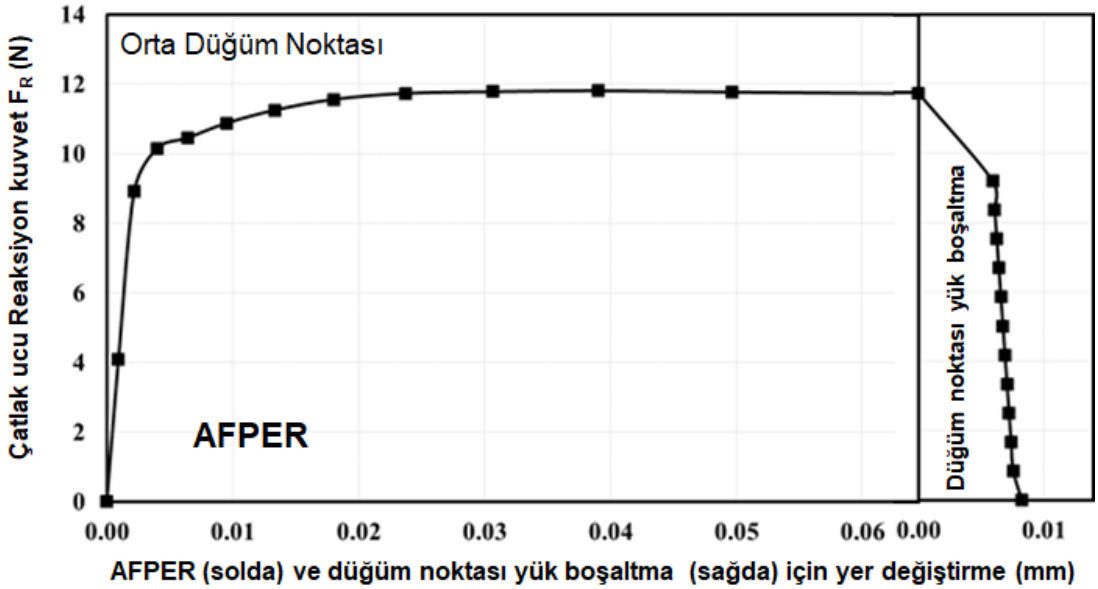
Şekil 2.45. Lineer Elastik koşullarda gerçekleştirilen bir analiz için VCCT yöntemi ve düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı yöntemi için köşe düğüm noktasının çatlak ilerleme sırasındaki yer değiştirme - reaksiyon kuvvet ilişkisi



Şekil 2.46. Lineer Elastik koşullarda gerçekleştirilen bir analiz için VCCT yöntemi ve düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı yöntemi için orta düğüm noktasının çatlak ilerleme sırasındaki yer değiştirme - reaksiyon kuvvet ilişkisi.



Şekil 2.47. Elastik –plastik koşullarda gerçekleştirilen bir analiz için AFPER yöntemi ve düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı yöntemi için köşe düğüm noktasının çatlak ilerleme sırasındaki yer değiştirme - reaksiyon kuvvet ilişkisi.



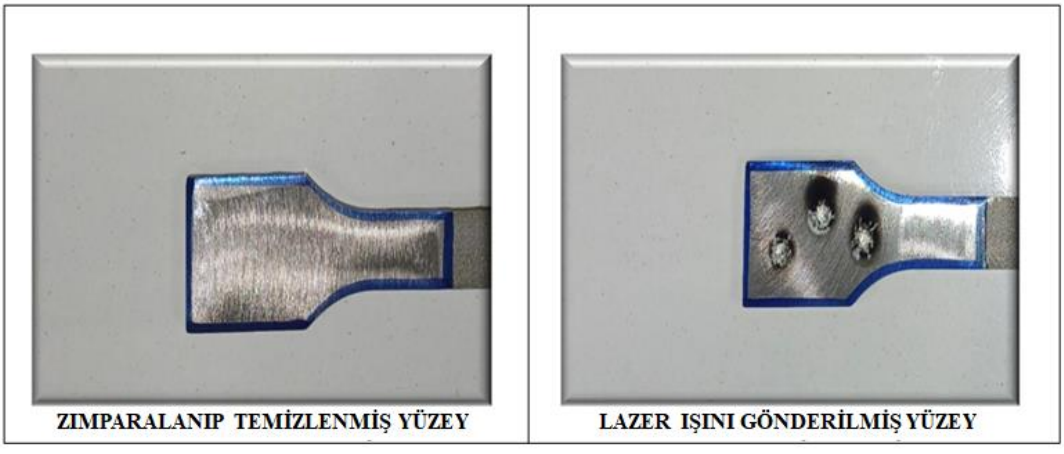
Şekil 2.48. Elastik –plastik koşullarda gerçekleştirilen bir analiz için AFPER yöntemi ve düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı yöntemi için orta düğüm noktasının çatlak ilerleme sırasındaki yer değiştirme - reaksiyon kuvvet ilişkisi.

3. AL-2024 MALZEMESİ İÇİN MEKANİK VE KARIŞIK MOD KIRILMA TOKLUĞU TESTLERİ

Bu bölüm içerisinde AL-2024 T351 malzemesi için gerçekleştirilen karakterizasyon, mekanik ve karışık mod kırılma tokluğu testlerinin detayları verilecektir. Çalışma kapsamında ilk olarak malzemenin kimyasal analizi ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ileride kriter gelişme çalışmalarında kullanılmak üzere mod-I, mod-I/II, mod-I/III ve mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. Al-2024 T351 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu aşamada ilk olarak tez kapsamında kullanılan AL-2024 T351 malzemesinin kimyasal analiz çalışmaları sunulmuştur. Kimyasal analiz testleri, TIRSAN Treyler A.Ş mekanik laboratuvarında yer alan optik spektrometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test aşamasında, öncelikle numune ince zımpara ile temizlenmiş ve sonrasında yüzeye üç adet lazer ışını gönderilmiştir. Şekil 3.1'te kimyasal analiz gerçekleştirlen yüzeyi gösterilmektedir. Şekil 3.2'de ise Al-2024 T351 malzemesi için gerçekleştirilen kimyasal analiz sonuçlarını sunulmaktadır. Test EN 573-3: 2009 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [49].



Şekil 3.1. AL 2024 T351 malzemesinin kimyasal analizi için kullanılan numune.

	Al [%]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Zn [%]
1	93.0	0.216	0.252	4.14	0.516	1.45	0.249
2	92.8	0.222	0.274	4.21	0.541	1.54	0.254
3	92.8	0.221	0.281	4.16	0.561	1.56	0.266
⇑		0.500	0.500	4.90	0.900	1.80	
↑		0.500	0.500	4.90	0.900	1.80	
Ø	**92.9**	**0.220**	**0.269**	**4.17**	**0.540**	**1.52**	**0.256**
↓		0.0000	0.0000	3.80	0.300	1.20	
⇓		0.0000	0.0000	3.80	0.300	1.20	

	Cr [%]	Ni [%]	Ti [%]	Be [%]	Ca [%]	Pb [%]	Sn [%]
1	0.0202	0.0088	0.0270	<0.0010	<0.0010	0.0111	<0.0050
2	0.0194	0.0099	0.0274	<0.0010	<0.0010	0.0107	<0.0050
3	0.0193	0.0108	0.0271	<0.0010	<0.0010	0.0137	<0.0050
⇑	0.100		0.150			0.0500	
↑	0.100		0.150			0.0500	
Ø	**0.0196**	**0.0098**	**0.0272**	**<0.0010**	**<0.0010**	**0.0118**	**<0.0050**
↓	0.0000		0.0000			0.0000	
⇓	0.0000		0.0000			0.0000	

	Sr [%]	V [%]	Bi [%]	Zr [%]	B [%]	Ga [%]	Cd [%]
1	<0.0010	0.0417	<0.0100	<0.0020	<0.0010	0.0082	<0.0030
2	<0.0010	0.0418	<0.0100	<0.0020	<0.0010	0.0086	<0.0030
3	<0.0010	0.0432	<0.0100	<0.0020	<0.0010	0.0096	<0.0030
⇑							
↑							
Ø	**<0.0010**	**0.0422**	**<0.0100**	**<0.0020**	**<0.0010**	**0.0088**	**<0.0030**
↓							
⇓							

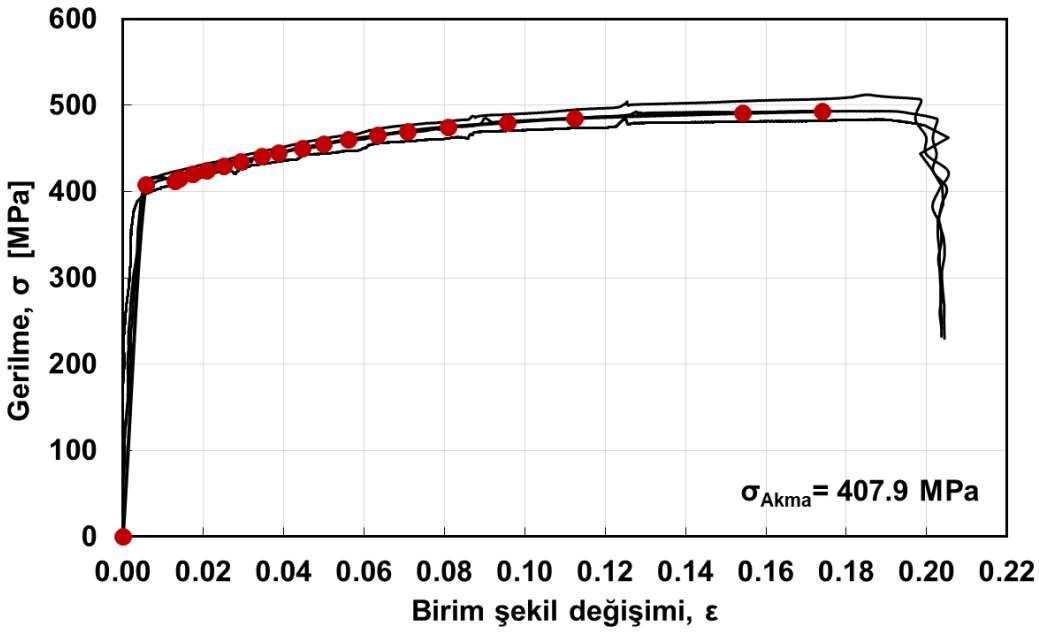
	Co [%]	Ag [%]	In [%]	Ce [%]	Hg [%]	La [%]	Mo [%]
1	<0.0020	<0.0010	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0020	<0.0020
2	<0.0020	<0.0010	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0020	<0.0020
3	<0.0020	0.0011	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0020	<0.0020
⇑							
↑							
Ø	**<0.0020**	**0.0010**	**<0.0050**	**<0.0050**	**<0.0050**	**<0.0020**	**<0.0020**
↓							
⇓							

Şekil 3.2. AL 2024 T351 numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Malzeme karekterizasyon çalışmaları kapsamında AL-2024 T351 malzemesi için testlerde de kullanılacak olan levhadan çekme numuneleri çıkartılmış ve bu numuneler ile çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3, test sonrası çekme numunelerinin resmini, Şekil 3.4 ise çekme testi sonucu gerilme – şekil değişimi eğrilerini göstermektedir. Test sonucu hesaplanan akma mukavemeti 407 Mpa, kopmadan önceki yüzde uzama ise %19 dur. Şekil 3.4'de kırmızı daire formatında gösterilen noktalar ise sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan gerilme-şekil değişimi eğrisini göstermektedir.



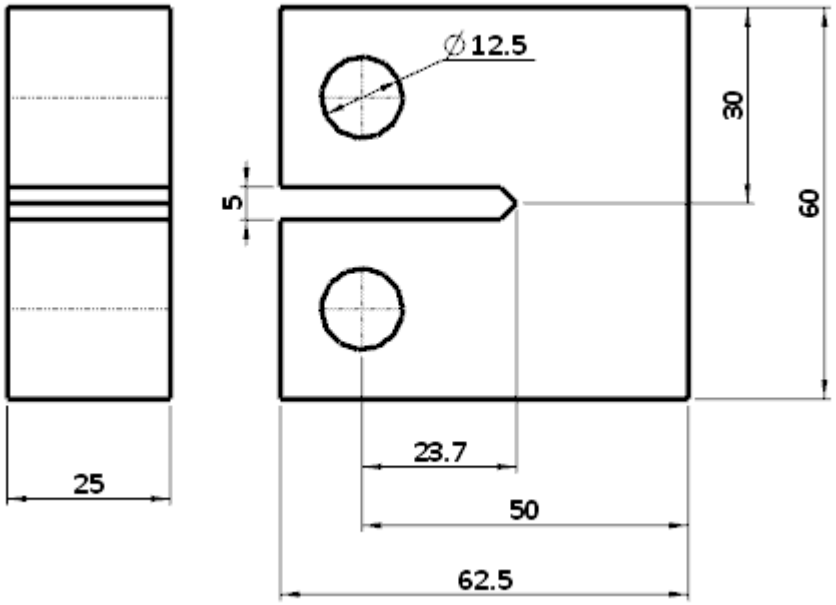
Şekil 3.3. AL 2024 Çekme testi sonrası kırılan numune görüntüleri.



Şekil 3.4. AL 2024 Çekme testi sonrası gerilme – şekil değişimi diyagramları.

3.2. Mod-I Test Sistemi, Numune özellikleri ve Kırılma Tokluğu Testleri

Bu kısımda Mod-I (açılma) modu için farklı kalınlık ve çatlak boyları ile gerçekleştirilen kırılma tokluğu testleri sunulacaktır. Bu testler CT (Compact Tension) numuneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5 CT numunesinin teknik resmini göstermektedir. Testlerin tamamı ASTM E399 (standard test method for measurement of fracture toughness plane stress / plane straın) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [50]. Kırılma tokluğu testleri Sakarya Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvaru (SARGEM) bünyesinde bünyesinde yer alan MTS yorulma cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da test sistemi kurulumu gösterilmektedir.



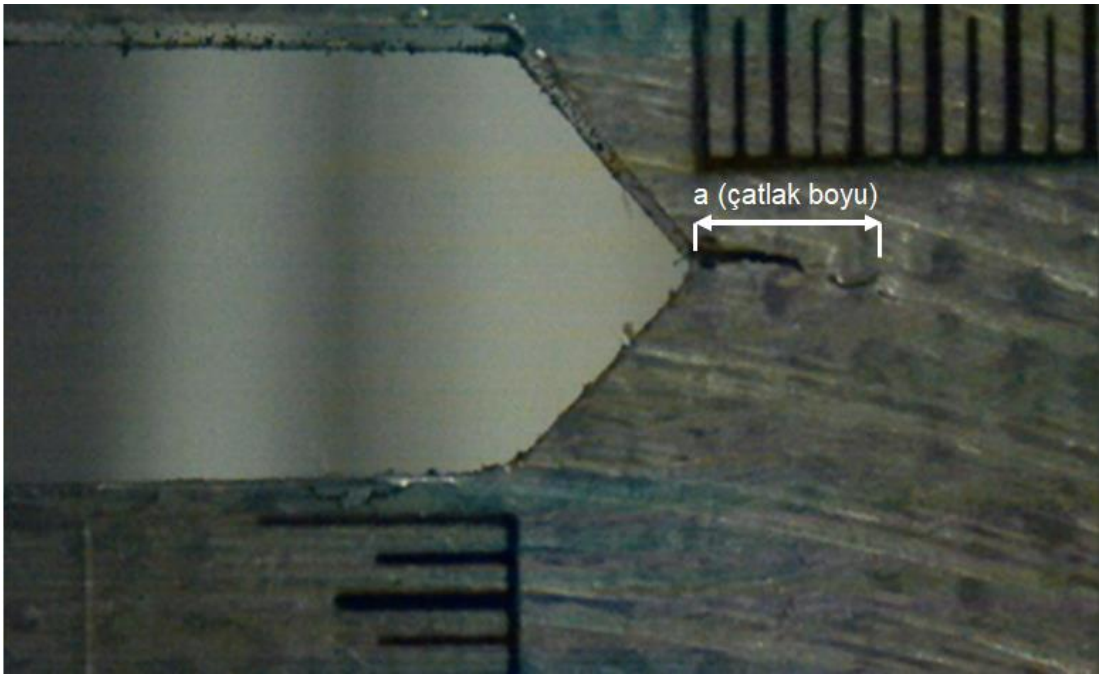
Şekil 3.5. CT numunesi teknik resmi.



Şekil 3.6. CT numunesi mod-I kırılma tokluğu testi kurulumu.

Kırılma tokluğu testi öncesi CT numunesi üzerinde ön yorulma çatlağı oluşturulmaktadır. Çatlağın oluşum ve ilerleme süreci kamera ile test sırasında izlenmekte, yorulma çatlağı istenen boyutlara ulaştığında ise yorulma testi durdurulmaktadır. Şekil 3.7, yorulma çatlağı oluşturmak amacıyla yapılan yorulma testi sırasındaki kamera görüntüsünü göstermektedir. Yorulma çatlağı oluşturma testleri R=0.1 koşullarında gerçekleştirilmektedir. Yorulma ön çatlağı oluşturulma işlemlerinden sonra, farklı çatlak boyları ve numune kalınlığı değerleri için kırılma

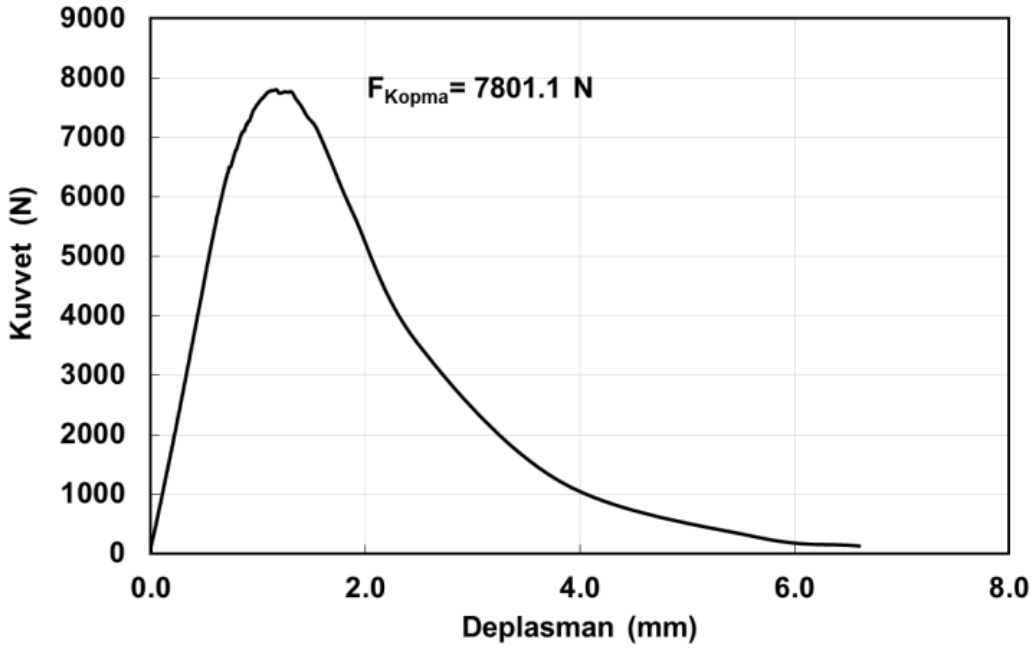
tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma ön çatlağı oluşturma aşamasında, numunelere kalınlık değerleri baz alınarak yük uygulanmaktadır. 25 mm kalınlıklı CT numuneleri için 10.5 kN, 10 mm kalınlıklı numuneler için 5.6 kN ve 5 mm kalınlıklı numuneler için 2.9 kN olarak uygulanmıştır. Şekil 3.8 ise kırılma tokluğu testi sırasındaki yükleme piminde oluşan kuvvet – yer değiştirme grafiğini vermektedir. Maksimum yük değeri kırılma yükü olarak belirlenmektedir.



Şekil 3.7. Kamera ile çekilen çatlak ilerleme görüntüsü resmi.

Çatlak boyu, numune kalınlığı gibi değişkenlerin kırılma yüküne etkisi, kırılma tokluğu testleri ile incelenebilir. Gevrek malzemeler için numune kalınlığının kırılma yüküne etkisi lineerdir. Ancak sünek malzemelerde numune kalınlığı ve çatlak boyunun değişimi çatlak ucundaki plastik deformasyonu değiştirdiğinden, kopma yükündeki değişim doğrusal olarak değişmemektedir. Test sonrası yorulma yüzeyi ve ani kırılma yüzeyi görsel olarak ayırt edilebilmektedir. Numune üzerine yerleştirilen, yarım milimetrelik adımlar içeren bir etiket yardımıyla ve görüntü işleme programı kullanılarak, numunenin ortasından ve iki yan yüzeyden kalınlığın dörtte biri kadar içerideki noktalardan alınan ölçümler (kalınlık yönünde %25, %50 ve %75 konumları) ile ortalama çatlak boyu hesaplanabilmektedir [51]. Şekil 3.9 kırılma tokluğu testi sonra numune görüntüsünü, Şekil 3.10 görüntü işleme programı yardımı ile çatlak boyu ölçme işlemlerini göstermektedir. Tablo 3.1, faklı kalınlık ve farklı çatlak uzunluklarda (yaklaşık olarak a/w=0.5 ve a/w=0.6; a: çatlak uzunluğu, w: numune

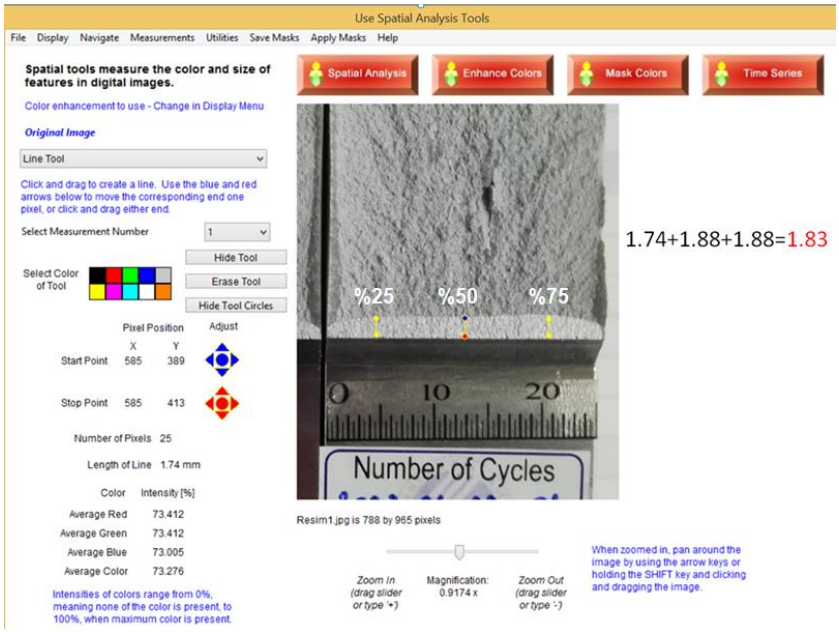
genişliği) gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerini ve elde edilen kırılma yüklerini vermektedir. Tez kapsamında Al 2024 T351 malzemesi kullanılarak toplam 12 adet mod-I testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11, test sonrası 5 mm kalınlıklı mod-I kırılma tokluğu numunelerinin resmini, Şekil 3.12, 10 mm kalınlıklı mod-I kırılma tokluğu numunelerinin resmini, Şekil 3.13 ise 25 mm kalınlık mod-I kırılma tokluğu numunelerinin resmini göstermektedir.



Şekil 3.8. Mod-I kırılma tokluğu testi boyunca, yükleme pimi kuvvet – yer değiştirme grafiği.



Şekil 3.9. Mod-I kırılma tokluğu testi sonrası kırılma yüzeyleri.



Şekil 3.10. Kırılma tokluğu testi sonrası görüntü işleme programı ile çatlak boyu belirlenmesi [51].

Tablo 3.1. Mod-I kırılma tokluğu testleri sonucu elde edilen kırılma yükleri.

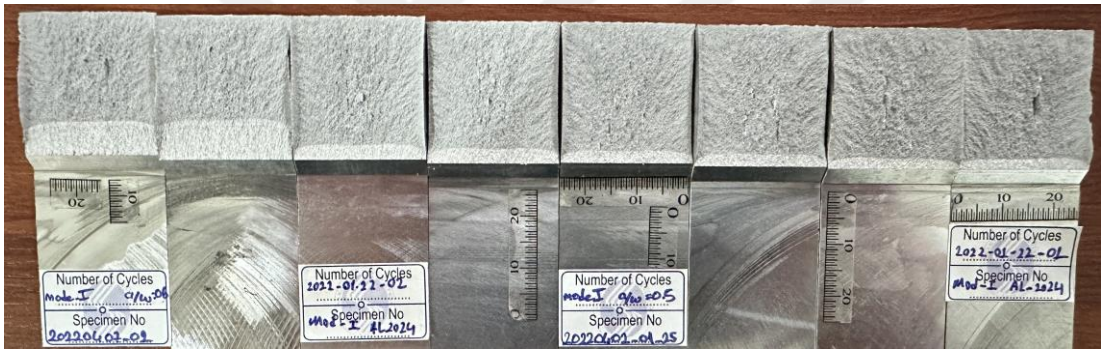
Numune ismi	Malzeme	Numune Kalınlığı (mm)	Kırılma Yükü (N)	Çatlak boyu (mm)
20220122_02_25mm	AL 2024 T351	25mm	22184,53	25,58
20220407_02_25mm	AL 2024 T351	25mm	16647,19	29,77
20220402_01_25mm	AL 2024 T351	25mm	22690,18	25,58
20220402_02_10mm	AL 2024 T351	10mm	12068,59	24,594
20220408_03_10mm	AL 2024 T351	10mm	7752,74	29,69
20220331_01_10mm	AL 2024 T351	10mm	7087,9	28,18
20220407_03_10mm	AL 2024 T351	10mm	7411,1	29,98
20220331_01_5mm	AL 2024 T351	5mm	5678,0	25,94
20220408_02_5mm	AL 2024 T351	5mm	4090,63	29,45
20220613_01_5mm	AL 2024 T351	5mm	2451,55	33,86
20220402_03_5mm	AL 2024 T351	5mm	6211,37	25,11
20220408_01_5mm	AL 2024 T351	5mm	4093,5	29,47



Şekil 3.11. Kırılma tokluğu testi sonrası 5 mm kalınlıklı mod-I numunelerinin görüntüleri.



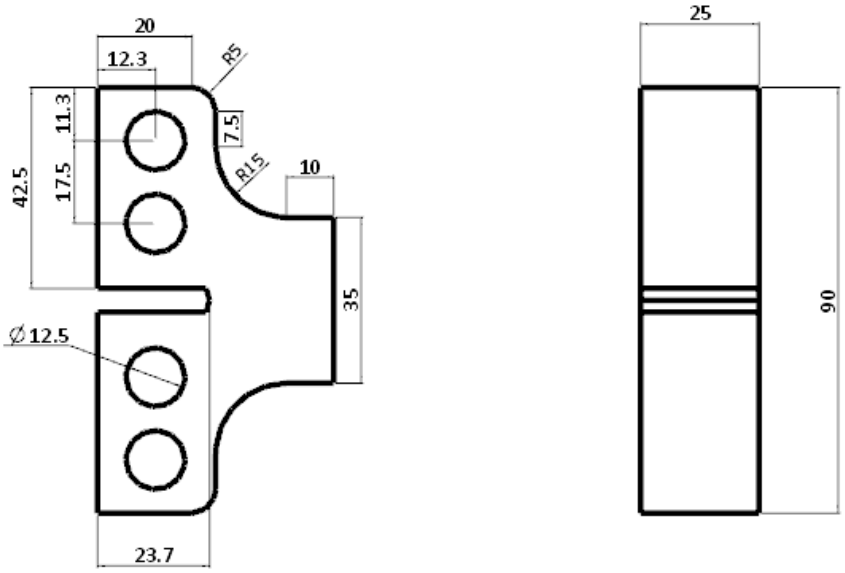
Şekil 3.12. Kırılma tokluğu testi sonrası 10 mm kalınlıklı mod-I numunelerinin görüntüleri.



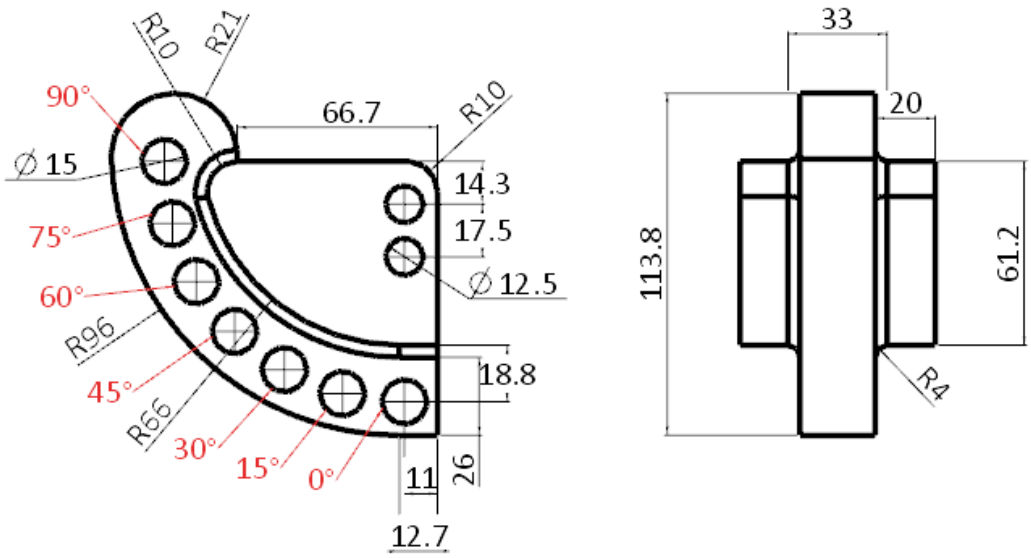
Şekil 3.13. Kırılma tokluğu testi sonrası 25 mm kalınlıklı mod-I numunelerinin görüntüleri.

3.3. Mod-I/II Test Sistemi, Numune Özellikleri Ve Kırılma Tokluğu Testleri

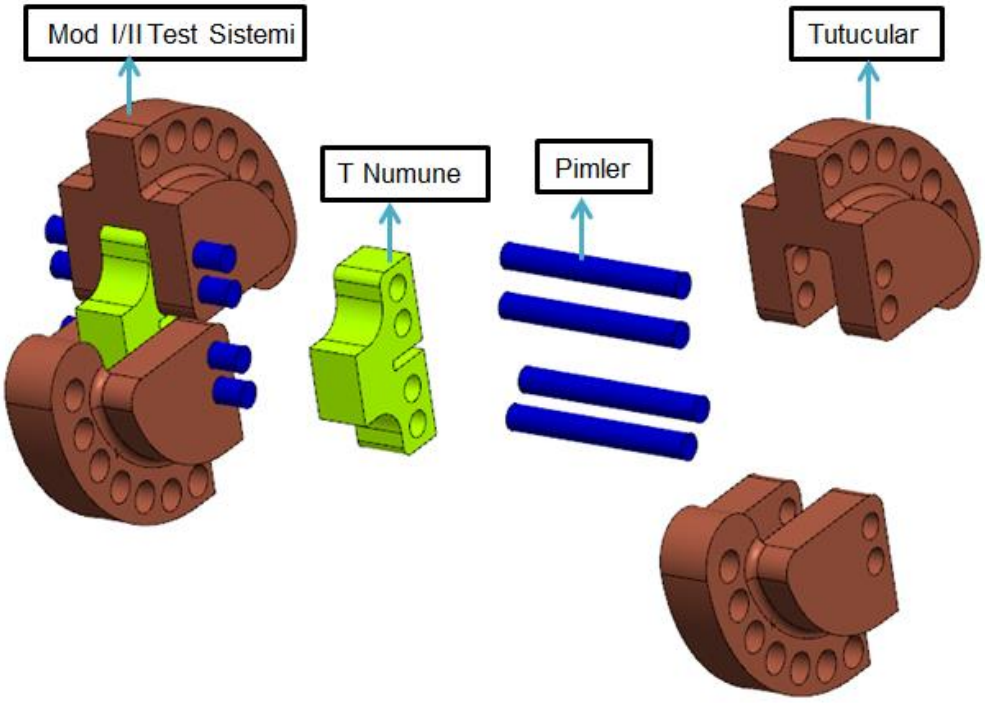
Bu kısım içerisinde mod-I (açılma modu) ile birlikte mod-II (kayma modu) yönünde de yüke maruz çatlaklı numunelerin kırılma tokluğu testleri sunulacaktır. Mod-I/II testleri T-numune ile gerçekleştirilmiştir [52]. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15, sırasıyla, mod-I/II deneyleri için kullanılan numune ve tutucusunun teknik resmini göstermektedir. Şekil 3.16, mod-I/II test sistemini, Şekil 3.17 ise T-numune ve T- numune tutucusunun gerçek resmini göstermektedir.



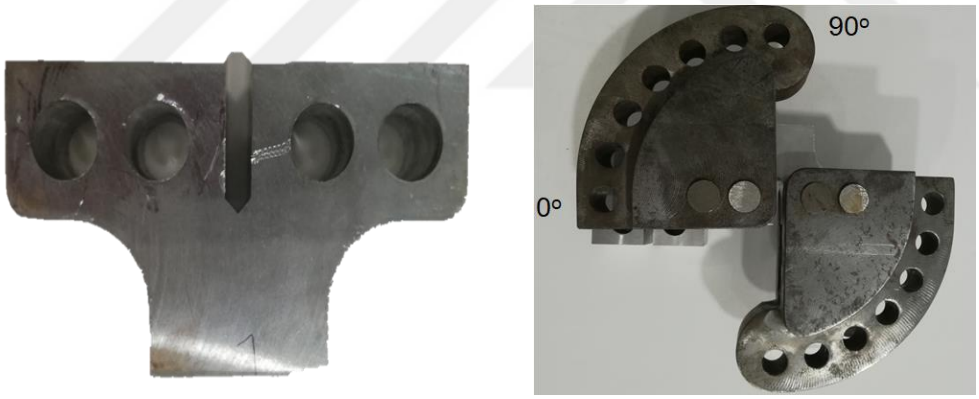
Şekil 3.14. T-numune teknik resmi [52].



Şekil 3.15. T-numune ve tutucusunun teknik resmi ve yükleme açıları [52].



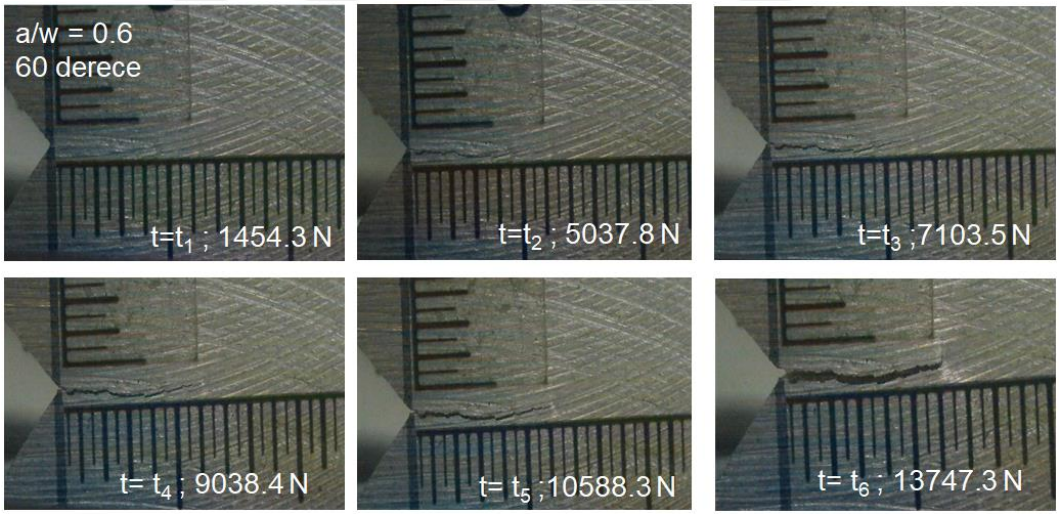
Şekil 3.16. Mod-I/II testleri için kullanılan T-numune ve T-numune tutucusunun model resimleri [52].



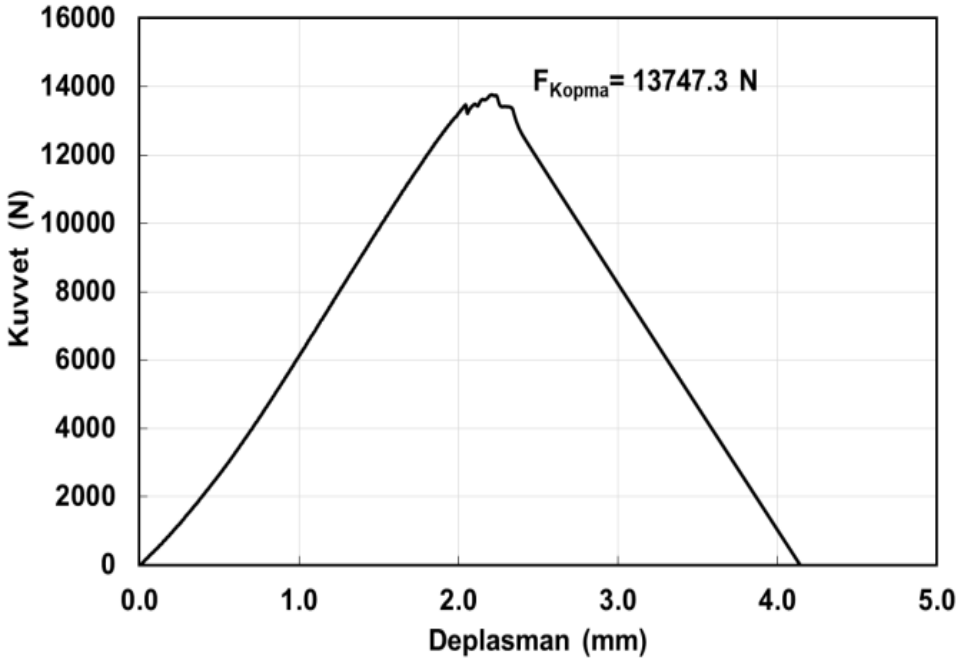
Şekil 3.17. T-numune (solda) ve T-numune tutucusunun görüntüsü (sağda).

Mod-I kırılma tokluğu testleri aşamasında da olduğu gibi, Mod-I/II kırılma tokluğu testlerinde de ilk aşama, yorulma ön çatlağının oluşturulmasıdır. Mod-I/II testlerinde T-numune kullanılmaktadır. Yorulma ön çatlağı oluşturma aşamasında T-numune önce CT numunesi tutucusuna bağlanmaktadır. Mod-I yükleme koşulları altında yorulma çatlağının oluşması ve ilerlemesi süreci kamera ile izlenmektedir. Yorulma çatlağı oluşturma testleri R=0.1 koşullarında gerçekleştirilmektedir. Numunelere kalınlık değerleri baz alınarak yorulma çatlağı oluşturma aşamasında yorulma yükü uygulanmaktadır. 25 mm kalınlıklı CT numuneleri için 10.5 kN, 10 mm kalınlıklı

numuneler için 5.6 kN ve 5 mm kalınlıklı numuneler için 2.9 kN olarak uygulanmıştır. Sonrasında ise T-numune kendi tutucusuna bağlanarak mod-I/II kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18'de kırılma tokluğu testi sırasındaki farklı zamanlarda çatlak bölgesinin kamera görüntüsü bulunmaktadır. Şekil 3.19, kırılma tokluğu testi sırasındaki yükleme piminde oluşan örnek bir kuvvet – yer değiştirme grafiğini gösterilmektedir. Bu grafik içerisinde yatay eksen yer değiştirmeyi, düşey eksen ise uygulanan kuvveti göstermektedir. Grafikteki maksimum yük değeri kırılma yükü olarak değerlendirilmektedir. Farklı çatlak boyları, numune kalınlığı ve yükleme açıları için kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.2, gerçekleştirilen Mod-I/II kırılma tokluğu testlerini ve kırılma yüklerini vermektedir. Tez kapsamında Al 2024 T351 malzemesi kullanılarak toplam 33 adet mod-I/II testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.20 ise Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrası 5 mm kalınlıklı numunelerin resimlerini, Şekil 3.21 ise Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonrası 10 mm kalınlıklı numunelerin resimlerini ve şekil 3.22 ise kırılma tokluğu testleri sonrası 20 mm kalınlıklı numunelerin resimlerini vermektedir.



Şekil 3.18. Mod-I/II kırılma tokluğu testi sırasında farklı zaman aralıklarında çekilen çatlak ucu kamera görüntüleri.



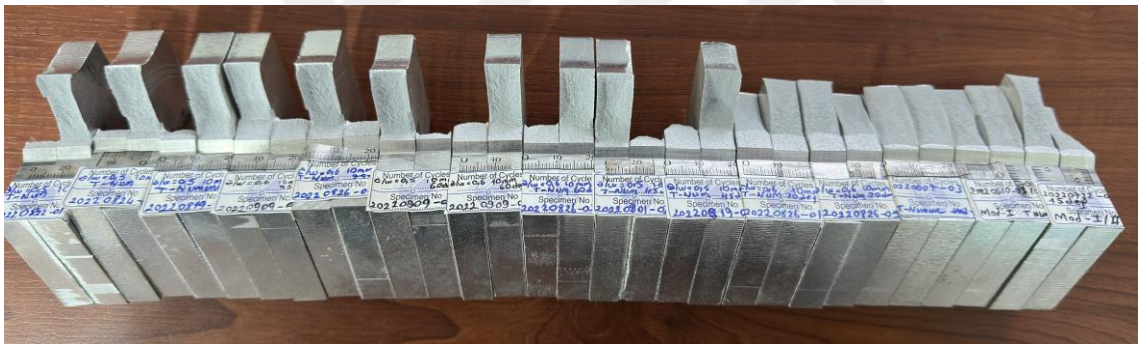
Şekil 3.19. Mod-I/II kırılma tokluğu testi sırasında, yükleme pimi kuvvet-yerdeğiştirme grafiği (numune kalınlığı= 10 mm, çatlak boyu= 31.15 mm, yükleme açısı = 45^o)

Tablo 3.2 Mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri.

Numune ismi	Malzeme	Kalınlık (mm)	Çatlak boyu (mm)	Yükleme Açısı	Kırılma Yükü (N)
20220722_01	AL 2024 T351	10	26.22	15º	13465.90
20220819_02	AL 2024 T351	10	25.46	45º	17025.30
20220822_01	AL 2024 T351	10	26.53	60º	17465.40
20220824_01	AL 2024 T351	10	26.71	75º	25353.50
20220626_01	AL 2024 T351	10	30.35	30º	11205.60
20220826_02	AL 2024 T351	10	30.19	45º	12610.20
20220826_03	AL 2024 T351	10	30.76	60º	13360.30
20220826_04	AL 2024 T351	10	32.21	75º	17855.80
20220829_05	AL 2024 T351	10	30.41	30º	11054.50
20220901_01	AL 2024 T351	10	32.20	45º	10410.10
20220909_02	AL 2024 T351	10	29.61	75º	23239.80
20220909_01	AL 2024 T351	10	31.15	45º	13747.30
20220912_01	AL 2024 T351	5	25.40	60º	10919.60
20220915_01	AL 2024 T351	5	25.53	45º	8851.10
20220915_02	AL 2024 T351	5	25.72	75º	11723.70
20220916_01	AL 2024 T351	5	29.21	75º	10976.30
20220916_02	AL 2024 T351	5	31.08	75º	8548.70
20220916_05	AL 2024 T351	5	28.57	60º	7548.90
20220916_06	AL 2024 T351	5	30.10	60º	8442.20
20220916_08	AL 2024 T351	5	30.10	45º	6717.00
20220916_09	AL 2024 T351	5	30.24	45º	6188.70
20220916_10	AL 2024 T351	5	29.31	30º	6151.30
20220916_11	AL 2024 T351	5	26.05	30º	7813.60
20220923_01	AL 2024 T351	20	25.90	30º	26122.00
20220923_02	AL 2024 T351	20	25.89	30º	26268.90
20220920_01	AL 2024 T351	20	26.48	45º	30126.90
20220930_04	AL 2024 T351	20	27.42	45º	28708.10
20220923_03	AL 2024 T351	20	31.41	45º	19442.20
20220930_03	AL 2024 T351	20	31.71	45º	20928.90
20220930_06	AL 2024 T351	20	26.96	60º	36654.00
20220930_01	AL 2024 T351	20	32.19	30º	15512.40
20220930_02	AL 2024 T351	20	32.65	30º	16089.70
20220930_05	AL 2024 T351	20	32.21	60º	23058.80



Şekil 3.20. Kırılma tokluğu testi sonrası 5 mm kalınlıklı mod-I/II numunelerinin görüntüleri.



Şekil 3.21. Kırılma tokluğu testi sonrası 10 mm kalınlıklı mod-I/II numunelerinin görüntüleri.

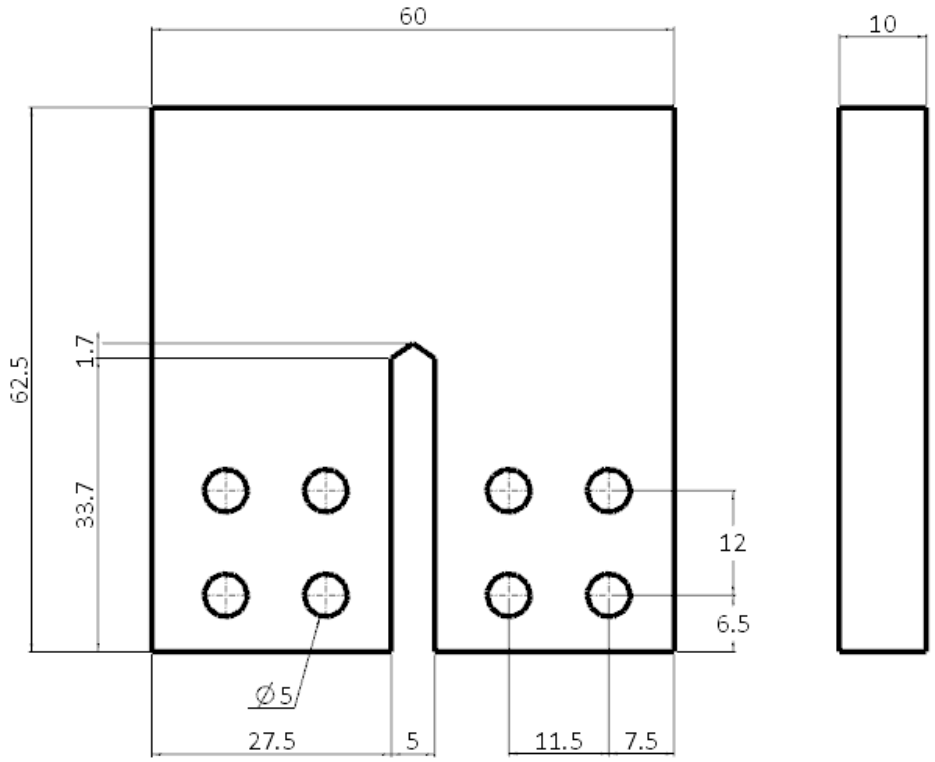


Şekil 3.22. Kırılma tokluğu testi sonrası 20 mm kalınlıklı mod-I/II numunelerinin görüntüleri.

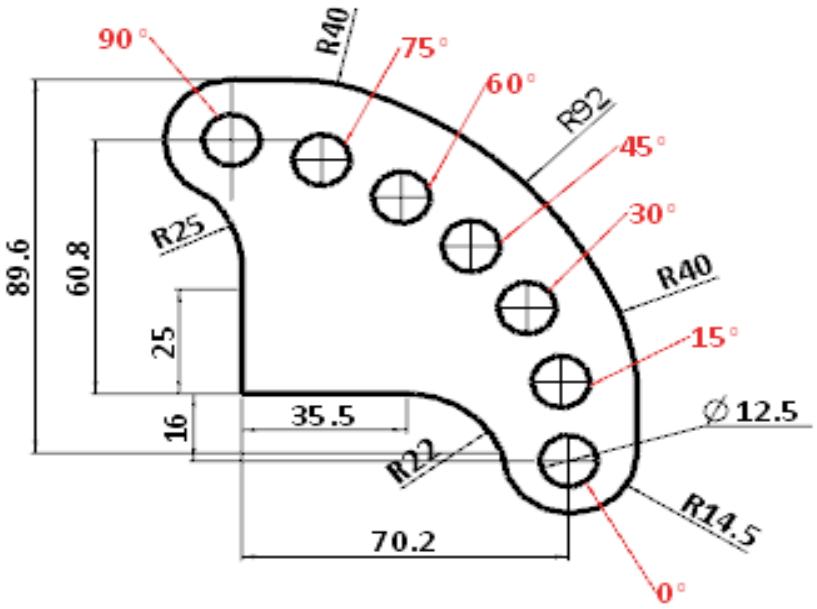
3.4. Mod-I/III Test Sistemi Numune Özellikleri ve Kırılma Tokluğu Testleri

Bu kısım içerisinde mod-I (açılma modu) ile birlikte mod-III (yırtılma modu) yönünde de yüke maruz olan CTT (Compact Tension and Tearing) numunelerinin kırılma

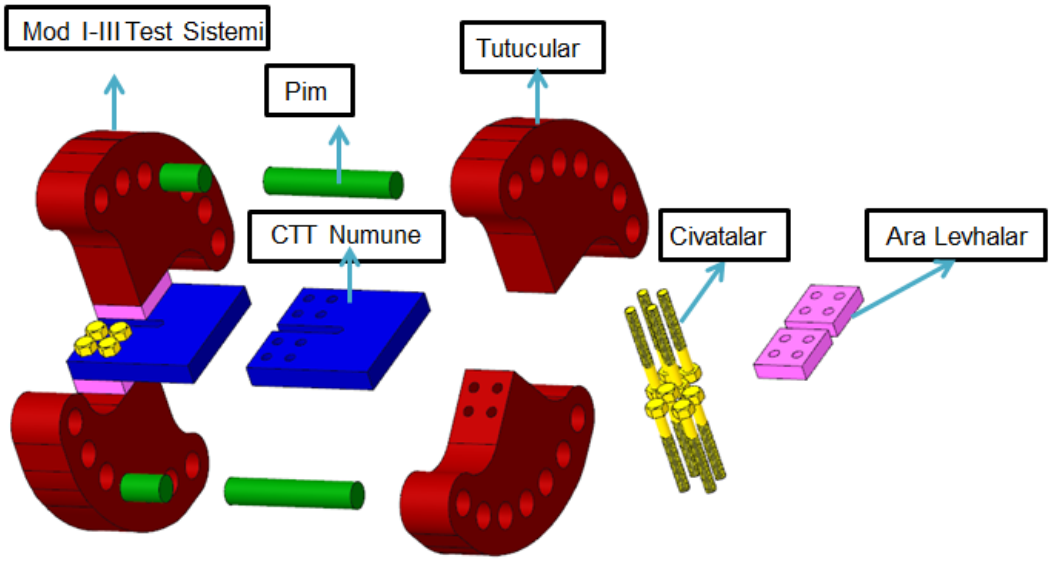
tokluğu testleri sunulacaktır. Mod-I/III testleri CTT Numunesi ile gerçekleştirilmiştir [53]. Şekil 3.23, CTT numunesi, Şekil 3.24'te ise Mod-I/III tutucusunun resmi gösterilmektedir. Şekil 3.25 ise mod-I/III test sisteminin modelini göstermektedir.



Şekil 3.23. Mod-I/III testleri için kullanılan CTT numunesi teknik resmi [53].



Şekil 3.24. Mod-I/III testleri için kullanılan CTT tutucusunun teknik resmi.



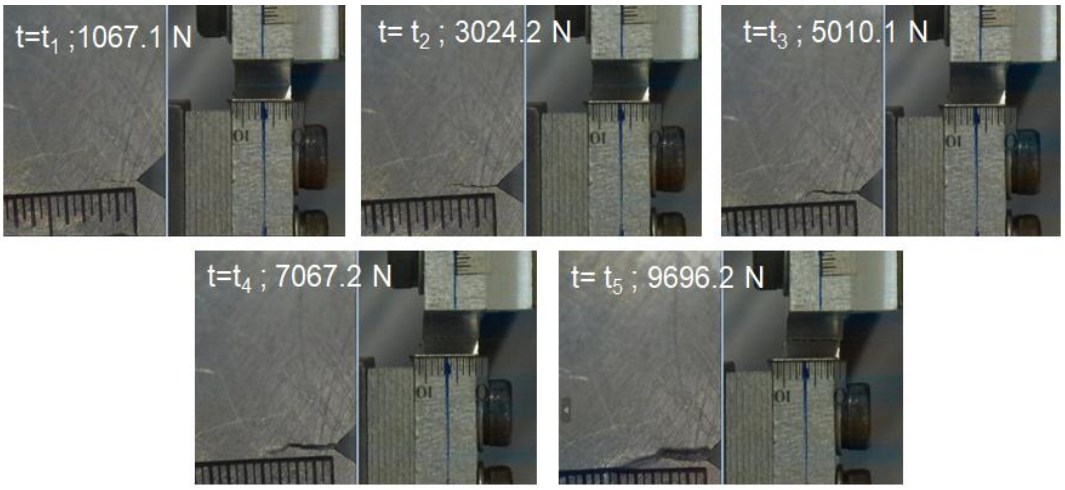
Şekil 3.25. Mod-I/III test sistemi bileşenleri.

Mod-I ve Mod-I/II kırılma tokluğu testlerinde olduğu gibi, Mod-I/III kırılma tokluğu testlerinde de ilk aşama yorulma ön çatlağının oluşturulmasıdır. Mod-I/III testlerinde CTT (Compact Tension tearing) isimli numune kullanılmaktadır. Yorulma çatlağı oluşturma aşamasında CTT numunesi mod-I/III numunesi tutucusuna mod-I konumunda (0 derece) bağlanmaktadır. Mod-I yükleme koşulları altında yorulma çatlağının oluşması ve ilerlemesi süreci kamera ile izlenmektedir. Yorulma çatlağı oluşturma testleri R=0.1 koşullarında gerçekleştirilmektedir. Numunelere kalınlık değerleri temel alınarak yorulma çatlağı oluşturma aşamasında yorulma yükü uygulanmaktadır. Yorulma çatlağı oluşturma aşamasında, 25 mm kalınlıklı CT numuneleri için 10.5 kN, 10 mm kalınlıklı numuneler için 5.6 kN ve 5 mm kalınlıklı numuneler için 2,9 kN yorulma yük uygulanmaktadır. Sonrasında ise CTT numunesi tutucu değiştirmeye gerek kalmadan sadece yükleme açısı değiştirilerek karışık mod kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.26, kırılma tokluğu testi sırasındaki farklı zaman aralıklarında çatlak bölgesinin kamera görüntülerini içermektedir. Şekil 3.27'de kırılma tokluğu testi sırasındaki yükleme pimindeki kuvvet-yer değiştirme grafiğini gösterilmektedir. Şekil 3.28'e yatay eksen yerdeğiştirme, düşey eksen ise kuvvettir. Şekildeki maksimum yük değeri kırılma yükü olarak isimlendirilmektedir. Farklı çatlak boyları, numune kalınlığı ve yükleme açıları için kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.3, gerçekleştirilen Mod-I/III kırılma tokluğu testlerini ve kırılma yüklerini vermektedir. Tez kapsamında Al 2024 T351 malzemesi kullanılarak toplam 21 adet mod-I/III testi

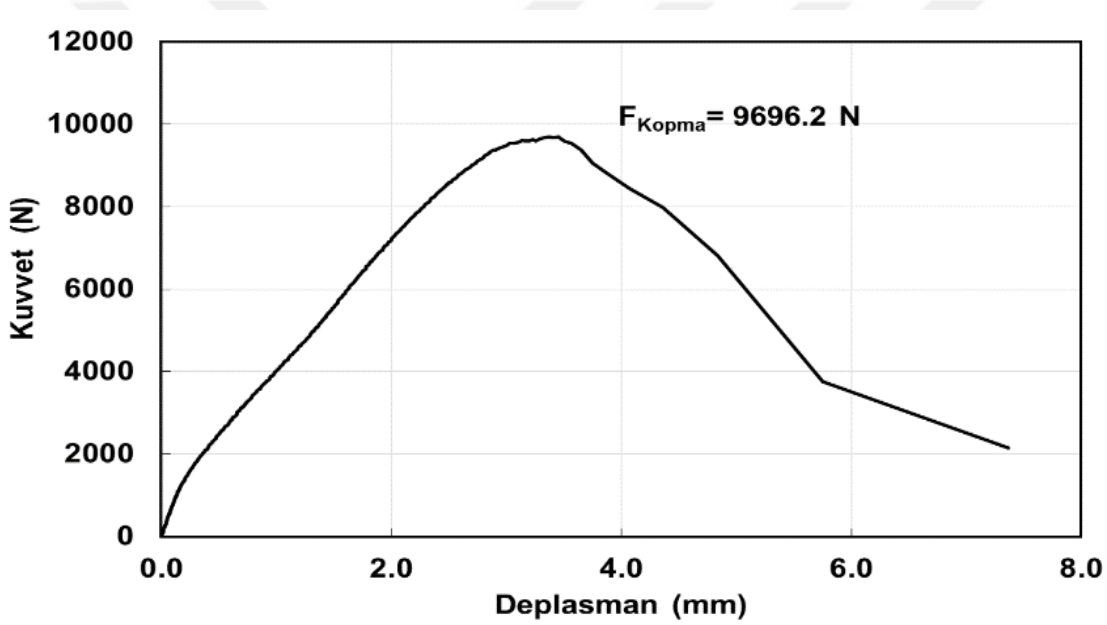
gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.28 ise Al-2024 T351 malzemesi ile gerçekleştirilen mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrası numune kırılma açılarının gevrek bir malzeme olan Al-7075 ile karşılaştırmalarını göstermektedir. Gevrek malzemelerde gerçekleşen kırılma tokluğu testlerinde kırılma açısının yükleme açısına yakın olduğu bilinmektedir [51]. Ancak tez kapsamında sünek malzemeler için yapılan testlerde kırılma açısı yükleme açısından farklı çıkmıştır. Şekil 3.29 kırılma tokuğu testleri sonrası 10 mm kalınlıklı mod-I/III numunelerin resmini, Şekil 3.30 ise kırılma tokuğu testleri sonrası 25 mm kalınlıklı mod-I/III numunelerin resmini vermektedir.

Tablo 3.3 Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri.

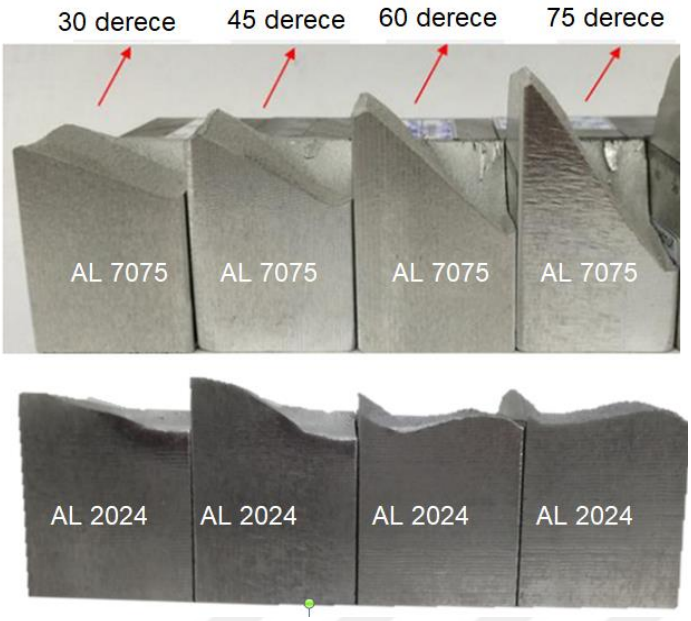
Numune ismi	Malzeme	Kalınlık (mm)	Çatlak boyu (mm)	Yükleme Açısı	Kopma Yükü (N)
20221014_02	AL 2024 T351	10	27.5	45º	9696.23
20221014_01	AL 2024 T351	10	31.16	45º	7924.2
20221026_01	AL 2024 T351	10	30.02	60º	8611.6
20221026_02	AL 2024 T351	10	29.36	30º	8644.1
20221026_03	AL 2024 T351	10	30.43	75º	8881.1
20221026_05	AL 2024 T351	10	27.62	60º	9371.9
20221111_01	AL 2024 T351	10	26.55	30º	9918.4
20221111_02	AL 2024 T351	10	27.24	30º	10086.8
20221026_04	AL 2024 T351	10	25.90	75º	11074.1
20221111_04	AL 2024 T351	10	28.1	60º	8816.2
20221118_01	AL 2024 T351	25	27.61	30º	21819.4
20221118_02	AL 2024 T351	25	27.7	45º	25162.9
20221118_03	AL 2024 T351	25	29.6	45º	20018.6
20221118_04	AL 2024 T351	25	31.92	30º	13576.3
20221118_05	AL 2024 T351	25	26.46	30º	22925.7
20221119_01	AL 2024 T351	25	29.72	60º	23349
20221119_02	AL 2024 T351	25	30.51	75º	22713.4
20221202_02	AL 2024 T351	25	26.18	60º	30410.7
20221202_03	AL 2024 T351	25	26.07	60º	31455.3
20221202_01	AL 2024 T351	25	26.16	75º	31007.3
20230505_06	AL 2024 T351	25	25.57	90º	35000



Şekil 3.26. Mod-I/III kırılma tokluğu testi sırasında farklı zaman aralıkları için çekilen çatlak ucu kamera görüntüleri.



Şekil 3.27. Mod-I/III kırılma tokluğu testi, yükleme pimi kuvvet-yer değiştirme grafiği (numune kalınlığı= 10 mm, çatlak boyu= 27.5 mm, yükleme açısı = 45^{o})



Şekil 3.28. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrası gevrek [42] ve sünek kırılma yüzeylerinin eğimleri (numune sırt görüntüleri).



Şekil 3.29. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrası 10 mm kalınlıktaki numunelerin görüntüleri.

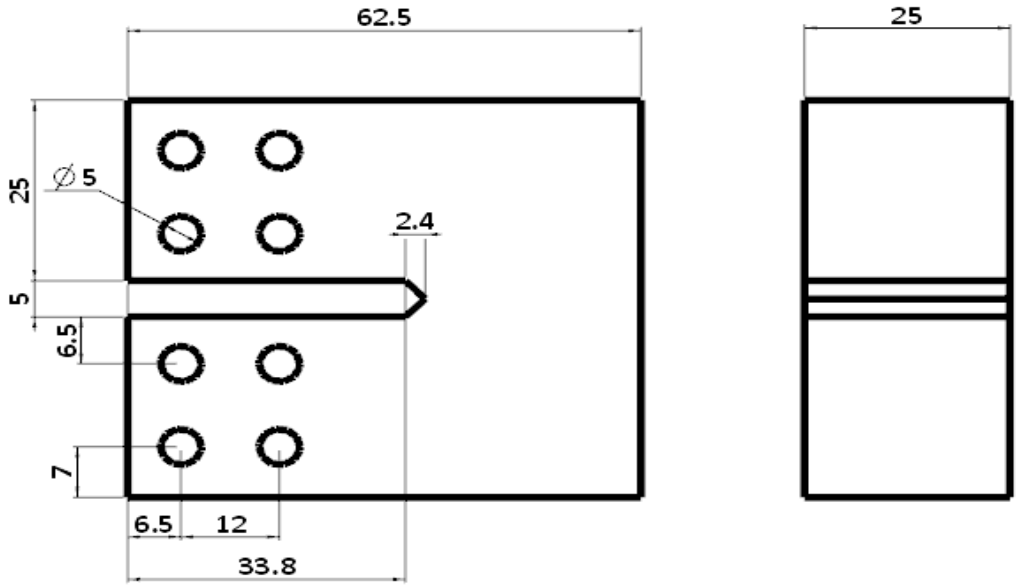


Şekil 3.30. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrası 25 mm kalınlıktaki numunelerin görüntüleri.

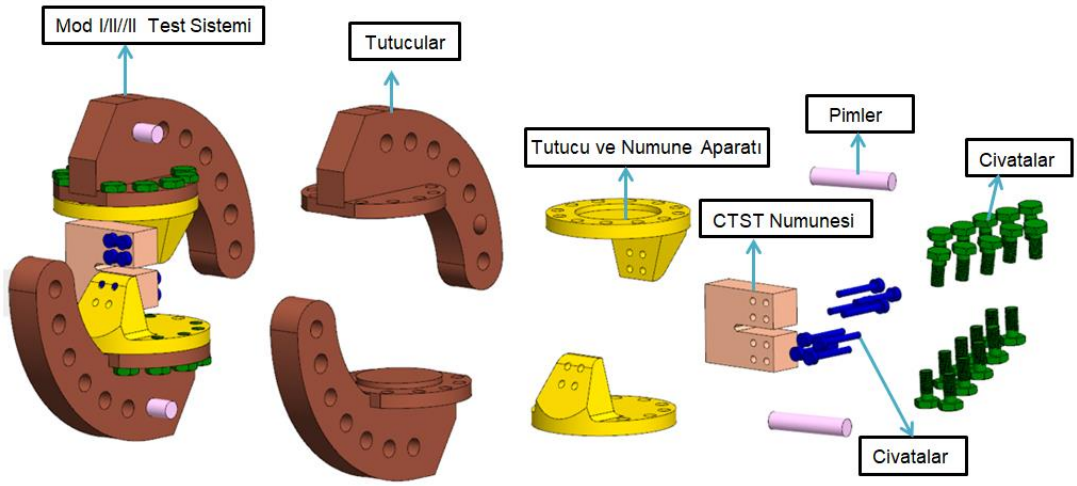
3.5. Mod-I/II/III Test Sistemi, Numune Özellikleri ve Kırılma Tokluğu Testleri

Bu bölüm içerisinde üç-boyutlu karışık mod yüklemeler altında gerçekleştirilen kırılma tokluğu testlerinin detayları sunulacaktır. Karışık mod-I/II/III testlerinde, önce numunede mod-I yük altında ön çatlak oluşturulur ve bu numune daha sonra, mod-I (açılma modu), mod-II (kayma modu) ve mod-III (yırtılma modu) yönünde farklı büyüklerde yükler altında test edilir.. Mod-I/II/III testleri CTST (Compact Tension,

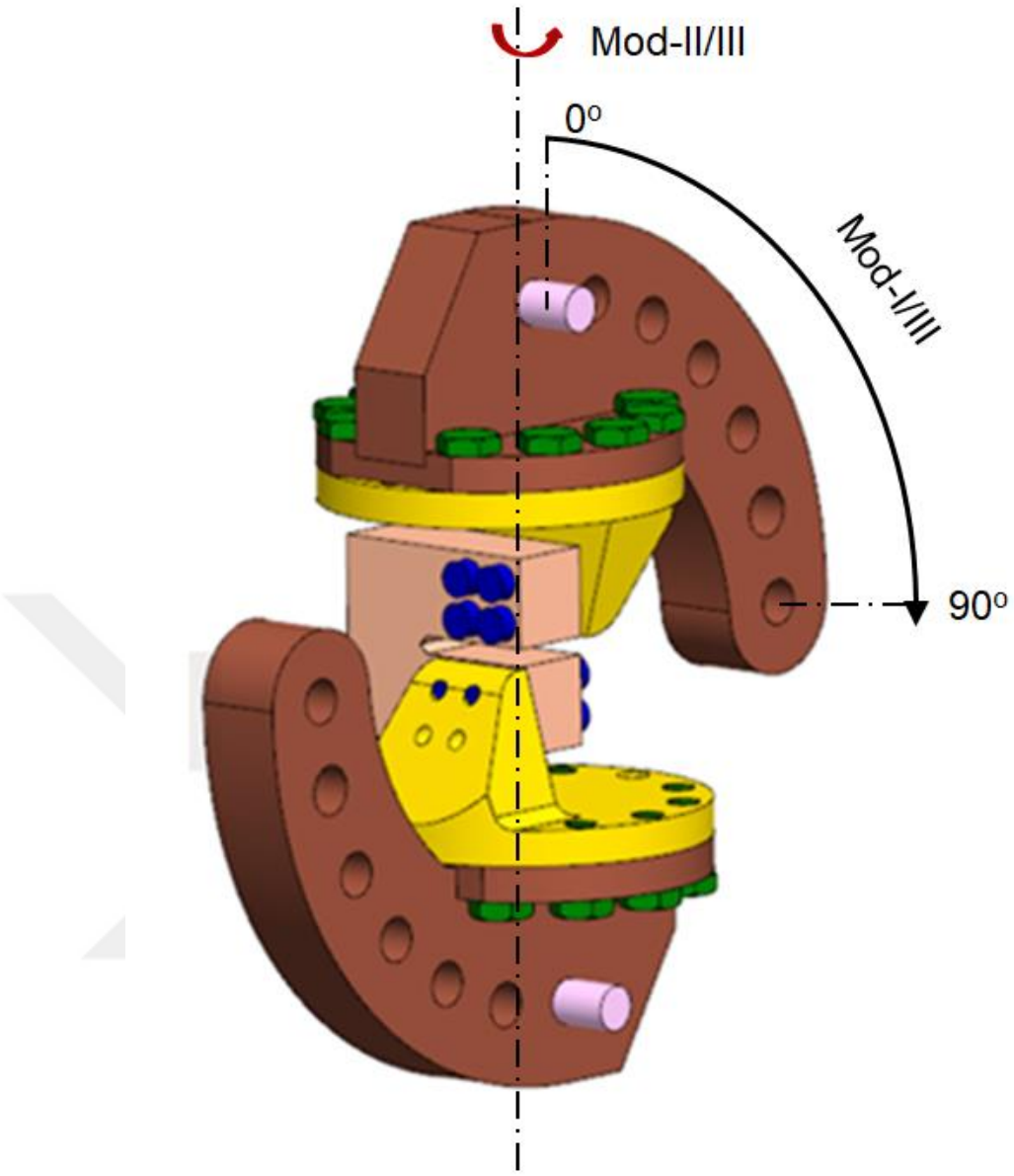
Shear and Tearing) numunesi ile gerçekleştirilmiştir [54]. Şekil 3.31, CTST numunesini, Şekil 3.32 ise Mod-I/II/III tutucusu ve numune-tutucu test sisteminin model resimlerini göstermektedir. Bu testler için kullanılan numune-tutucu test sistemi, daha önce [42] Al-7075 numune malzemesinin lineer-elastik ve gevrek kırılma testleri için kullanılan sistem ile aynı olup, numune malzemesi daha sünek bir malzeme olan Al-2024'tür. Şekil 3.33'te ise kırılma tokluğu testlerinde kullanılan mod-I/III ve mod-II/III yükleme şekilleri ve açıları gösterilmektedir.



Şekil 3.31. Mod-I/II/III testlerinde kullanılan CTST numunesinin boyutları [54].



Şekil 3.32. Mod-I/II/III test sistemi ve bileşenleri [55].



Şekil 3.33. Mod-I/II/III test sistemi ve mod-I/III ve mod-III/III yükleme açıları.

Mod-I, mod-I/II ve mod-I/III kırılma tokluğu testleri aşamasında da olduğu gibi mod-I/II/III kırılma tokluğu testlerinde de ilk aşama yorulma ön çatlağının oluşturulmasıdır. Mod-I/II/III testlerinde CTST (Compact Tension Shear Tearing) isimli numune kullanılmaktadır. Yorulma çatlağı oluşturma aşamasında CTST numunesi mod-I/III numunesi tutucusuna bağlanarak mod-I yükleme açısında bulunan deliklerden pimler geçirilerek yükleme yapılmaktadır. Mod-I yükleme koşulları altında yorulma çatlağının oluşması ve ilerlemesi süreci kamera ile izlenmektedir. Yorulma çatlağı oluşturma testleri R=0.1 koşullarında gerçekleştirilmektedir. Yorulma çatlağı oluşturmak için uygulanan yük değerleri numune kalınlıkları dikkate alınarak belirlenmektedir. 25 mm kalınlıklı CTST numuneleri için 10.5 kN, 10 mm kalınlıklı

numuneler için 5.6 kN olarak uygulanmaktadır. Sonrasında ise CTST numunesi mod-I/II/III tutucusuna ilgili testin gerektirdiği yükleme açısında bağlanarak kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.34, kırılma tokluğu testi sırasındaki yükleme pimindeki kuvvet-yer değiştirme grafiğini göstermektedir. Maksimum yük değeri kırılma yükü olarak isimlendirilmektedir. Farklı çatlak boyları, numune kalınlığı ve yükleme açıları için kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.4, gerçekleştirilen mod-I/II/III kırılma tokluğu testlerindeki geometrik boyutları, yükleme açılarını ve kırılma yüklerini vermektedir. Al 2024 T351 malzemesi kullanılarak toplam 90 adet mod-I/II/III testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.35, Mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri sonrası 10 mm kalınlıklı numunelerin resimlerini, Şekil 3.36'te ise mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri sonrası 25 mm kalınlıklı numunelerin resimleri gösterilmektedir.

Tablo 3.4 Mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri.

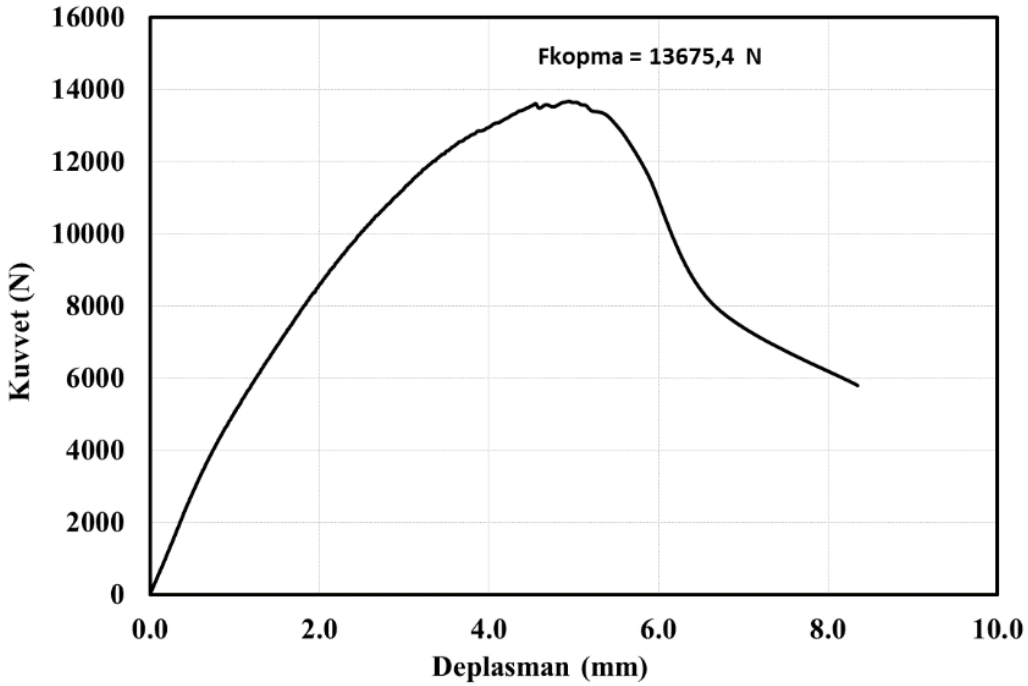
Numune ismi	Malzeme	Kalınlık (mm)	Çatlak boyu (mm)	Mod-I/III Yükleme Açısı	Mod-I/III Yükleme Açısı	Kırılma Yükü (N)
20230106_01	AL-2024 T351	25	29.73	45º	45º	20178.3
20230106_02	AL-2024 T351	25	25.91	45º	45º	29178.5
20230106_03	AL-2024 T351	25	25.83	45º	45º	30366.1
20230118_01	AL-2024 T351	10	25.53	30º	60º	16542.5
20230118_02	AL-2024 T351	10	30.73	30º	30º	16644
20230120_01	AL-2024 T351	10	26.26	30º	60º	24250.1
20230120_02	AL-2024 T351	10	25.36	30º	75º	18653.3
20230120_03	AL-2024 T351	10	26.22	30º	45º	10477.8
20230120_04	AL-2024 T351	10	24.92	30º	30º	10596.6
20230120_05	AL-2024 T351	10	29.10	30º	30º	6461.6
20230204_01	AL-2024 T351	10	24.82	30º	45º	11568.2
20230204_02	AL-2024 T351	10	30.69	30º	45º	6253.9
20230204_03	AL-2024 T351	10	29.21	30º	60º	10308.1
20230210_01	AL-2024 T351	10	29.80	30º	75º	12571.4
20230210_02	AL-2024 T351	10	25.97	30º	75º	16632.3
20230210_03	AL-2024 T351	10	25.57	30º	60º	14725.2
20230210_04	AL-2024 T351	10	25.28	30º	30º	10312.9
20230210_05	AL-2024 T351	10	29.62	60º	30º	7549.063
20230210_06	AL-2024 T351	10	24.94	60º	30º	10954.3
20230210_07	AL-2024 T351	10	25.53	60º	30º	10266.3

Tablo 3.4. (Devamı) Mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri.

20230210_08	AL-2024 T351	10	25.46	60º	30º	10628.04
20230210_09	AL-2024 T351	10	24.79	60º	75º	13675.4
20230210_10	AL-2024 T351	10	30.48	60º	75º	9163.113
20230210_11	AL-2024 T351	10	25.33	60º	75º	13099.8
20230210_12	AL-2024 T351	10	30.72	60º	60º	9266.658
20230216_01	AL-2024 T351	10	25.72	60º	60º	12443.51
20230216_02	AL-2024 T351	10	25.24	60º	60º	10859.46
20230216_03	AL-2024 T351	10	24.83	60º	45º	12714.82
20230216_04	AL-2024 T351	10	30.07	60º	45º	8437.75
20230216_05	AL-2024 T351	10	25.35	60º	45º	11212.15
20230216_06	AL-2024 T351	10	29.90	45º	30º	11103.59
20230216_07	AL-2024 T351	25	25.58	45º	30º	27056.85
20230216_08	AL-2024 T351	25	25.63	45º	30º	26087.07
20230216_09	AL-2024 T351	10	25.59	45º	75º	15925.8
20230216_10	AL-2024 T351	10	30.23	45º	75º	12488.75
20230216_11	AL-2024 T351	10	25.91	45º	75º	15164.1
20230224_01	AL-2024 T351	10	25.45	45º	60º	14228.31
20230224_02	AL-2024 T351	10	25.82	45º	60º	13873.33
20230224_03	AL-2024 T351	10	30.06	45º	60º	10912.4
20230224_04	AL-2024 T351	10	25.97	45º	45º	13521.23
20230224_05	AL-2024 T351	10	25.14	45º	45º	13868.78
20230224_06	AL-2024 T351	10	30.13	45º	45º	9326.501
20230224_07	AL-2024 T351	10	25.19	45º	30º	12974.3
20230224_08	AL-2024 T351	10	28.41	45º	30º	10069.27
20230224_09	AL-2024 T351	10	25.29	45º	30º	12415.99
20230224_10	AL-2024 T351	10	29.60	75º	45º	8403.634
20230224_11	AL-2024 T351	10	25.06	75º	45º	12464.77
20230224_12	AL-2024 T351	10	25.41	75º	45º	12348.48
20230224_13	AL-2024 T351	10	25.16	75º	75º	12324.84
20230310_01	AL-2024 T351	10	25.46	75º	30º	13015.12
20230310_02	AL-2024 T351	25	30.70	75º	30º	18145.79
20230310_03	AL-2024 T351	25	26.36	75º	30º	25707.38
20230310_04	AL-2024 T351	25	26.57	75º	45º	29330.65
20230310_05	AL-2024 T351	25	30.26	75º	45º	22703.01
20230310_06	AL-2024 T351	25	31.10	75º	60º	24463.51
20230310_07	AL-2024 T351	10	25.37	75º	60º	11997.91
20230317_01	AL-2024 T351	25	25.49	75º	60º	36245.81
20230317_02	AL-2024 T351	25	26.82	75º	60º	30730.82
20230330_01	AL-2024 T351	10	24.50	75º	75º	13302.57
20230330_02	AL-2024 T351	10	31.27	75º	75º	7938.086

Tablo 3.4. (Devamı) Mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri.

20230330_03	AL-2024 T351	25	30.69	75º	75º	33407.05
20230330_04	AL-2024 T351	25	25.59	75º	75º	35153.46
20230330_05	AL-2024 T351	25	26.65	75º	75º	33427.1
20230330_06	AL-2024 T351	10	25.79	75º	60º	10178.09
20230330_07	AL-2024 T351	10	31.38	75º	60º	7800.027
20230330_08	AL-2024 T351	25	30.63	75º	30º	17785.31
20230330_09	AL-2024 T351	25	24.31	75º	45º	33816.76
20230407_01	AL-2024 T351	25	32.32	60º	30º	15064.8
20230407_02	AL-2024 T351	25	26.17	60º	30º	25795.36
20230407_03	AL-2024 T351	25	25.64	60º	30º	28377.3
20230407_04	AL-2024 T351	25	31.62	60º	45º	19572.86
20230407_05	AL-2024 T351	25	25.37	60º	45º	32699.01
20230407_06	AL-2024 T351	25	30.56	60º	60º	24594.69
20230407_07	AL-2024 T351	25	30.53	60º	75º	28456.49
20230407_08	AL-2024 T351	25	25.60	30º	30º	27601.12
20230407_09	AL-2024 T351	25	30.51	30º	30º	16548.5
20230407_10	AL-2024 T351	25	30.7	30º	45º	21710.18
20230414_01	AL-2024 T351	25	28.32	30º	45º	25740.18
20230414_02	AL-2024 T351	25	28.25	30º	45º	25850.5
20230414_03	AL-2024 T351	25	26.26	30º	60º	24250.2
20230414_05	AL-2024 T351	25	27.60	60º	60º	30454.39
20230414_06	AL-2024 T351	25	29.11	60º	60º	26586.79
20230414_07	AL-2024 T351	25	29.62	60º	75º	30406.8
20230414_07	AL-2024 T351	25	29.62	60º	75º	30406.8
20230414_08	AL-2024 T351	25	28.65	60º	75º	30177.18
20230414_09	AL-2024 T351	25	33.26	45º	60º	20304.9
20230505_01	AL-2024 T351	25	29.58	45º	60º	27122.91
20230505_02	AL-2024 T351	25	28.40	45º	60º	24445.07
20230505_03	AL-2024 T351	25	31.50	45º	75º	28445.94
20230505_04	AL-2024 T351	25	29.99	45º	30º	31806.31



Şekil 3.34. Mod-I/II/III kırılma tokluğu testi, yükleme pimi kuvvet-yer değiştirme grafiği (numune kalınlığı= 10 mm, çatlak boyu= 24.79 mm, mod-I/III yükleme açısı = 75^o, mod-II/III yükleme açısı =60^o).



Şekil 3.35. Mod-I/II/III kırılma tokluğu testi sonrası 10 mm kalınlıklı numunelerin görüntüleri.



Şekil 3.36. Mod-I/II/III kırılma tokluğu testi sonrası 25 mm kalınlıklı numunelerin görüntüleri.

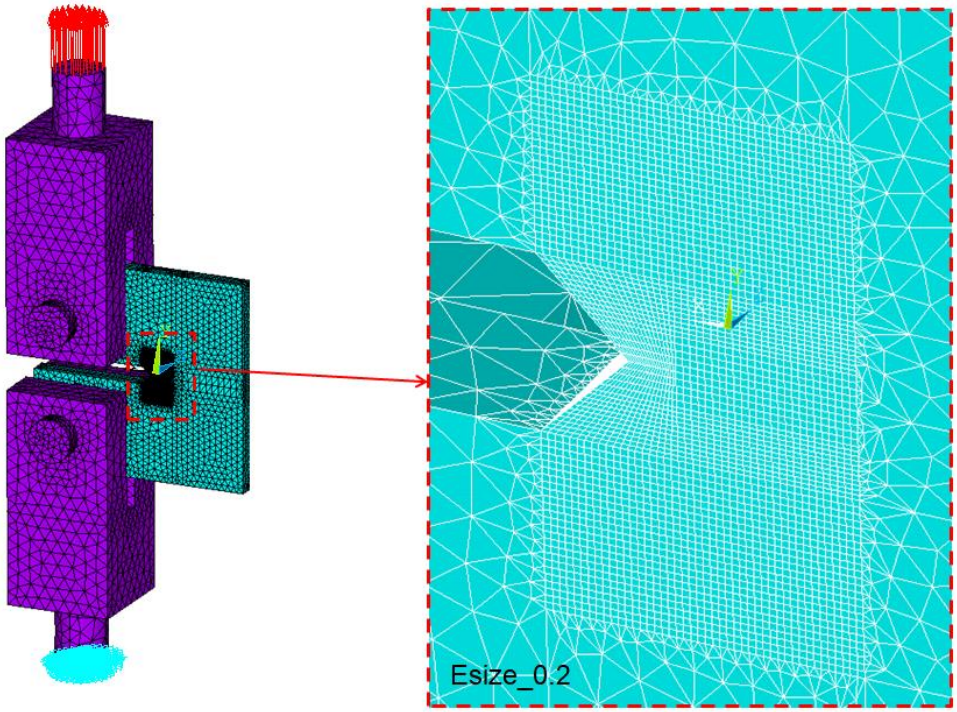
4. VCCT YÖNTEMİYLE GERÇEKLEŞTİRİLEN LEKM ANALİZLERİ VE KIRILMA YÜKÜ TAHMİNİ

Bu bölüm içerisinde kırılma tokluğu testlerinden elde edilen kırılma yükü ve çatlak uzunluğu verileri kullanılarak lineer-elastik kırılma mekaniği (LEKM) kuralları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve gerilme-şiddet faktörü değerleri hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu testlerinde kullanılan AL-2024-T351 malzemesinin kırılma tokluğu değeri 37 MPa.$\sqrt{m}$ dir [56]. Bu kısımda VCCT yöntemi kullanılarak enerji salınım oranı hesaplanmış ve denklem 1.29 kullanılarak gerilme-şiddet faktörüne dönüşümü sağlanmıştır.

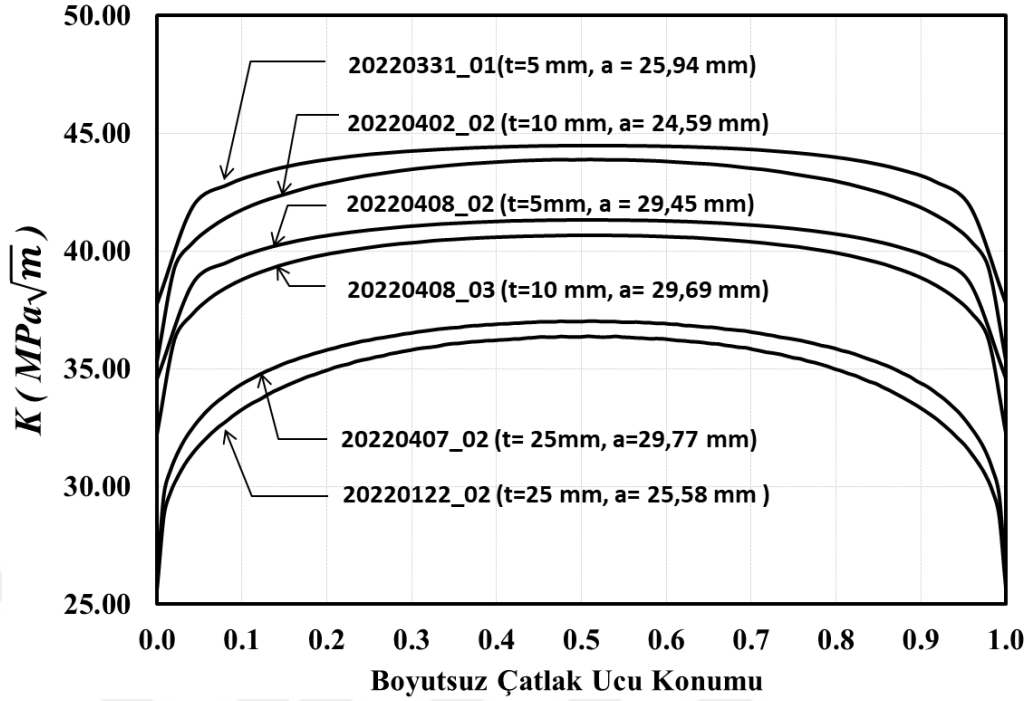
4.1. Mod-I Kırılma Analizleri ve Gerilme-Şiddet Faktörü Sonuçları

Bu kısımda mod-I kırılma tokluğu testlerinin sonlu elemanlar modellerinin hazırlanması ve gerilme şiddet faktörü hesaplanması aşamaları sunulacaktır. Şekil 4.1'te mod-I yönünde yüklemeye maruz bir CT numunesinin sonlu elamanlar ağ yapısını gösterilmektedir. Modelleme aşamasında 20 düğüm noktalı Solid-186 elemanı kullanılmıştır. Çatlak ucu civarında 0.2 mm boyuta sahip küp elemanlar kullanılmıştır. Diğer kısımlar ise 4 mm tetrahedral elemanlar ile modellenmiştir. Analizde tutucu için elastiklik modülü E = 210 Gpa, poisson oranı v = 0.30, CT numunesi için elastik modülü E = 71.3 Gpa, poisson oranı v = 0.33 tanımlanmıştır. Malzeme modeli tamamen lineer elastik koşullarda ele alınmıştır. Pim-tutucu ve pim-numune arası ise lineer olmayan temas ilişkisi (contact) ile modellenmiştir. Sürtünmeli kontakt modellenen bölgelerde sürtünme katsayısı 0.4 alınmıştır. Tablo 3.1'de verilen testler, farklı çatlak boyu, numune kalınlığı için elde edilen kırılma yüklerini ve doğrulama testlerini içermektedir. Doğrulama testleri dışındaki tüm testlerin sonlu elemanlar modeli hazırlanmış ve kırılma yüklerine karşılık gelen gerilme-şiddet faktörü numunenin kalınlığı yönündeki çatlak önü boyunca Şekil.4.2'de verilmiştir. En yüksek gerilme-şiddet faktörü değeri, 5 mm kalınlık ve 25.94 mm çatlağa sahip numune için elde edilmiştir. En düşük değer ise düzlem şekil değişimi koşuluna en yakın kalınlık değeri olan 25 mm kalınlıklı numuneler için elde edilmiştir. 10 mm kalınlığa sahip numuneler ise arada değerler almıştır. Aynı kalınlığa sahip numuneleri

kıyasladığımızda çatlak boyunun artması hesaplanan kritik gerilme-şiddet faktörü değerlerini azaltmaktadır. 25 mm kalınlığa sahip numuneler için ise arttığı gözlemlenmiştir. Çatlak ucu boyunca elde edilen gerilme-şiddet faktörü değerleri incelendiğinde, tüm mod-I problemleri için en yüksek değer çatlak ucu orta noktasında elde edilmiştir. Tablo 4.1, mod-I problemleri için elde edilen en yüksek gerilme-şiddet faktörü değerlerini ve net kesit alanı gerilmesi değerlerini vermektedir. Net kesit alanı değerleri arasında kalınlık boyunca bir süreklilik gözükmemektedir. Analizler, 11. nesil Intel i7-1165G7 işlemcili, 20 GB RAM içeren bilgisayarda çözdürülmüştür. Herbir mod-I analizinin çözümü yaklaşık olarak 8 saat sürmektedir. Tez kapsamında, Al 2024 T351 malzemesi için toplam 7 adet mod-I kırılma analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Mod-I Açılma modu problemi için hazırlanan sonlu elemanlar ağ yapısı.



Şekil 4.2. Mod-I Açılma modu problemi için hesaplanan GŞF değerleri.

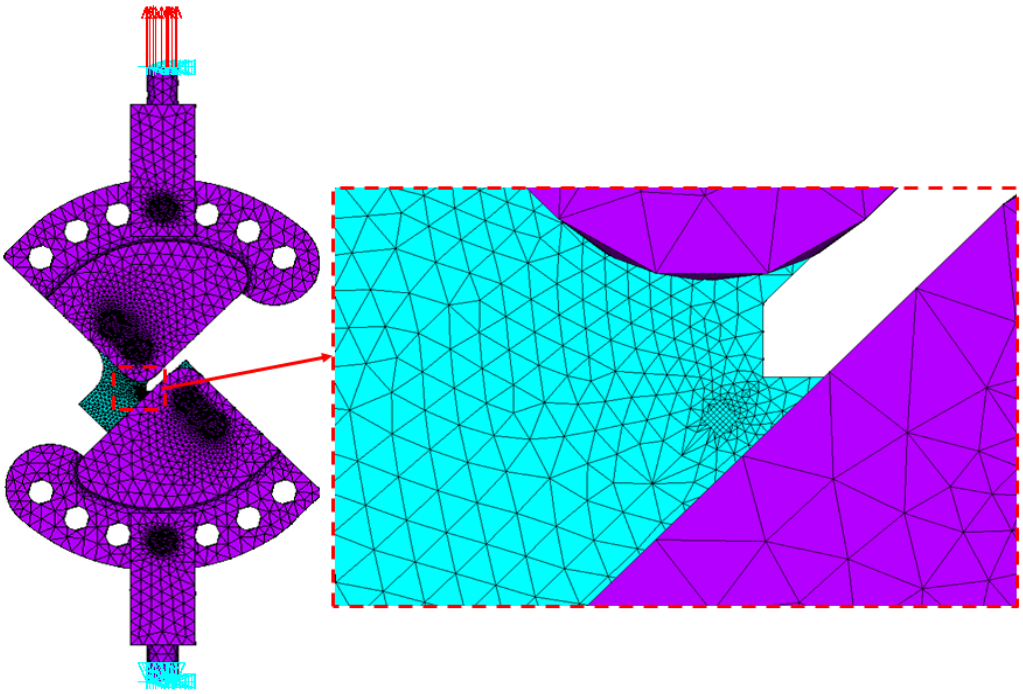
Tablo 4.1. Mod-I kırılma analizleri sonucu çatlak ucu orta noktası için elde edilen en yüksek GŞF değerleri.

Numune ismi	Test Kırılma Yükü (N)	Kalınlık (mm)	Çatlak boyu (mm)	K_I (Mpa.$\sqrt{m}$)	Net Kesit alanı Gerilmesi (MPa)
20220122_02	22184,53	25	25,58	36.35	36.34
20220407_02	16647,19	25	29,77	37.00	32.92
20220402_02	12068,59	10	24,594	43.88	47.50
20220408_03	7752,74	10	29,69	40.66	38.17
20220331_01	7087,9	5	28,18	44.47	64.97
20220613_01	2451,55	5	33,86	47.16	30.38
20220408_02	4090,63	5	29,45	41.32	39.81

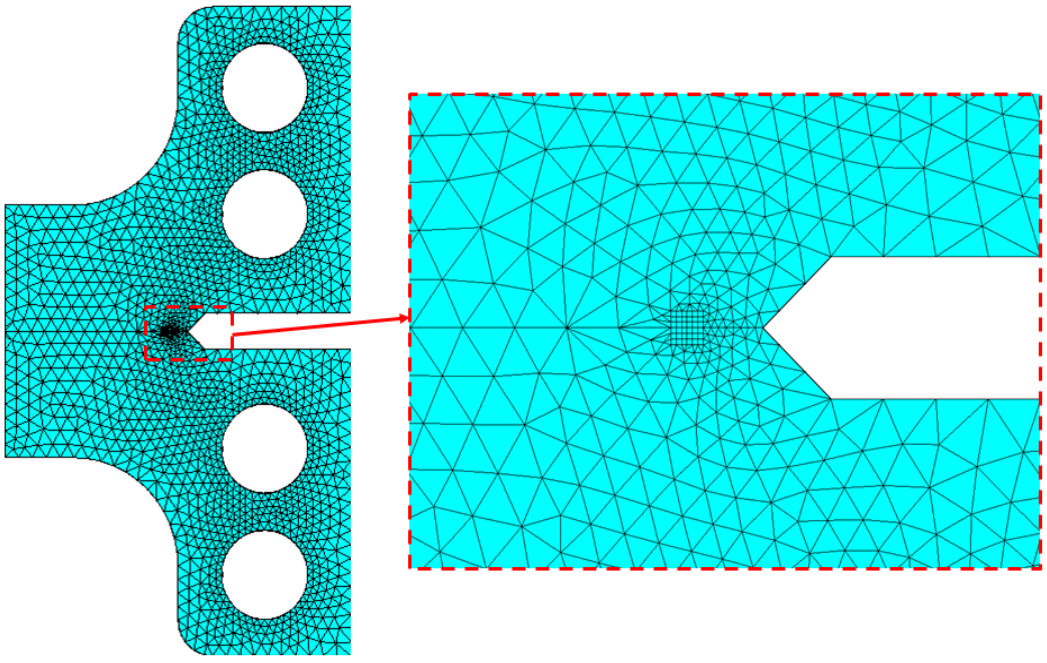
4.2. Mod-I/II Kırılma Analizleri ve GŞF Sonuçları

Bu kısımda mod-I/II kırılma analizlerinin sonlu elemanlar modellerinin hazırlanması ve gerilme şiddet faktörü hesaplanması aşamaları sunulacaktır. Şekil 4.3'te mod-I/II problemleri için kullanılan T-numune ve tutucusunun sonlu elamanlar ağ yapısını gösterilmektedir. Şekil 4.4'te ise T-numune ağ yapısını sunulmaktadır. Modelleme

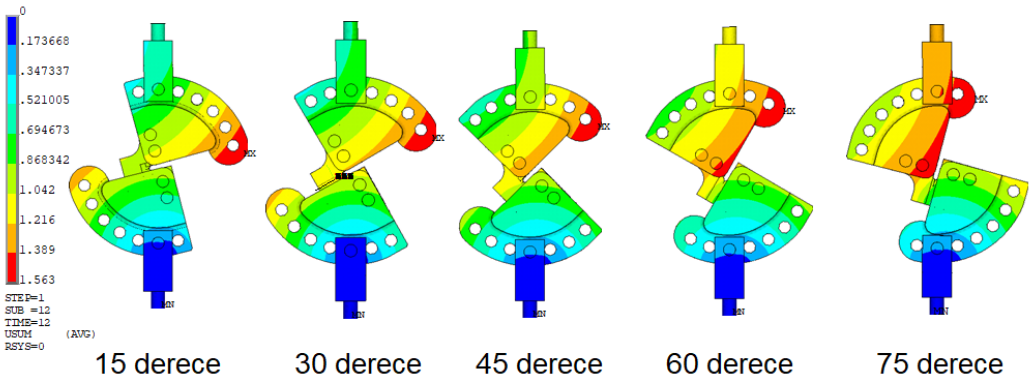
aşamasında 20 düğüm noktalı Solid-186 elemanı kullanılmıştır. Çatlak ucu civarında 0.2 mm boyuta sahip küp elemanlar kullanılmaktadır. Diğer kısımlar ise 4 mm tetrahedral elemanlar ile modellenmiştir. Analizde tutucu için elastik modülü E = 210 GPa, poisson oranı v = 0.30, T-numune için elastik modülü E = 71.3 Gpa, poisson oranı v = 0.33 tanımlanmıştır. Malzeme modeli tamamen lineer elastik koşullarda ele alınmıştır. Pim-tutucu ve pim-numune arası ise lineer olmayan temas (contact) ile modellenmiştir. Kullanılan sürtünmeli temas yüzeylerinde sürtünme katsayısı 0.4 olarak alınmıştır. Analiz sonucu farklı yükleme açıları için elde edilen yer değiştirme kontur dağılımları Şekil 4.5'te verilmektedir. Tablo 3.2'de verilen test sonuçları, farklı çatlak boyu, numune kalınlığı ve doğrulama çalışmaları için gerçekleştirilen testlerin sonuçlarını içermektedir. Doğrulama testleri dışındaki tüm testlerin sonlu elemanlar modeli hazırlanmış ve gerilme-şiddet faktörleri hesaplanmıştır. Şekil 4.6, kalınlığı 5 mm ve çatlak boyu yaklaşık 25 mm olan problemler için mod-I gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını vermektedir. Mod-I/II yükleme açısı arttıkça hesaplanan K_I değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.7'te ise kalınlığı 5 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için testlerde elde edilen kırılma yüklerine karşılık gelen mod-II gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/II yükleme açısı arttıkça hesaplanan K_{II} gerilme-şiddet faktörü değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Mod-I ve mod-II yönündeki benzer eğilim kalınlık ve çatlak boyuna göre sınıflandırılan tüm grafiklerde görülmektedir. Şekil 4.8, 30 mm civarı çatlak barındıran 5 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını, Şekil 4.9'da ise K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını sunulmaktadır. Şekil 4.10'da 10 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını, Şekil 4.11'de ise K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.12'de 25 mm civarı çatlak barındıran 20 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını, Şekil 4.13'te ise K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını gösterilmektedir. Şekil 4.14'te 30 mm civarı çatlak barındıran 20 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını, Şekil 4.15'te ise K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları sunulmaktadır. Analizler, 11. nesil Intel i7-1165G7 işlemcili, 20 GB RAM içeren bilgisayarda çözdürülmüştür. Herbir mod-I/II analizinin çözümü yaklaşık olarak 48 saat sürmektedir. Tez kapsamında, Al 2024 T351 malzemesi için toplam 19 adet mod-I/II kırılma analizi gerçekleştirilmiştir.



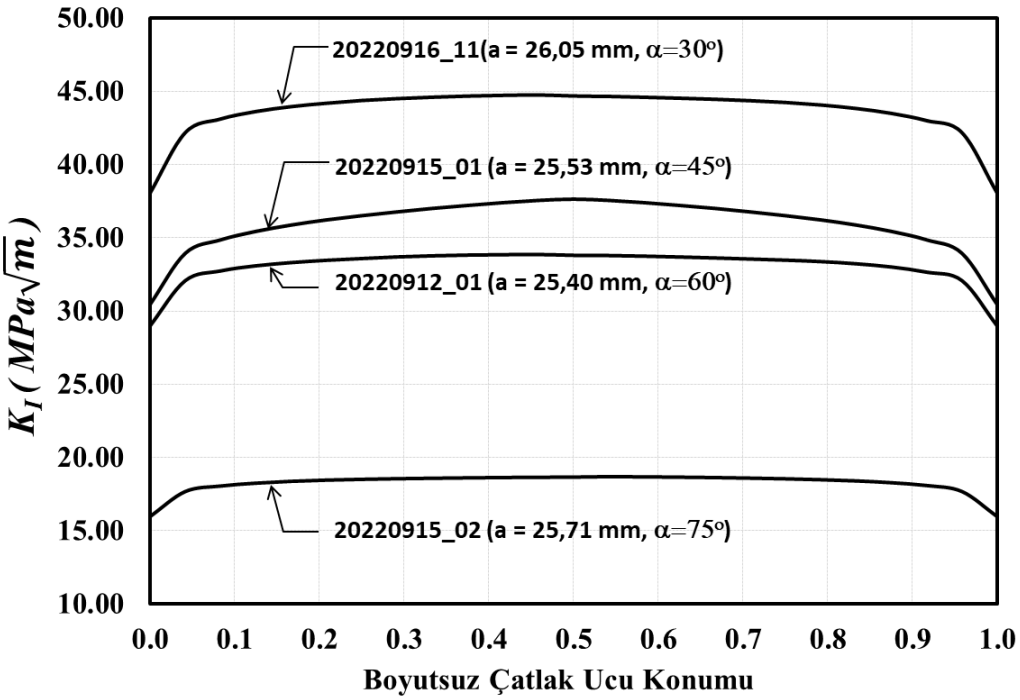
Şekil 4.3. Mod-I/II kırılma analizleri için hazırlanan sonlu elemanlar ağ yapısı.



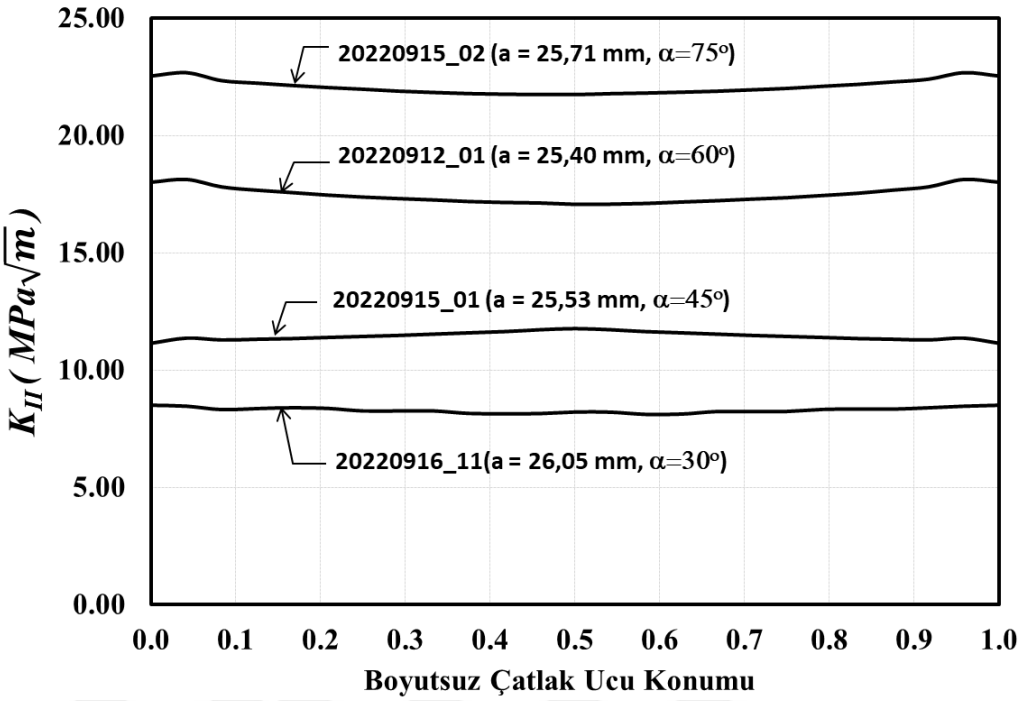
Şekil 4.4. Mod-I/II T numune kırılma analizleri için hazırlanan sonlu elemanlar ağ yapısı.



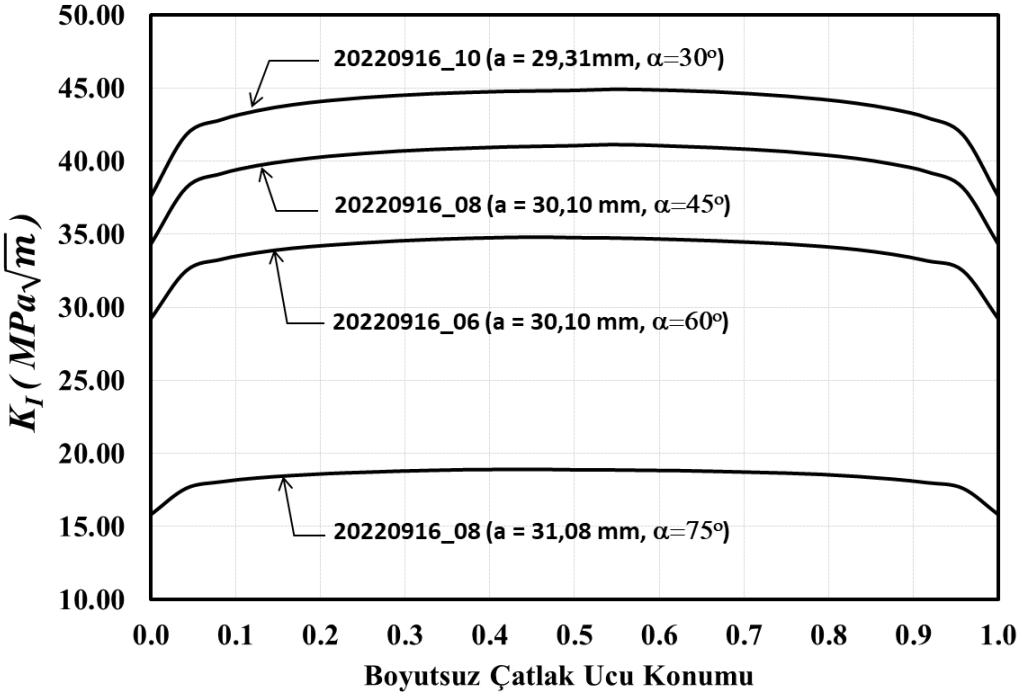
Şekil 4.5. Mod-I/II T numune problemi analiz sonucu y ekseni yer değiştirme sonuçları.



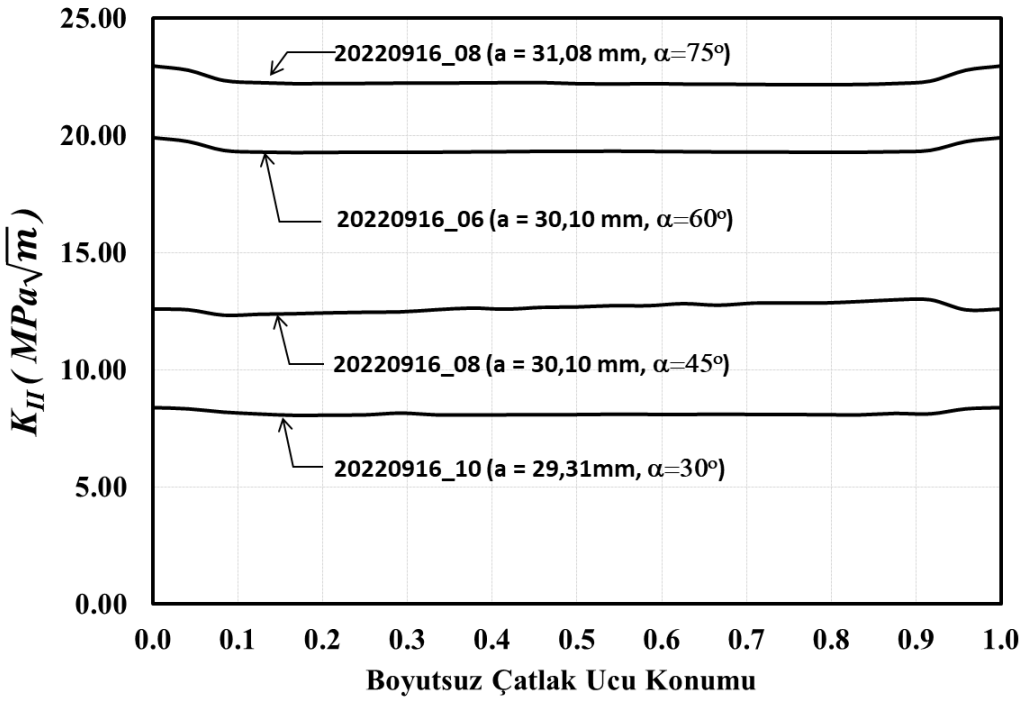
Şekil 4.6. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları..



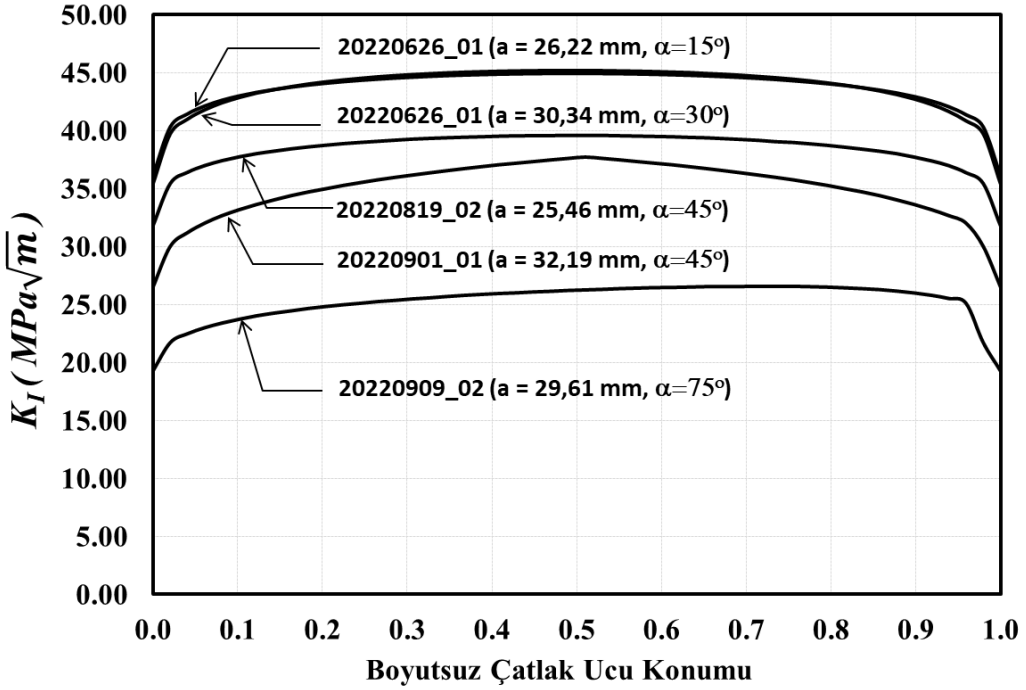
Şekil 4.7. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



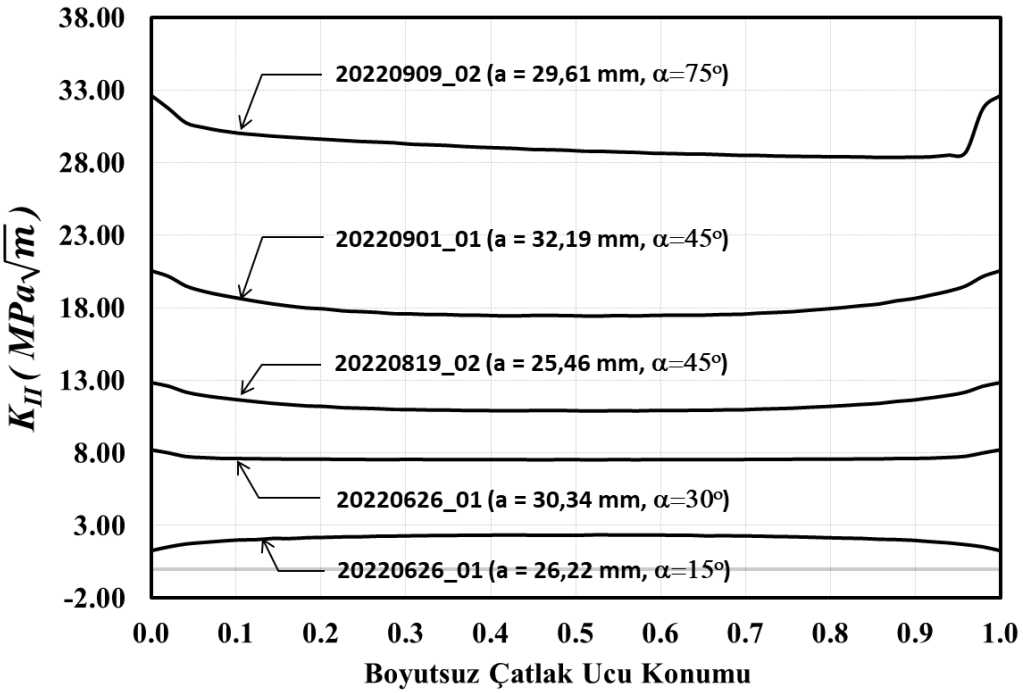
Şekil 4.8. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



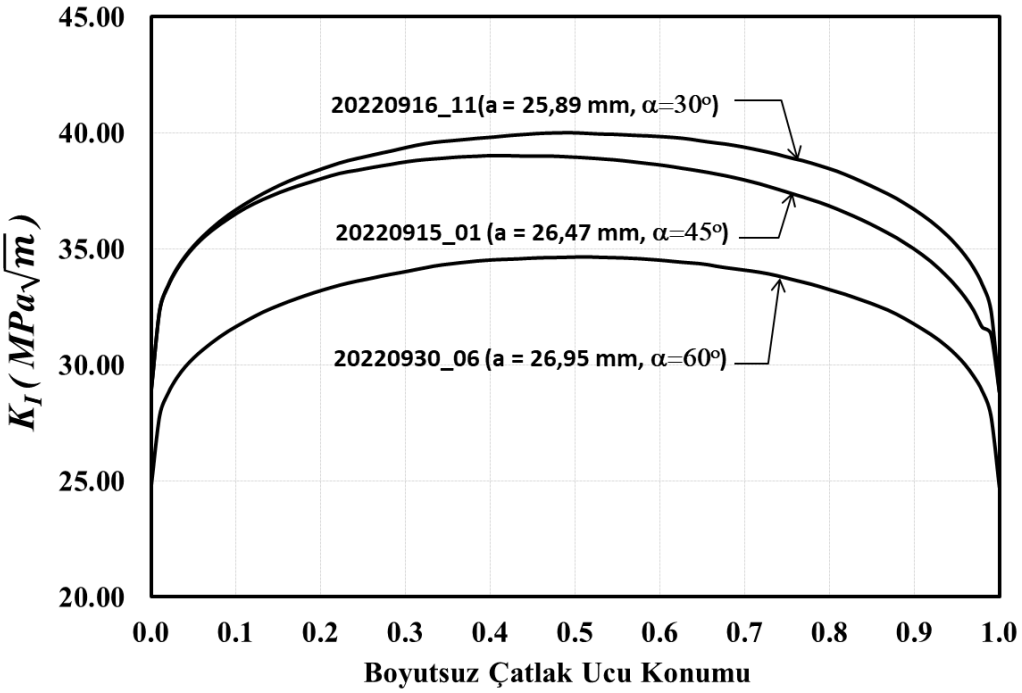
Şekil 4.9. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



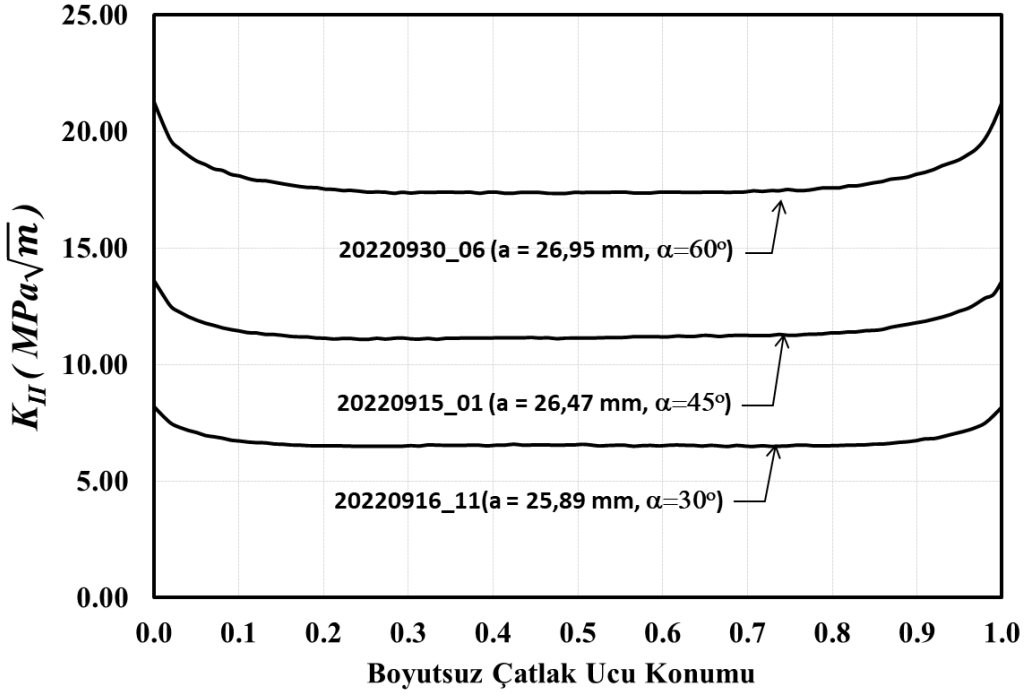
Şekil 4.10. Farklı çatlak boylarındaki, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



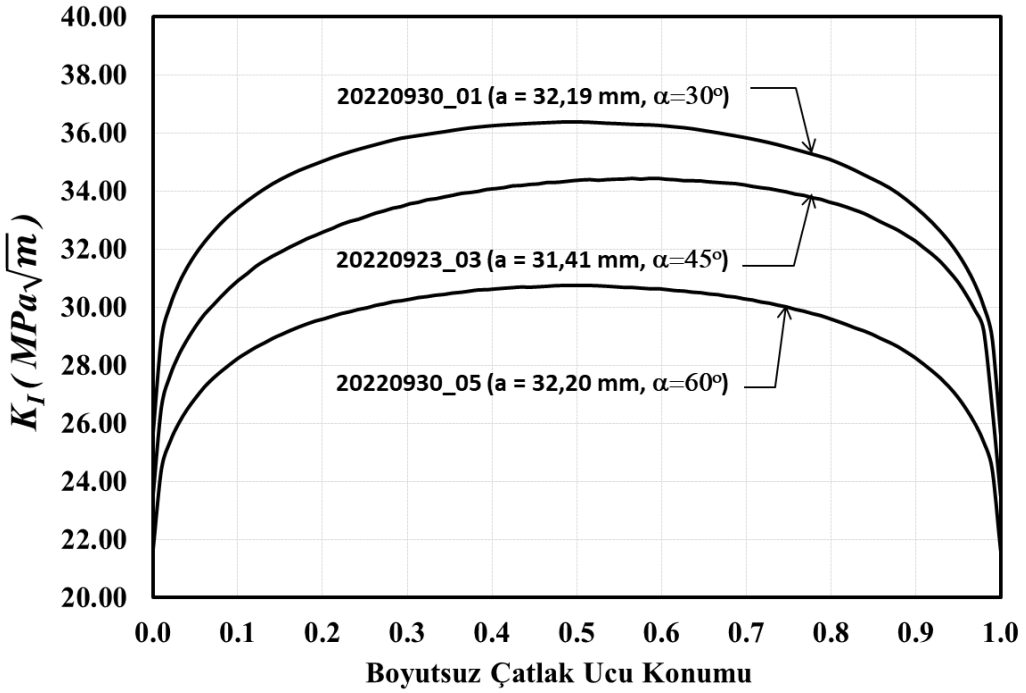
Şekil 4.11. Farklı çatlak boylarındaki, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



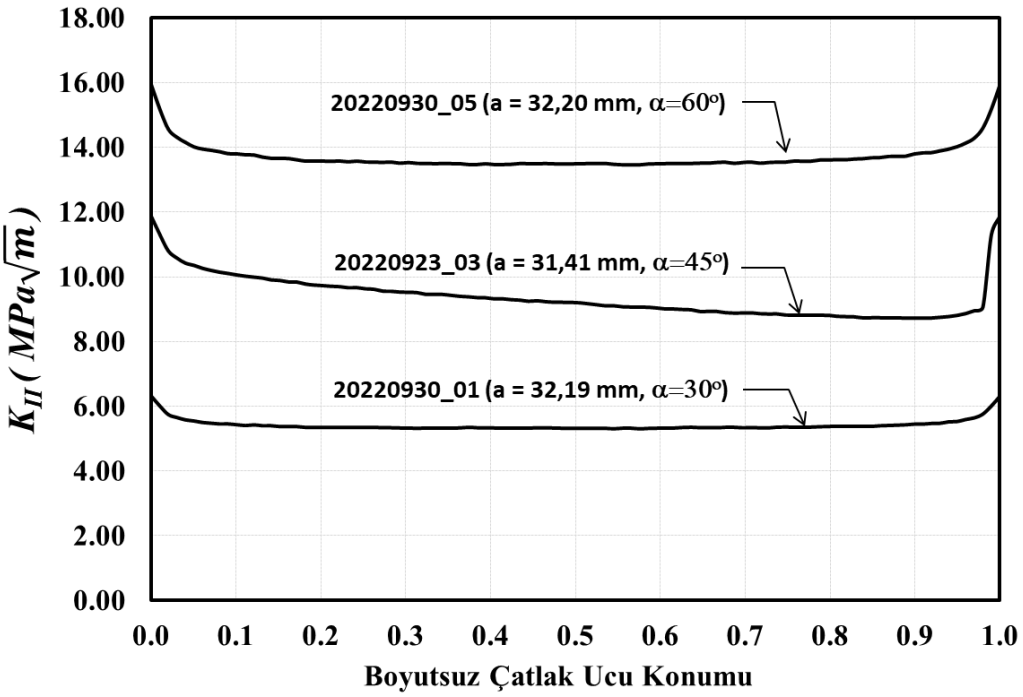
Şekil 4.12. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



Şekil 4.13. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



Şekil 4.14. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



Şekil 4.15. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.

Hesaplanan mod-I (açılma modu) ve mod-II (kayma modu) gerilme-şiddet faktörü değerlerinin kırılma yükü hesaplamalarında kullanılabilmesi için K_I ve K_{II} gerilme şiddet faktörü değerleri kullanıarak eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu doğrultuda iki farklı kriter ile hesaplama yapılmıştır. Denklem 4.1 Richard kriteri denklemini [57], Denklem 2.2 ise Demir-Ayhan kriteri denklemini [51] vermektedir. Denklem (4.1) içerisinde yer alan α_1, K_{IC}/K_{IIC} oranını simgeleyen bir parametredir ve 1.155 değerini almaktadır. Denklem (4.2)'de yer alan sabit sayılar; a =0,9151, b= -0,2401 ve c=2,4070 değerlerine sahiptir. Eşdeğer gerilme-şiddet faktörü hesaplanan tüm mod-I/II probleleri için en yüksek değer çatlak önü doğrultusundaki numune kalınlığı boyunca orta noktadadır. Tablo 4.2 mod-I/II problemleri için elde edilen en yüksek gerilme-şiddet faktörü değerlerini vermektedir. Özellikle 10mm ve 5 mm kalınlıklı numuneler için hesaplanan gerilme-şiddet faktörü değerleri malzemenin 37 MPa.$\sqrt{m}$ kırılma tokluğu değerinden oldukça uzaktır. Dolayısıyla, Al-2024 malzemesi için LEKM yöntemleri ile tahmin edilen kırılma yükleride, test yüklerinden farklı olacaktır.

$$K_{eş} = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{K_I^2 + 4\,(\alpha_1 K_{II})^2} \qquad (4.1)$$

$$K_{eş} = (\mathrm{a}.{K_I}^4 + b.{K_{II}}^4 + c.{K_I}^2 + {K_{II}}^2)^{1/4} \quad (4.2)$$

Tablo 4.2 Richard ve Demir-Ayhan kriterlerine göre Mod-I/II kırılma analizleri sonucu elde edilen en yüksek Keş değerleri.

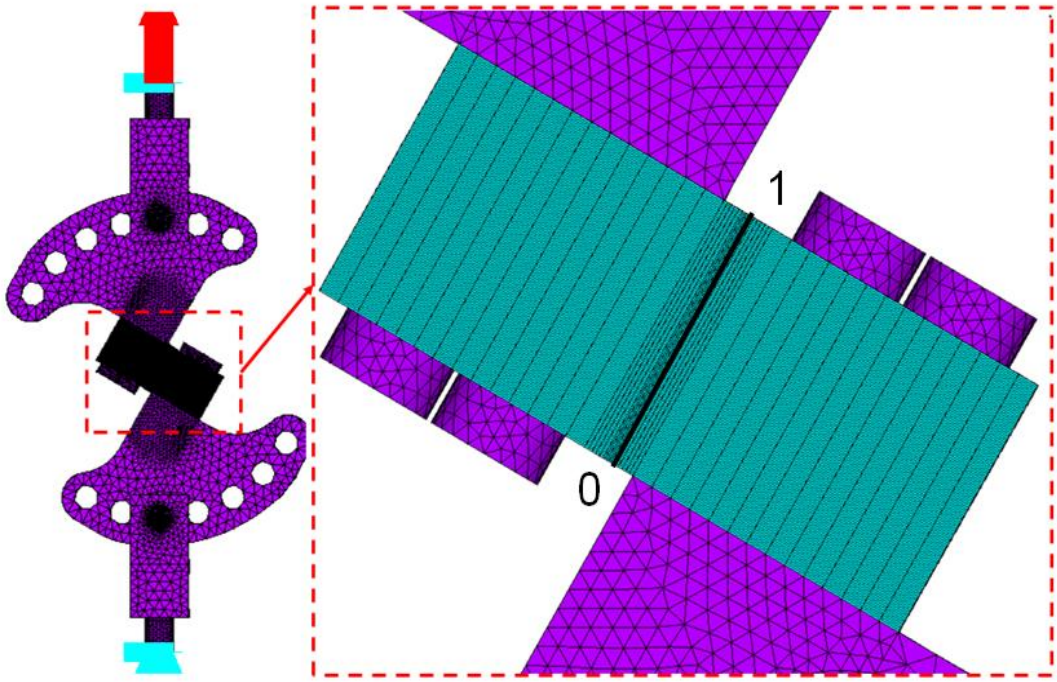
Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yüklemee Açısı	K_I (MPa.$\sqrt{m}$)	K_{II} (MPa.$\sqrt{m}$)	$K_{eş}$ (Richard) (MPa.$\sqrt{m}$)	$K_{eş}$ (Demir-Ayhan) (MPa.$\sqrt{m}$)
20220722_01	10 mm	15º	44.92	2.33	54.45	43.95
20220819_02	10 mm	45º	39.58	10.89	52.98	38.71
20220822_01	10 mm	60º	30.69	16.05	49.43	29.89
20220626_01	10 mm	30º	45.18	7.53	56.83	44.20
20220826_02	10 mm	45º	45.68	12.23	60.85	44.68
20220901_01	10 mm	45º	37.71	10.10	50.247	36.89
20220912_01	5 mm	60º	33.81	17.07	53.69	32.95
20220915_01	5 mm	45º	37.64	11.77	51.69	36.81
20220915_02	5 mm	75º	18.67	21.75	47.32	N/A
20220916_02	5 mm	75º	18.89	22.20	48.19	N/A
20220916_06	5 mm	60º	34.77	19.31	57.45	33.81
20220916_08	5 mm	45º	41.06	12.68	56.22	40.15
20220916_10	5 mm	30º	44.84	8.08	56.78	43.87
20220923_01	20 mm	30º	39.98	6.57	50.25	39.12
20220920_01	20 mm	45º	38.93	11.13	52.49	38.08
20220923_03	20 mm	45º	34.38	9.197	45.79	33.6
20220930_06	20 mm	60º	34.64	17.37	54.87	33.76
20220930_01	20 mm	30º	36.37	5.31	45.34	35.59
20220930_05	20 mm	60º	30.75	13.50	46.38	30.02

4.3. Mod-I/III Kırılma Analizleri ve GŞF Sonuçları

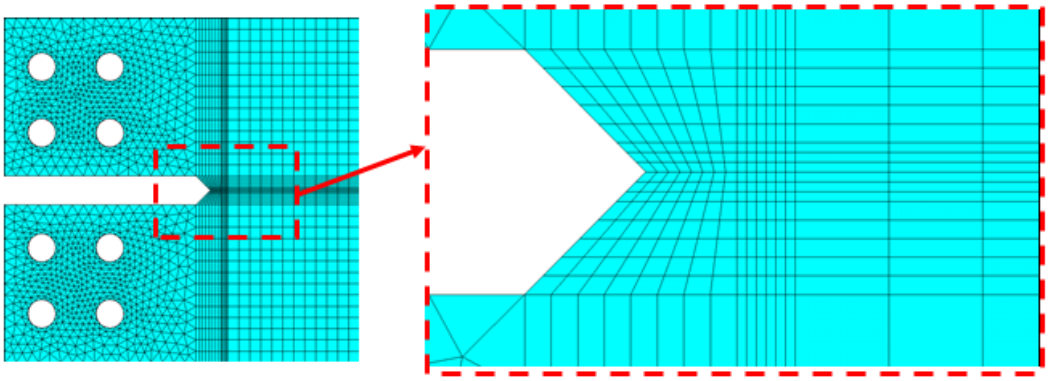
Bu kısımda mod-I/III kırılma tokluğu testlerinin sonlu elemanlar modellerinin hazırlanması ve gerilme şiddet faktörü hesaplanması aşamaları sunulacaktır. Şekil 4.16'da mod-I/III problemleri için kullanılan CTT numune ve tutucusunun sonlu elamanlar ağ yapısını gösterilmektedir. Şekil 4.17'te ise numunenin sonlu elemanlar

ağ yapısını gösterilmektedir. Modelleme aşamasında 20 düğüm noktalı Solid-186 elemanı kullanılmıştır. Çatlak ucu civarında 0.2 mm boyuta sahip küp elemanlar kullanılmıştır. Diğer kısımlar ise 4 mm tet elemanlar ile modellenmiştir. Analizde tutucu için elastiklik modülü E = 210 GPa, poisson oranı v = 0.30, CTT numunesi için elastiklik modülü E = 71.3 Gpa, poisson oranı v = 0.33 tanımlanmıştır. Malzeme modeli tamamen lineer elastik koşullarda ele alınmıştır. Pim-tutucu ve pim-numune arası ise lineer olmayan temas yüzeyi tanımlanarak modellenmiştir. Kullanılan sürtünmeli temas yüzeylerinde sürtünme katsayısı 0.4 olarak alınmıştır. Analiz sonucu farklı yükleme açıları için elde edilen yer değiştirme sonuçları Şekil 4.18'de verilmektedir. Tablo 3.3'te verilen değerler, farklı çatlak boyu, numune kalınlığı ve doğrulama testlerini içermektedir. Doğrulama testleri dışındaki tüm testlerin sonlu elemanlar modeli hazırlanmış ve ve deneylerden elde edilen kritik kırılma yüklerine karşılık gelen yük seviyesi altındaki gerilme şiddet faktörü değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.19'te kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık 25 mm olan problemler için mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan K_I değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.20 ise kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için mod-II gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını vermektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan K_{II} gerilme-şiddet faktörü değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.21'te ise kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için mod-III gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan K_{III} gerilme-şiddet faktörü değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Mod-I ,mod-II ve mod-III yönündeki benzer eğilim kalınlık ve çatlak boyuna göre sınıflandırılan tüm grafiklerde görülmektedir. Şekil 4.22, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını, Şekil 4.23, K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını, Şekil 4.24'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.25'te 25 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.26'te K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, şekil 4.27'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.28'te 30 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.26'te K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını, şekil 4.27'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Analizler, 11. nesil Intel i7-1165G7 işlemcili, 20 GB RAM içeren bilgisayarda çözdürülmüştür. Herbir mod-I/III analizinin çözümü yaklaşık olarak 32

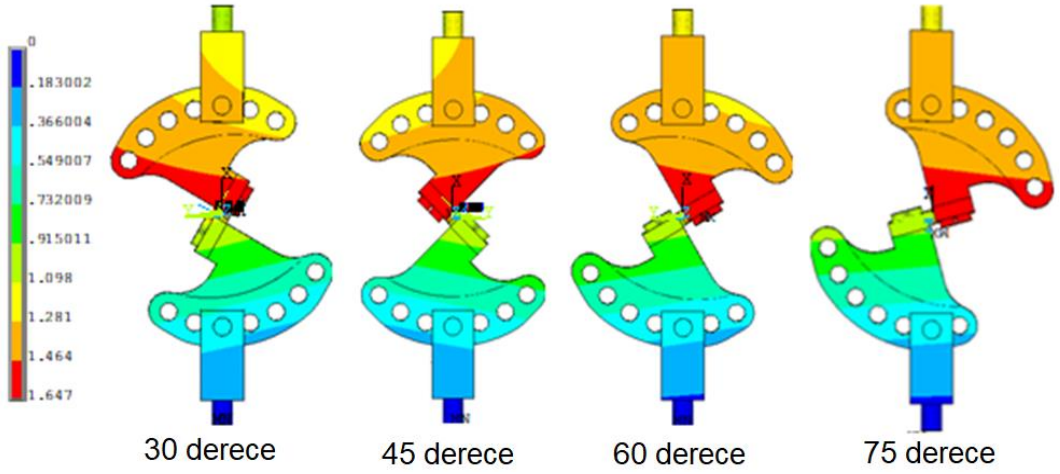
saat sürmektedir. Tez kapsamında, Al 2024 T351 malzemesi için toplam 17 adet mod-I/III kırılma analizi gerçekleştirilmiştir. Tüm gerilme-şiddet faktörü grafiklerinin x eksenleri çatlak önü boyunca kalınlık doğrultusundaki noktasal konumu temsil eden boyutsuz çatlak ucu tanımına göre çizilmiştir. Şekil 4.16'da görüldüğü gibi çatlak ucu ön kısmından başlayıp arka kısmında son bulan çatlak önü boyunca konum boyutsuz hale getirilerek, çatlak önü doğrultusundaki konum koordinatı sınırları 0 ile 1 arasında boyutsuz eksenlerde verilmiştir.



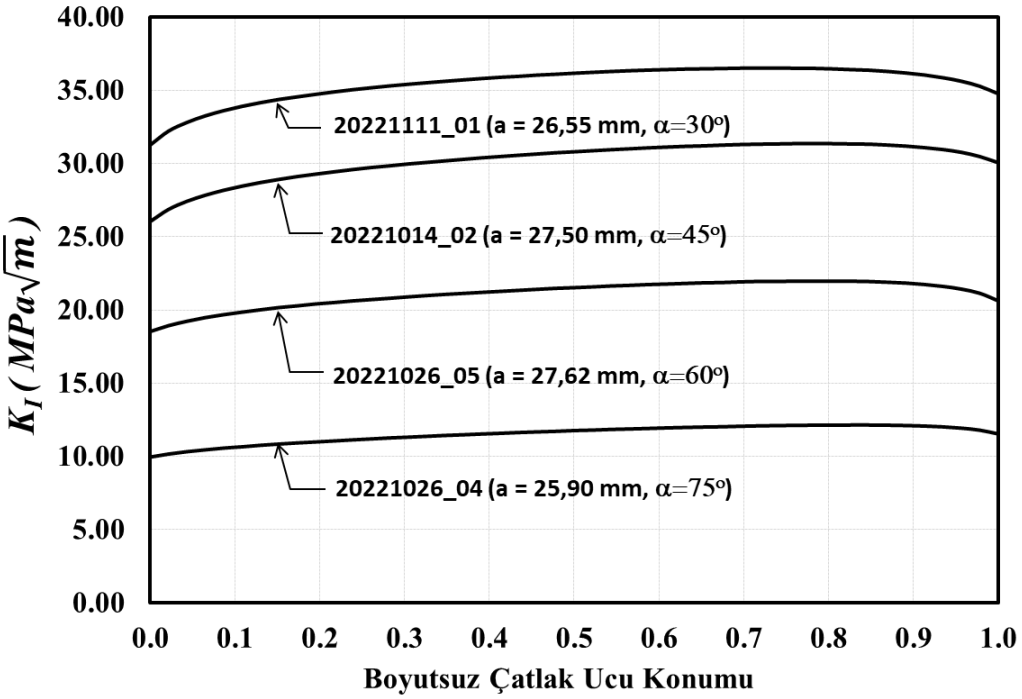
Şekil 4.16. Mod-I/III problemi sonlu elemanlar modeli ve CTT numunesinin yakın görüntüsü.



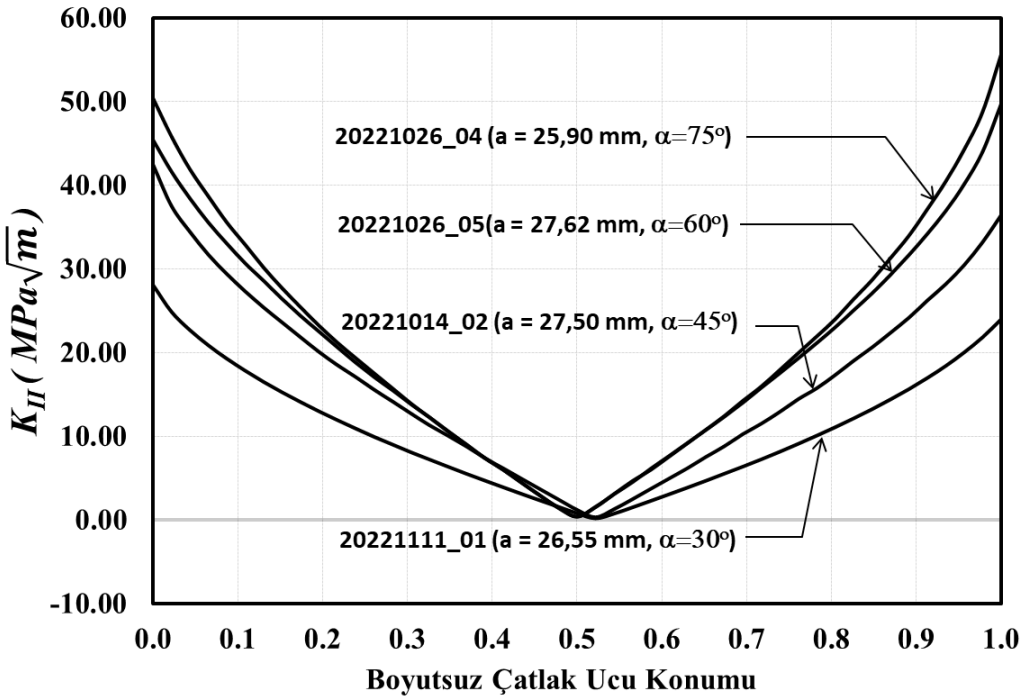
Şekil 4.17. Mod-I/III CTT numunesi sonlu elemanlar modeli ve çatlak ucu yakın görüntüsü.



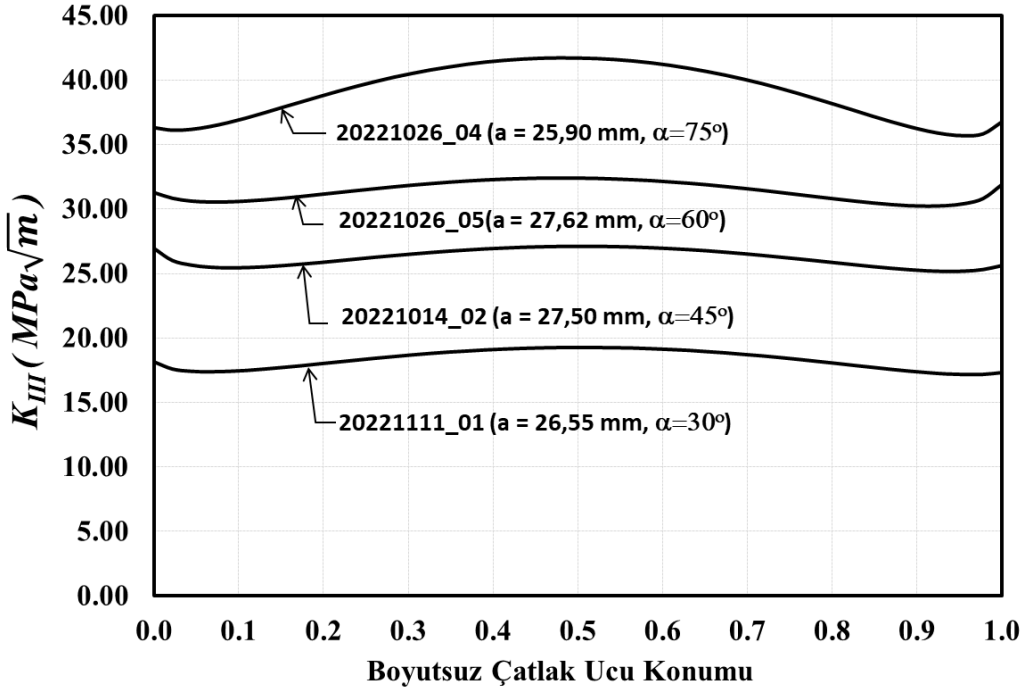
Şekil 4.18. Mod-I/III CCT numunesi problemi analiz sonucu y ekseni yer değiştirme sonuçları.



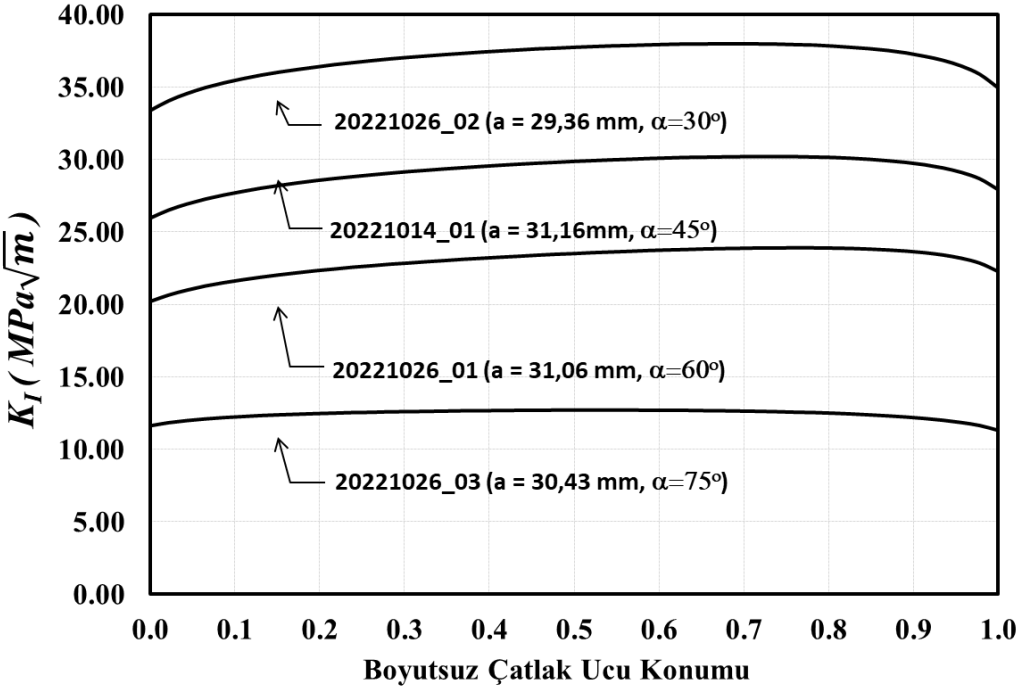
Şekil 4.19. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



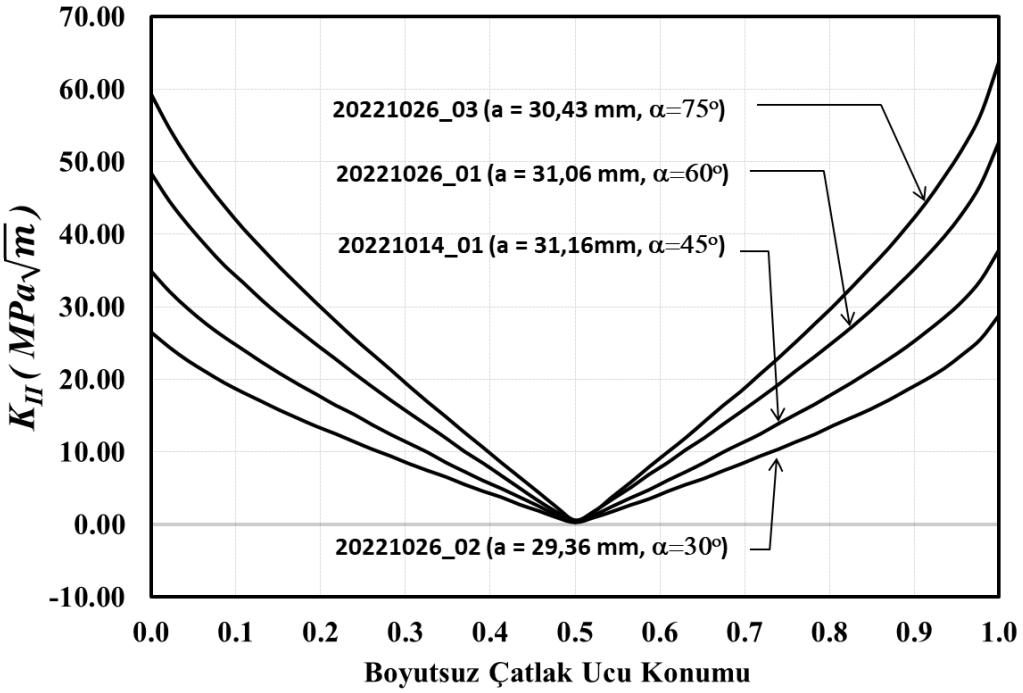
Şekil 4.20. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



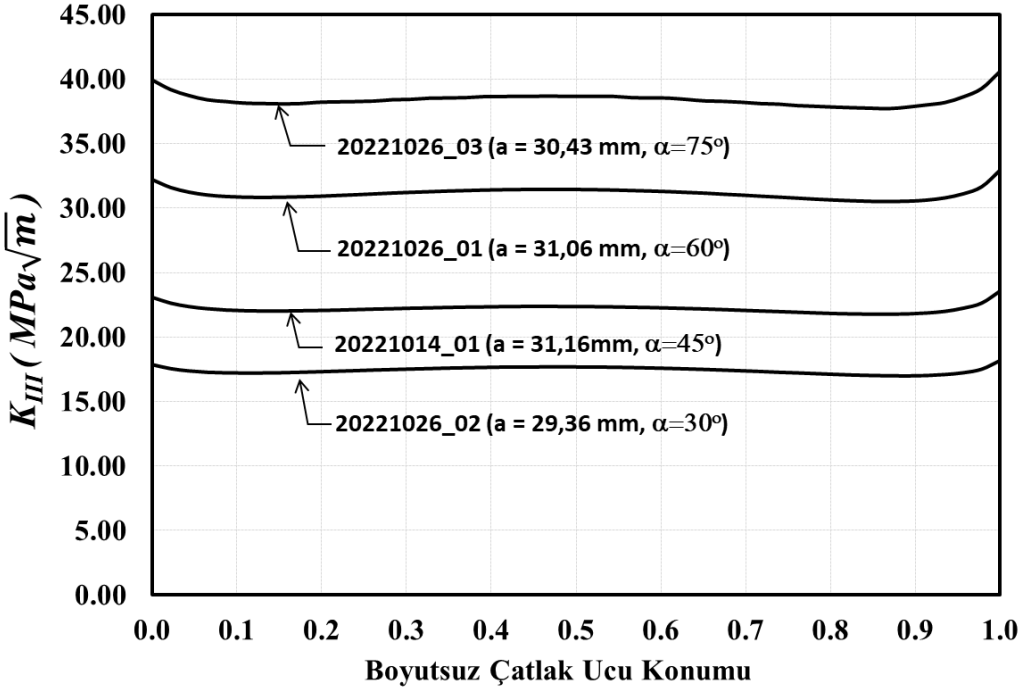
Şekil 4.21. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



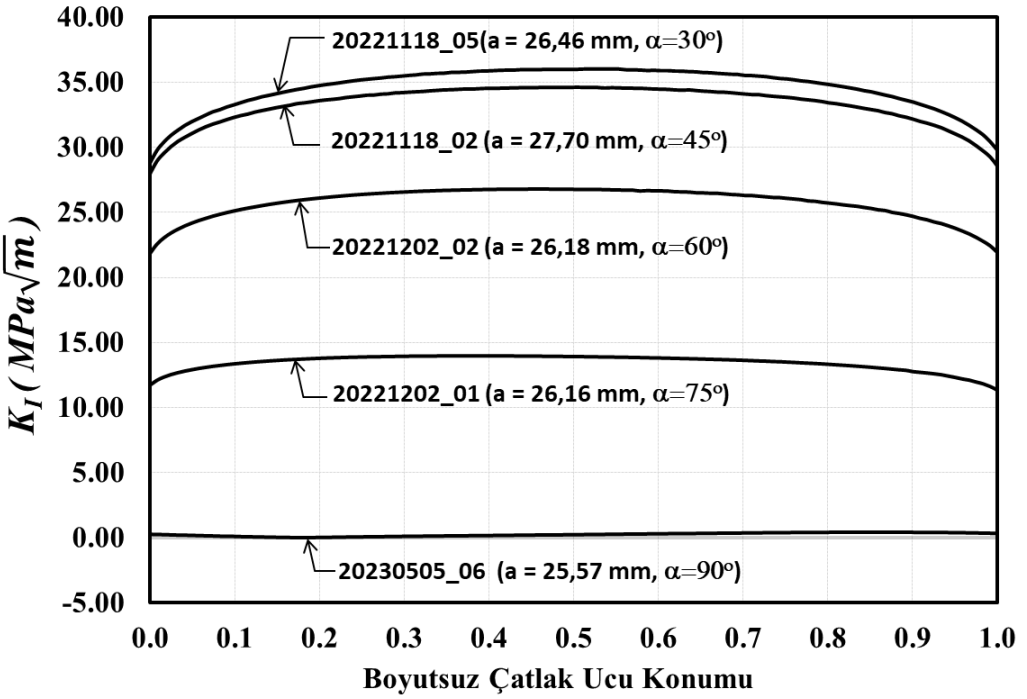
Şekil 4.22. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



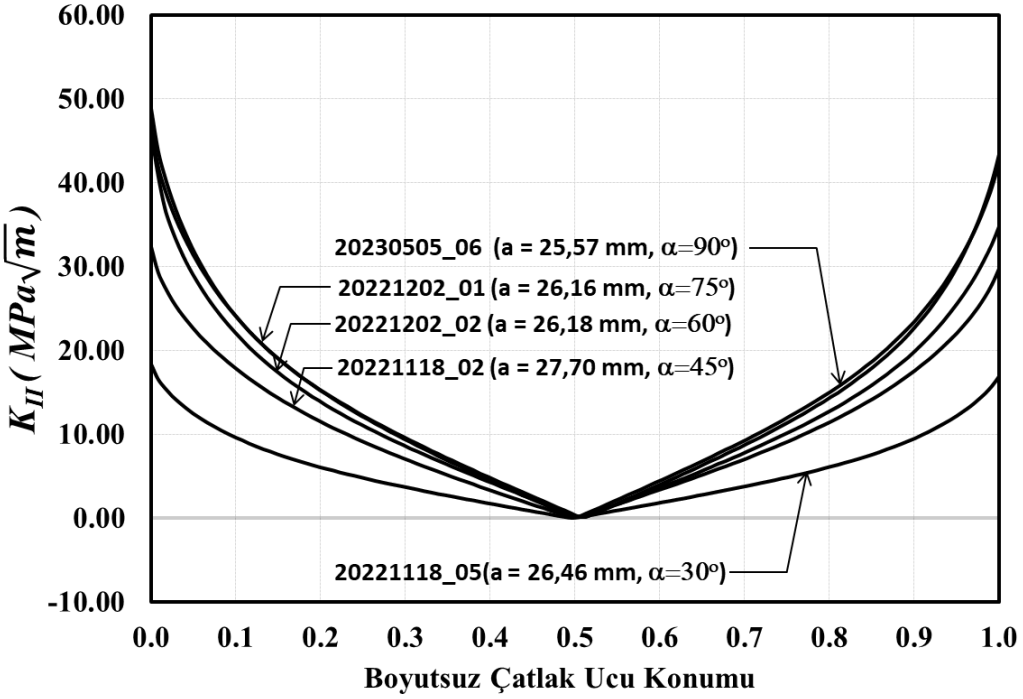
Şekil 4.23. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



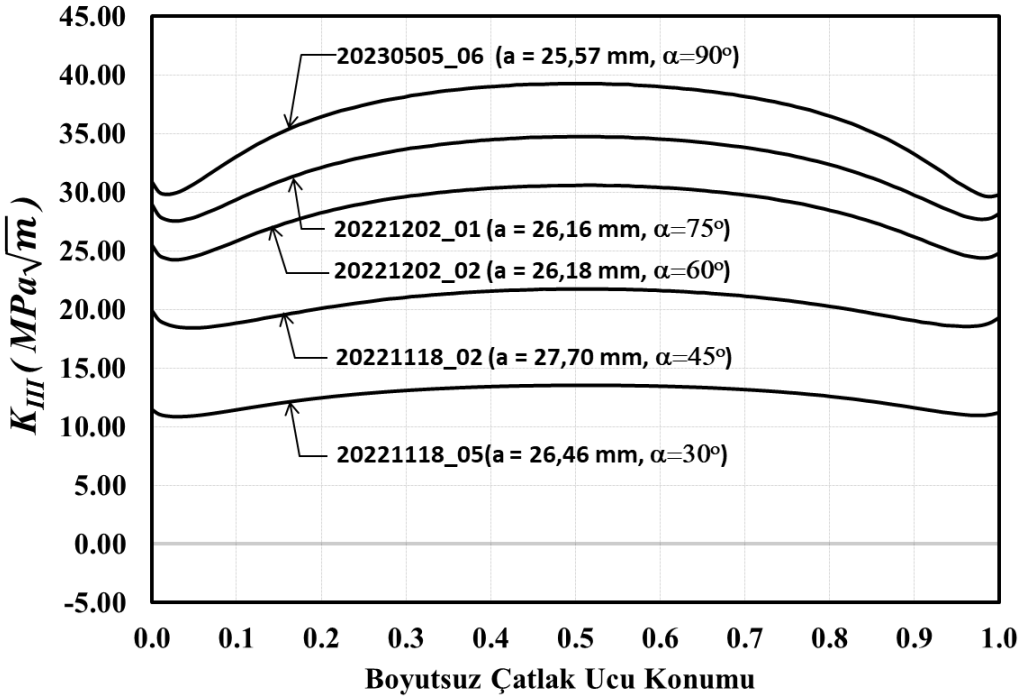
Şekil 4.24. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



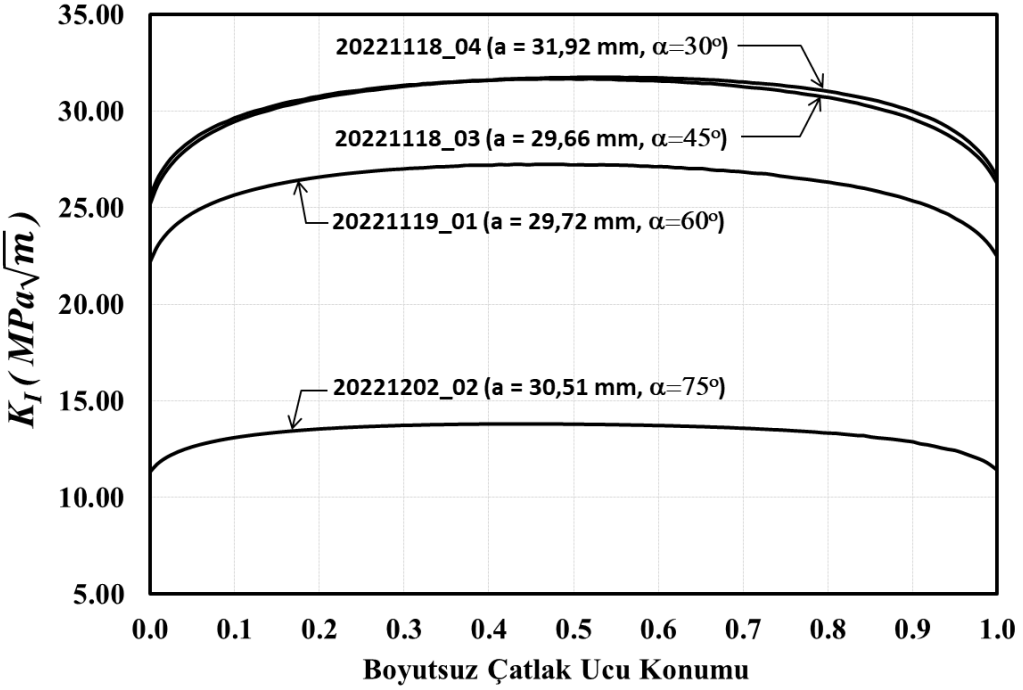
Şekil 4.25. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



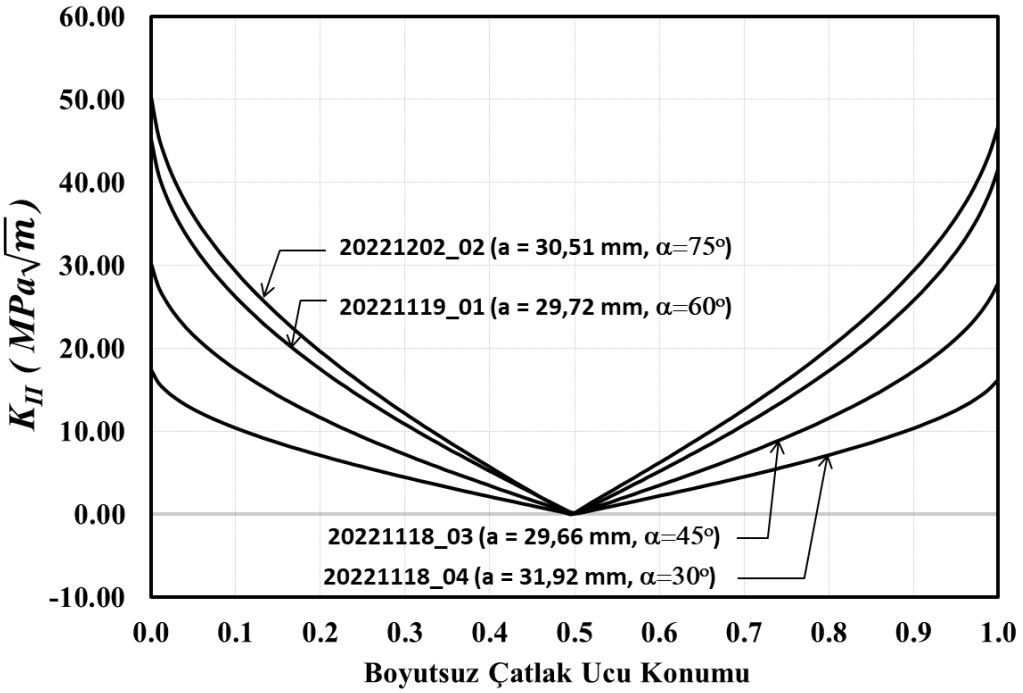
Şekil 4.26. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



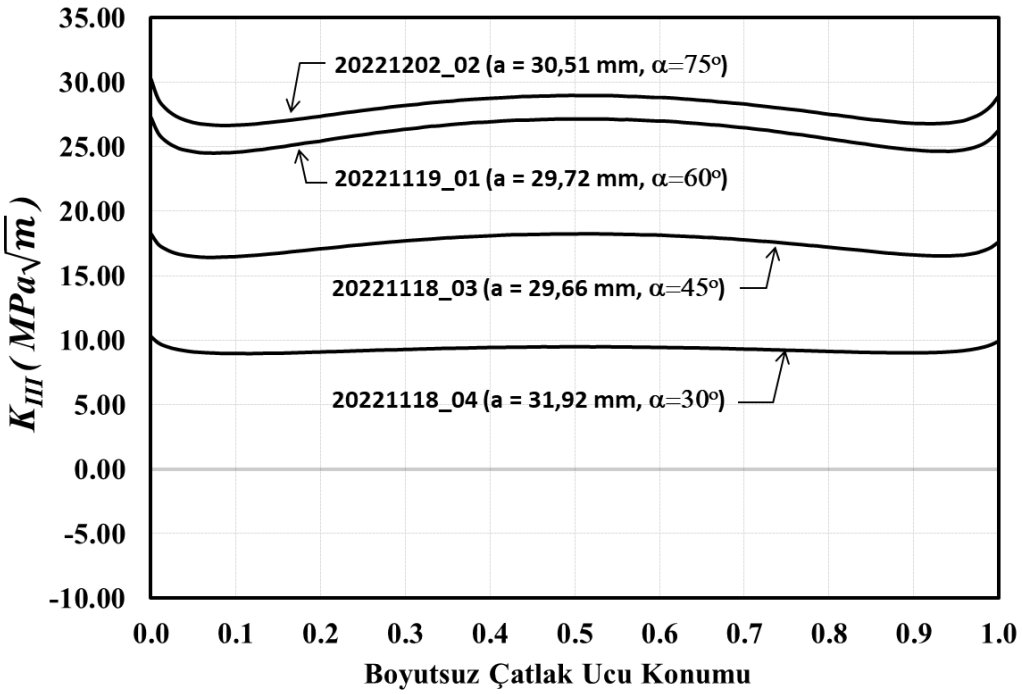
Şekil 4.27. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



Şekil 4.28. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



Şekil 4.29. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



Şekil 4.30. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.

Hesaplanan mod-I (açılma modu), mod-II (kayma modu) ve mod-II (yırtılma modu) gerilme-şiddet faktörü değerlerinin kırılma yükü hesaplamalarında kullanılabilmesi için K_I, K_{II} ve K_{III} gerilme şiddet faktörü değerleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu doğrultuda iki farklı kriter ile hesaplama yapılmıştır. Denklem 4.3 Richard kriteri denklemini [56], denklem 4.4 ise Demir-Ayhan kriteri denklemini vermektedir [51]. Denklem 4.4 içerisinde yer alan $K_{eş(II/III)}$ formülasyonu ise denklem 4.5'de verilmektedir. Denklem 4.4 ve 4.5'de yer alan sabit sayılar; a =0,6890, b= 0,6796 ve c=0,5263, d=0,3322, e= -0,1112, f=0,0257 ve g=-0,0004 değerini almaktadır. Eşdeğer gerilme-şiddet faktörü hesaplanan tüm mod-I/III probleleri için en yüksek değer kenar düğüm noktasındadır (Boyutsuz çatlak ucu konumu 1). Tablo 4.3 mod-I/III problemleri için elde edilen en yüksek gerilme-şiddet faktörü değerlerini vermektedir. Özellikle 10mm ve 5 mm kalınlıklı numuneler için hesaplanan gerilme-şiddet faktörü değerleri malzemenin 37 MPa.$\sqrt{m}$ kırılma tokluğu değerinden oldukça uzaktır. Dolayısıyla, Al-2024 malzemesi için LEKM yöntemleri ile tahmin edilen kırılma yükleride, test yüklerinden farklı olacaktır.

$$K_{eş} = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{K_I^2 + 5{,}366.\ {K_{II}}^2 + 4.\ {K_{III}}^2} \quad (4.3)$$

$$K_{eş(I/II/III)} = \sqrt{c.K_I^2 + d.K_{eş(II/III)}^2 + e.K_I.K_{eş(II/III)}} + (f.K_I^4 + g.K_I.K_{eş(II/III)}^3)^{0.25} \quad (4.4)$$

$$K_{eş(II/III)} = \sqrt{\mathrm{a}.K_{II}^2 + b.K_{III}^2} \quad (4.5)$$

Tablo 4.3. Richard ve Demir-Ayhan kriterlerine göre Mod-I/III kırılma analizleri sonucu elde edilen en yüksek Keş değerleri.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	K_I (Mpa. $\sqrt{m}$)	K_{II} (Mpa. $\sqrt{m}$)	K_{III} (Mpa. $\sqrt{m}$)	$K_{eş}$ (Richard) (Mpa. $\sqrt{m}$)	$K_{eş}$ (Demir-Ayhan) (Mpa. $\sqrt{m}$)
20221014_02	10	45º	26.04	42.49	26.95	70.62	38.77
20221014_01	10	45º	27.91	37.90	23.57	65.70	38.45
20221026_01	10	60º	22.26	52.83	32.94	81.51	40.34
20221026_02	10	30º	34.94	28.89	18.18	59.37	42.21
20221026_03	10	75º	11.31	63.87	40.61	90.23	N/A
20221026_05	10	60º	20.63	49.70	31.89	76.93	37.91
20221111_01	10	30º	32.81	22.72	17.43	51.98	38.94
20221026_04	10	75º	11.55	55.60	36.75	80.15	N/A
20221118_02	25	45º	27.96	32.44	19.90	58.74	36.51
20221118_03	25	45º	25.55	30.33	18.25	54.38	33.54
20221118_04	25	30º	25.17	17.49	10.29	38.56	29.57
20221118_05	25	30º	28.78	18.42	11.468	42.558	33.55
20221119_01	25	60º	22.18	45.34	27.26	71.29	36.69
20221119_02	25	75º	50.46	30.24	71.71	108.93	68.52
20221202_02	25	60º	21.83	40.94	25.50	65.85	34.68
20221202_01	25	75º	11.72	46.58	28.97	67.37	29.03
20230505_06	25	90º	0.27	48.95	30.89	64.69	N/A

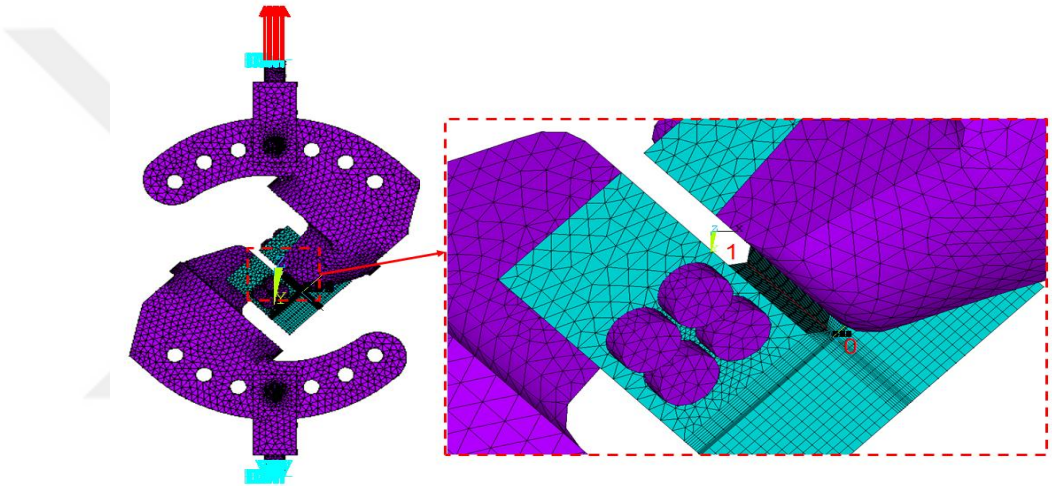
4.4. Mod-I/II/III Kırılma Analizleri ve GŞF Sonuçları

Bu kısımda mod-I/II/III kırılma tokluğu testlerinin sonlu elemanlar modellerinin hazırlanması ve gerilme şiddet faktörü hesaplanması aşamaları sunulacaktır. Şekil

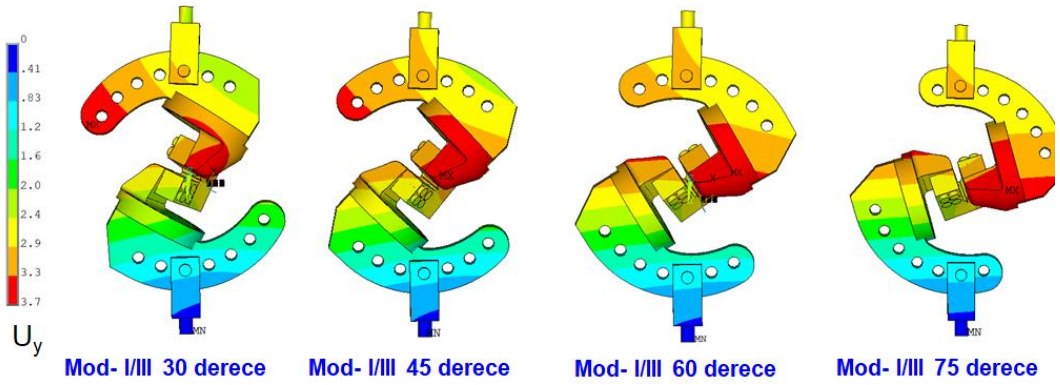
4.31'te mod-I/II/III problemleri için kullanılan CTST numune ve tutucusunun sonlu elamanlar ağ yapısını göstermektedir. Modelleme aşamasında 20 düğüm noktalı Solid-186 elemanı kullanılmıştır. Çatlak ucu civarında 0.2 mm boyuta sahip küp elemanlar kullanılmaktadır. Diğer kısımlar ise 4 mm tetrahedral elemanlar ile modellenmiştir. Analizde tutucu için elastiklik modülü E = 210 GPa, poisson oranı v = 0.30 CTT numunesi için elastik modülü E = 71.3 GPa, poisson oranı v = 0.33 olarak tanımlanmıştır. Malzeme modeli tamamen lineer elastik koşullarda ele alınmıştır. Pim-tutucu ve pim-numune arası ise lineer olmayan temas yüzeyi ile modellenmiştir. Kullanılan sürtünmeli temas yüzeylerinde sürtünme katsayısı 0.4 olarak alınmıştır. Mod-II//III açısı 45^o olan durum için farklı mod-I/III yükleme açılarında gerçekleştirilen analizler sonrası numune ve tutucuda oluşan yerdeğiştirme değerlerinin değişimleri Şekil 4.32'de gösterilmektedir. Tablo 3.4'de farklı çatlak boyu, numune kalınlığındaki testler ile doğrulama testlerine dair veriler içermektedir. Doğrulama testleri dışındaki tüm testlerin sonlu elemanlar modelleri hazırlanmış ve gerilme-şiddet faktörleri hesaplanmıştır. Şekil 4.33'te mod-II/III açısı 30^o , kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık 25 mm olan problemler için mod-I gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan K_I değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.33 içerisinde mod-I/III açısının 45^o olduğu durum için mod-I gerilme-şiddet faktörü değerleri 60^o'den düşüktür. Ancak çatlak boyları arasında yaklaşık 0.80 mm fark vardır. Dolayısıyla mod-I/III açısının artmasının, mod-I gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını düşürdüğü varsayımı hala geçerli olmakla birlikte çatlak boyları arasındaki farkın yüksek olması sonuçları etkilemektedir. Şekil 4.34'te mod-II/III açısı 30^o , kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için mod-II gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan K_{II} gerilme-şiddet faktörü değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.35'te, mod-II/III açısı 30^o, kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için mod-III gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan K_{III} gerilme-şiddet faktörü değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Mod-I ,mod-II ve mod-III yönündeki benzer eğilim kalınlık ve çatlak boyuna göre sınıflandırılan tüm grafiklerde görülmektedir. Bu eğilimi etkileyen tek parametre ise çatlak boyudur. Şekil 4.36'da mod-II/III açısı 30^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.37, K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.38'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları

gösterilmektedir. Şekil 4.39'da mod-II/III açısı 45^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.40'da, K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.41'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.42'de mod-II/III açısı 45^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.43'te K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.44'de ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.45'de mod-II/III açısı 60^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.46'da K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.47'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.48'te mod-II/III açısı 60^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.49'da K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.50'de ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.51 mod-II/III açısı 75^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını, Şekil 4.52'te K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.53'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.54'te mod-II/III açısı 75^o ve 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçlarını, Şekil 4.55, K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.56'da ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.57'te mod-II/III açısı 30^o ve farklı boyutlarda çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.58'te K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.59'da ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.60'da mod-II/III açısı 45^o ve farklı boyutlarda çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.61, K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.62'da ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.63'te mod-II/III açısı 60^o ve 25 mm civarı çatlak barındıran 27 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.64'da K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.65'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.66'da mod-II/III açısı 60^o ve 25 mm civarı çatlak barındıran 32 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.67'te K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.68'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.69'da mod-II/III açısı 60^{o}ve 25 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.70'da K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.71'te ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.72'da

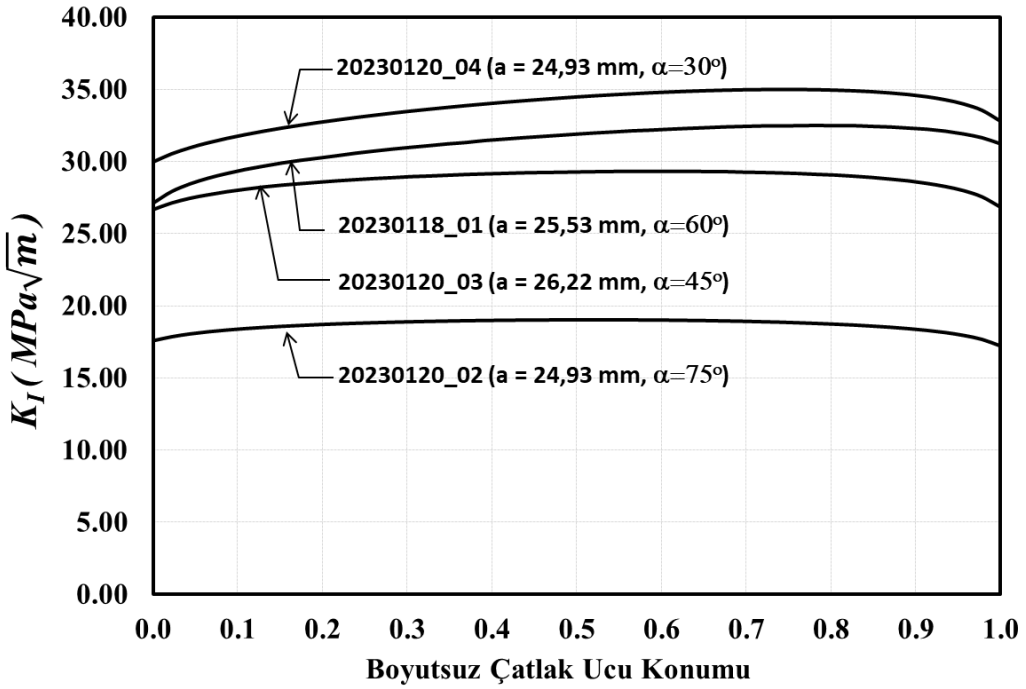
mod-II/III açısı 60^{o} ve 25 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için K_I gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.73'te K_{II} gerilme-şiddet faktörü sonuçları, Şekil 4.74'de ise K_{III} gerilme-şiddet faktörü sonuçları gösterilmektedir. Analizler, 11. nesil Intel i7-1165G7 işlemcili, 20 GB RAM içeren bilgisayarda çözdürülmüştür. Herbir mod-I/II/III analizinin çözümü yaklaşık olarak 52 saat sürmektedir. Tez kapsamında, Al 2024 T351 malzemesi için toplam 56 adet mod-I/II/II kırılma analizi gerçekleştirilmiştir. Tüm gerilme-şiddet faktörü grafiklerinin x eksenleri boyutsuz çatlak ucu tanımına göre çizilmiştir. Şekil 4.31'de görüldüğü gibi çatlak ucu konumu ön kısmından başlayıp arka kısmında son bulan çatlak boyu boyutsuz hale getirilerek, çatlak ucu konumu koordinatı sınırları 0 ile 1 arasında boyutsuz eksenlerde verilmiştir.



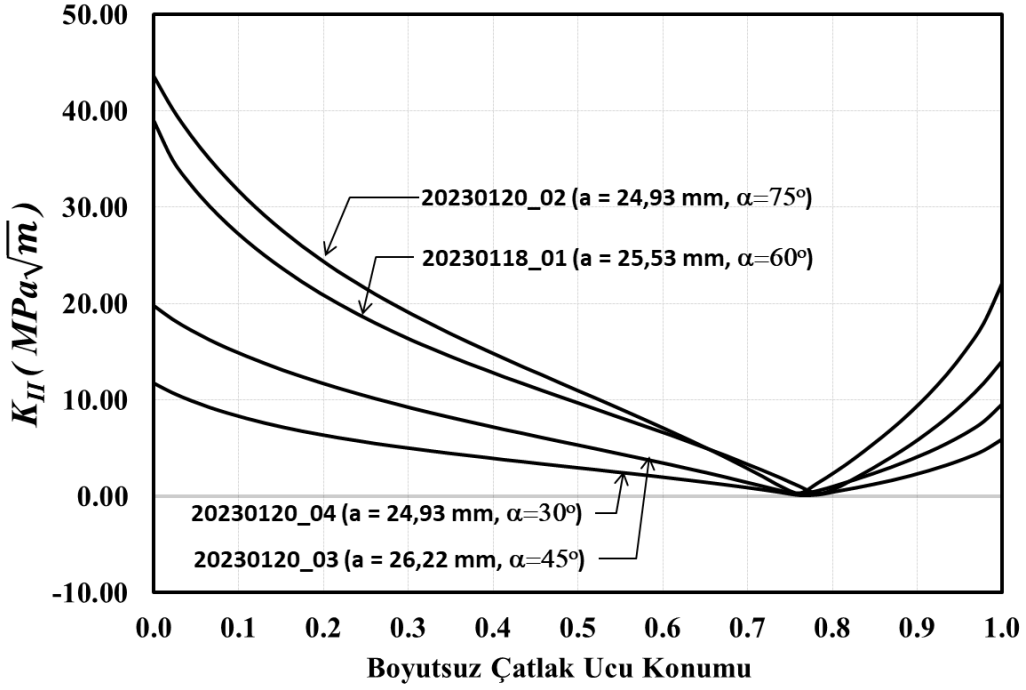
Şekil 4.31. Mod-I/II/III problemi sonlu elemanlar modeli ve CTST numunesinin yakın görüntüsü.



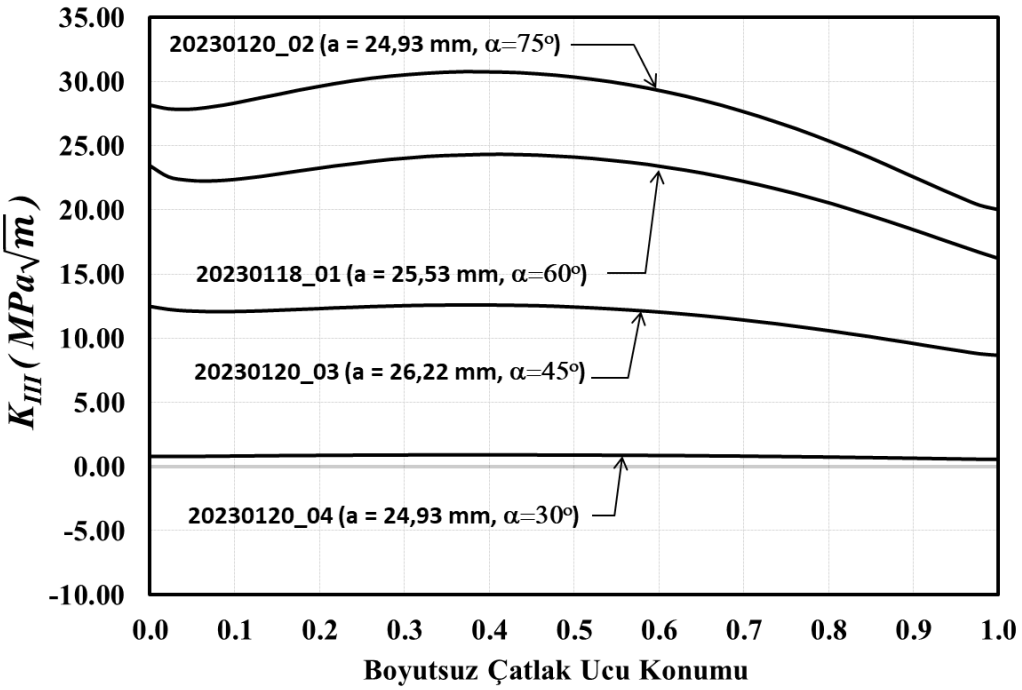
Şekil 4.32. Mod-I/II/III CTST mod=II/III = 45^{o} koşulu altında mod-I/III açısının değişiminin kırılma analiz sonucu Y ekseni yer değiştirme dağılımları (mm).



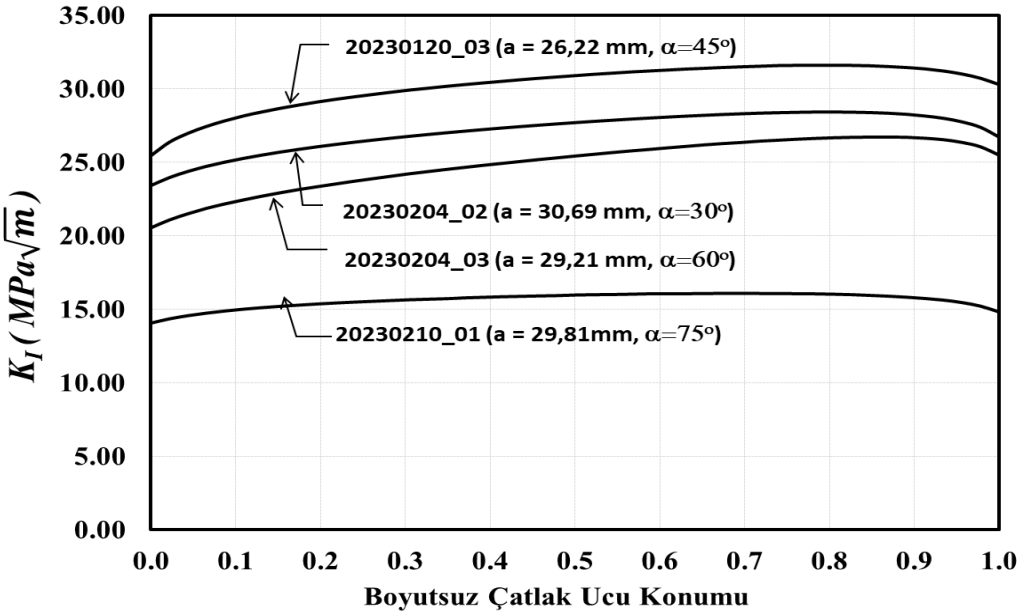
Şekil 4.33. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



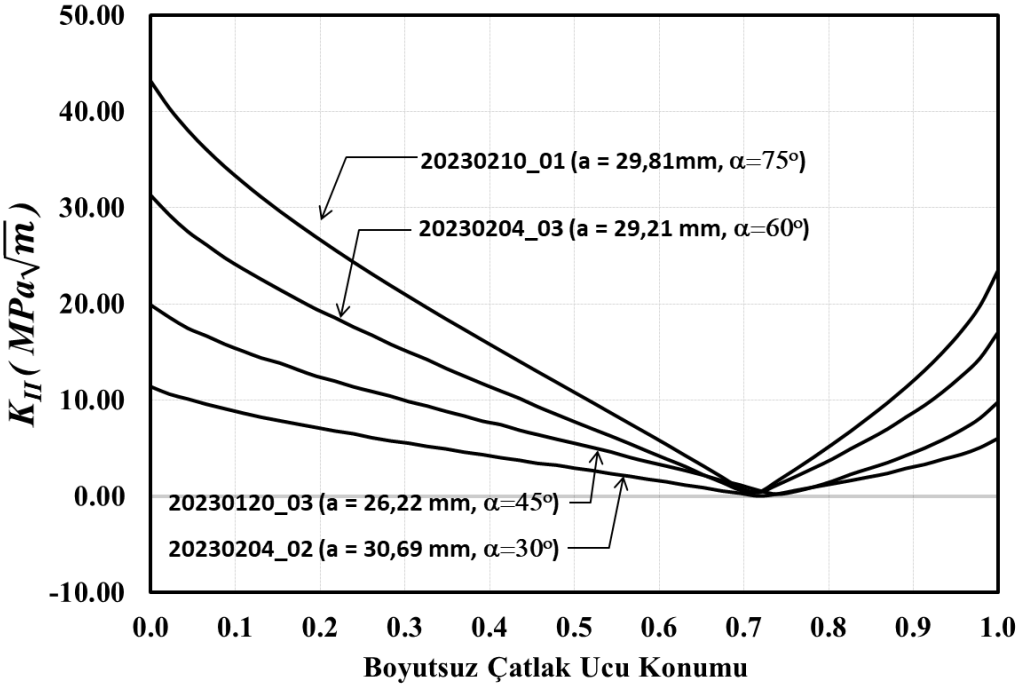
Şekil 4.34. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



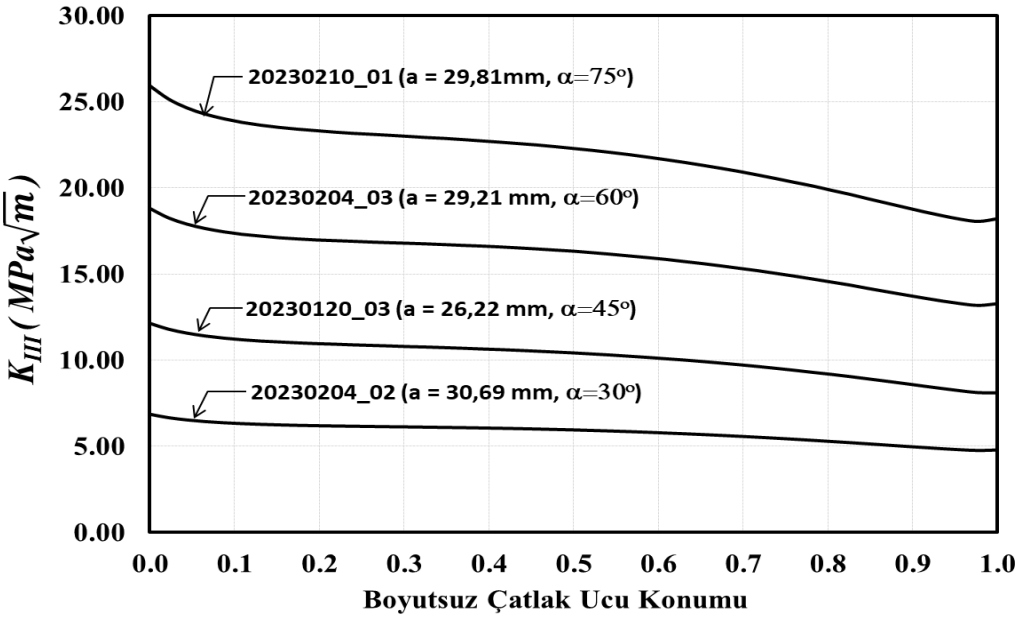
Şekil 4.35. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları..



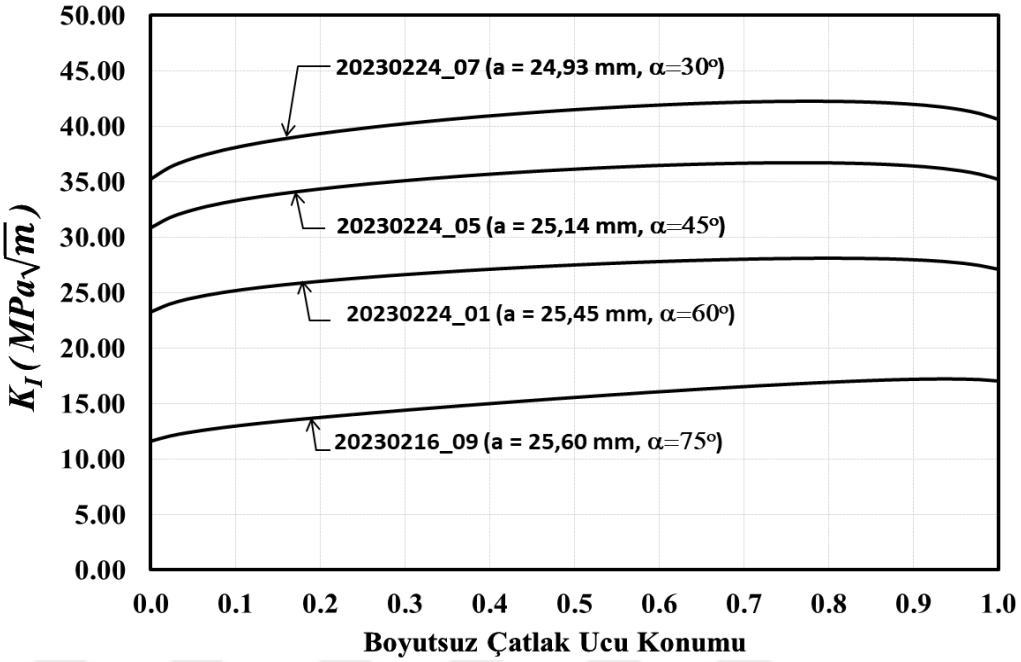
Şekil 4.36. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



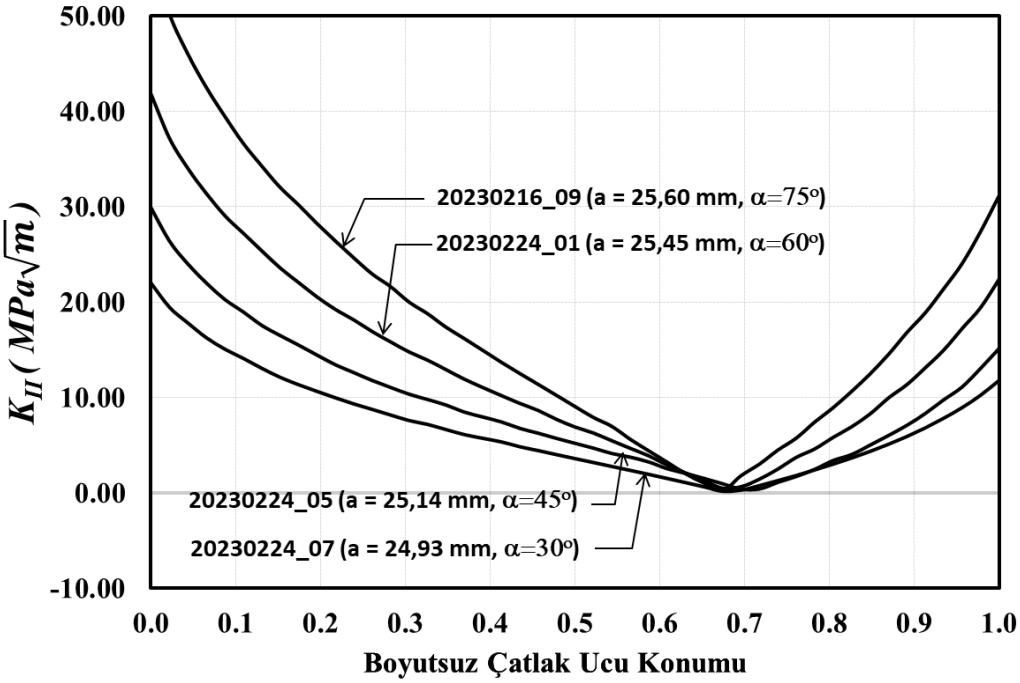
Şekil 4.37. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



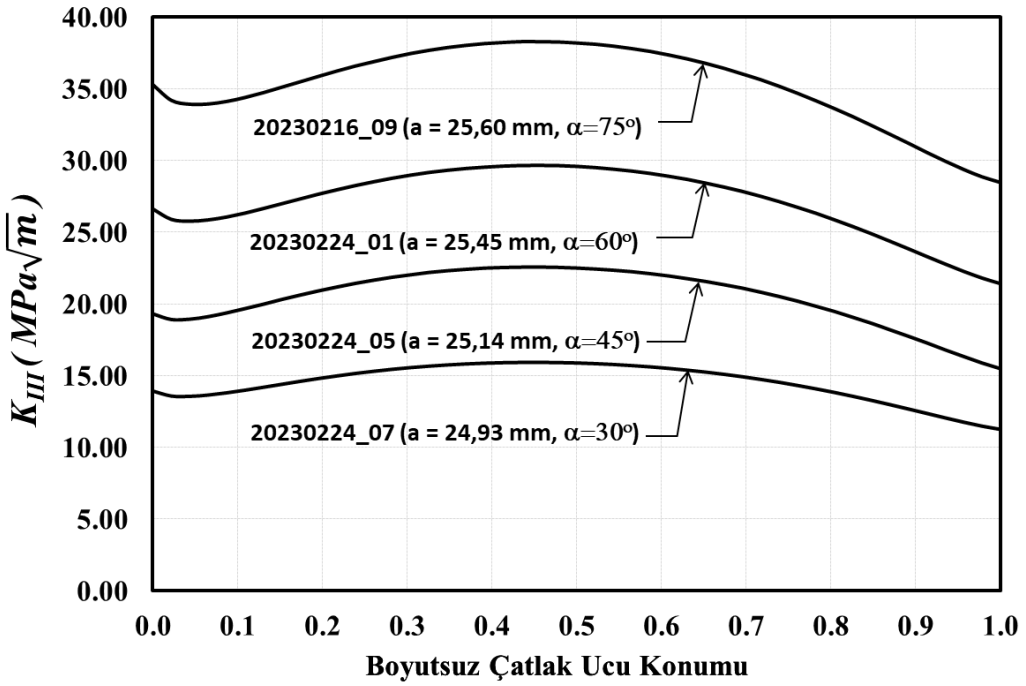
Şekil 4.38. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, kalınlıklı mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



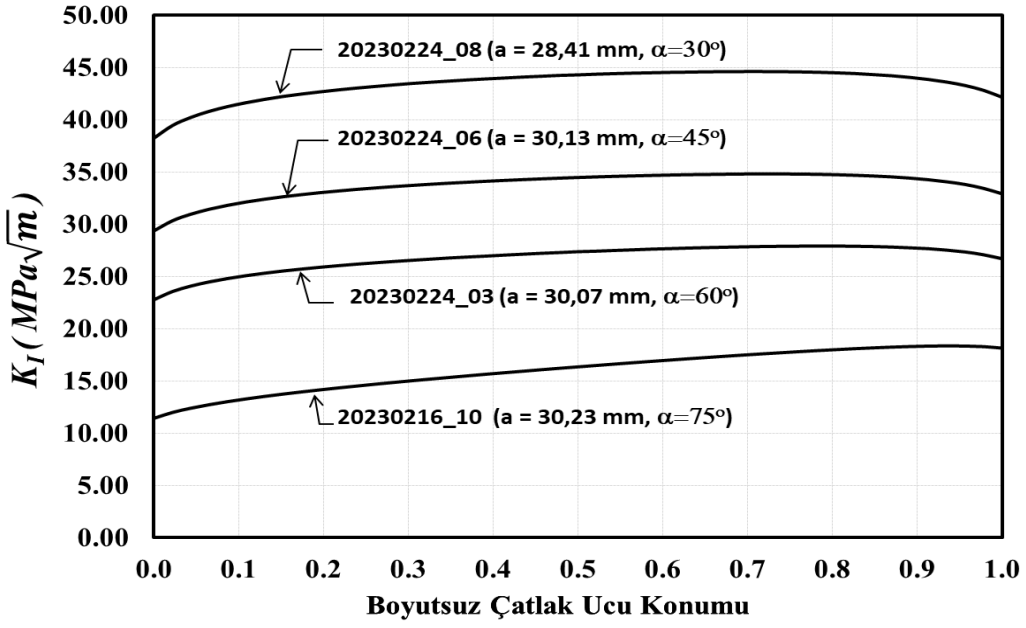
Şekil 4.39. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



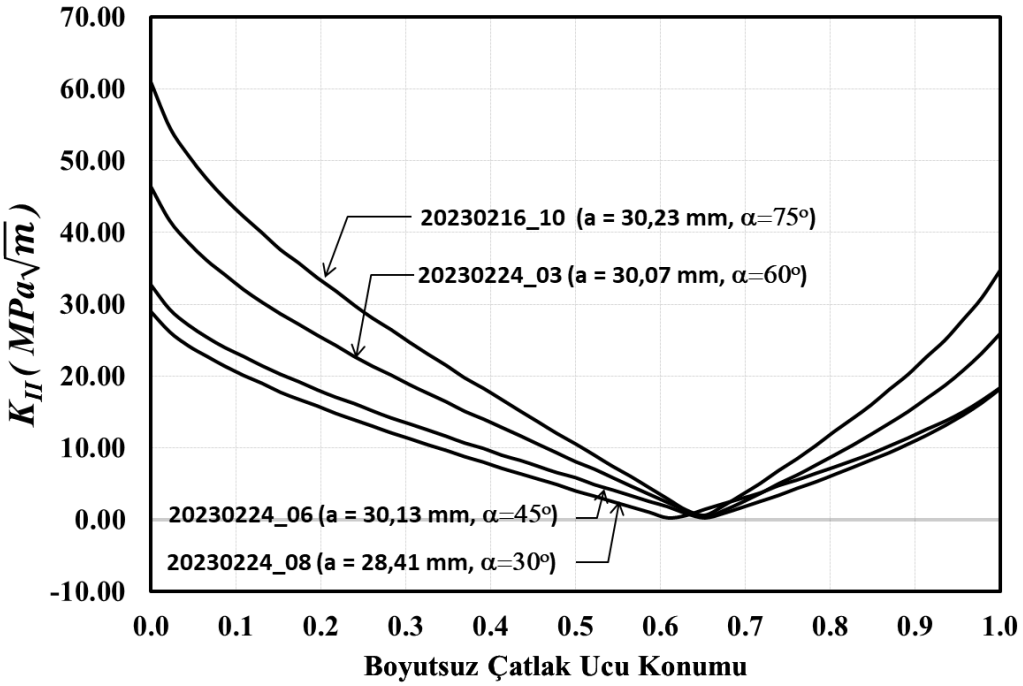
Şekil 3.40. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



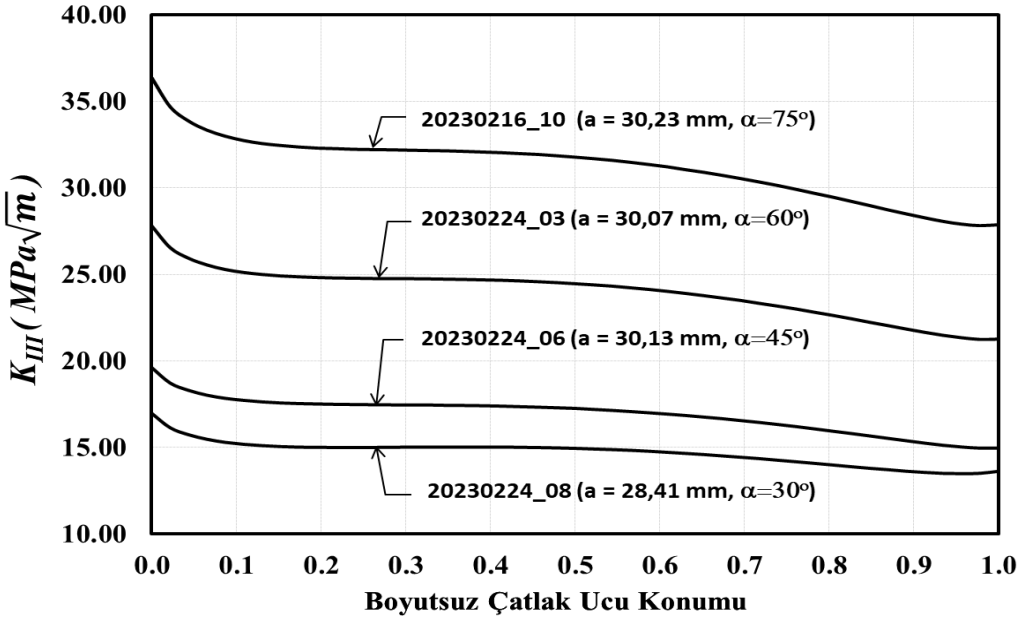
Şekil 4.41. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



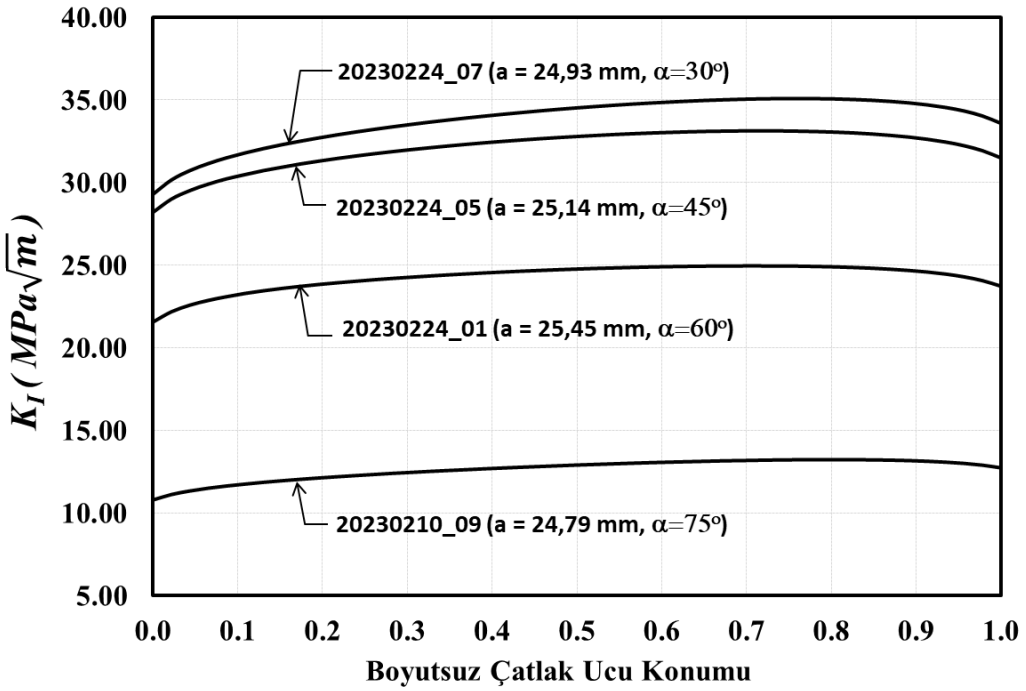
Şekil 4.42. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



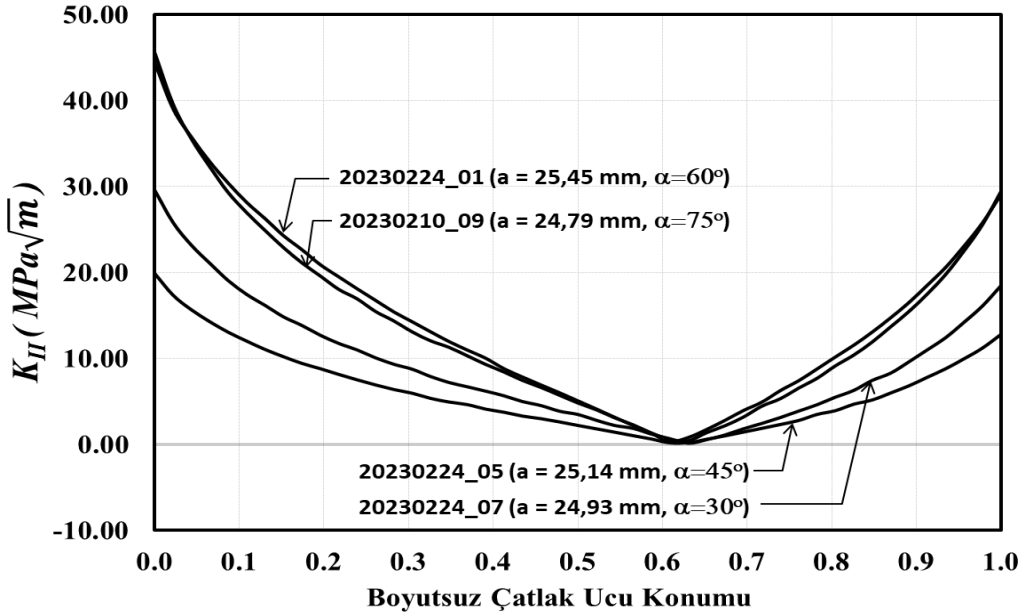
Şekil 4.43. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



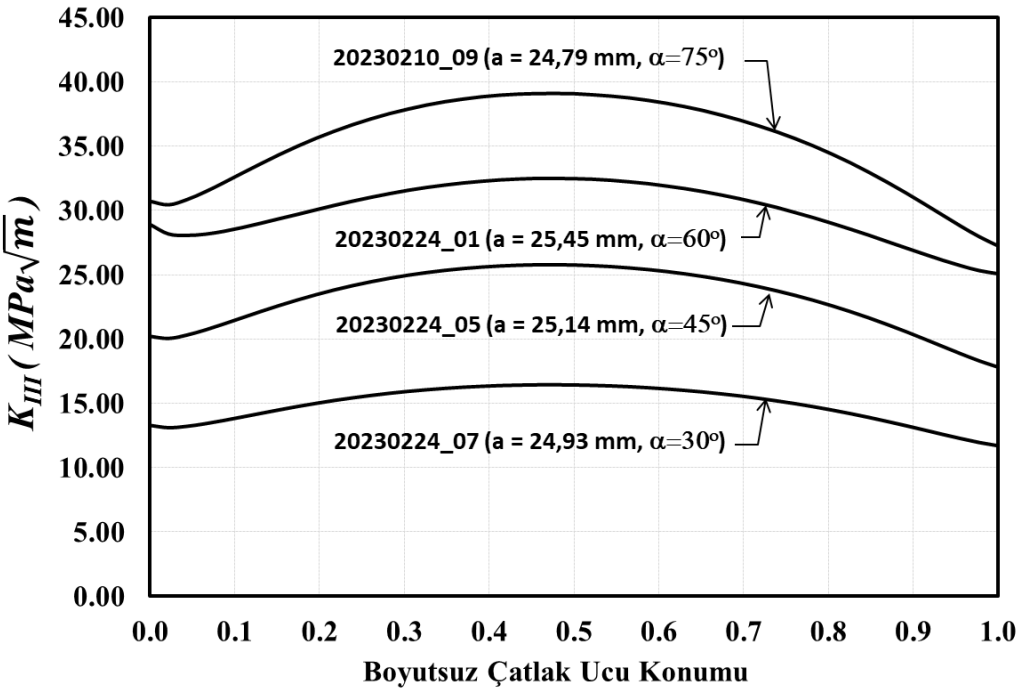
Şekil 4.44. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



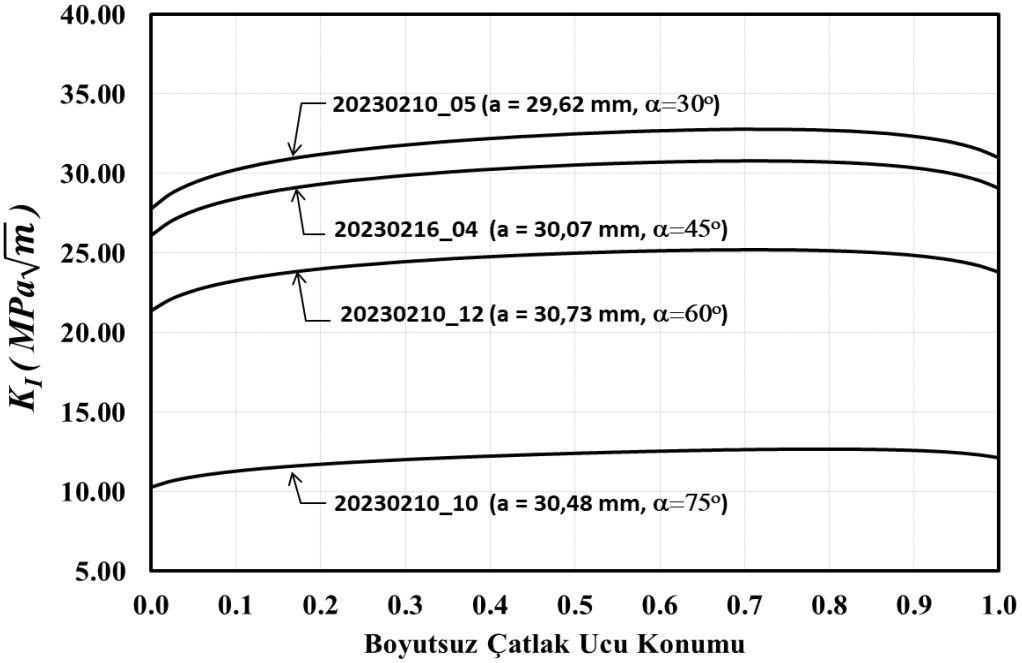
Şekil 4.45. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, kalınlıklı mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



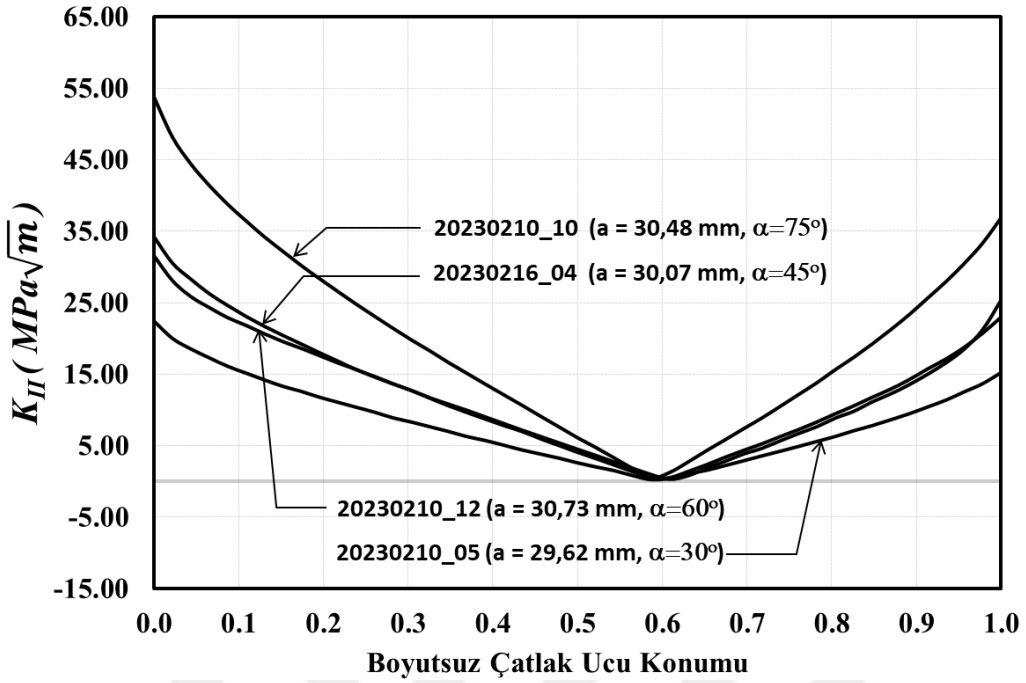
Şekil 4.46. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, kalınlıklı mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



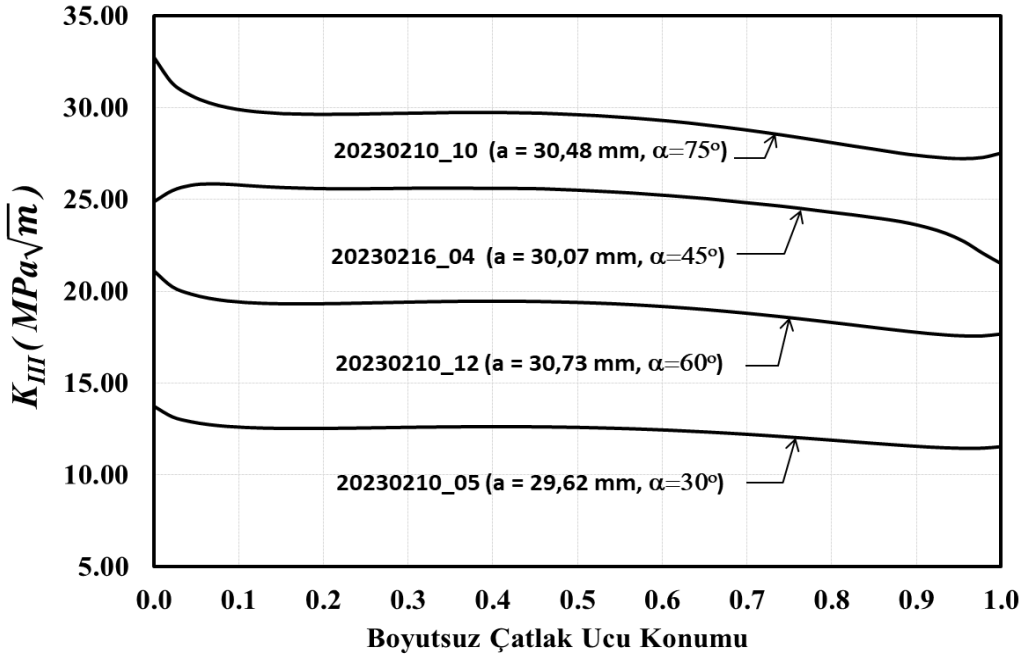
Şekil 4.47. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



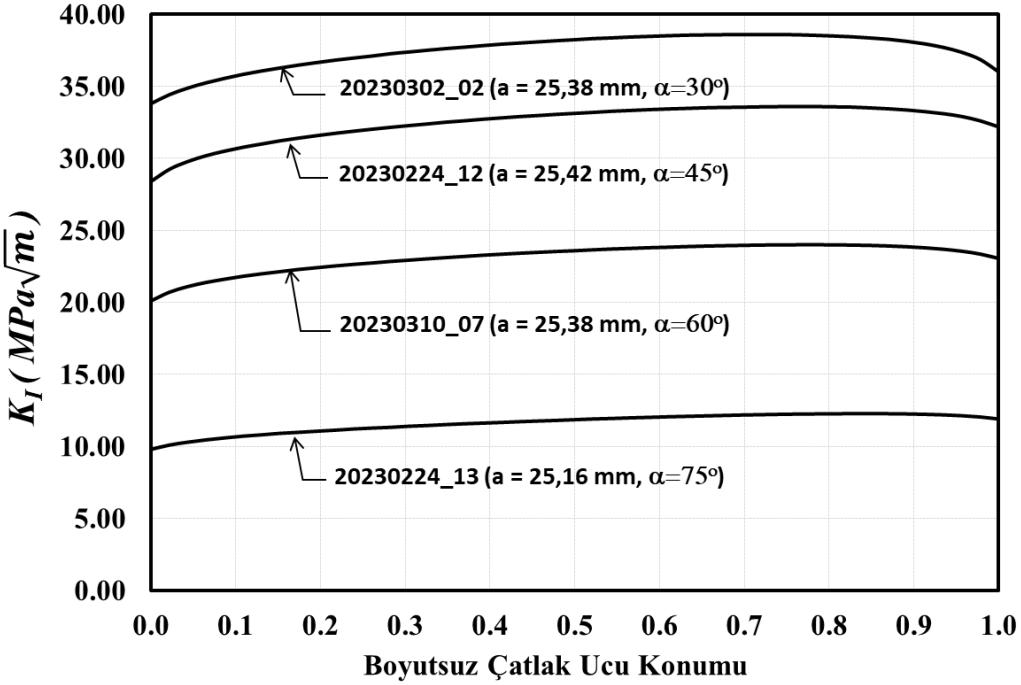
Şekil 4.48. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



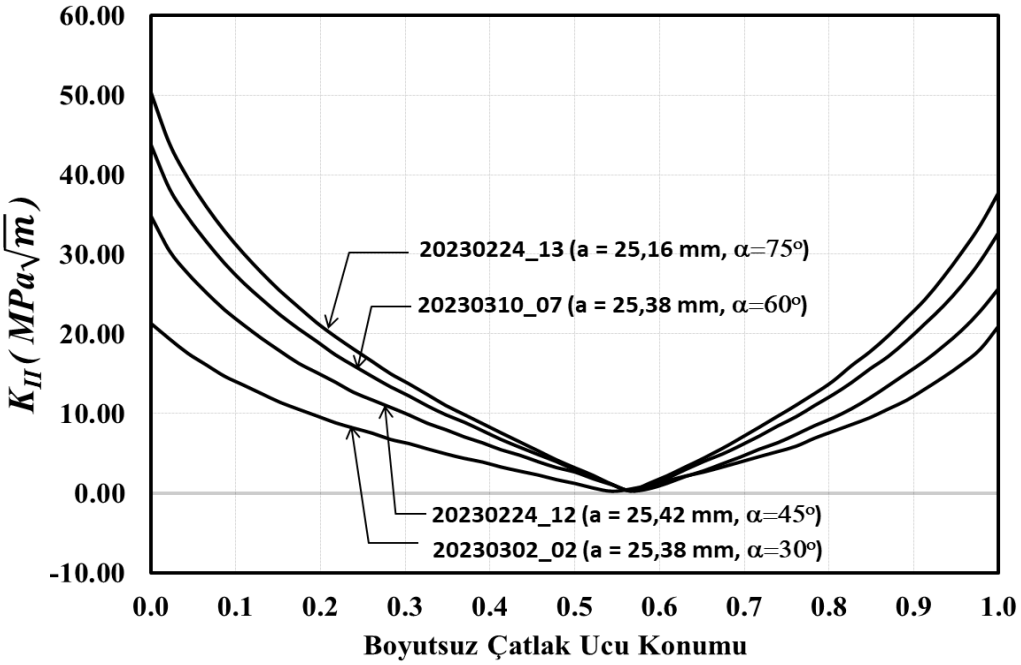
Şekil 4.49. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



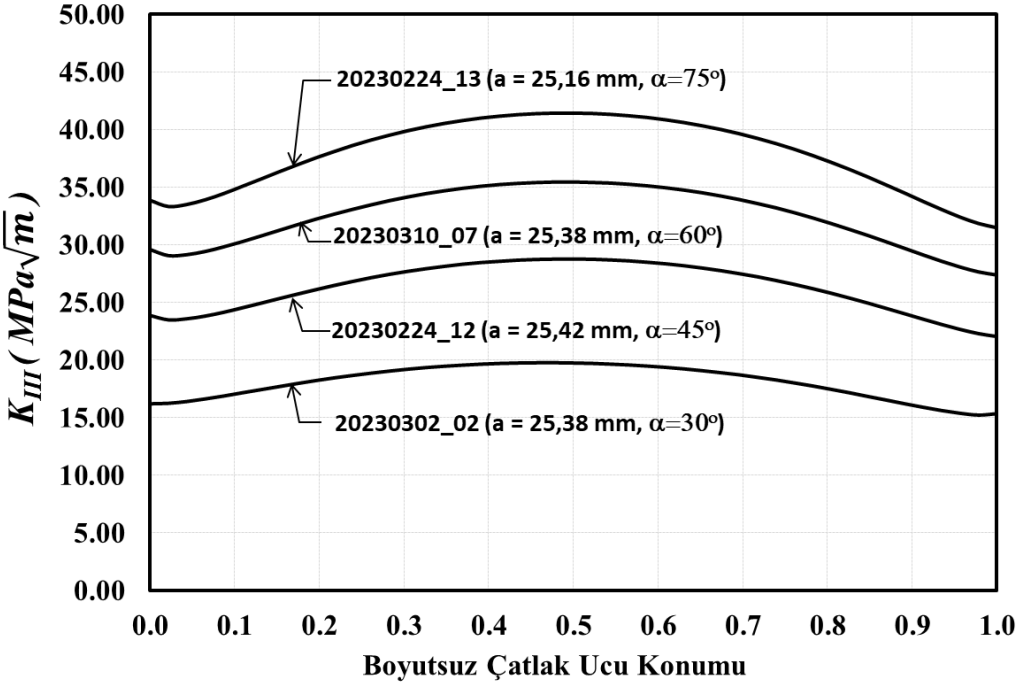
Şekil 4.50. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



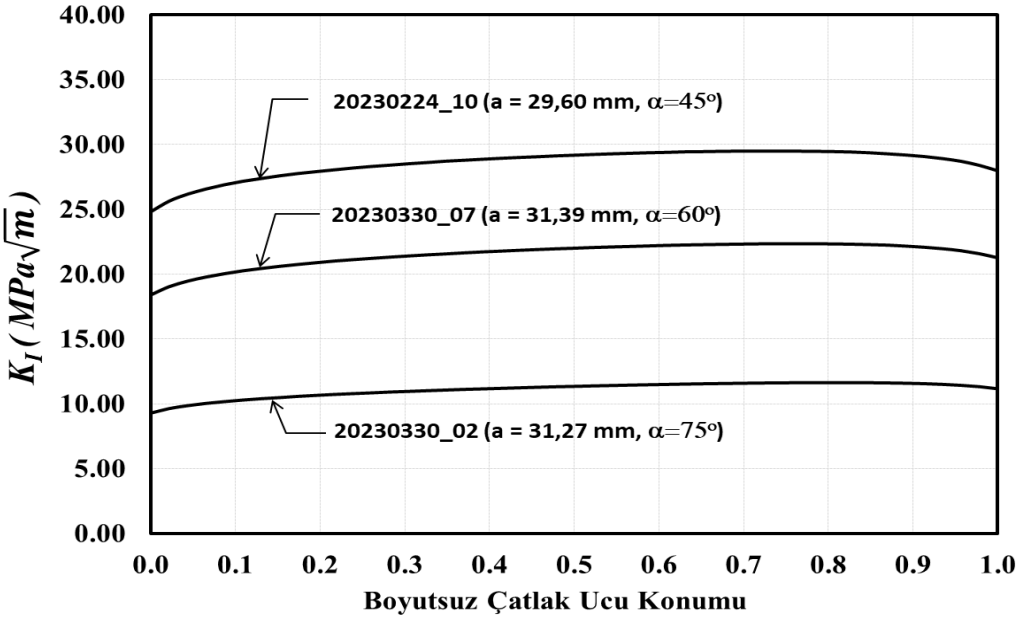
Şekil 4.51. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



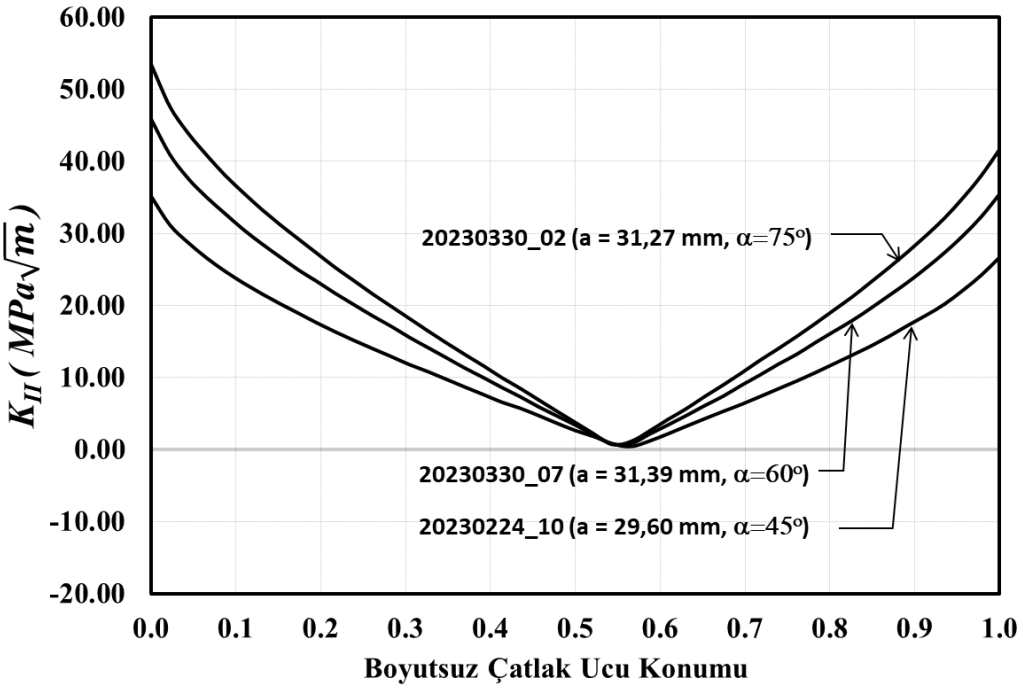
Şekil 4.52. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



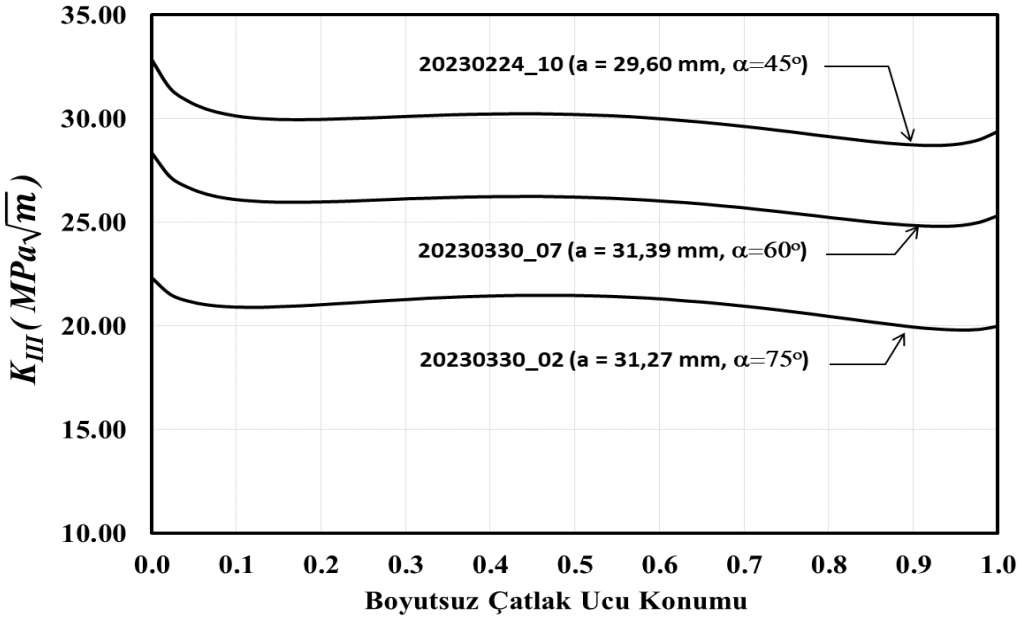
Şekil 4.53. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



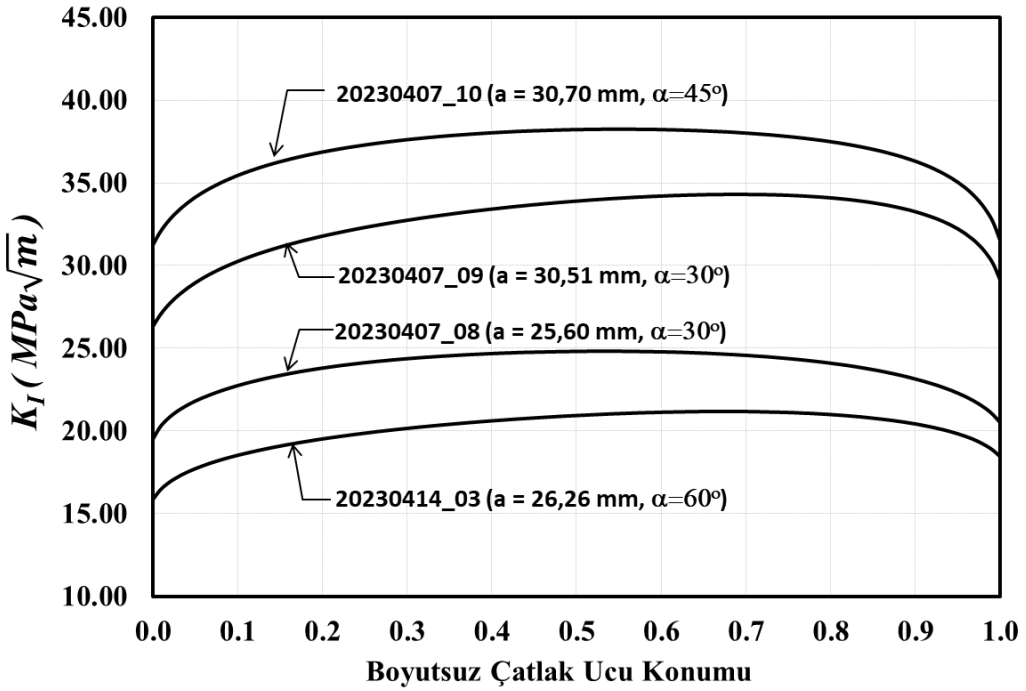
Şekil 4.54. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



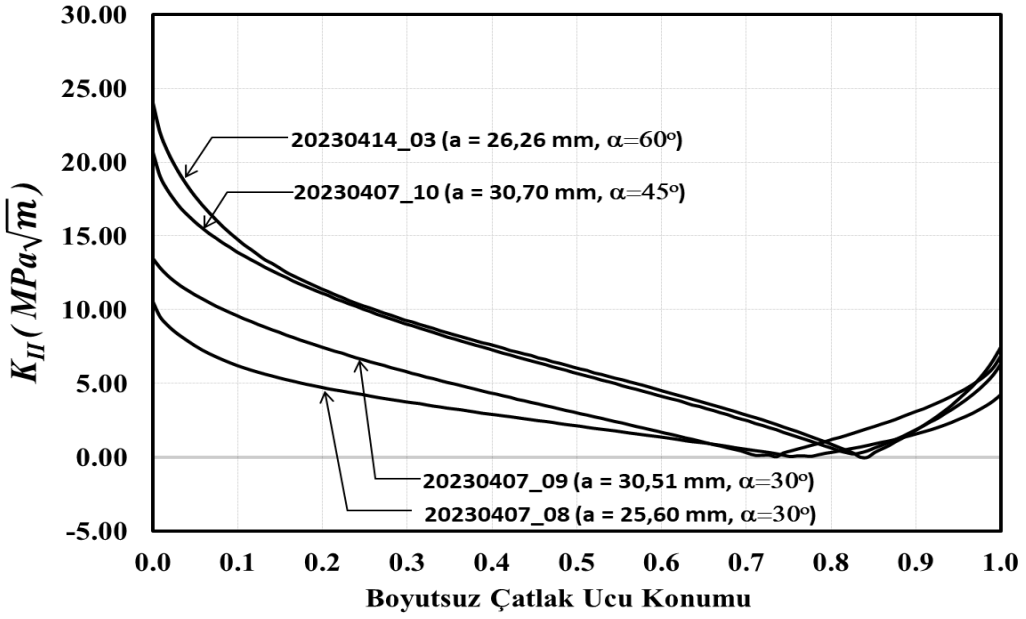
Şekil 4.55. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



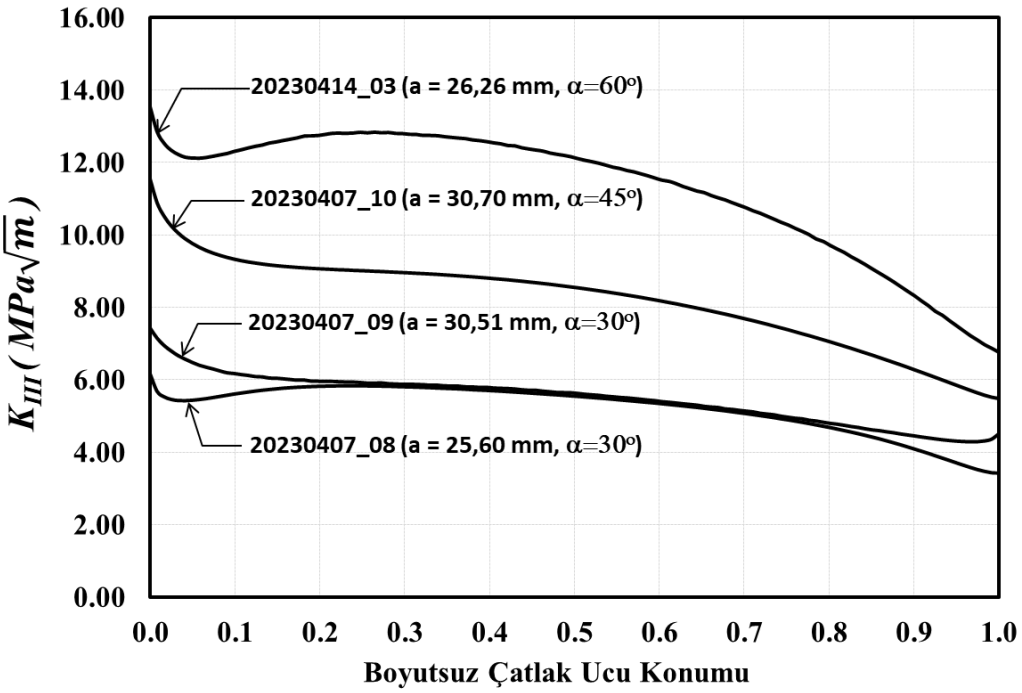
Şekil 4.56. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



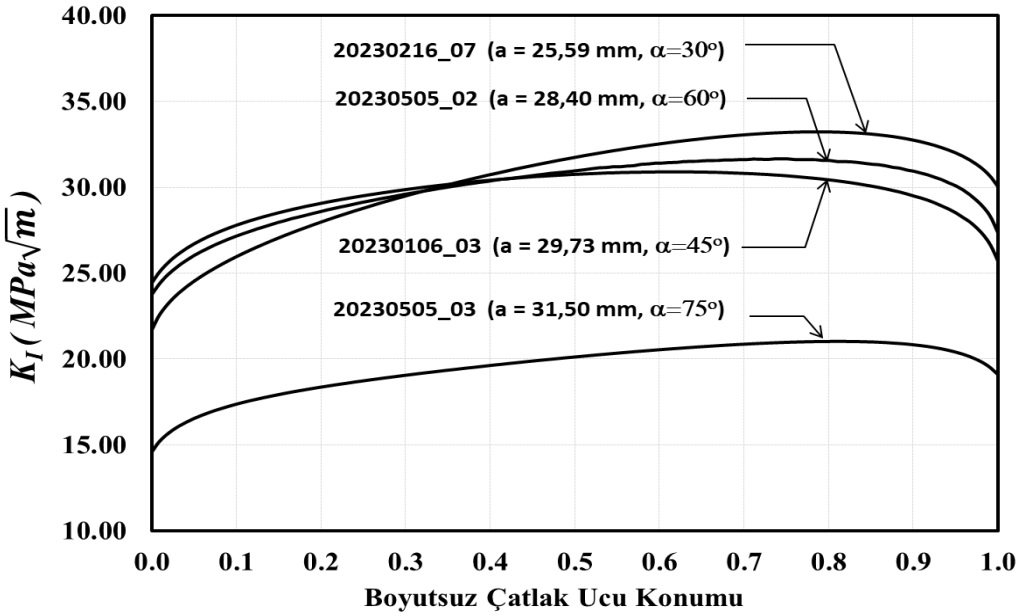
Şekil 4.57. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



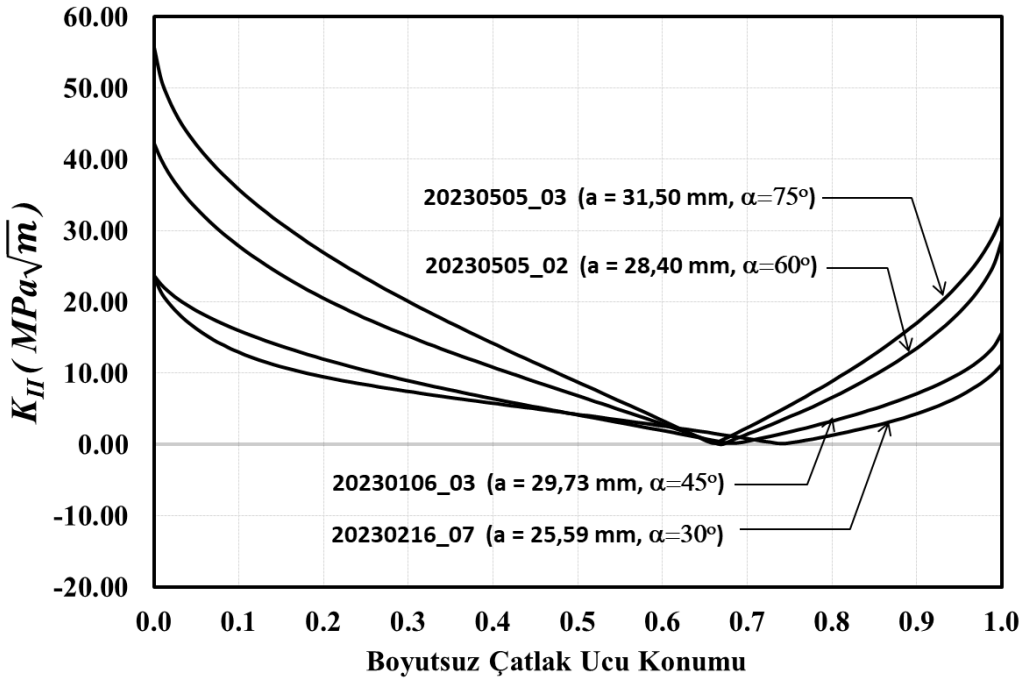
Şekil 4.58. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



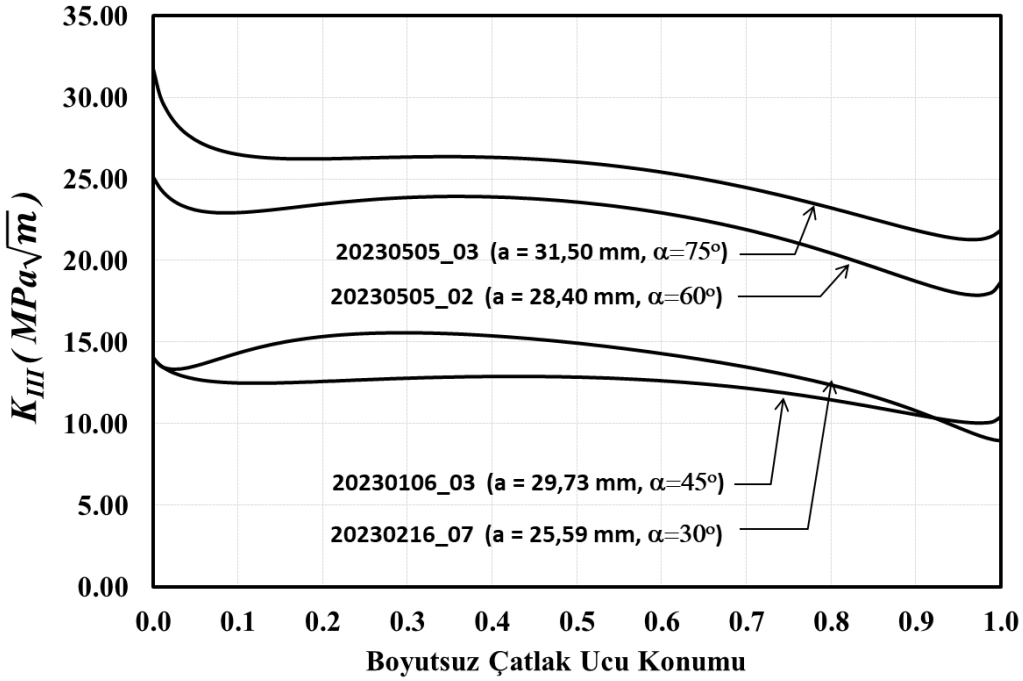
Şekil 4.59. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



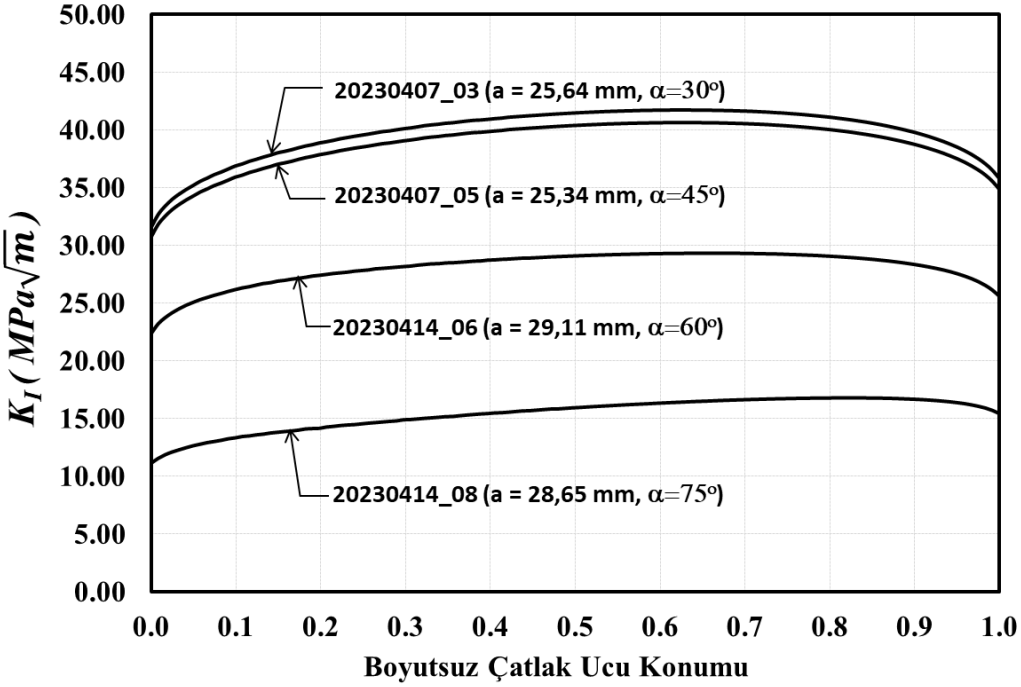
Şekil 4.60. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



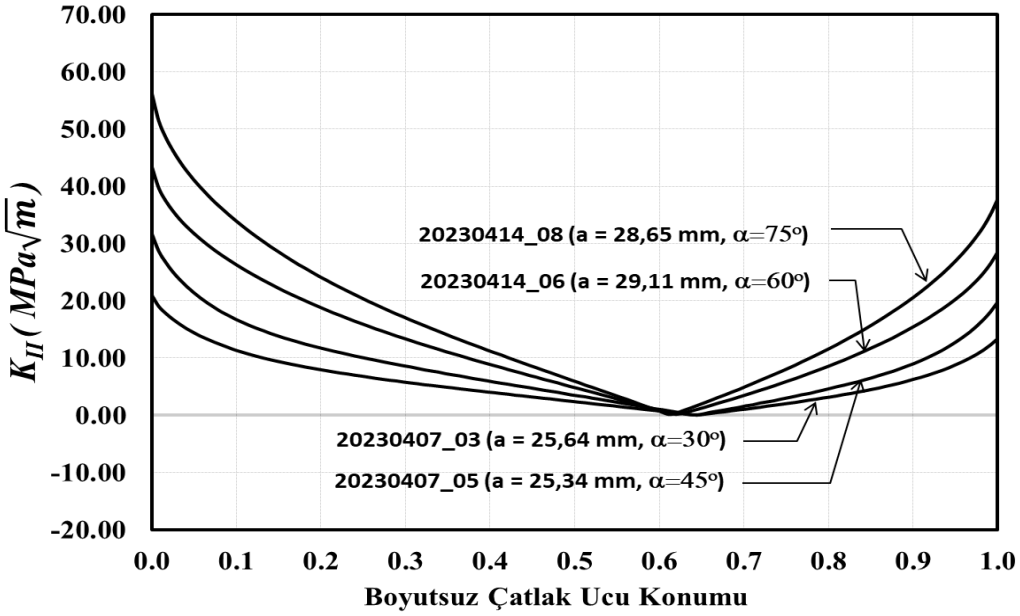
Şekil 4.61. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



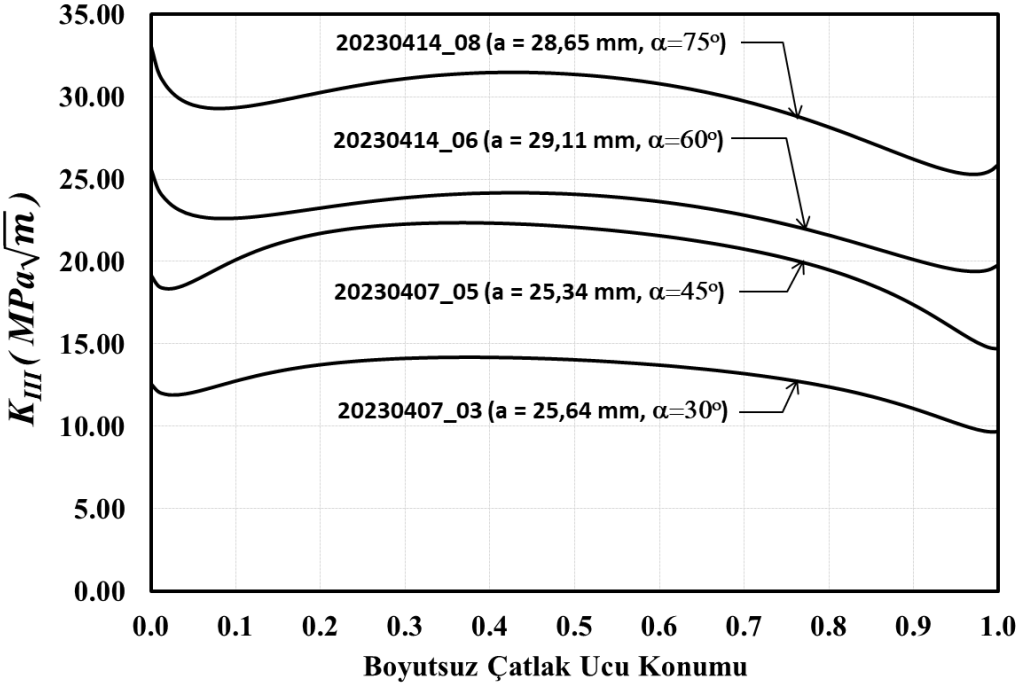
Şekil 4.62. Farklı boyutlarda çatlak içeren kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



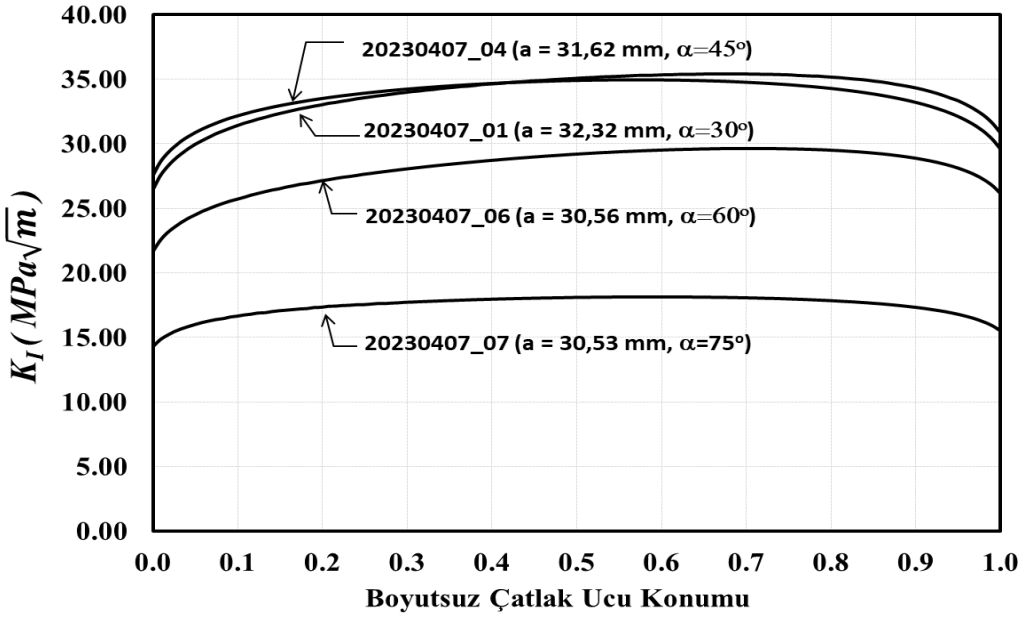
Şekil 4.63. Çatlak uzunluğu yaklaşık 27 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



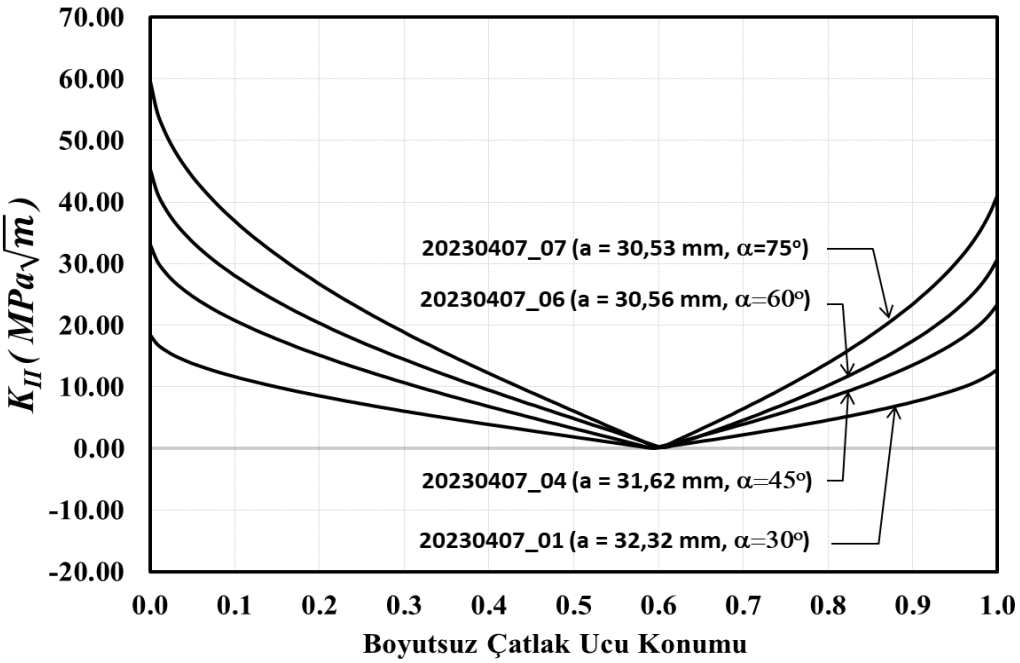
Şekil 4.64. Çatlak uzunluğu yaklaşık 27 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



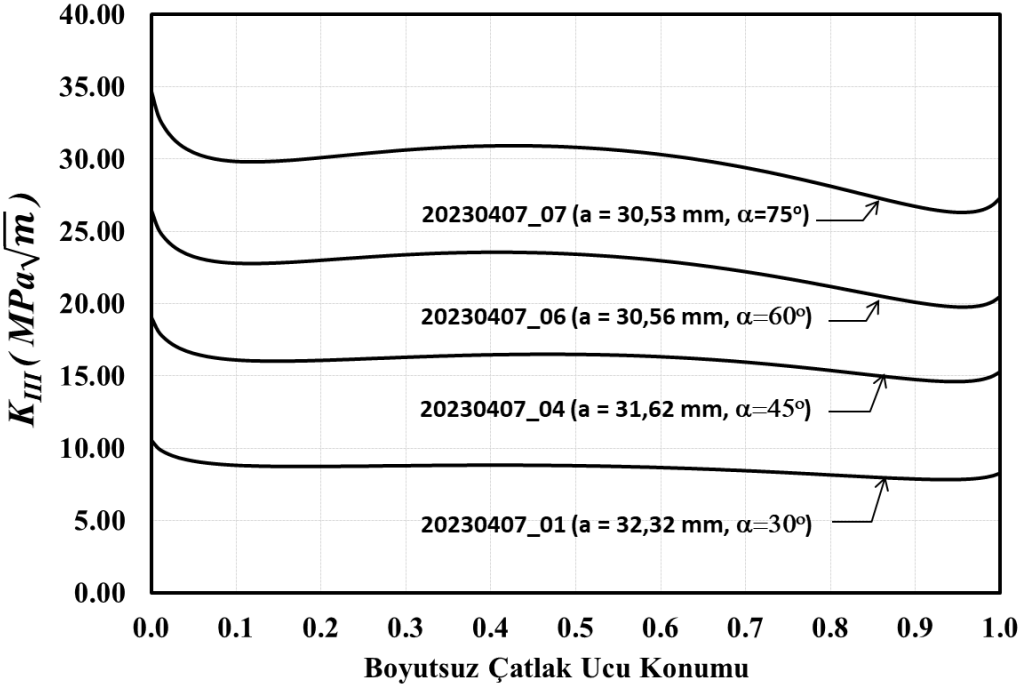
Şekil 4.65. Çatlak uzunluğu yaklaşık 27 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



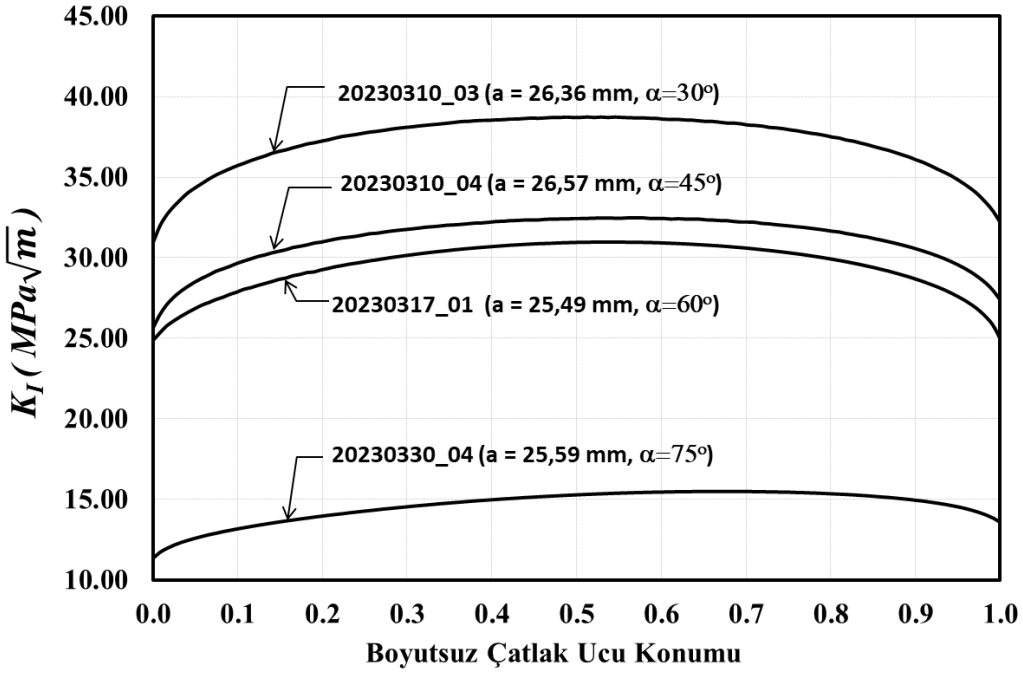
Şekil 4.66. Çatlak uzunluğu yaklaşık 32 mm, kalınlığı 25 mm, kalınlıklı mod-II/III açısı 60^o olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



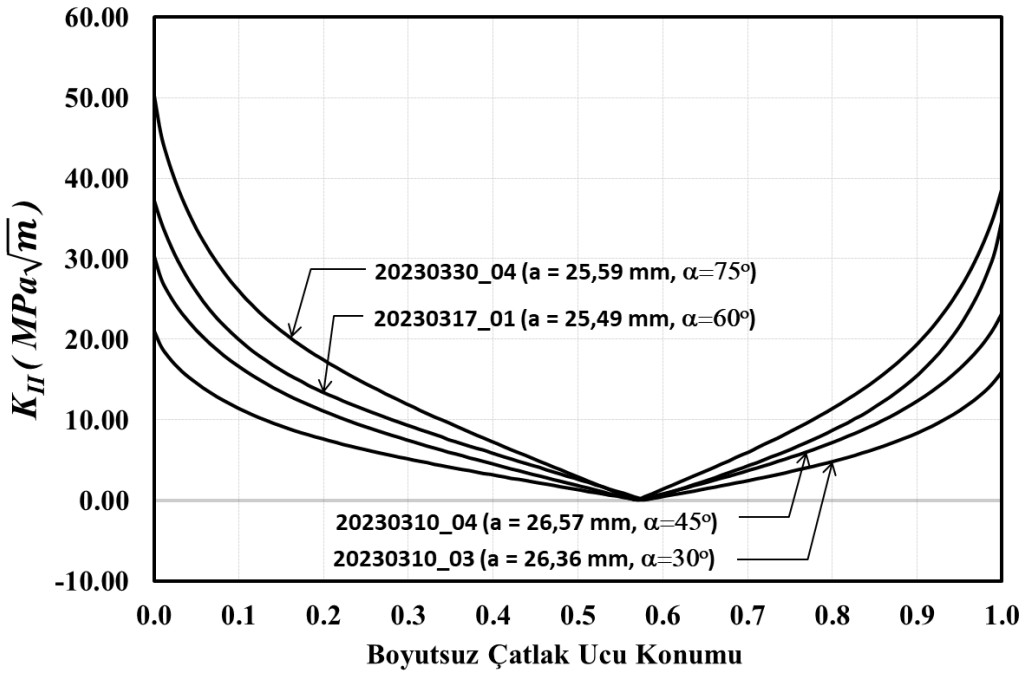
Şekil 4.67. Çatlak uzunluğu yaklaşık 32 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



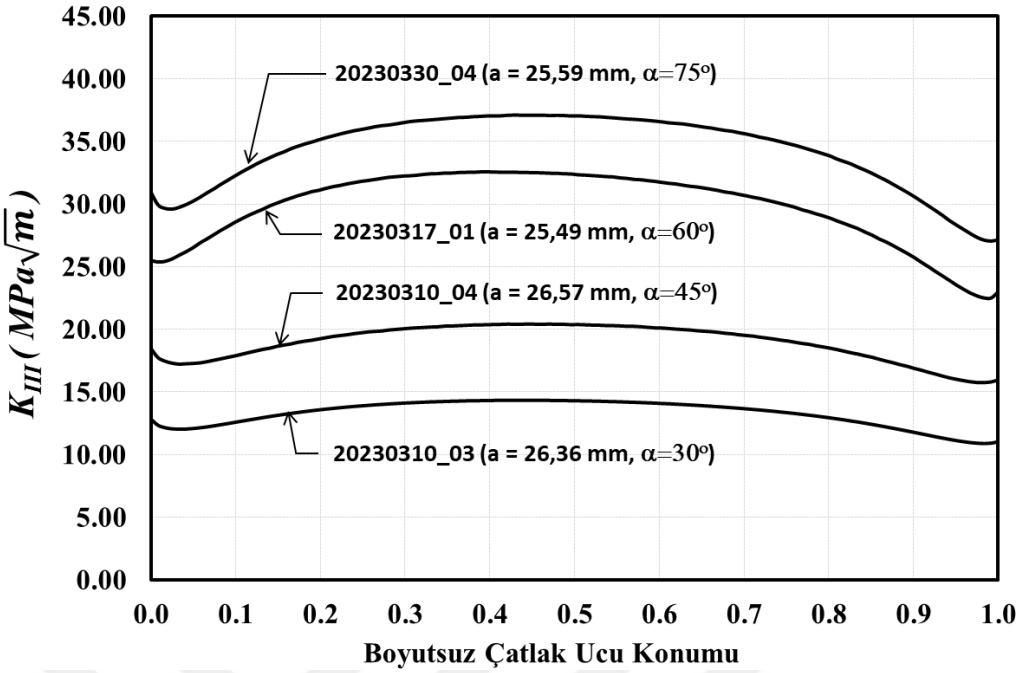
Şekil 4.68. Çatlak uzunluğu yaklaşık 32 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



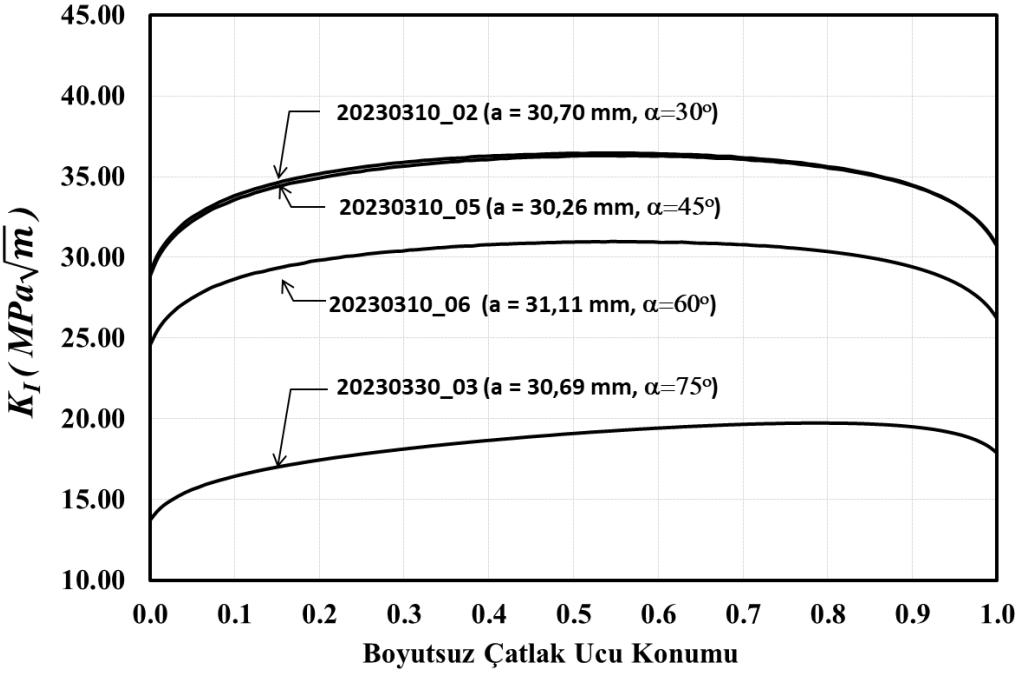
Şekil 4.69. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



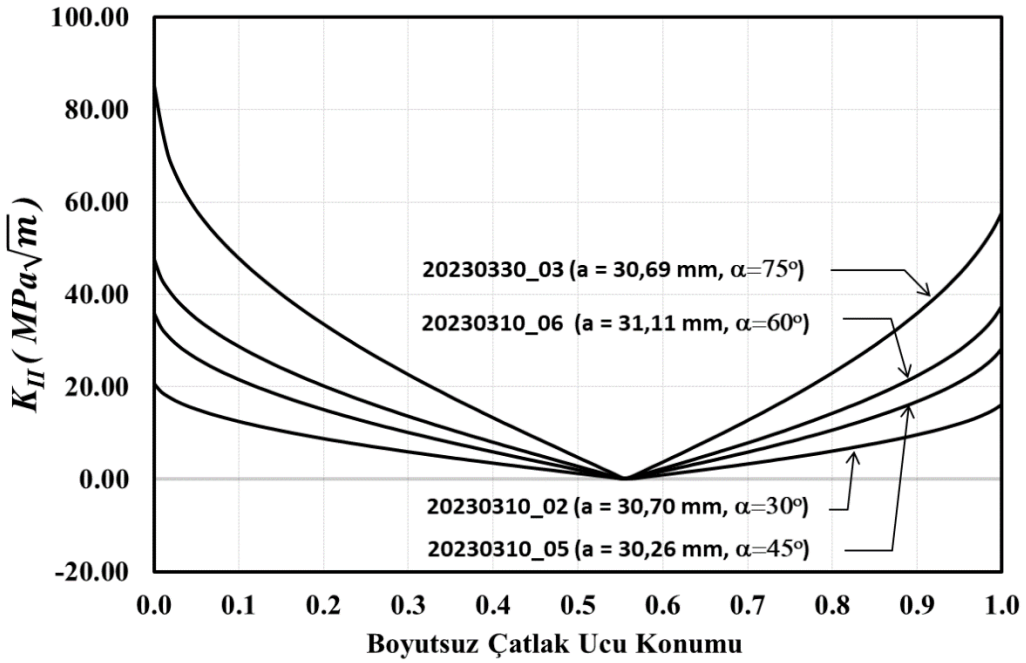
Şekil 4.70. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



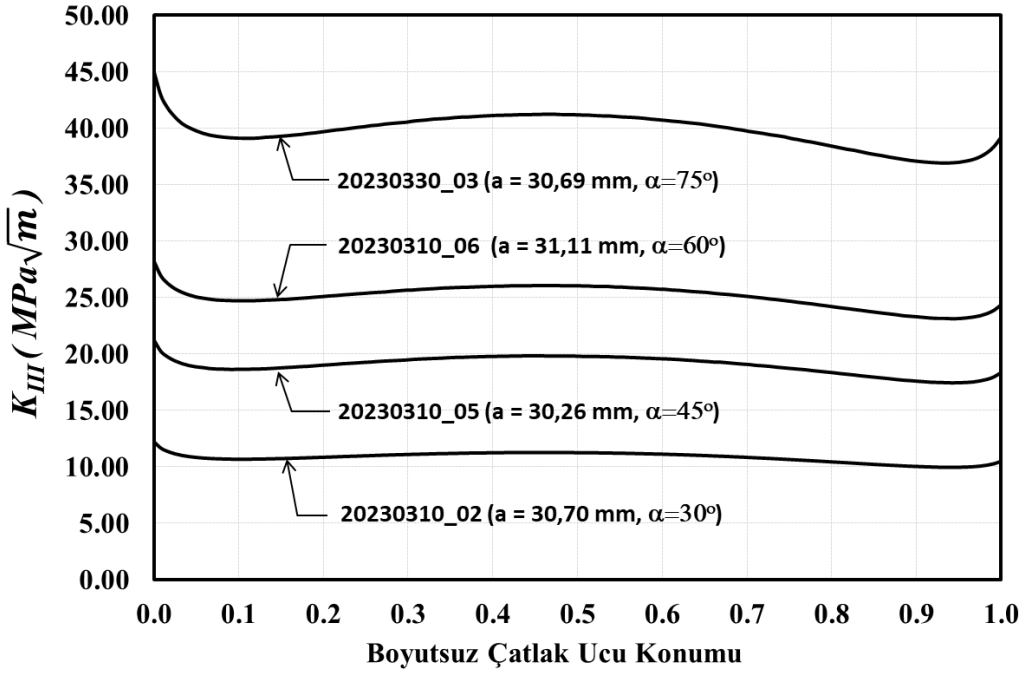
Şekil 4.71. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



Şekil 4.72. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



Şekil 4.73. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II gerilme-şiddet faktörü dağılımları.



Şekil 4.74. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III gerilme-şiddet faktörü dağılımları.

Hesaplanan mod-I (açılma modu), mod-II (kayma modu) ve mod-II (yırtılma modu) gerilme-şiddet faktörü değerlerinin kırılma yükü hesaplamalarında kullanılabilmesi

için K_I, K_{II} ve K_{III} gerilme şiddet faktörü değerleri kullanılarak hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu doğrultuda mod-I/III problemlerinde de olduğu gibi Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile hesaplama yapılmıştır. Tüm mod-I/II/III problemleri için en yüksek değer kenar düğüm noktasındadır (Boyutsuz çatlak ucu konumu=0). Tablo 4.4 mod-I/III problemleri için elde edilen en yüksek gerilme-şiddet faktörü değerlerini vermektedir. Özellikle 10mm ve 5 mm kalınlıklı numuneler için hesaplanan gerilme-şiddet faktörü değerleri malzemenin 37 MPa.$\sqrt{m}$ kırılma tokluğu değerinden oldukça uzaktır. Dolayısıyla, Al-2024 malzemesi için LEKM yöntemleri ile tahmin edilen kırılma yükleride, test yüklerinden farklı olacaktır.

Tablo 4.4. Mod-I/II/III kırılma analizleri sonucu elde edilen Richard ve Demir-Ayhan kriterlerine göre en yüksek Keş değerleri.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Mod-II/III Yükleme Açısı	Mod-I/III Yükleme Açısı	K_I (Mpa.$\sqrt{m}$)	K_{II} (Mpa.$\sqrt{m}$)	K_{III} (Mpa.$\sqrt{m}$)	$K_{eş}$ (Richard) (Mpa.$\sqrt{m}$)	$K_{eş}$ (Demir Ayhan) (Mpa.$\sqrt{m}$)
20230106_01	25	45º	45º	25.01	22.45	13.59	44.40	30.63
20230106_03	25	45º	45º	28.49	22.63	13.90	47.15	34.15
20230118_01	10	30º	60º	27.11	38.93	23.43	66.14	38.02
20230120_02	10	30º	75º	17.86	40.21	27.87	63.93	31.96
20230120_03	10	30º	45º	27.1263	18.37	12.25	41.61	31.92
20230120_04	10	30º	30º	32.7977	5.91	0.55	34.17	36.72
20230120_05	10	30º	30º	23.97	10.63	6.66	30.42	27.22
20230204_02	10	30º	45º	30.72	18.61	11.80	44.35	35.64
20230204_03	10	30º	60º	21.09	29.27	18.27	50.47	29.30
20230210_01	10	30º	75º	14.57	38.06	24.65	58.32	28.20
20230210_05	10	60º	30º	27.78	22.46	13.75	46.42	33.39
20230210_06	10	60º	30º	29.30	19.88	13.29	45.01	34.47
20230210_09	10	60º	75º	10.80	45.55	30.71	66.68	N/A
20230210_10	10	60º	75º	10.28	53.81	32.74	75.73	N/A
20230210_12	10	60º	60º	24.17	28.12	25.49	55.17	33.06
20230216_01	10	60º	60º	21.57	44.45	28.91	70.80	36.27
20230216_03	10	60º	45º	28.21	29.56	20.22	56.29	36.10
20230216_04	10	60º	45º	26.10	34.26	21.11	59.86	35.48
20230216_07	25	45º	30º	21.68	23.56	14.07	43.40	27.73
20230216_09	10	45º	75º	11.61	56.29	35.28	80.16	N/A
20230216_10	10	45º	75º	11.43	60.85	36.36	85.22	N/A
20230224_01	10	45º	60º	41.80	26.62	35.28	72.21	51.24
20230224_03	10	45º	60º	22.77	46.30	27.81	72.85	37.55
20230224_05	10	45º	45º	30.85	29.88	19.31	57.95	38.54
20230224_06	10	45º	45º	29.37	32.67	19.62	59.76	37.82

Tablo 4.4. (Devamı) Mod-I/II/III kırılma analizleri sonucu elde edilen Richard ve Demir-Ayhan kriterlerine göre en yüksek Keş değerleri.

20230224_07	10	45º	30º	35.24	21.99	13.93	51.58	40.99
20230224_08	10	45º	30º	38.24	28.94	16.97	61.28	45.43
20230224_10	10	75º	45º	24.82	35.15	22.32	60.47	34.82
20230224_12	10	75º	45º	28.39	34.81	23.87	63.15	38.11
20230224_13	10	75º	75º	9.80	50.30	33.86	72.46	N/A
20230310_01	10	75º	30º	32.47	7.34	7.23	35.94	36.42
20230310_02	25	75º	30º	29.03	20.76	12.22	45.14	34.22
20230310_03	25	75º	30º	30.92	21.11	12.83	47.10	36.28
20230310_04	25	75º	45º	25.63	30.41	18.47	54.60	33.66
20230310_05	25	75º	45º	28.83	35.98	21.23	63.36	38.38
20230310_06	25	75º	60º	24.55	47.73	28.22	75.54	39.45
20230310_07	10	75º	60º	20.10	43.75	29.58	69.58	35.10
20230317_01	25	75º	60º	24.98	34.84	22.99	60.58	34.99
20230330_02	10	75º	75º	9.29	53.47	32.83	74.89	N/A
20230330_03	25	75º	75º	13.71	76.83	45.02	106.82	N/A
20230330_04	25	75º	75º	11.34	50.40	30.96	71.99	N/A
20230330_07	10	75º	60º	18.40	45.87	28.34	70.11	34.30
20230407_01	25	60º	30º	26.45	18.48	10.56	40.51	31.07
20230407_03	25	60º	30º	31.54	21.01	12.59	47.38	36.89
20230407_04	25	60º	45º	27.55	33.21	19.08	58.87	36.20
20230407_05	25	60º	45º	30.71	31.76	19.18	59.59	38.81
20230407_06	25	60º	60º	21.65	45.46	26.48	70.75	36.18
20230407_07	25	60º	75º	14.28	59.76	34.73	84.91	#SAYI!
20230407_08	25	30º	30º	24.81	2.16	5.55	26.23	27.78
20230407_09	25	30º	30º	33.92	2.95	5.62	35.15	37.97
20230407_10	25	30º	45º	31.53	20.65	11.54	46.64	36.74
20230414_03	25	30º	60º	15.86	23.99	13.53	39.83	22.56
20230414_06	25	60º	60º	22.35	43.49	25.61	68.78	35.91
20230414_08	25	60º	75º	11.13	56.31	33.11	78.91	N/A
20230505_02	25	45º	60º	24.33	40.00	24.43	65.93	36.18
20230505_03	25	45º	75º	14.58	55.78	31.79	79.66	35.18

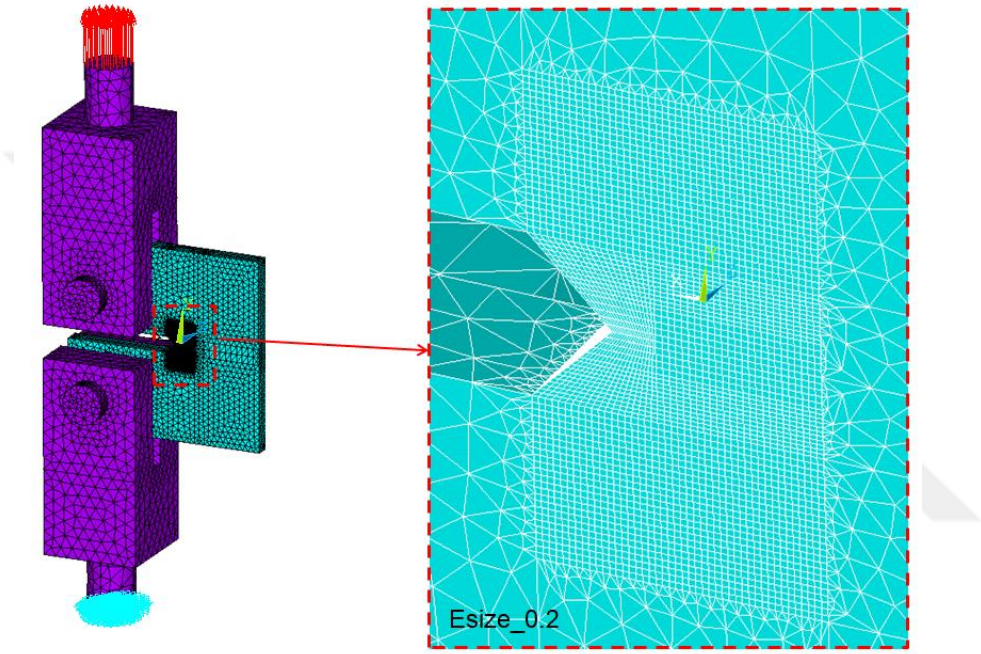
5. AFPER/ARUER YÖNTEMİ İLE EPKM ANALİZLERİ

Bu bölümde, elastik-plastik malzeme özelliği taşıyan Al-2024-T351 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen mod-I, ve karışık mod yükleme durumları olan mod-I/III ve mod-I/II/III kırılma tokluğu deneylerinden elde edilen kopma yüklerinin tahminine yönelik olarak önerilen AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan AFPER ve ARUER değerlerinin detayları paylaşılacaktır.

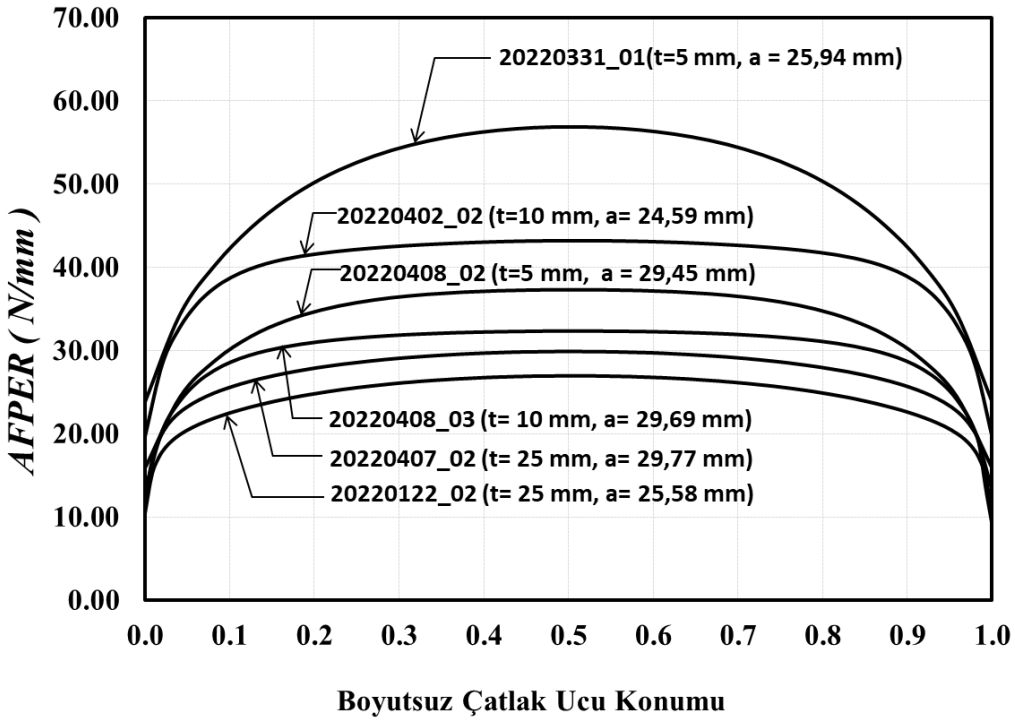
5.1. Mod-I Kırılma Analizleri ve AFPER ve ARUER Sonuçları

Bu kısımda, mod-I kırılma tokluğu testleri için sonlu elemanlar modellerinin hazırlanması, daha önce kavramsal detayları açıklanan AFPER (Artificial Fracture Process Energy Rate) ve ARUER (Artificial Recoverable Unloading Energy Rate) değerlerinin hesaplanması aşamaları sunulacaktır. Şekil 5.1'de mod-I yönünde yüklemeye maruz bir CT numunesinin sonlu elamanlar ağ yapısı gösterilmektedir. Modelleme aşamasında 20 düğüm noktalı Solid-186 elemanı kullanılmıştır. Çatlak ucu civarında 0.2 mm boyuta sahip küp elemanlar kullanılmıştır. Diğer kısımlar ise 4 mm tetrahedral elemanlar ile modellenmiştir. Analizde tutucu için elastiklik modülü E = 210 GPa, poisson oranı v = 0.30 CT numunesi için elastik modülü E = 71.3 GPa, poisson oranı v = 0.33 tanımlanmıştır. Ayrıca malzeme kartı içerisine Şekil 3.4'te belirtilen mühendislik gerilme-yer değiştirme eğirisi 'mises plastisity' özellikleri ile ANSYS içerisinde tanımlanmıştır. Pim-tutucu ve pim-numune arası ise lineer olmayan temas yüzeyleri ile modellenmiştir. Kullanılan sürtünmeli temas yüzeylerinde sürtünme katsayısı 0.4 olarak alınmıştır. Tablo 3.1'de verilen test sonuçları, farklı çatlak boyu, numune kalınlığı ve doğrulama çalışmaları için gerçekleştirilen testlerin sonuçlarını içermektedir. Doğrulama testleri dışındaki tüm testlerin sonlu elemanlar modeli hazırlanmış ve ilgili testin çatlak uzunluğu ve kırılma yüküne karşılık gelen AFPER değerlerinin çatlak önü boyunca dağılımı Şekil.5.2'de, ARUER değerleri ise Şekil 5.3'de gösterilmektedir. En yüksek AFPER ve ARUER değerleri 5 mm kalınlık ve 25.94 mm uzunluğundaki çatlağa sahip kırılma tokluğu testinde elde edilmiştir. En düşük değer ise düzlem şekil değişimi koşuluna en yakın kalınlık değeri olan 25 mm kalınlıklı numuneler için elde edilmiştir. 10 mm kalınlığa sahip numuneler ise arada

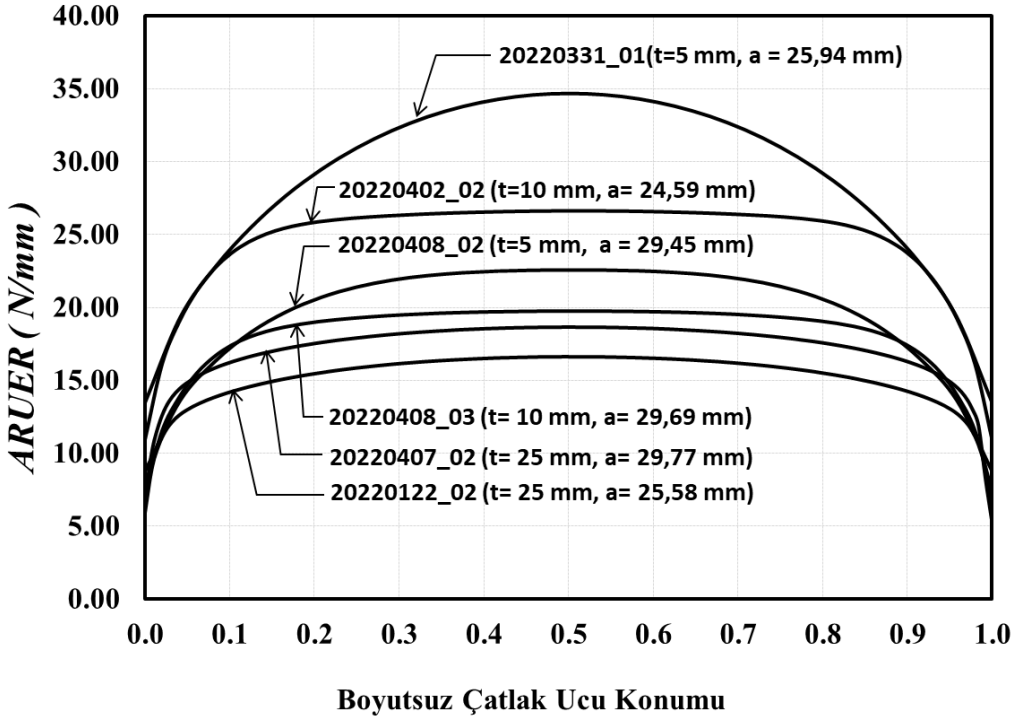
değerler almıştır. Aynı kalınlığa sahip numuneleri kıyasladığımızda çatlak boyunun artması hesaplanan AFPER ve ARUER değerlerini azaltmaktadır. AFPER ve ARUER değerleri hesaplanan tüm mod-I problemleri için en yüksek değerler çatlak ucunun orta noktasındadır. Tablo 5.1, mod-I problemleri için çatlak önü boyunca elde edilen en yüksek AFPER ve ARUER değerlerini vermektedir. Analizler, 11. nesil Intel i7-1165G7 işlemcili, 20 GB RAM içeren bilgisayarda çözdürülmüştür. Herbir mod-I analizinin çözümü yaklaşık olarak 8 saat sürmektedir. Tez kapsamında, Al 2024 T351 malzemesi için toplam 6 adet mod-I elastik-plastik kırılma analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. Mod-I Açılma modu problemi için hazırlanan sonlu elemanlar ağ yapısı.



Şekil 5.2. Mod-I açılma modu problemleri için hesaplanan AFPER değerleri.



Şekil 5.3. Mod-I açılma modu problemleri için hesaplanan ARUER değerleri.

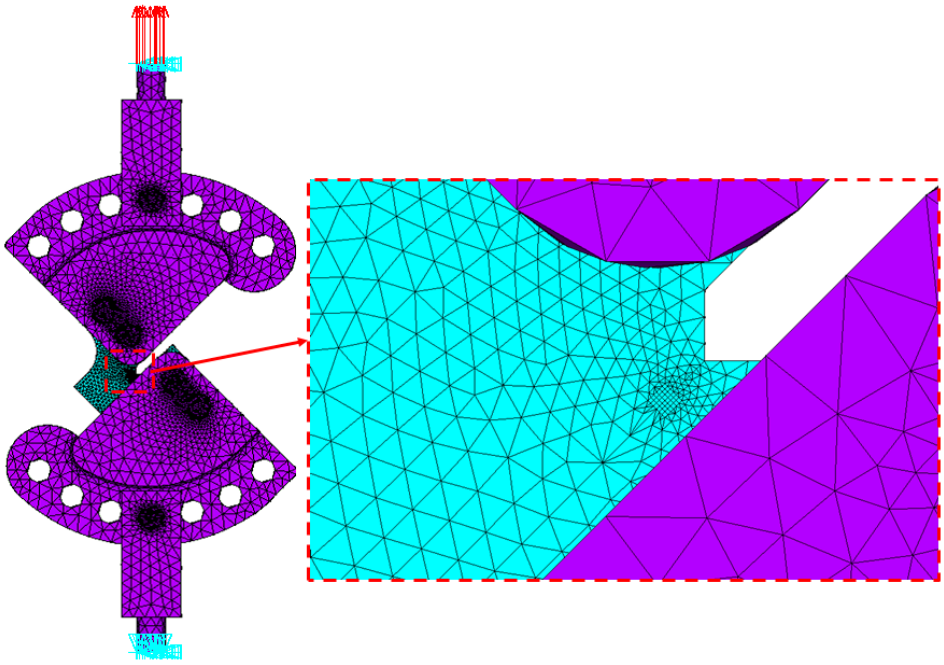
Tablo 5.1 Mod-I kırılma analizleri sonucu elde edilen en yüksek AFPER ve ARUER değerleri.

Numune ismi	Kalınlık	AFPER (N/mm)	ARUER (N/mm)
20220122_02	25	26.98	16.63
20220407_02	25	29.92	18.66
20220402_02	10	43.23	26.63
20220408_03	10	32.37	19.76
20220331_01	5	56.89	34.68
20220408_02	5	26.99	16.63

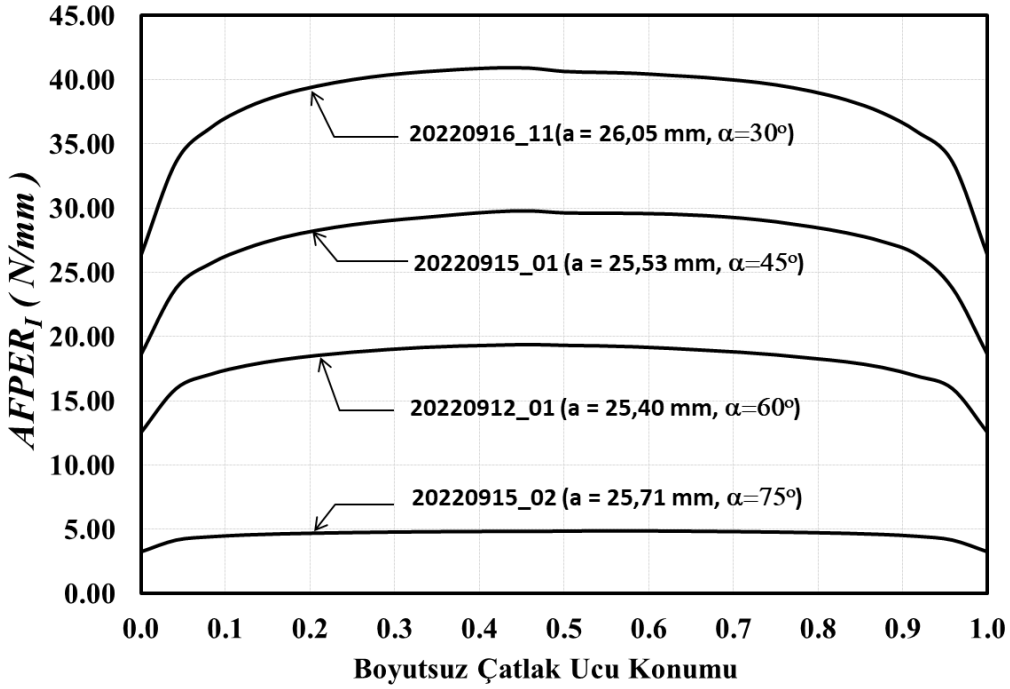
5.2. Mod-I/II Kırılma Analizleri ve AFPER ve ARUER Sonuçları

Bu kısımda mod-I/II kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak boyu ve kırılma yükü bilgisi ile sonlu elemanlar modellerinin hazırlanması, AFPER ve ARUER hesaplanması aşamaları sunulmuştur. Şekil 5.4'te mod-I/II problemleri için kullanılan T-numune ve tutucusunun sonlu elamanlar ağ yapısını gösterilmektedir. Modelleme aşamasında 20 düğüm noktalı Solid-186 elemanı kullanılmıştır. Çatlak ucu civarında 0.2 mm boyuta sahip küp elemanlar kullanılmaktadır. Diğer kısımlar ise 4 mm tetrahedral elemanlar ile modellenmiştir. Analizde tutucu için elastiklik modülü E= 210 GPa, poisson oranı v = 0.30, T numune için elastik modülü E = 71.3 GPa, poisson oranı v = 0.33 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca malzeme kartı içerisine Şekil 3.4'te belirtilen mühendislik gerilme-şekil değişim eğirisi 'mises plastisity' özellikleri seçilerek tanımlanmıştır. Pim-tutucu ve pim-numune arası lineer olmayan yüzey teması ile modellenmiştir. Kullanılan sürtünmeli temas yüzeylerinde sürtünme katsayısı 0.4 olarak alınmıştır. Tablo 3.2, farklı çatlak boyu, numune kalınlığı ve doğrulama çalışmaları için gerçekleştirilen testlere dair verileri içermektedir. Doğrulama testleri dışındaki tüm testlerin sonlu elemanlar modeli hazırlanmış ve ilgili testin çatlak uzunluğu ve kırılma yüküne karşılık gelen AFPER ve ARUER değerlerinin çatlak önü boyunca dağılımları hesaplanmıştır. Şekil 5.5'te kalınlığı 5 mm ve çatlak boyu yaklaşık 25 mm olan problemler için mod-I AFPER sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/II yükleme açısı arttıkça hesaplanan $AFPER_I$ değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Şekil 5.6'de ise kalınlığı 5 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için mod-II AFPER sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/II yükleme açısı arttıkça hesaplanan $AFPER_{II}$ değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.7'de kalınlığı 5 mm ve çatlak boyu yaklaşık 25 mm olan problemler için mod-

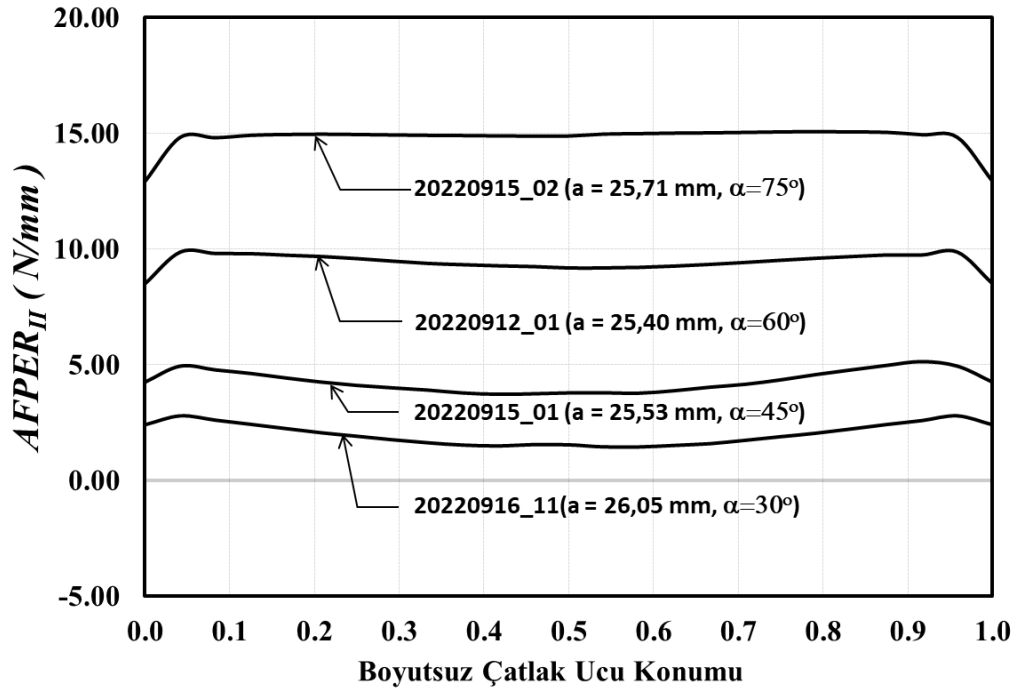
I ARUER sonuçlarını gösterilmektedir. Mod-I/II yükleme açısı arttıkça hesaplanan $ARUER_I$ değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Şekil 5.8'de ise kalınlığı 5 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için mod-II ARUER sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/II yükleme açısı arttıkça hesaplanan $AFPER_{II}$ değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Mod-I ve mod-II AFPER ve ARUER sonuçlarınındaki benzer eğilim kalınlık ve çatlak boyuna göre sınıflandırılan tüm grafiklerde görülmektedir. Şekil 5.9'da, 30 mm civarı çatlak barındıran 5 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$, Şekil 5.10'da, $AFPER_{II}$, Şekil 5.11'te $ARUER_I$ ve Şekil 5.12'te $ARUER_{II}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.13'de, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$, Şekil 5.14'da, $AFPER_{II}$, Şekil 5.15'te, $ARUER_I$ ve Şekil 5.16'da $ARUER_{II}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.17'te, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ Şekil 5.18'te, $AFPER_{II}$, Şekil 5.19'da, $ARUER_I$ ve Şekil 5.20'te, $ARUER_{II}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.21'de, 25 mm civarı çatlak barındıran 20 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$, Şekil 5.22'te, $AFPER_{II}$, Şekil 5.23'te, $ARUER_I$ ve Şekil 5.24'te, $ARUER_{II}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.25'te, 30 mm civarı çatlak barındıran 20 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$, Şekil 5.26'da, $AFPER_{II}$, Şekil 5.27'te, $ARUER_I$ ve Şekil 5.28'te, $ARUER_{II}$ sonuçları gösterilmektedir. Tablo 5.2'de mod-I/II problemleri için elde edilen çatlak önü boyunca tanımlı en yüksek AFPER ve ARUER değerlerini gösterilmektedir. Analizler, 11. nesil Intel i7-1165G7 işlemcili, 20 GB RAM içeren bilgisayarda çözdürülmüştür. Herbir mod-I/II analizinin çözümü yaklaşık olarak 48 saat sürmektedir. Tez kapsamında, Al 2024 T351 malzemesi için toplam 21 adet mod-I/II elastik-plastik kırılma analizi gerçekleştirilmiştir.



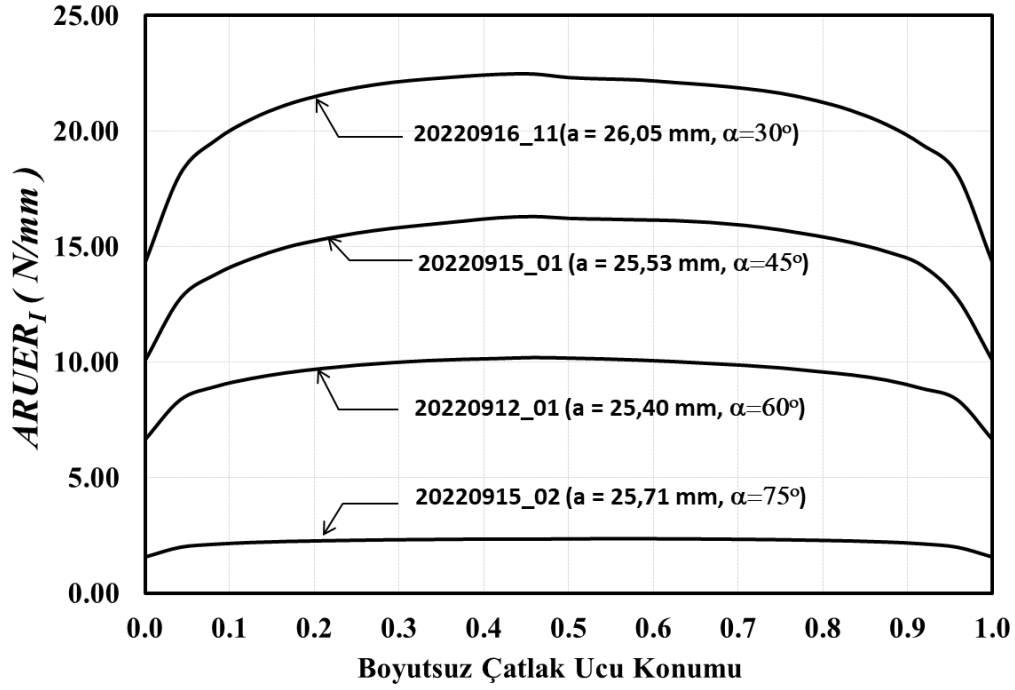
Şekil 5.4. Mod-I/II kırılma analizleri için hazırlanan model ve sonlu elemanlar ağ yapısı.



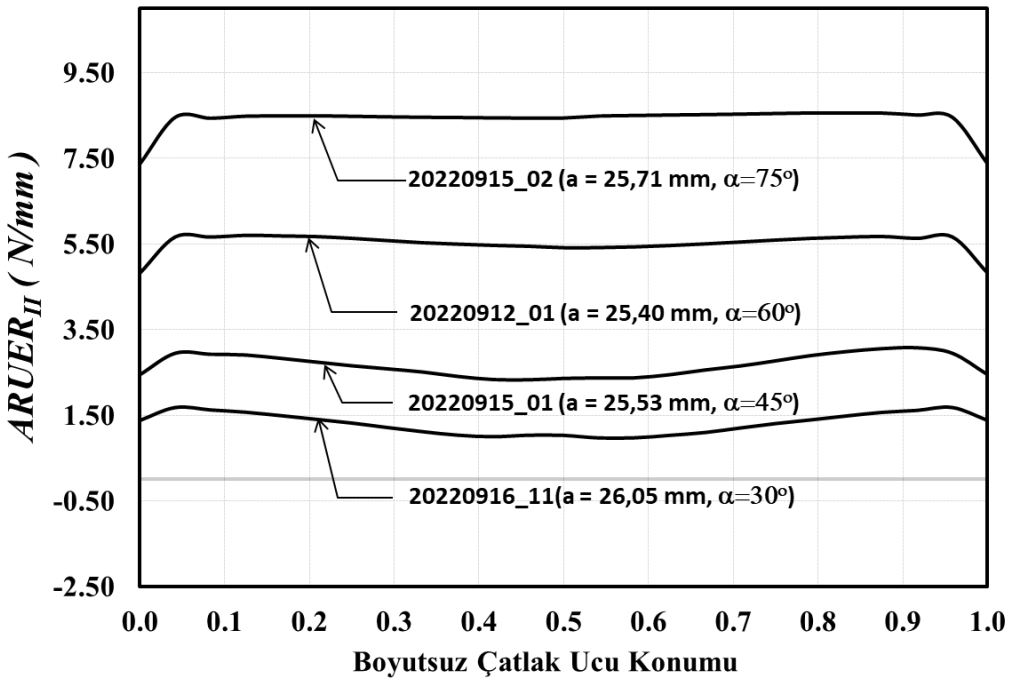
Şekil 5.5. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I AFPER$_I$ dağılımları..



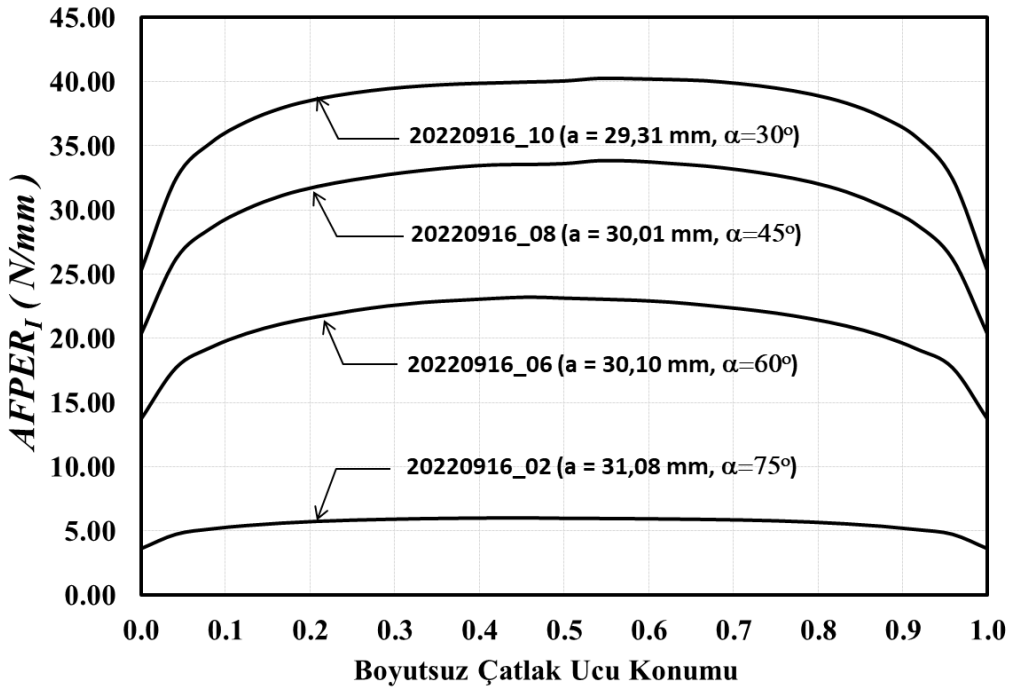
Şekil 5.6. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları..



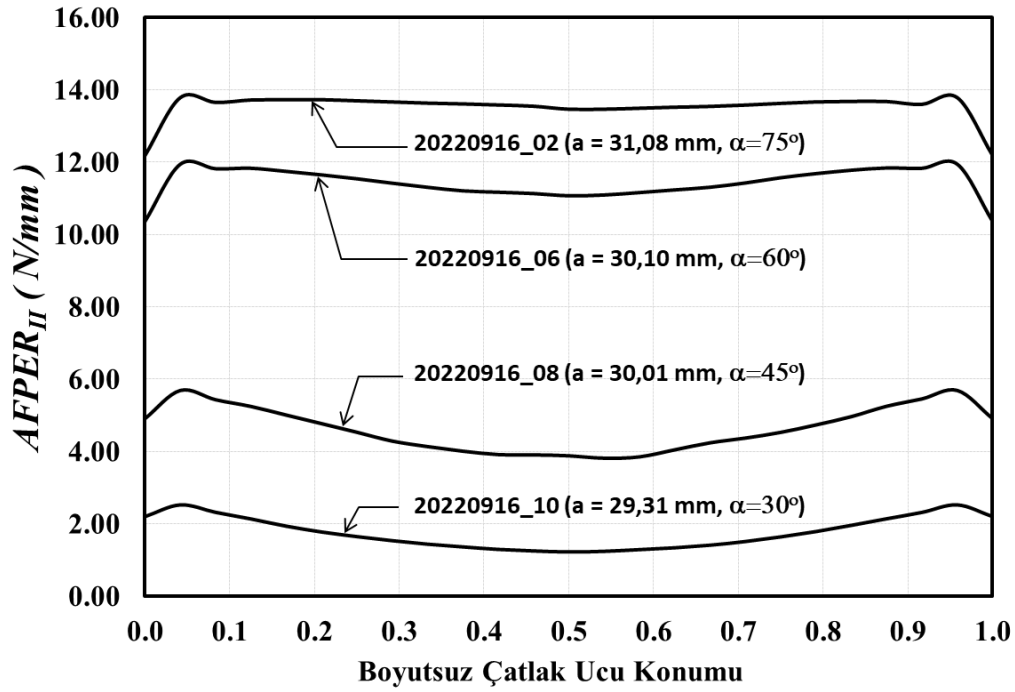
Şekil 5.7. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



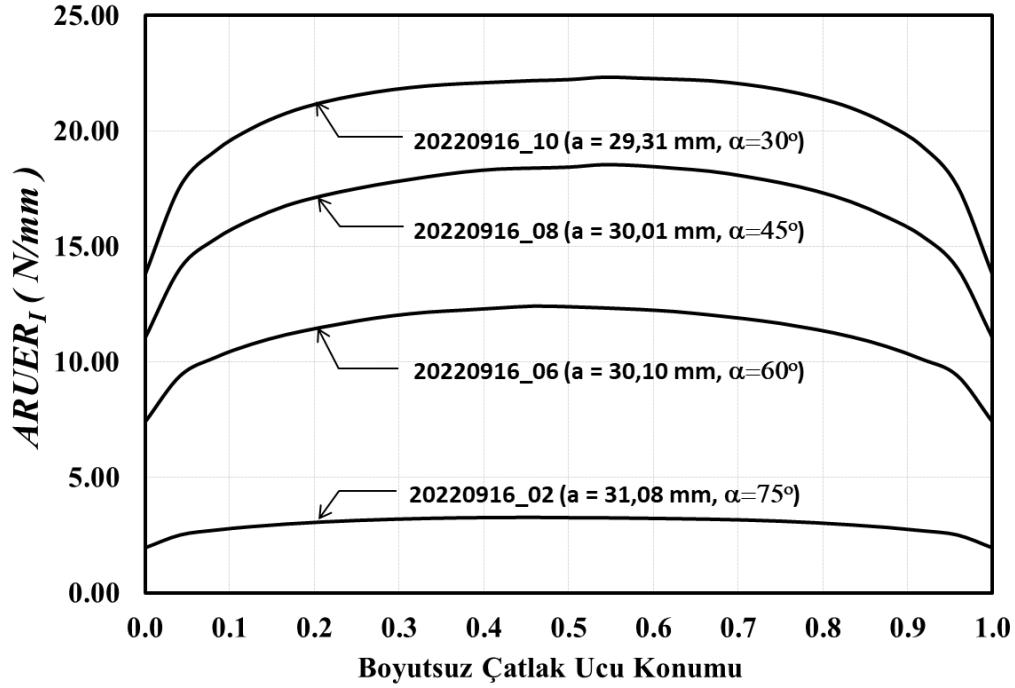
Şekil 5.8. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



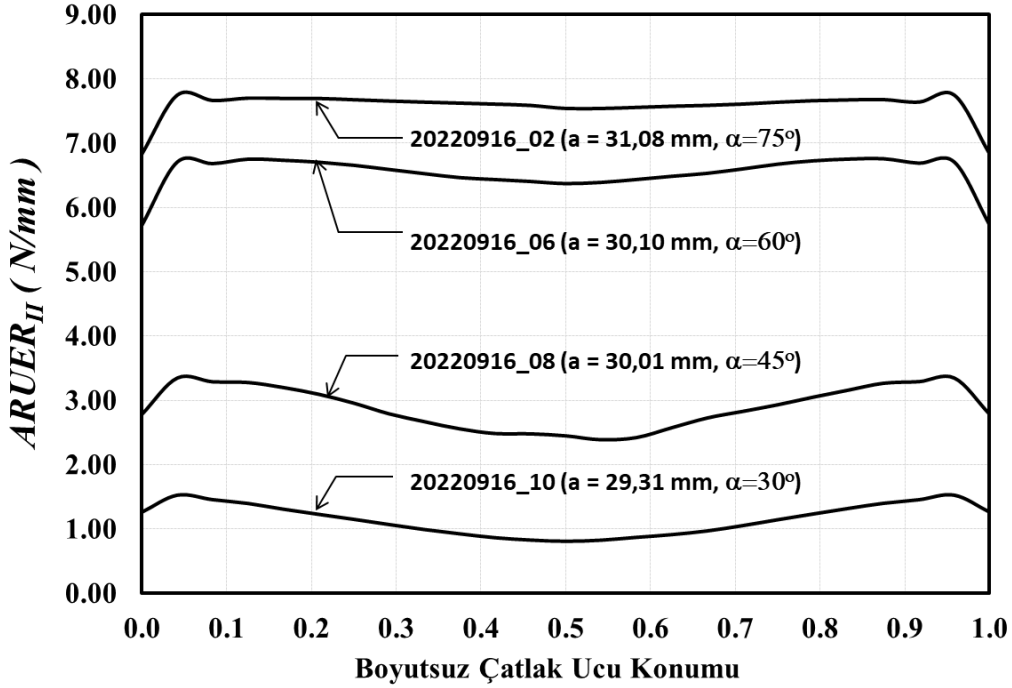
Şekil 5.9. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



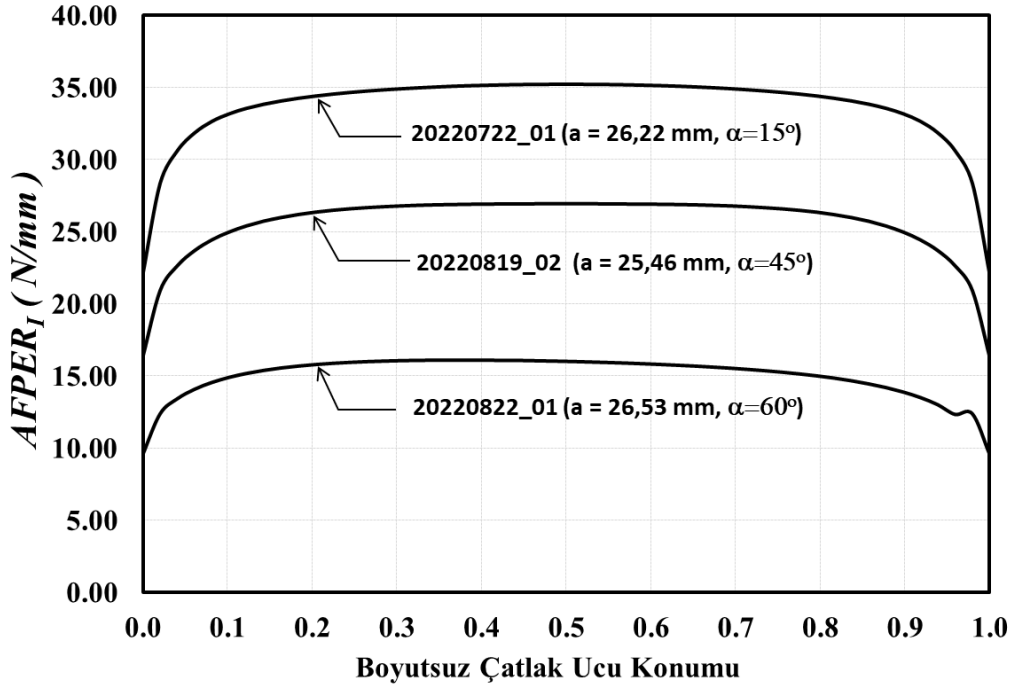
Şekil 5.10. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



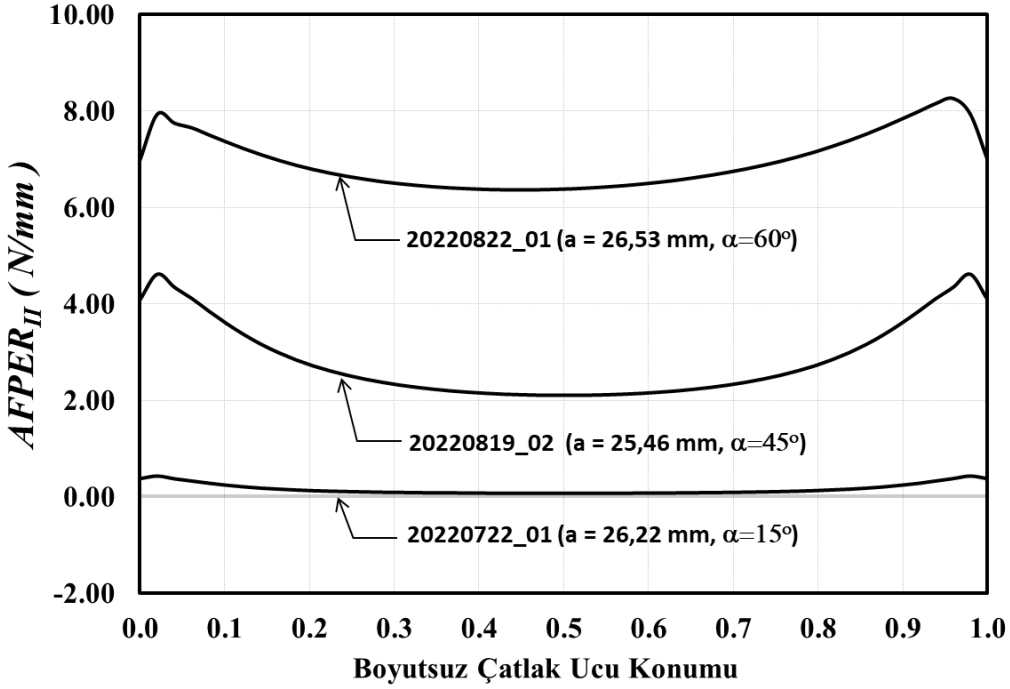
Şekil 5.11. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



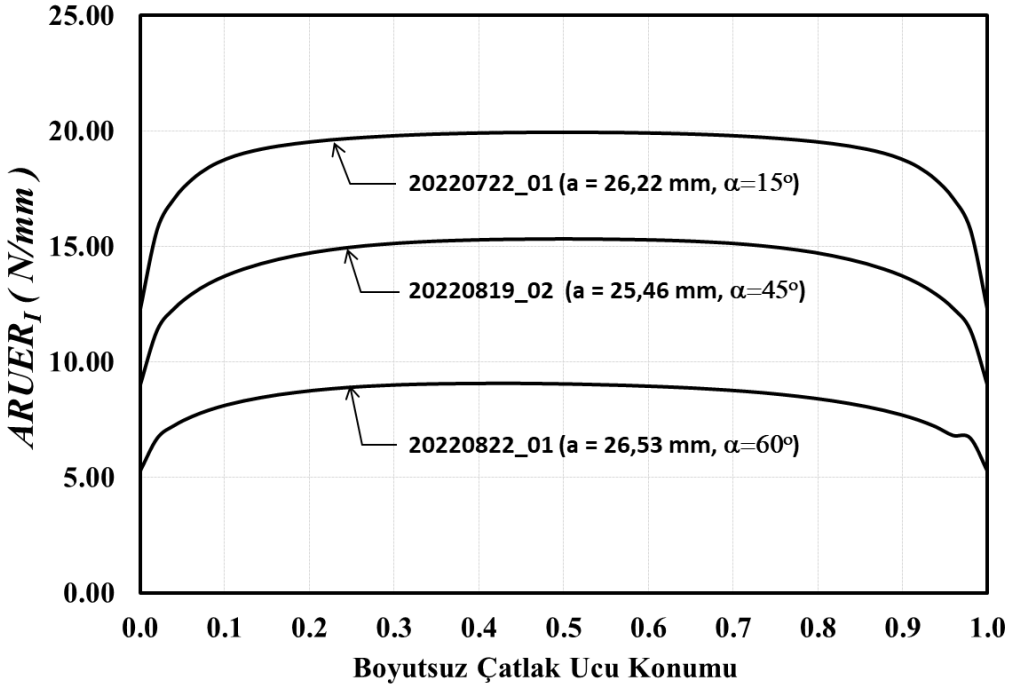
Şekil 5.12. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 5 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



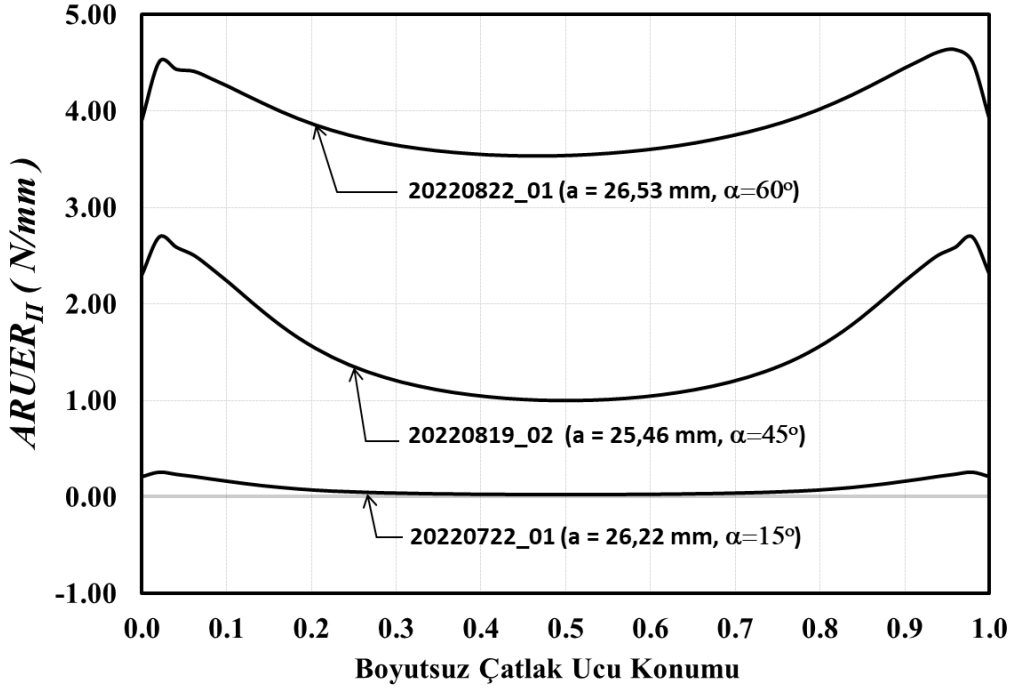
Şekil 5.13. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



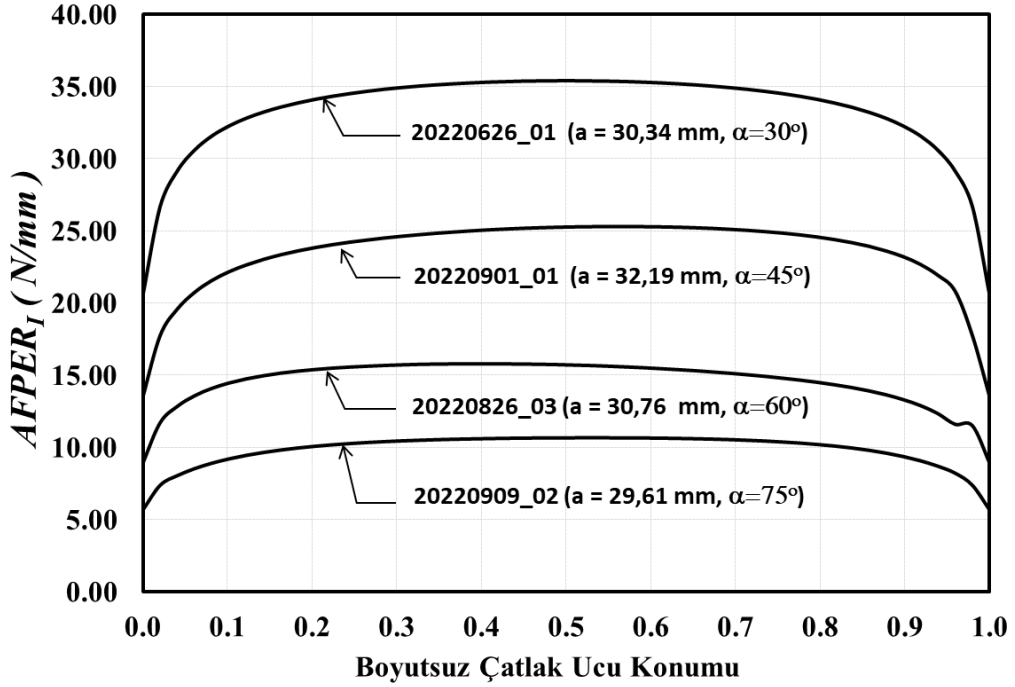
Şekil 5.14. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



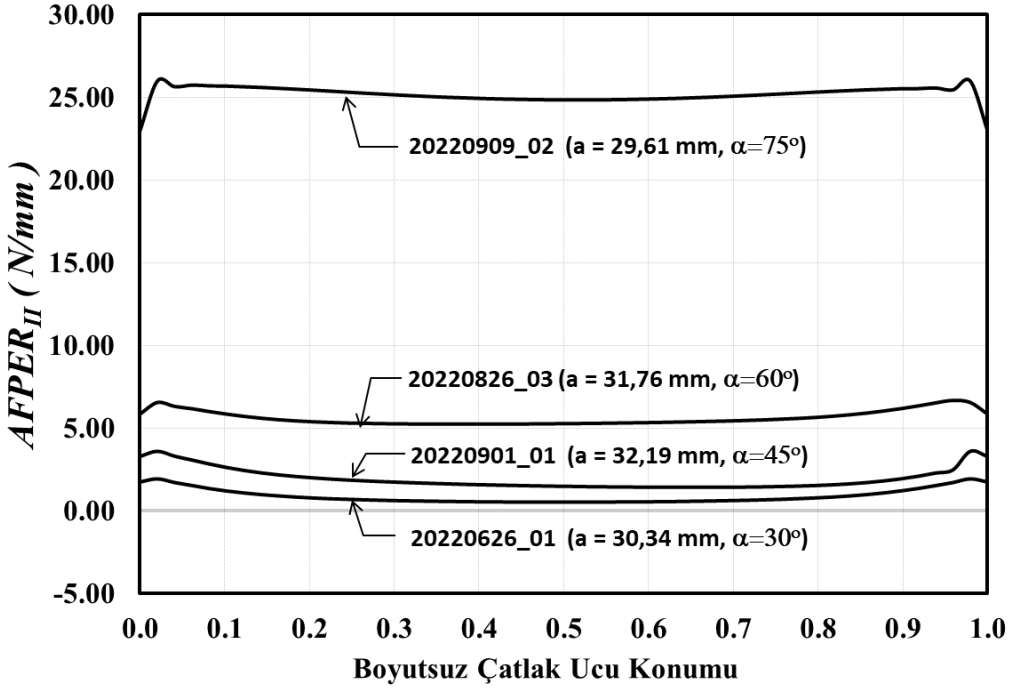
Şekil 5.15. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



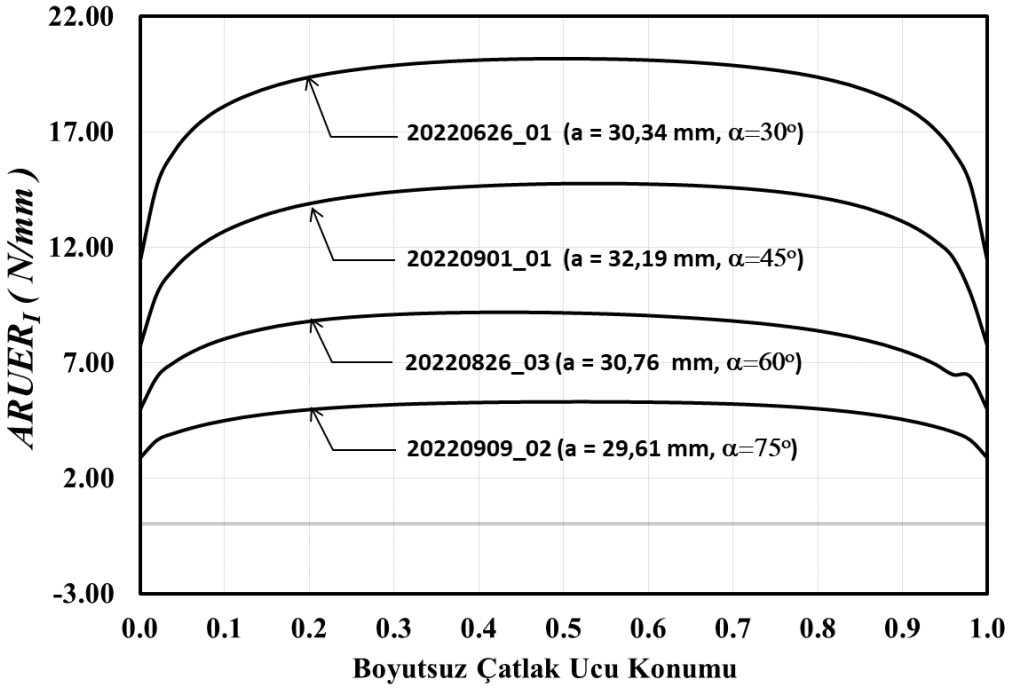
Şekil 5.16. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



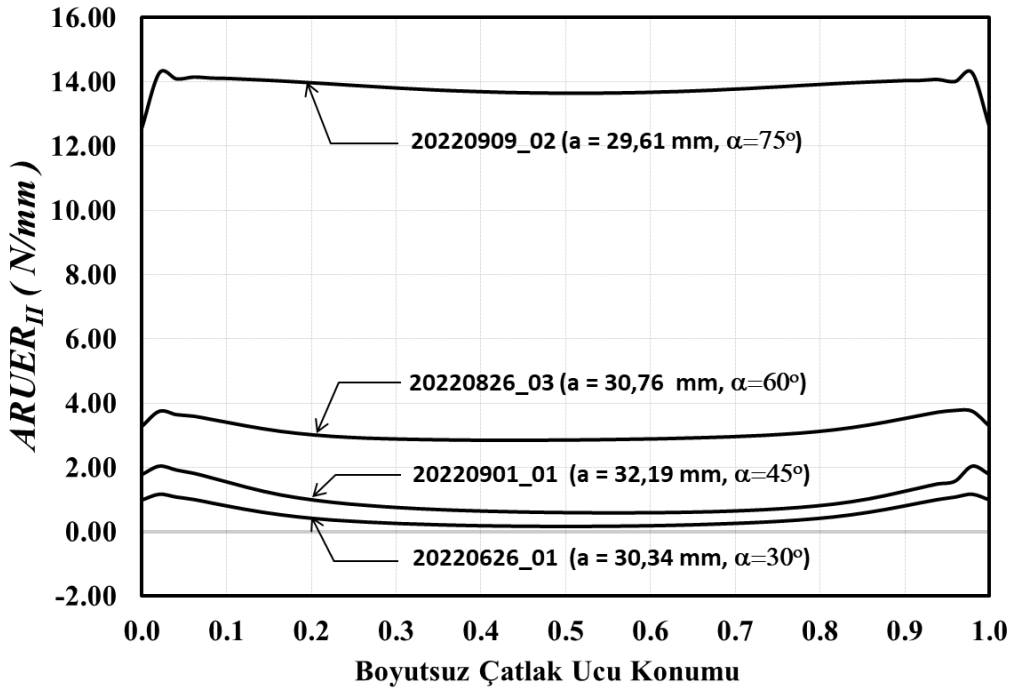
Şekil 5.17. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



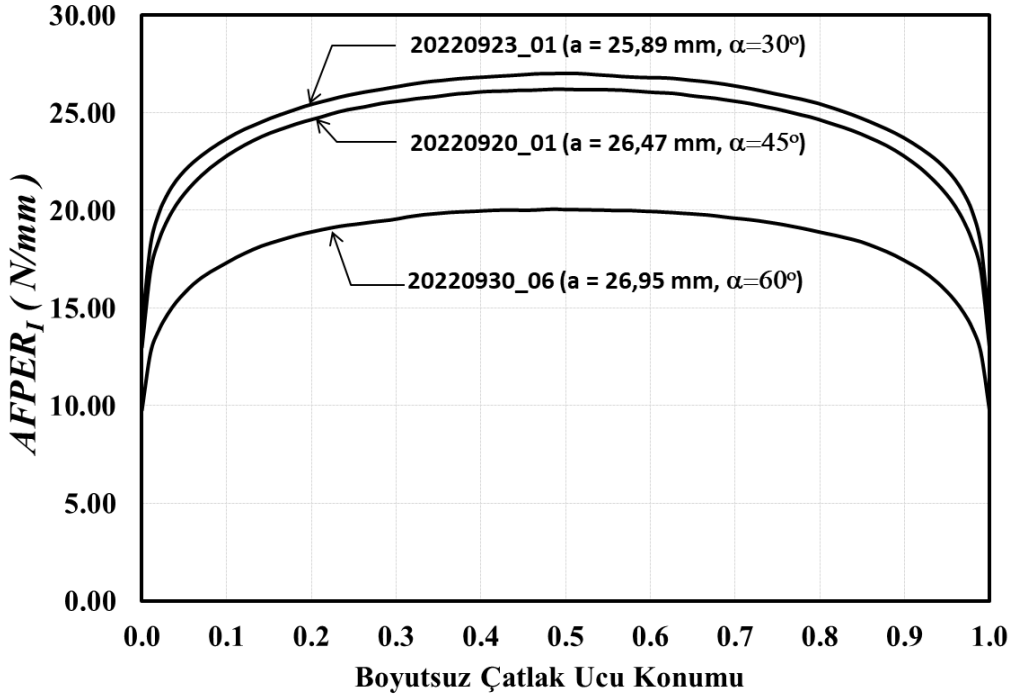
Şekil 5.18. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



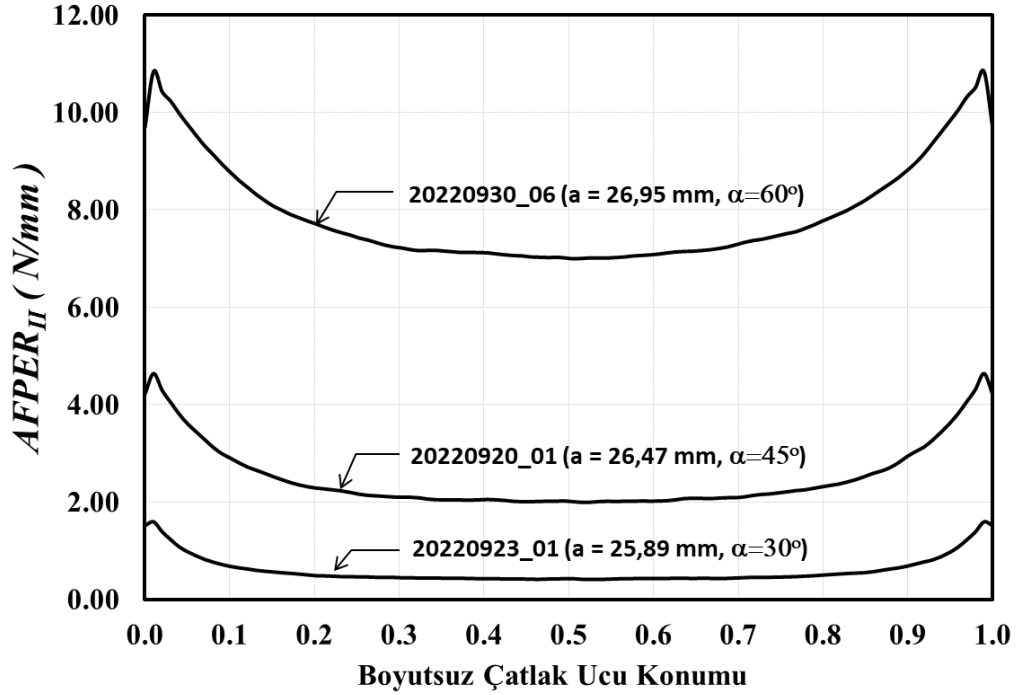
Şekil 5.19. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



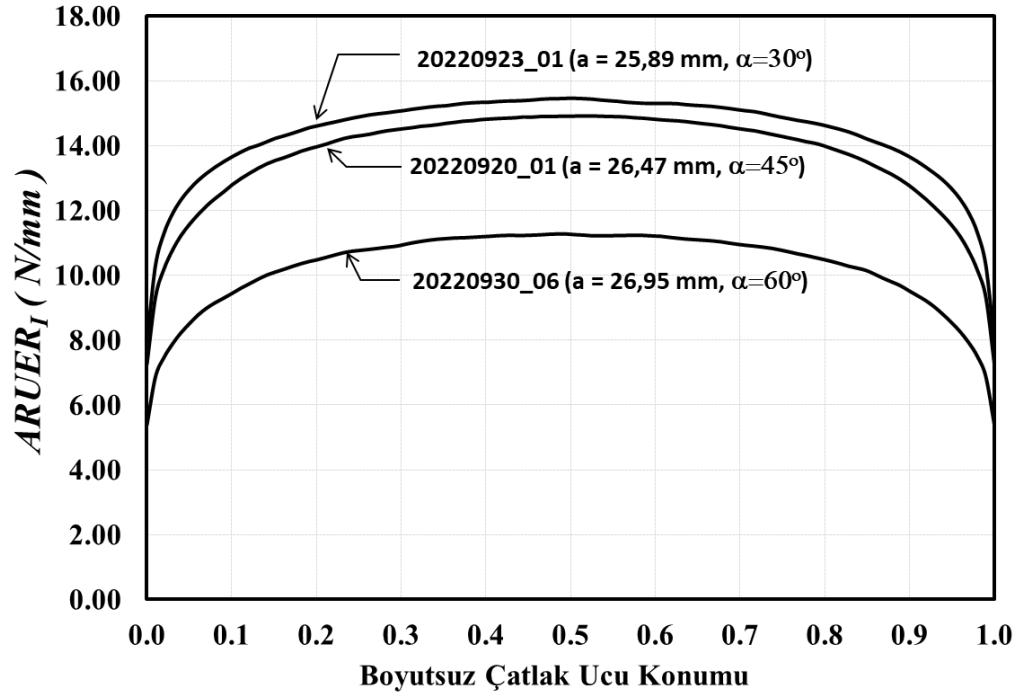
Şekil 5.20. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



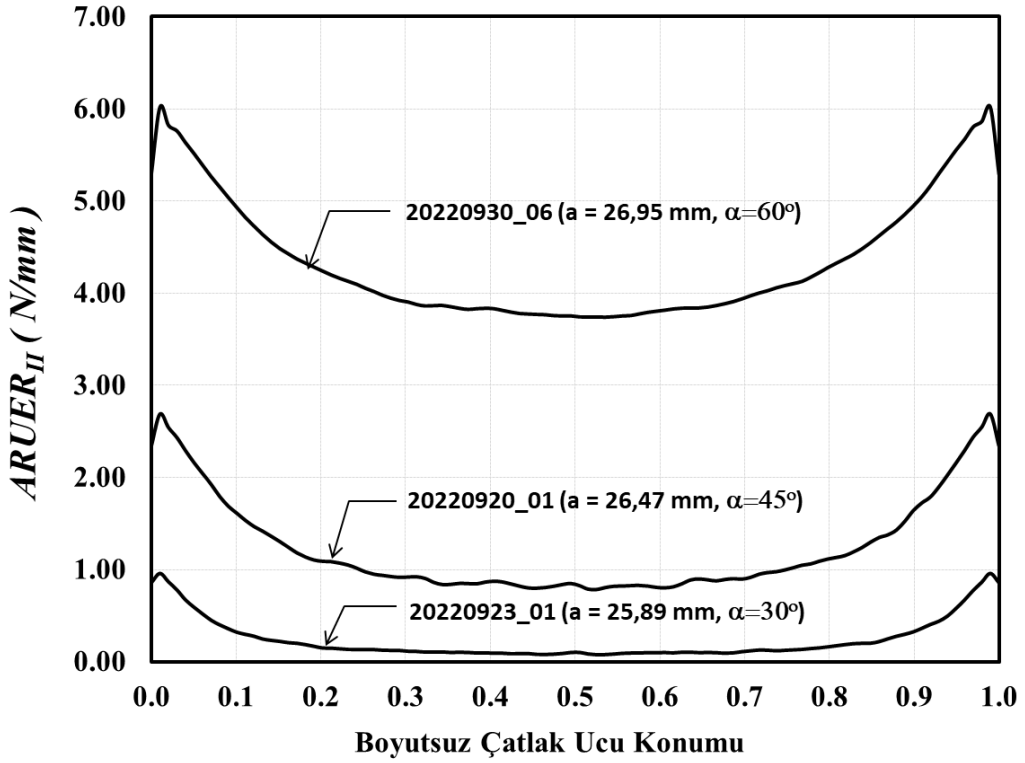
Şekil 5.21. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



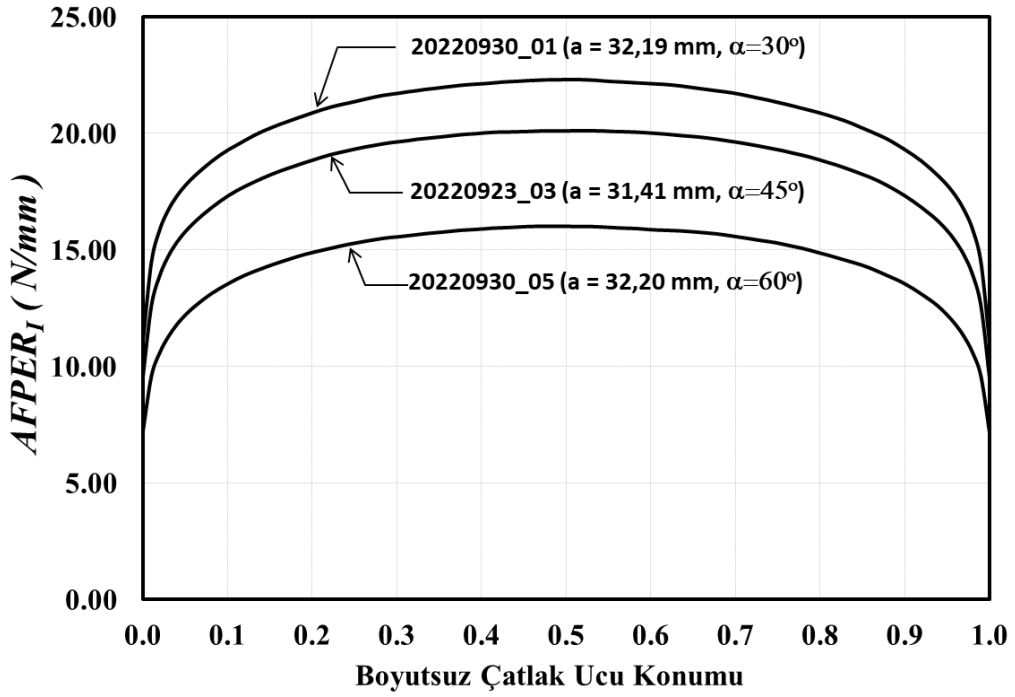
Şekil 5.22. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



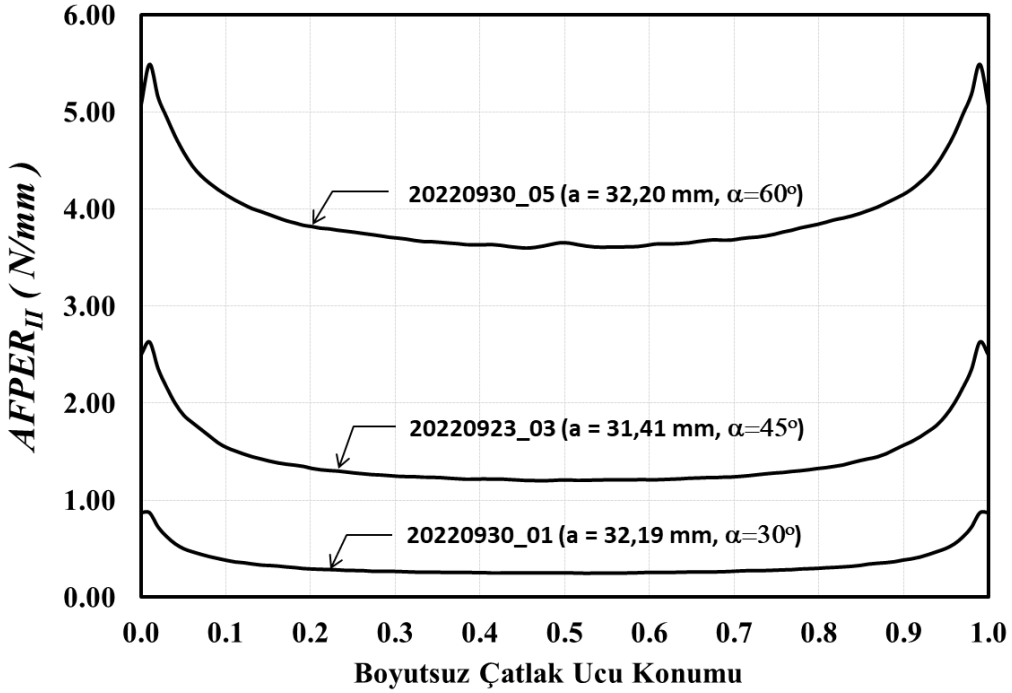
Şekil 5.23. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



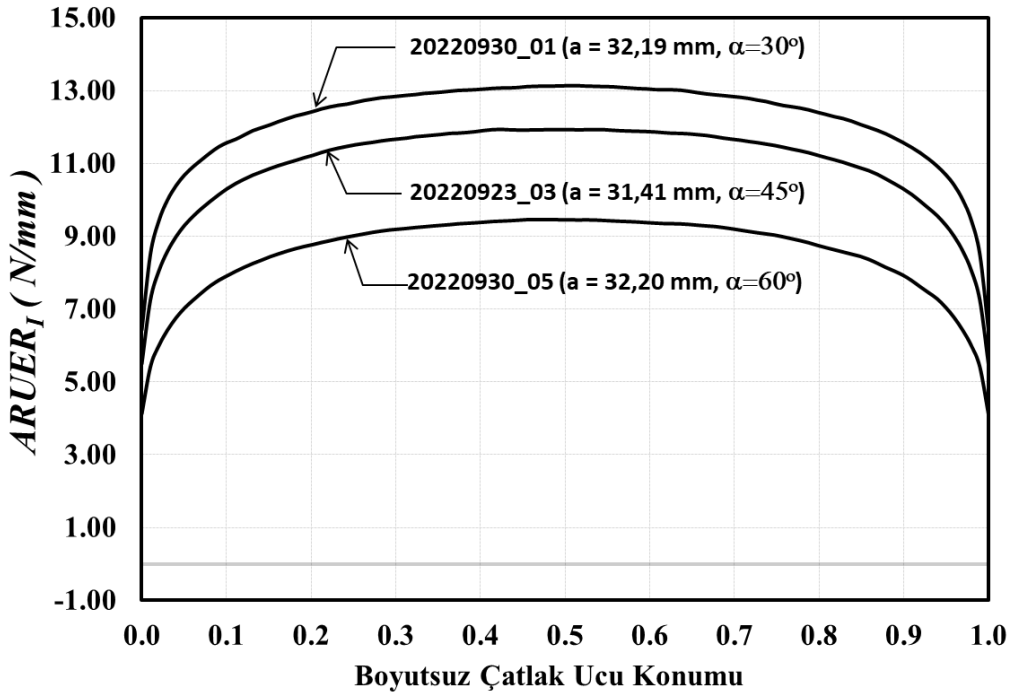
Şekil 5.24. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



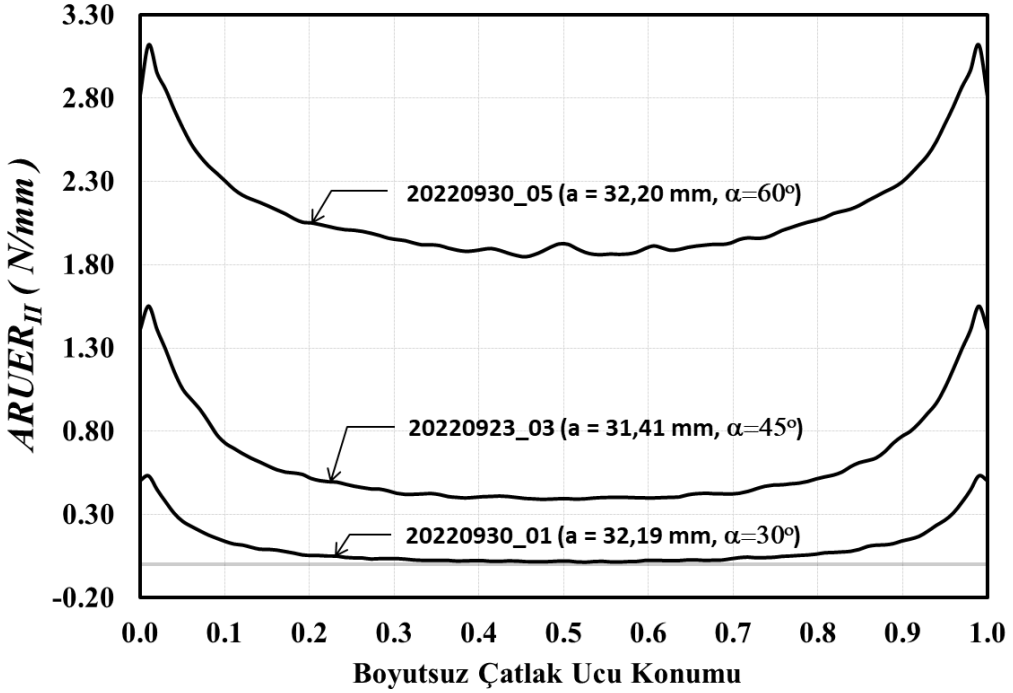
Şekil 5.25. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



Şekil 5.26. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $AFPER_{II}$ dağılımları.



Şekil 5.27. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



Şekil 5.28. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 20 mm olan numuneler için farklı mod-I/II yükleri altında mod-I $ARUER_{II}$ dağılımları.

Tablo 5.2 Mod-I/II kırılma analizleri sonucu çatlak önü boyunca elde edilenen yüksek AFPER ve ARUER değerleri.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yüklem e Açısı	$AFPER_I$ (N/mm)	$AFPER_{II}$ (N/mm)	$ARUER_I$ (N/mm)	$AFPER_{II}$ (N/mm)
20220722_01	10	15º	35.22	0.07	19.94	0.02
20220819_02	10	45º	26.94	2.10	15.32	1.00
20220822_01	10	60º	16.03	6.37	9.05	3.54
20220626_01	10	30º	35.40	0.52	20.17	0.16
20220826_03	10	60º	15.73	5.26	9.16	2.85
20220909_02	10	75º	10.66	24.84	5.30	13.65
20220909_01	10	45º	25.25	1.48	14.75	0.59
20220912_01	5	60º	19.31	9.18	10.17	5.41
20220915_01	5	45º	29.63	3.78	16.22	2.36
20220915_02	5	75º	4.84	14.88	2.34	8.44
20220916_02	5	75º	5.97	13.46	3.25	7.54
20220916_06	5	60º	23.13	11.07	12.38	6.37
20220916_08	5	45º	33.60	3.88	18.43	2.45
20220916_10	5	30º	40.04	1.22	22.22	0.81
20220916_11	5	30º	40.64	1.54	22.31	1.03

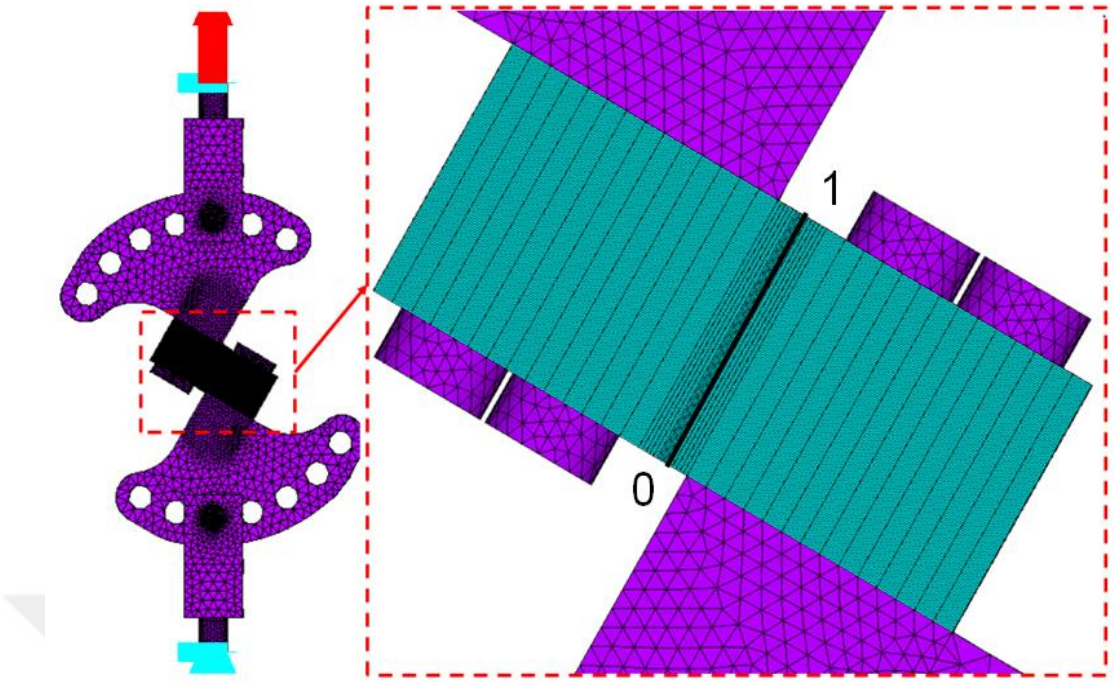
Tablo 5.2. (Devamı) Mod-I/II kırılma analizleri sonucu çatlak önü boyunca elde edilenen yüksek AFPER ve ARUER değerleri.

20220923_01	20	30°	27.02	0.42	15.46	0.10
20220920_01	20	45°	26.20	2.01	14.91	0.83
20220923_03	20	45°	20.11	1.20	11.93	0.39
20220930_06	20	60°	20.03	6.99	11.25	3.74
20220930_01	20	30°	22.30	0.25	13.13	0.02
20220930_05	20	60°	16.02	3.62	9.46	1.88

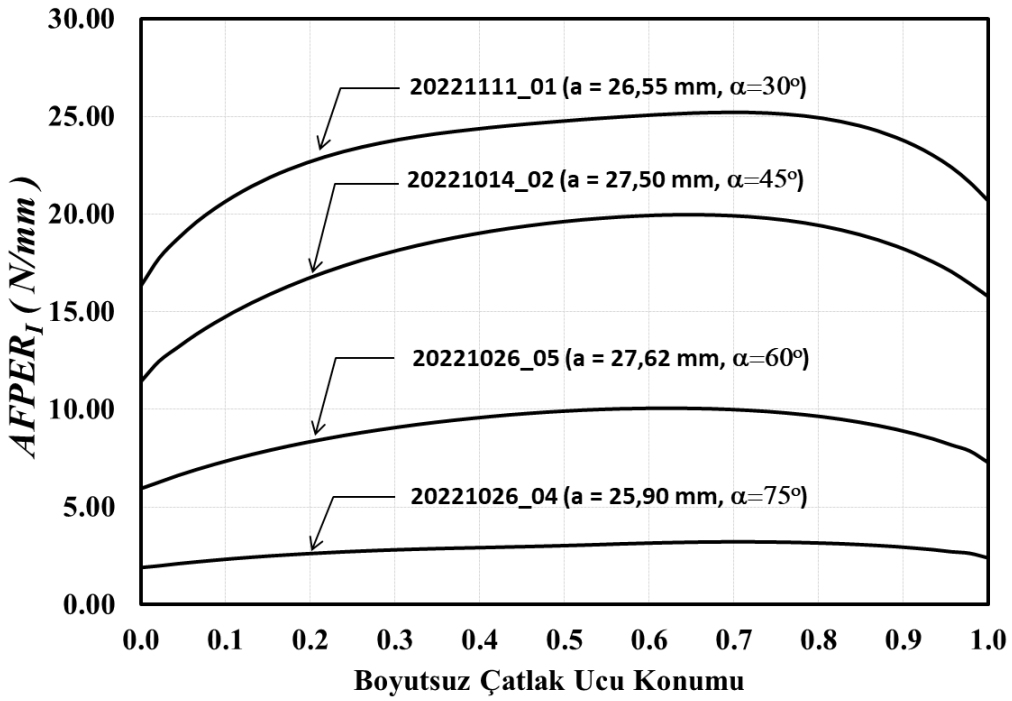
5.3. Mod-I/III Kırılma Analizleri AFPER ve ARUER Sonuçları

Bu kısımda mod-I/III kırılma tokluğu testlerinin elastik-plastik sonlu elemanlar modellerinin hazırlanması ile AFPER ve ARUER hesaplanması aşamaları sunulacaktır. Şekil 5.29'da mod-I/III problemleri için kullanılan CTT numune ve tutucusunun sonlu elamanlar ağ yapısı gösterilmektedir. Şekil 5.30'da ise numunenin sonlu elemanlar ağ yapısı gösterilmektedir. Modelleme aşamasında 20 düğüm noktalı Solid-186 elemanı kullanılmıştır. Çatlak ucu civarında 0.2 mm boyuta sahip küp elemanlar kullanılmaktadır. Diğer kısımlar ise 4 mm tetrahedral elemanlar ile modellenmiştir. Analizde tutucu için elastiklik modülü E = 210 GPa, poisson oranı v = 0.30 CTT numunesi için elastiklik modülü E = 71.3 GPa, poisson oranı v = 0.33 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca malzeme kartı içerisine Şekil 3.4'te belirtilen mühendislik gerilme-şekil değişimi eğrisi 'mises plastisity' özellikleri seçilerek tanımlanmıştır. Pim-tutucu ve pim-numune arası ise lineer olmayan temas yüzeyleri ile modellenmiştir. Kullanılan sürtünmeli temas yüzeylerinde sürtünme katsayısı 0.4 olarak alınmıştır. Tablo 3.3'te verilen test sonuçları, farklı çatlak boyu, numune kalınlığı ve doğrulama çalışmaları için gerçekleştirilen testlere dairdir. Doğrulama testleri dışındaki tüm testlerin sonlu elemanlar modelleri hazırlanmış, AFPER ve ARUER değerleri hesaplanmıştır. Şekil 5.30'da kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık 25 mm olan problemler için mod-I AFPER sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan $AFPER_I$ değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Şekil 5.31'te kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için mod-II AFPER sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan $AFPER_{II}$ değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.32'te ise kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için mod-III AFPER sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan $AFPER_{III}$ değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Mod-I , mod-II

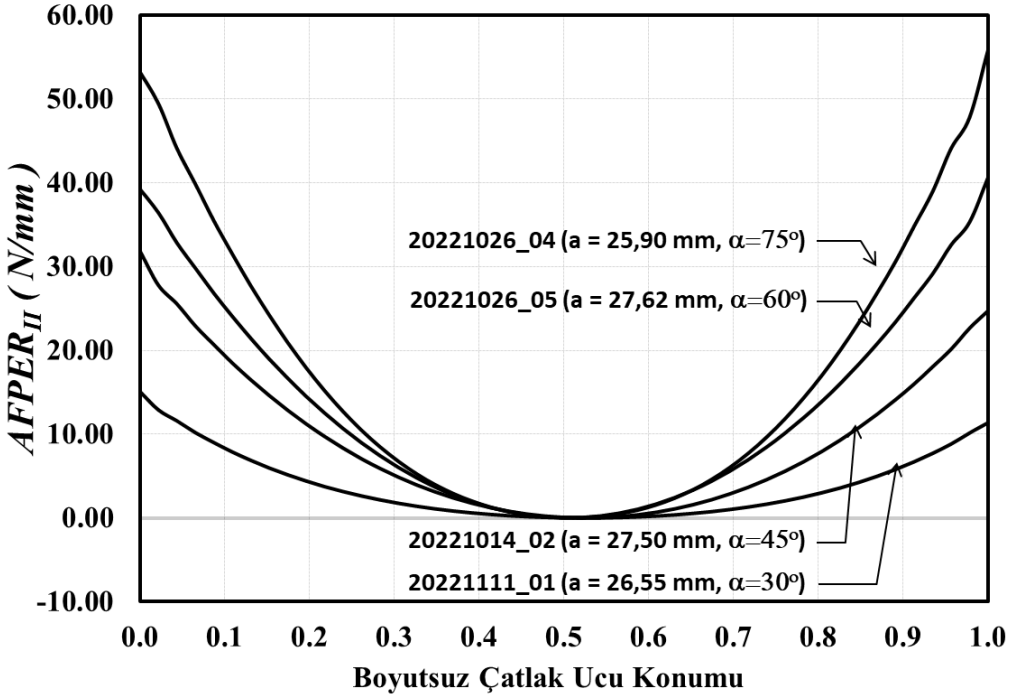
ve mod-III yönündeki benzer eğilim kalınlık ve çatlak boyuna göre sınıflandırılan tüm grafiklerde görülmektedir. Şekil 5.33'te, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.34'te, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.35'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.36'da, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 5.37'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.38'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.39'da, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.40'da, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.41'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.42'te, 25 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 5.43'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.44'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.45'te, 25 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.46'da, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.47'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.48'te, 30 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.49'da, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.50'da ise $ARUER_{III}$ sonuçları v gösterilmektedir. Şekil 5.51'te, 30 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.52, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.53 ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. AFPER ve ARUER grafiklerinin x eksenleri boyutsuz çatlak ucu konumu tanımına göre ilgili noktanın çatlak önü boyunca boyutsuz koordinatını temsil etmektedir. Şekil 5.29'da görüldüğü gibi çatlak ucu ön kısmından başlayıp arka kısmında son bulan çatlak önü boyunca konum boyutsuz hale getirilerek, çatlak önü doğrultusundaki konum koordinatı sınırları 0 ile 1 arasında boyutsuz eksenlerde verilmiştir. Tablo 5.3'de mod-I/III problemleri için elde edilen çatlak önü boyunca tanımlı en yüksek AFPER ve ARUER değerlerini gösterilmektedir. Analizler, 11. nesil Intel i7-1165G7 işlemcili, 20 GB RAM içeren bilgisayarda çözdürülmüştür. Herbir mod-I/III analizinin çözümü yaklaşık olarak 32 saat sürmektedir. Tez kapsamında, Al 2024 T351 malzemesi için toplam 17 adet mod-I/III elastik-plastik kırılma analizi gerçekleştirilmiştir.



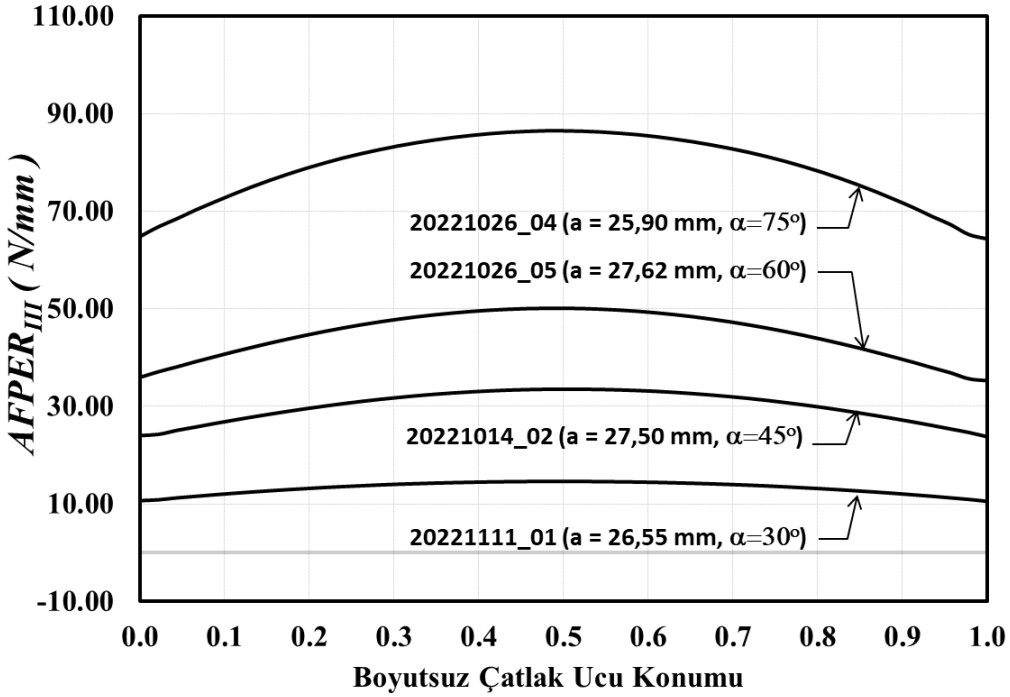
Şekil 5.29. Mod-I/III problemi sonlu elemanlar modeli ve CTT numunesinin yakın görüntüsü



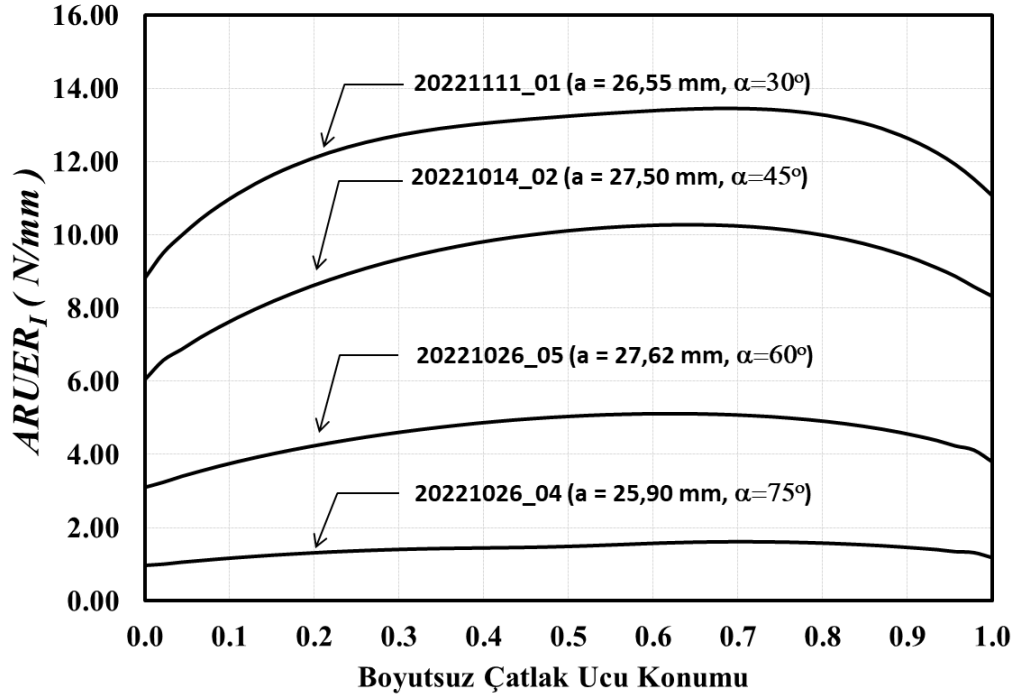
Şekil 5.30. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



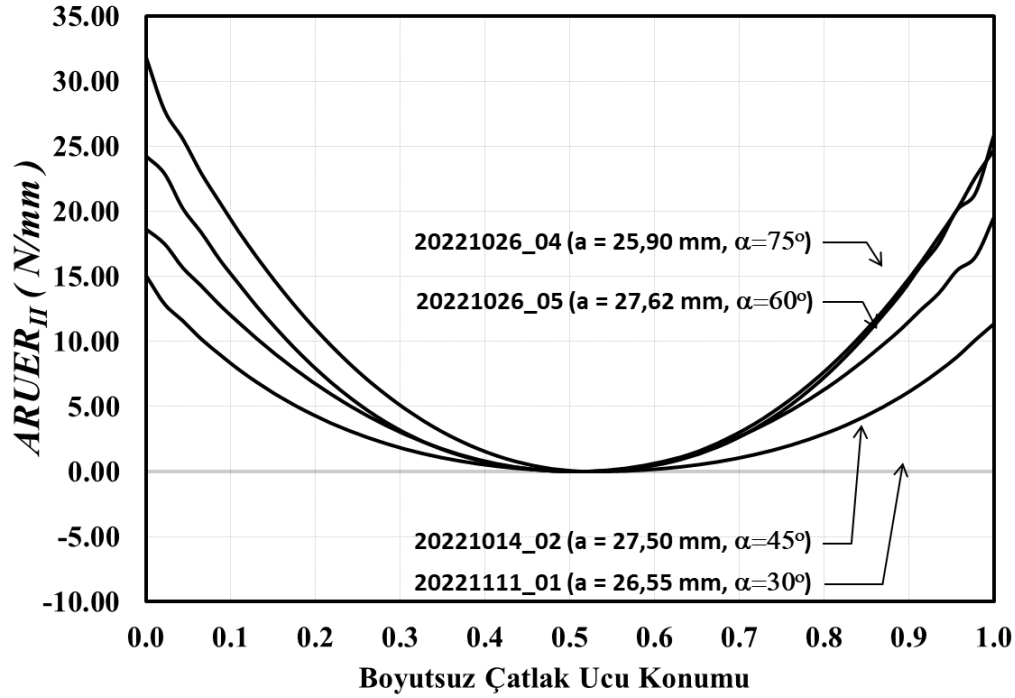
Şekil 5.31. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



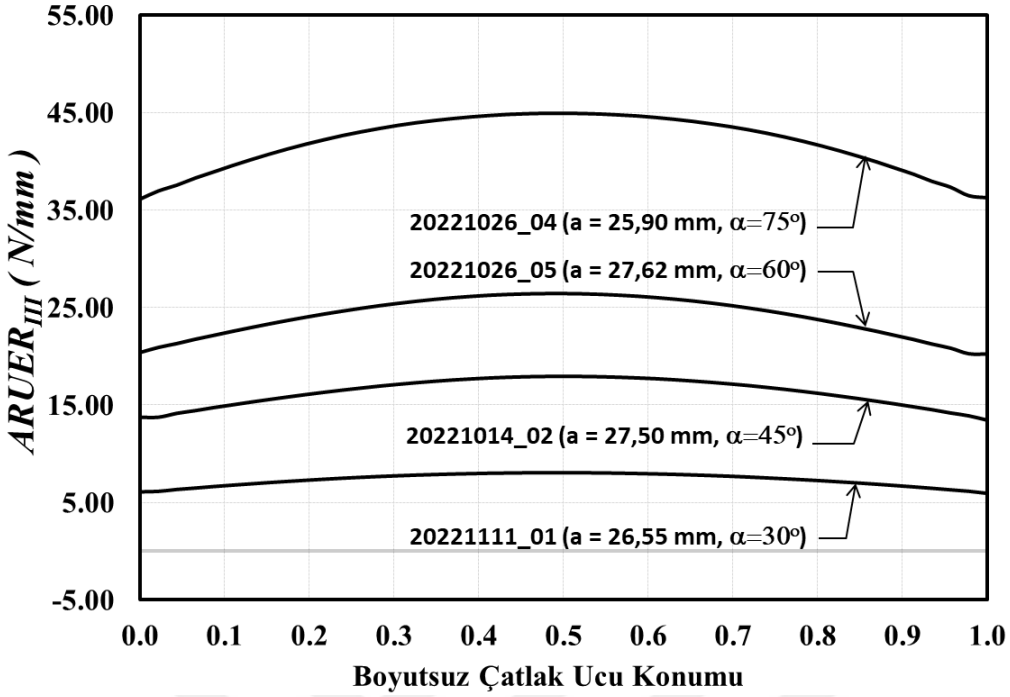
Şekil 5.32. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



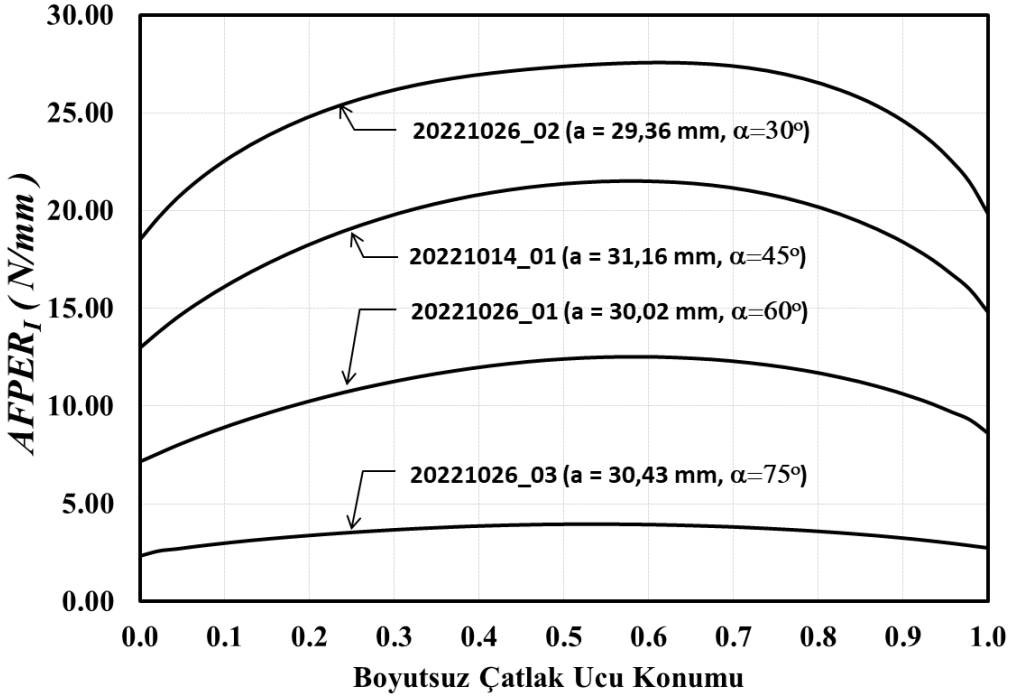
Şekil 5.33. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



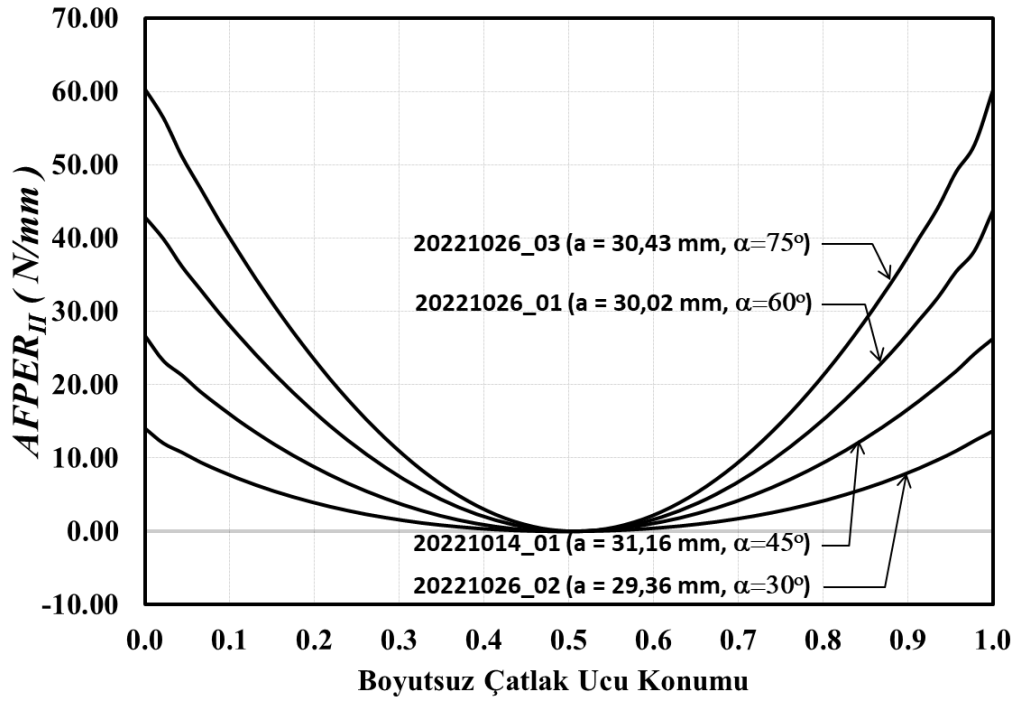
Şekil 5.34. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



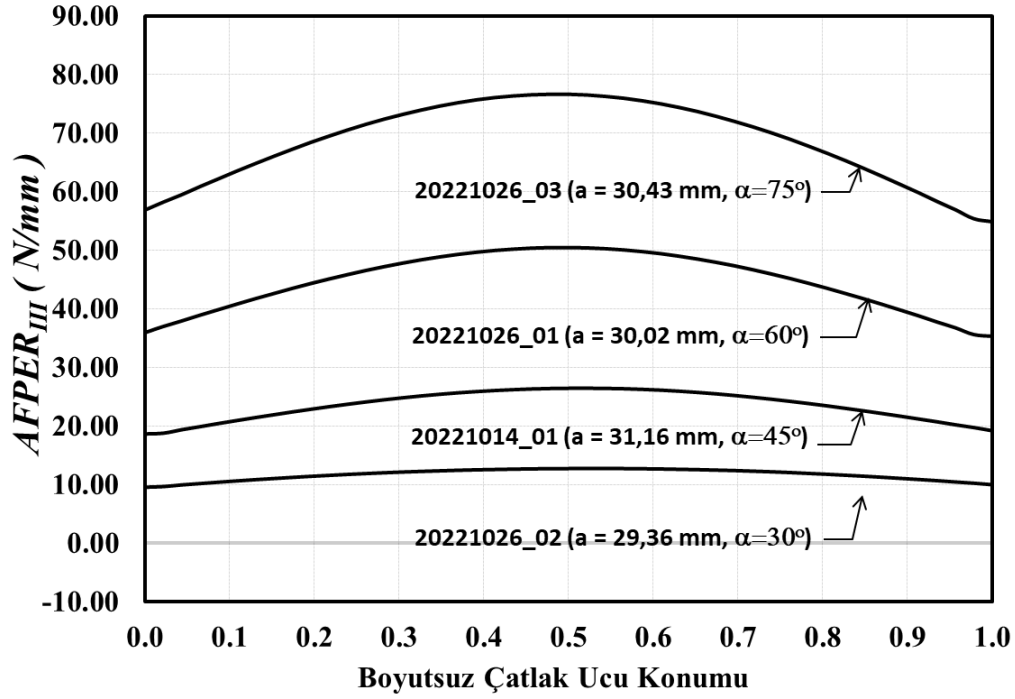
Şekil 5.35. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



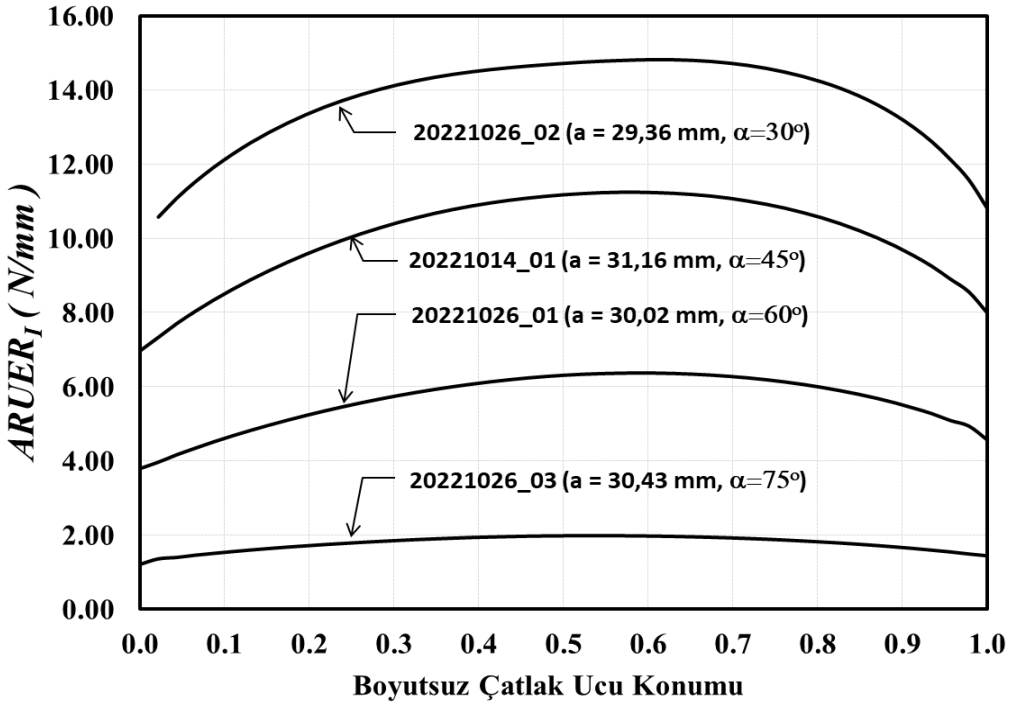
Şekil 5.36. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



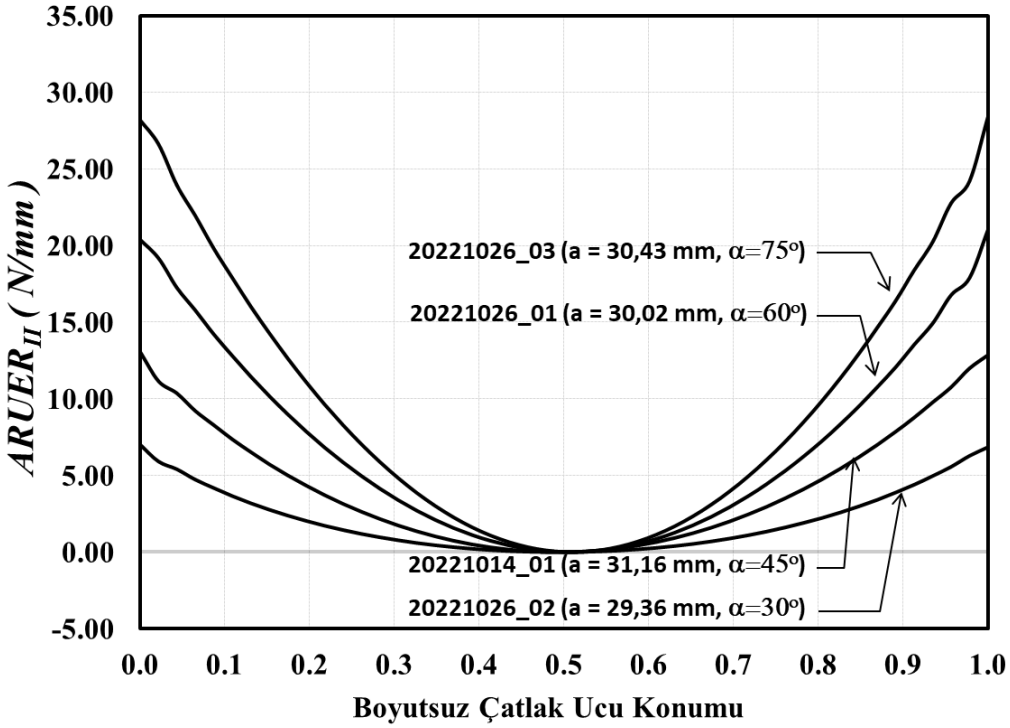
Şekil 5.37. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



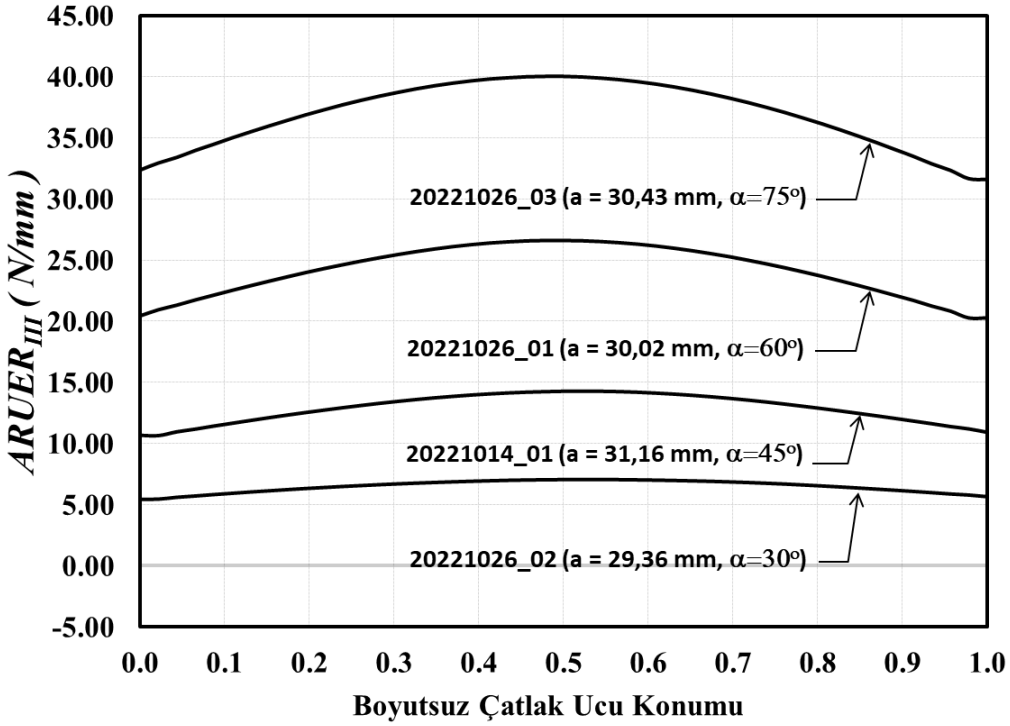
Şekil 5.38. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



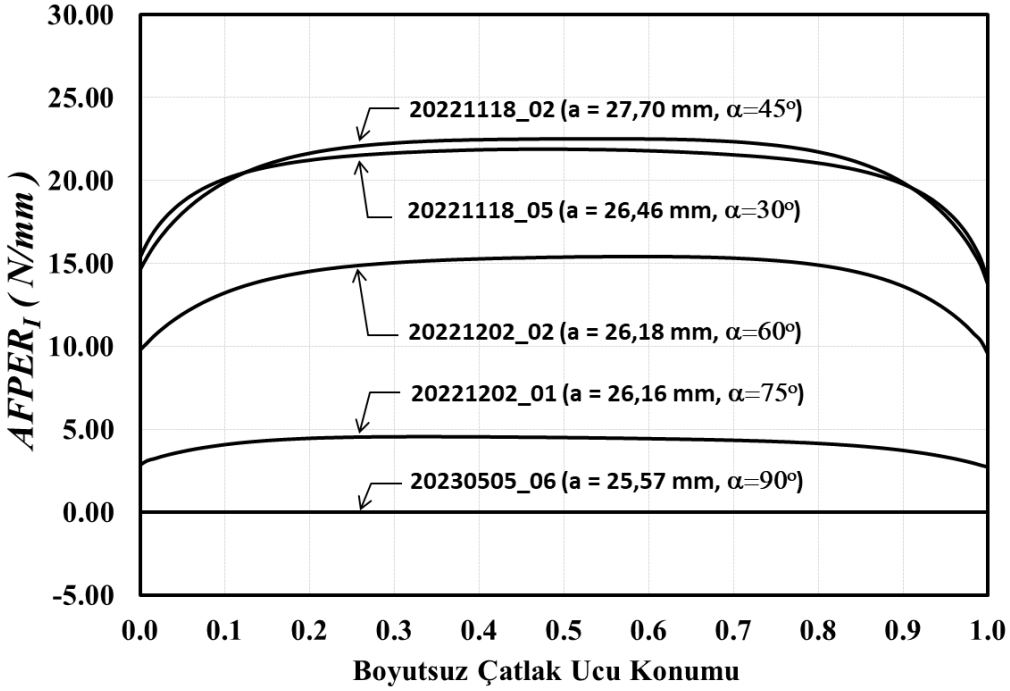
Şekil 5.39. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



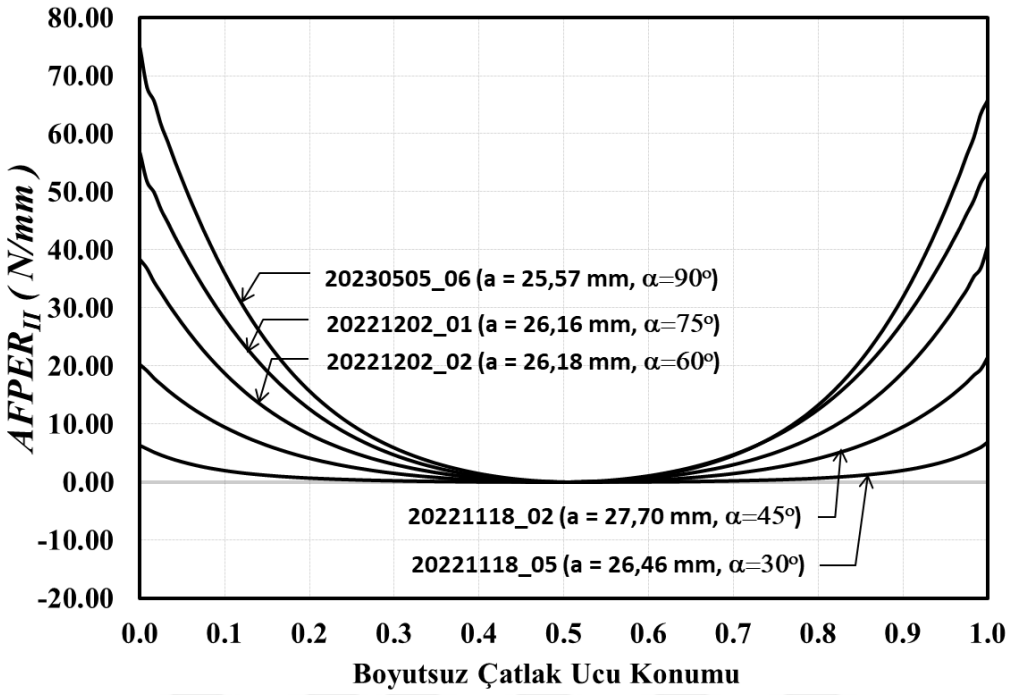
Şekil 5.40. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



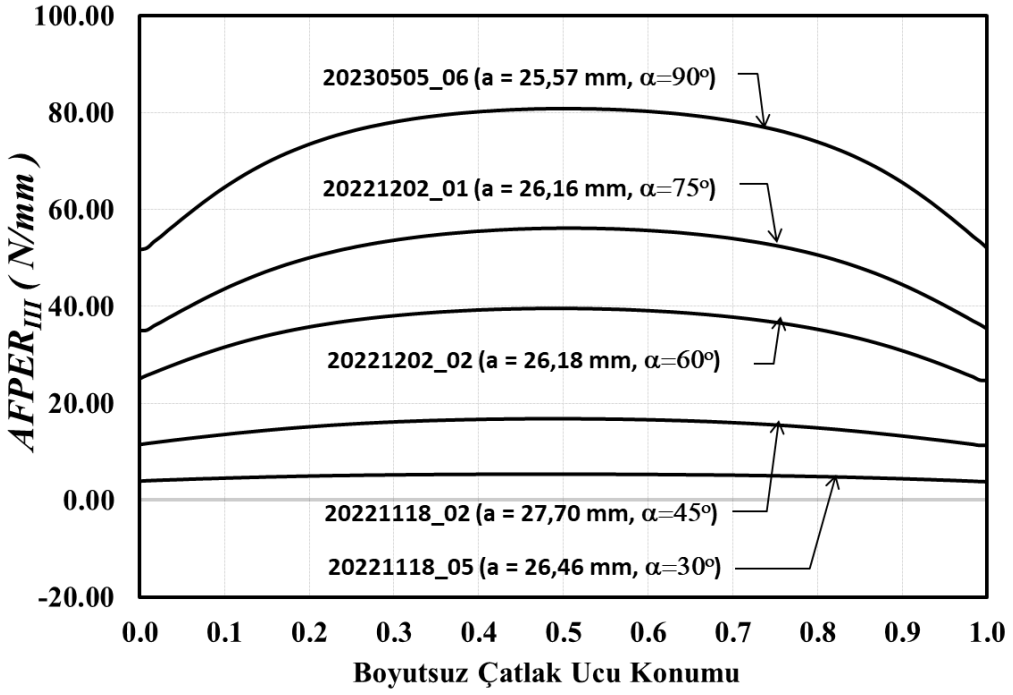
Şekil 5.41. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



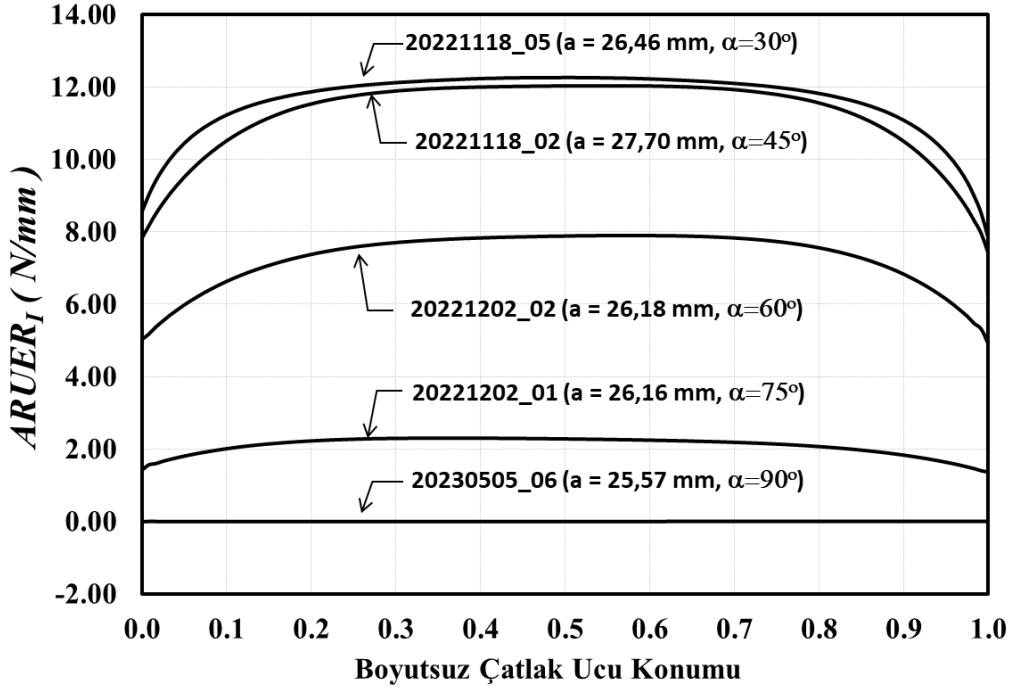
Şekil 5.42. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



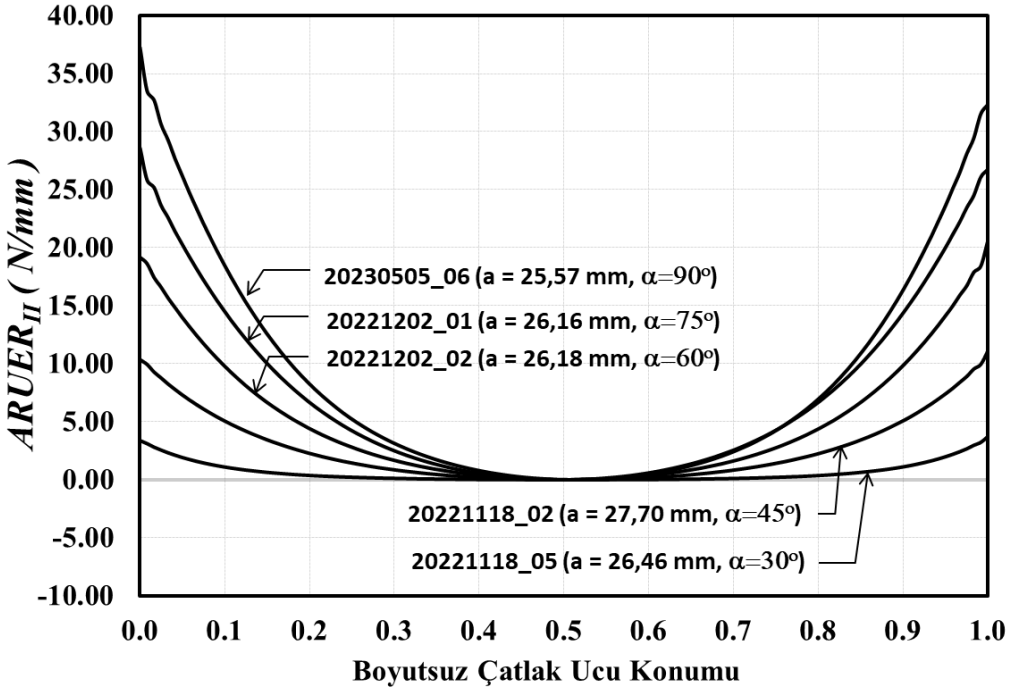
Şekil 5.43. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



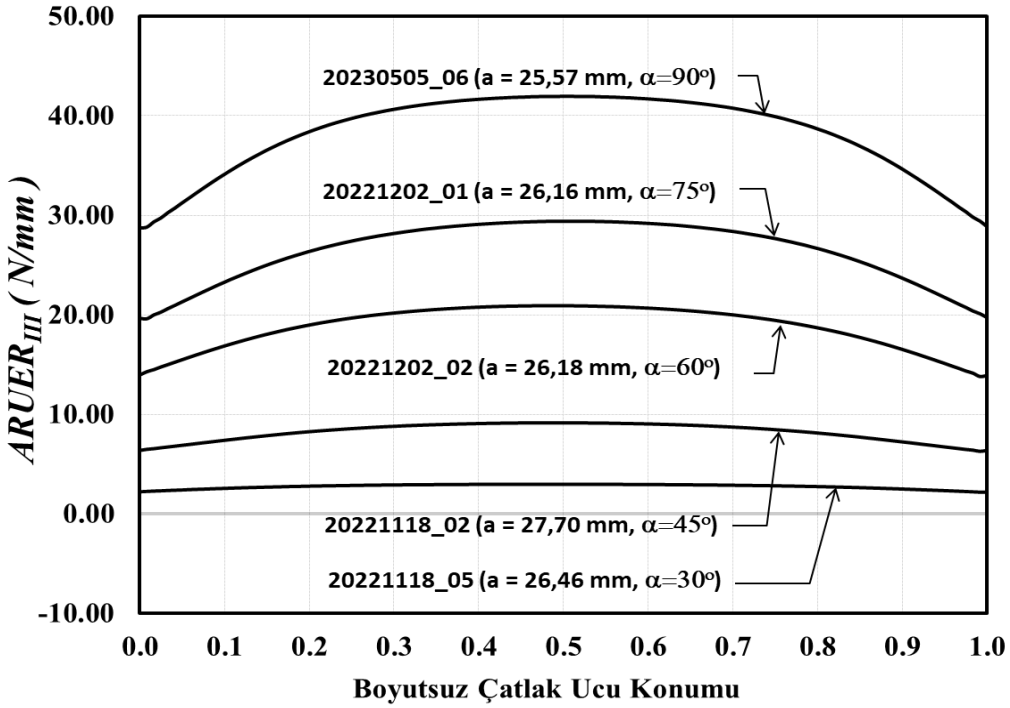
Şekil 5.44. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



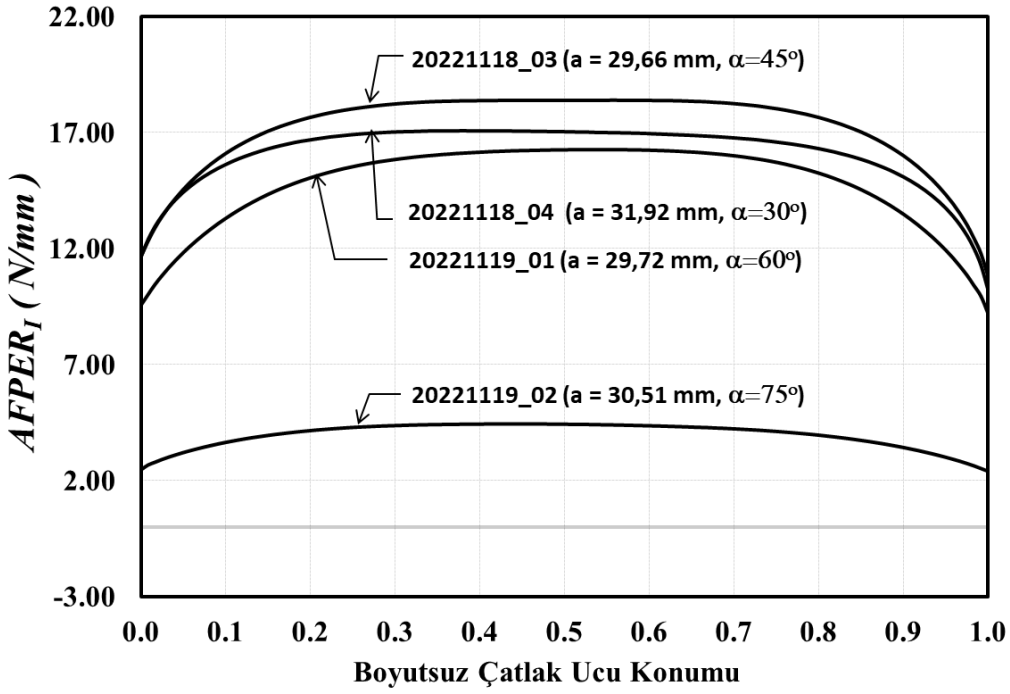
Şekil 5.45. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



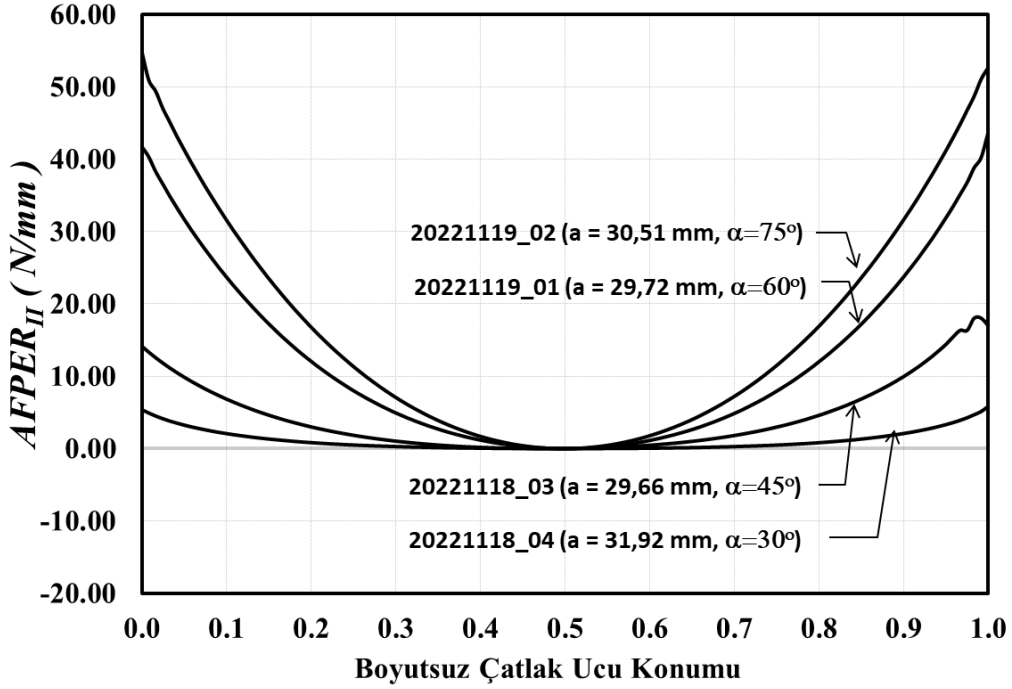
Şekil 5.46. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



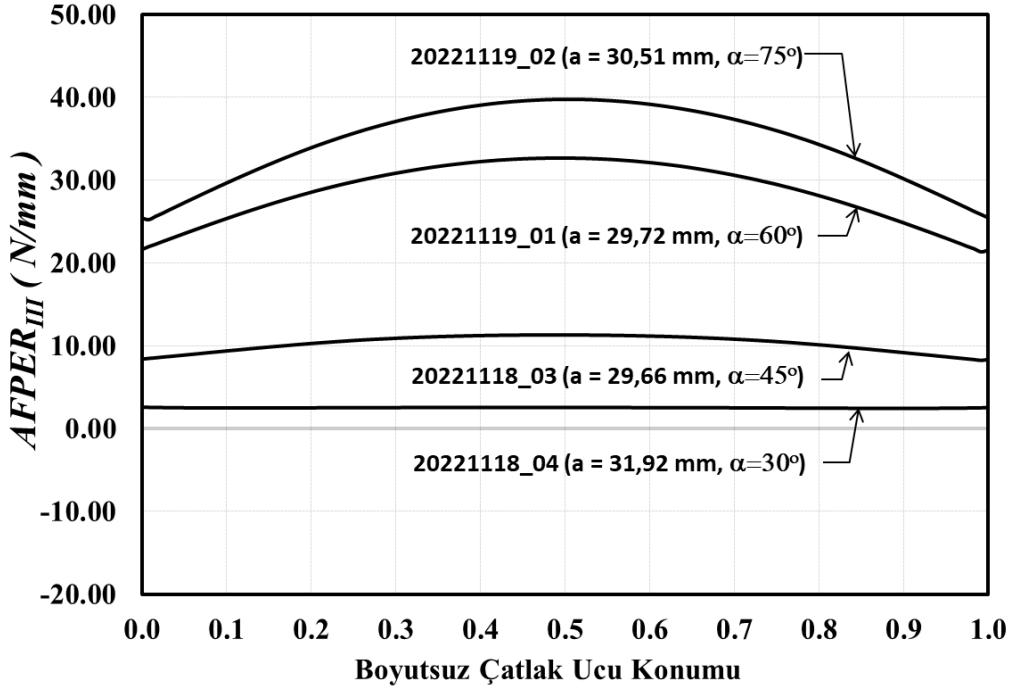
Şekil 5.47. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



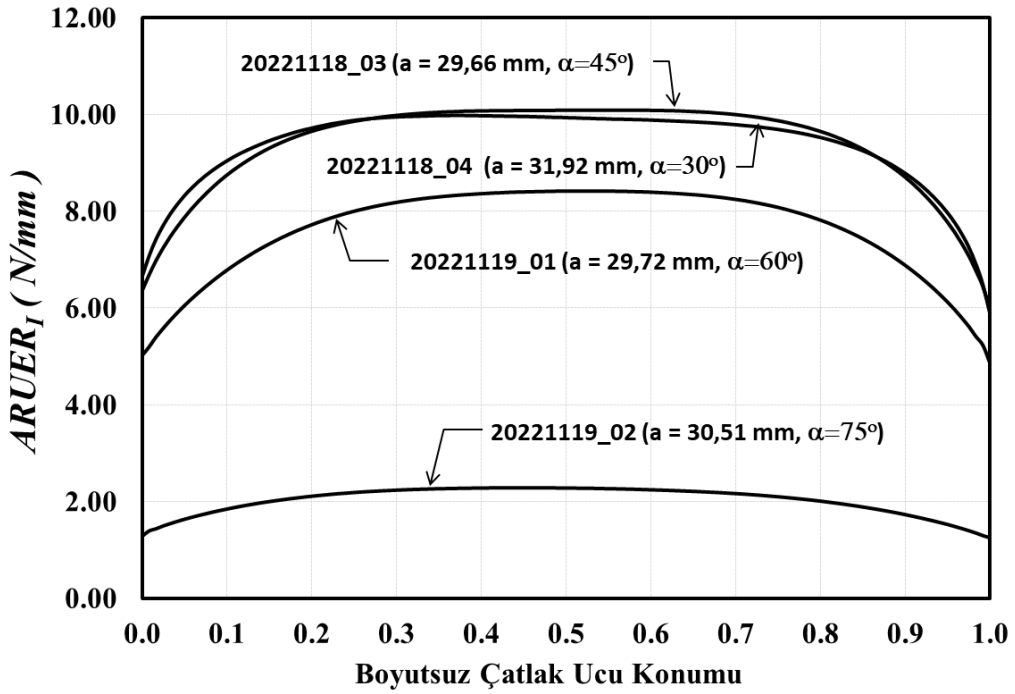
Şekil 5.48. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



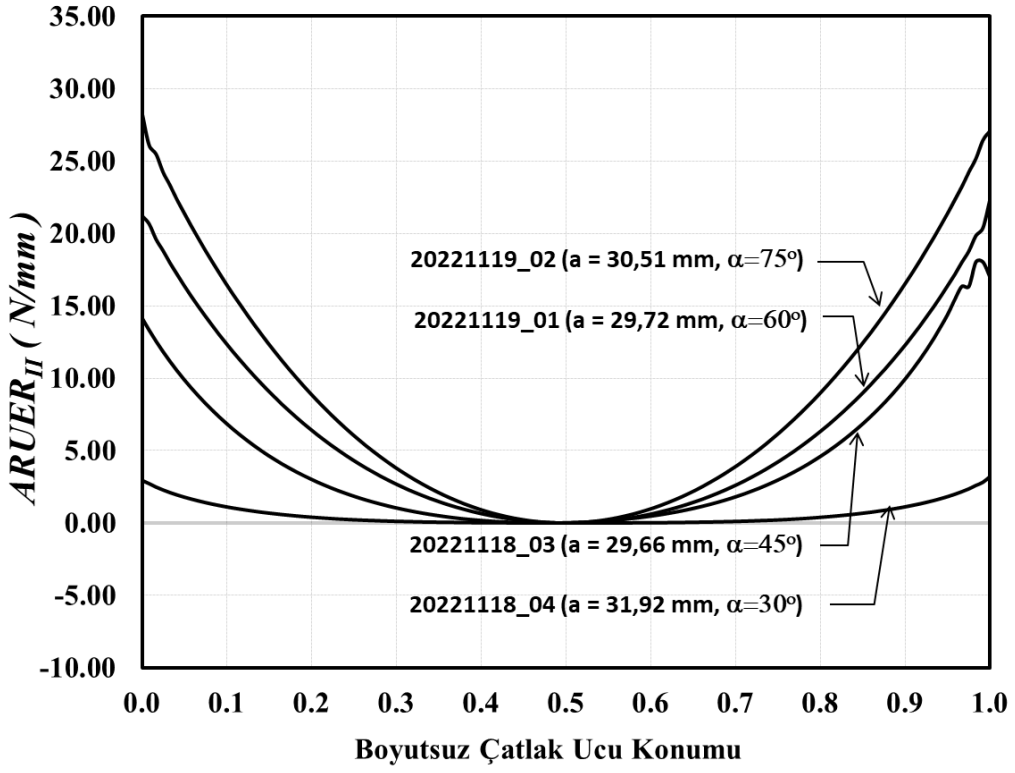
Şekil 5.49. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



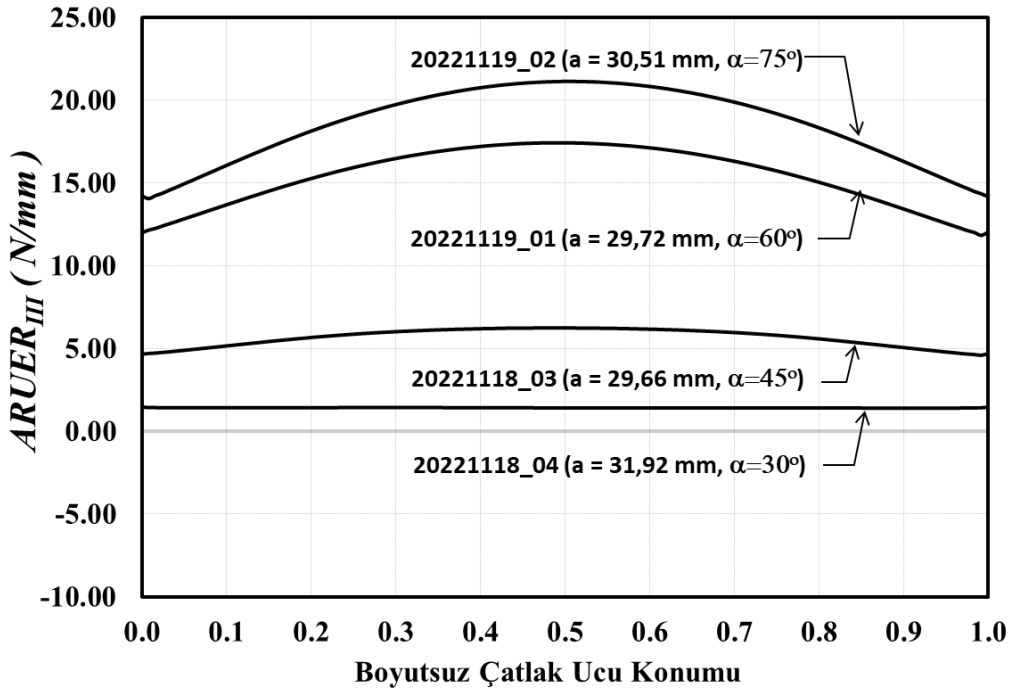
Şekil 5.50. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



Şekil 5.51. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



Şekil 5.52. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



Şekil 5.53. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.

Tablo 5.3 Mod-I/III kırılma analizleri sonucu çatlak önü boyunca elde edilen en yüksek AFPER ve ARUER değerleri.

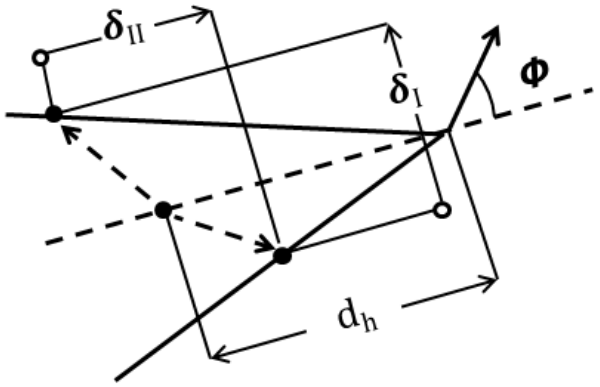
Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	$AFPER_I$ (N/mm)	$AFPER_{II}$ (N/mm)	$AFPER_{III}$ (N/mm)	$ARUER_I$ (N/mm)	$ARUER_{II}$ (N/mm)	$ARUER_{III}$ (N/mm)
20221014_02	10 mm	45º	11.43	31.84	24.03	6.05	15.64	13.74
20221014_01	10 mm	45º	14.80	26.68	18.69	7.99	13.08	10.68
20221026_01	10 mm	60º	8.61	43.78	35.36	4.57	21.02	20.28
20221026_02	10 mm	30º	19.83	14.05	9.60	10.81	7.02	5.44
20221026_03	10 mm	75º	2.33	60.17	54.91	1.21	28.41	31.59
20221026_05	10 mm	60º	7.28	40.61	35.27	3.80	19.54	20.22
20221111_01	10 mm	30º	16.33	15.07	10.68	8.82	7.64	6.09
20221026_04	10 mm	75º	2.39	55.81	64.34	1.18	25.86	36.26
20221118_02	25 mm	45º	13.72	21.53	11.36	7.42	11.10	6.37
20221118_03	25 mm	45º	10.82	17.00	8.36	5.97	9.49	4.70
20221118_04	25 mm	30º	10.23	5.85	2.56	5.88	3.20	1.46

Tablo 5.3. (Devamı) Mod-I/III kırılma analizleri sonucu çatlak önü boyunca elde edilen en yüksek AFPER ve ARUER değerleri.

20221118_05	25 mm	30º	13.96	6.92	3.82	7.84	3.73	2.18
20221119_01	25 mm	60º	9.21	43.68	21.57	4.86	22.31	12.03
20221119_02	25 mm	75º	2.46	54.88	25.44	1.28	28.31	14.23
20221202_02	25 mm	60º	9.54	40.71	24.74	4.92	20.57	13.90
20221202_01	25 mm	75º	2.84	56.70	35.01	1.41	28.60	19.65
20230505_06	25 mm	90º	0.00	74.77	51.73	0.00	37.25	28.73

5.3.1. Mod-I/III Analizleri için Çatlak Sapma Açısı Hesaplama [57]

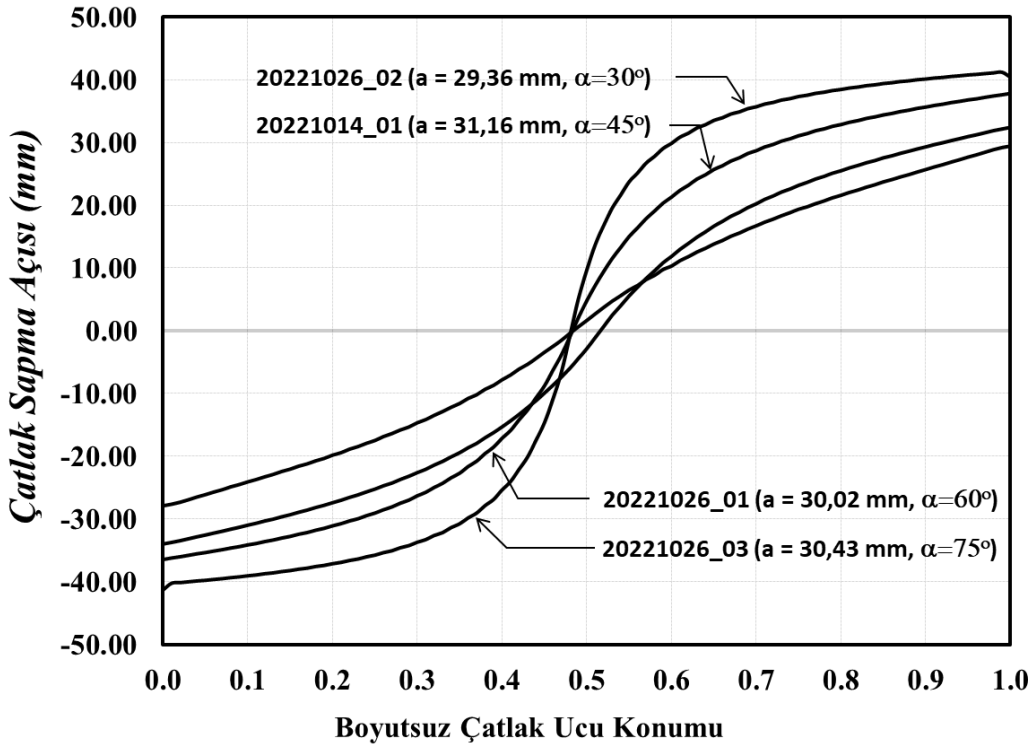
Bu bölüm içerisinde gevrek ve sünek malzemelerin mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrası kırılma yüzeylerindeki açı farkları incelenmiştir. Şekil 3.28, gevrek bir malzeme olan AL-7075 ve sünek özellik gösteren Al-2024'ten yapılmış numunelerin kırılma tokluğu testleri sonrası numune sırtından görüntülerini göstermektedir. Malzemenin sünek-gevrek davranışının doğrudan kırılma yüzeyini etkilediği bilinmektedir. Gevrek malzemelerde çatlak sapma açılarının hesaplanması için literatürde formülasyonlar yer almakta ve benzeri problemlerde kullanılmaktadır. Ancak sünek malzemeler için bu açıyı hesaplayan çalışma sayısı azdır. Bu doğrultuda Floros ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışma detaylı olarak incelenmiştir [57]. Çalışma çatlak ucu düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri temel alarak çatlak sapma açısını sünek malzemeler için hesaplamaktadır. Denklem 5.1, sünek malzemeler için çatlak sapma açısı hesaplama formülasyonunu vermektedir. Mod-I/III problemleri için sonlu elemanlar analizinden hesaplanan yerdeğiştirme değerleri Denklem 5.1'de yerine koyularak, çatlak sapma açıları hesaplanabilmektedir. Şekil 5.54'te, örnek olarak, kalınlığı 10 mm, çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm olan numunelerde 30, 45, 60 ve 75 derece mod-I/III yükleme açıları için hesaplanan çatlak önü boyunca sapma açıları verilmektedir. Gevrek malzemelerde çatlak saplama açısının yükleme açısına çok yakın olarak gerçekleştiği bilinmektedir. Sünek bir malzeme olan Al-2024 ile için hesaplanan değerlerde %40'a yakın seviyeler gözükmektedir. Gerçekte ise bu açılar sünek malzemeler için çok daha düşüktür.



Şekil 5.54. Çatlak ucu yerdeğiştirmelerin ve çatlak sapma açısı hesaplaması için kullanılan terimlerin gösterimi [58].

$$\Phi = arcsin\frac{\delta_{II}}{\delta} \tag{5.1}$$

$$\delta = \sqrt{{\delta_{II}}^2 + 2\delta_I|\delta_{II}| + 2{\delta_{II}}^2} \tag{5.2}$$



Şekil 5.54. Çatlak sapma açısı hesaplamaları [58].

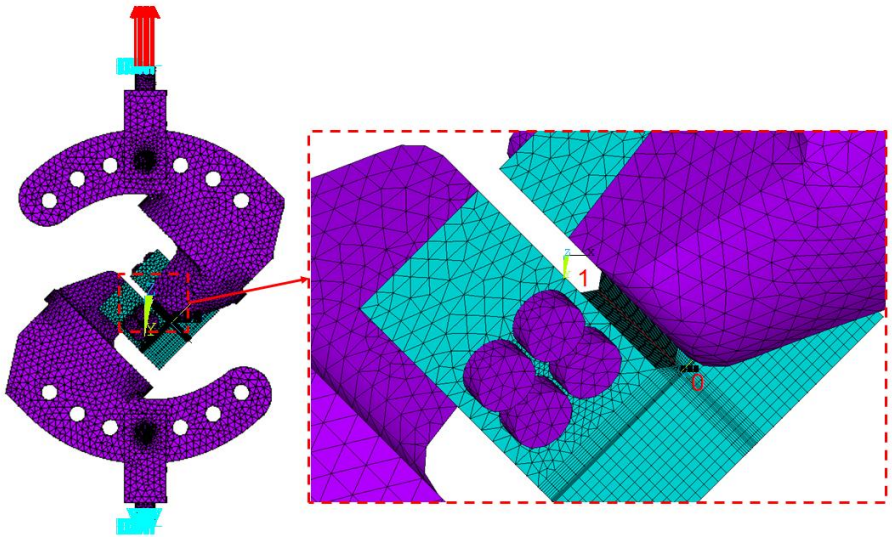
5.4. Mod-I/II/III Kırılma Analizleri AFPER ve ARUER Sonuçları

Bu kısımda mod-I/II/III kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak boyu ve kırılma yükü bilgileri ile oluşturulan sonlu elemanlar modellerinden, AFPER ve ARUER

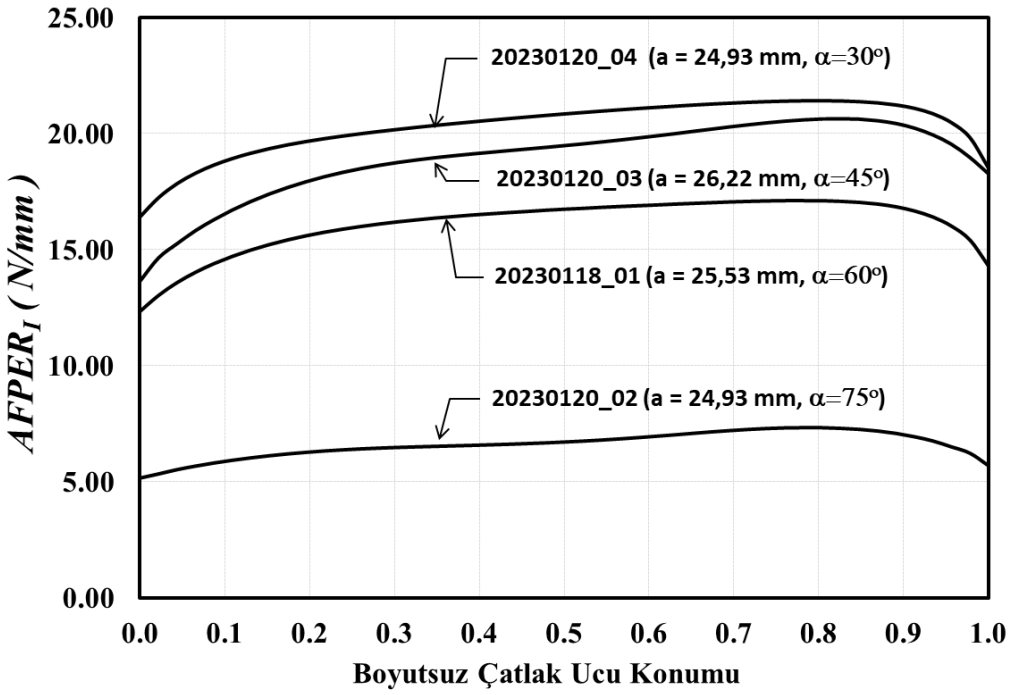
değerlerinin hesaplanması aşamaları sunulacaktır. Şekil 5.56'da mod-I/II/III problemleri için kullanılan CTST numunesi ve tutucusunun sonlu elamanlar ağ yapısı gösterilmektedir. Modelleme aşamasında 20 düğüm noktalı Solid-186 elemanı kullanılmıştır. Çatlak ucu civarında 0.2 mm boyuta sahip küp elemanlar kullanılmaktadır. Diğer kısımlar ise 4 mm tetrahedral elemanlar ile modellenmiştir. Analizde tutucu için elastik modülü E = 210 GPa, poisson oranı v = 0.30 CTST numunesi için elastik modülü E = 71.3 GPa, poisson oranı v = 0.33 tanımlanmıştır. Ayrıca malzeme kartı içerisine Şekil 3.4'te belirtilen mühendislik gerilme-şekil değişimi eğirisi 'mises plastisity' özellikleri seçilerek tanımlanmıştır. Pim-tutucu ve pim-numune arası ise lineer olmayan temas yüzeyi ile modellenmiştir. Kullanılan sürtünmeli temas yüzeylerinde sürtünme katsayısı 0.4 olarak alınmıştır. Tablo 3.4'te verilen test sonuçları, farklı çatlak boyu, numune kalınlığı ve doğrulama çalışmaları için gerçekleştirilen testlere dairdir. Doğrulama testleri dışındaki tüm testlerin sonlu elemanlar modelleri hazırlanmış, AFPER ve ARUER değerleri hesaplanmıştır. Şekil 5.56'da, mod-II/III açısı 30^o , kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık 25 mm olan problemler için mod-I AFPER sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan $AFPER_I$ değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Şekil 5.57'te, mod-II/III açısı 30^o kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için Mod-II AFPER sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan $AFPER_{II}$ değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.58'te, mod-II/III açısı 30^o, kalınlığı 10 mm ve çatlak boyu yaklaşık olarak 25 mm olan problemler için Mod-III AFPER sonuçları gösterilmektedir. Mod-I/III yükleme açısı arttıkça hesaplanan $AFPER_{III}$ değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Mod-I , mod-II ve mod-III yönündeki benzer eğilim kalınlık ve çatlak boyuna göre sınıflandırılan tüm AFPER ve ARUER grafiklerde görülmektedir. Bu eğilimi etkileyen tek parametre ise çatlak boyları arasındaki farktır. Şekil 5.59'da, mod-II/III açısı 30^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.60'da, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.61'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.62'te, mod-II/III açısı 30^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 5.63'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.64'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.65'te, mod-II/III açısı 30^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.66'da, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.67'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.68'te, mod-II/III açısı 45^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı

problemler için $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 5.69'da, $AFPER_{II}$ sonuçları, şekil 5.70'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.71'te mod-II/III açısı 45^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.72'te, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.73'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.74'te, mod-II/III açısı 45^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 5.75'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.76'da ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.77'te, mod-II/III açısı 45^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.78'te, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.79'da ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.80'da, mod-II/III açısı 60^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 5.81'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.82'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.83'te, mod-II/III açısı 60^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.84'te, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.85'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.86'da, mod-II/III açısı 60^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 5.87'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.88'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.89'da, mod-II/III açısı 60^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.90, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.91'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.92'te, mod-II/III açısı 75^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 5.93'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.94'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.95'te, mod-II/III açısı 75^o, 25 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.96'da, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.97'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.98'da mod-II/III açısı 75^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 5.99'da, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.100'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.10'te, mod-II/III açısı 75^o, 30 mm civarı çatlak barındıran 10 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.102'te, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.103'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.104'da, mod-II/III açısı 30^o, farklı boylarda çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_I$ sonuçları, şekil 5.105'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, şekil 5.106'da ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.107'te, mod-II/III açısı 30^o, farklı boylarda çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 5.108'te, $ARUER_{II}$ sonuçları, şekil 5.109'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir.

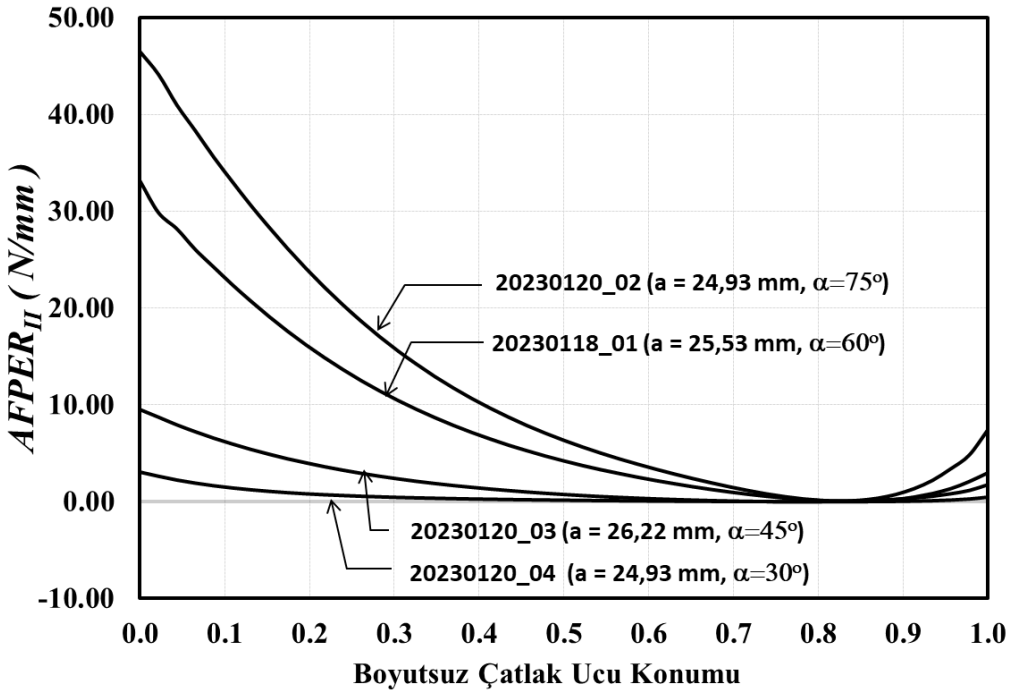
Şekil 5.110'te, mod-II/III açısı 45^{o}, farklı boylarda çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_{I}$ sonuçları, şekil 5.111'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, şekil 5.112'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.113'te, mod-II/III açısı 45^{o}, farklı boylarda çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_{I}$ sonuçları, Şekil 5.114'te, $ARUER_{II}$ sonuçlarını, Şekil 5.115 ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.116'da mod-II/III açısı 60^{o}, 25 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_{I}$ sonuçları, Şekil 5.117'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.118'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.119'da, mod-II/III açısı 60^{o}, 25 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_{I}$ sonuçları, Şekil 5.120'te, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.12'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.122'te, mod-II/III açısı 60^{o}, 30 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_{I}$ sonuçları, Şekil 5.123'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.124'te ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.125'te, mod-II/III açısı 60^{o}, 30 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_{I}$ sonuçları, Şekil 5.126'da, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.127'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.128'te, mod-II/III açısı 75^{o}, 25 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_{I}$ sonuçları, Şekil 5.129'da, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.130'da ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.131'te, mod-II/III açısı 75^{o}, 25 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_{I}$ sonuçları, Şekil 5.132'te, $ARUER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.133'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.134'te, mod-II/III açısı 75^{o}, 30 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $AFPER_{I}$ sonuçları, Şekil 5.135'te, $AFPER_{II}$ sonuçları, Şekil 5.136'da ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.137'te, mod-II/III açısı 75^{o}, 30 mm civarı çatlak barındıran 25 mm kalınlıklı problemler için $ARUER_{I}$ sonuçları, Şekil 5.138'te, $ARUER_{II}$ sonuçları, şekil 5.139'da ise $ARUER_{III}$ sonuçlarını gösterilmektedir. Tablo 5.4'de mod-I/II/III problemleri için elde edilen çatlak önü boyunca tanımlı en yüksek AFPER ve ARUER değerlerini gösterilmektedir. Analizler, 11. nesil Intel i7-1165G7 işlemcili, 20 GB RAM içeren bilgisayarda çözdürülmüştür. Herbir mod-I/II/III analizinin çözümü yaklaşık olarak 52 saat sürmektedir. Tez kapsamında, Al 2024 T351 malzemesi için toplam 56 adet mod-I/II/III elastik-plastik kırılma analizi gerçekleştirilmiştir.



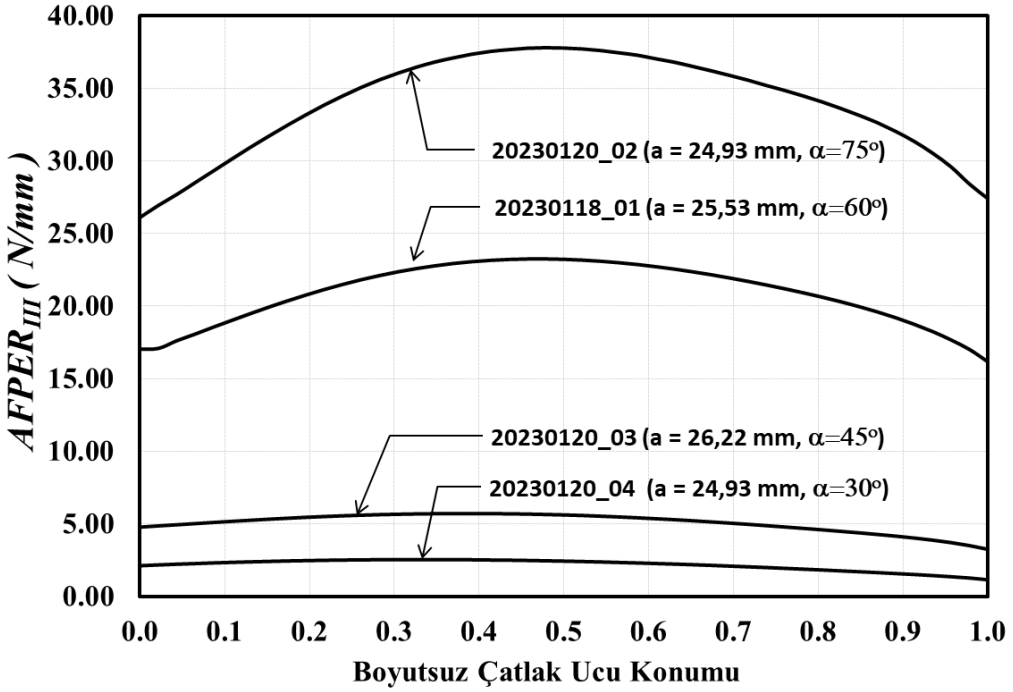
Şekil 5.55. Mod-I/II/III kırılma problemi sonlu elemanlar modeli ve CTST numunesinin yakın görüntüsü.



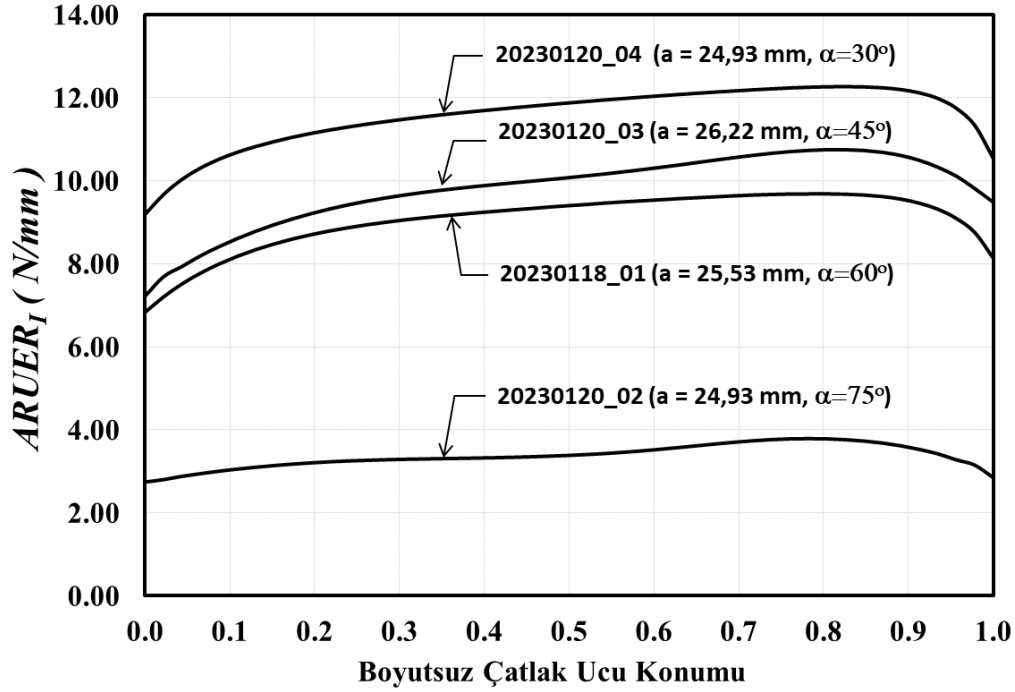
Şekil 5.56. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



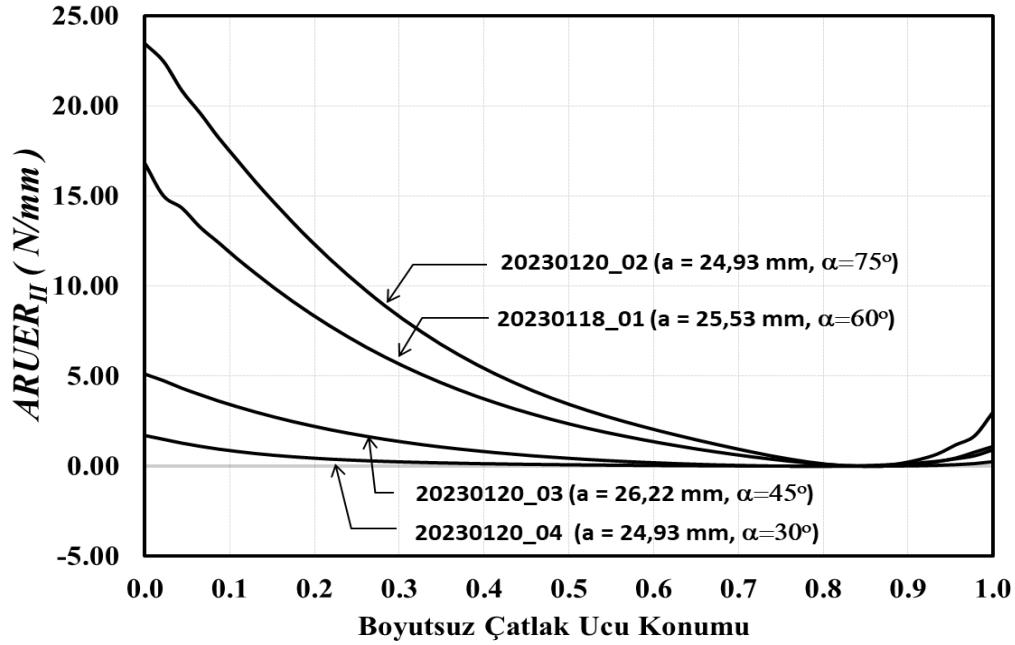
Şekil 5.57. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



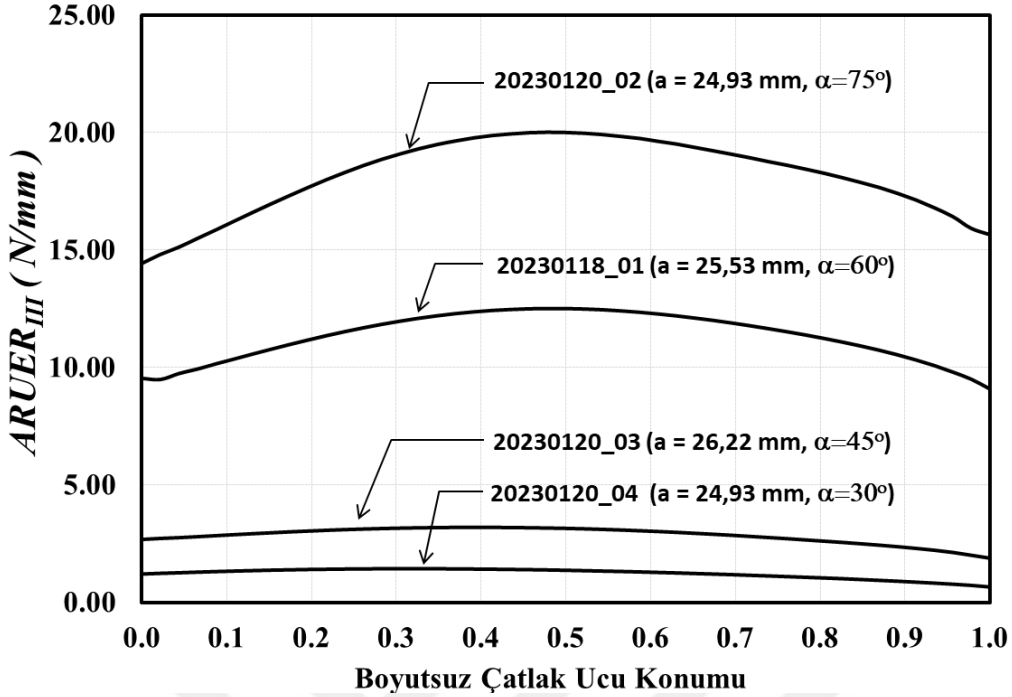
Şekil 5.58. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



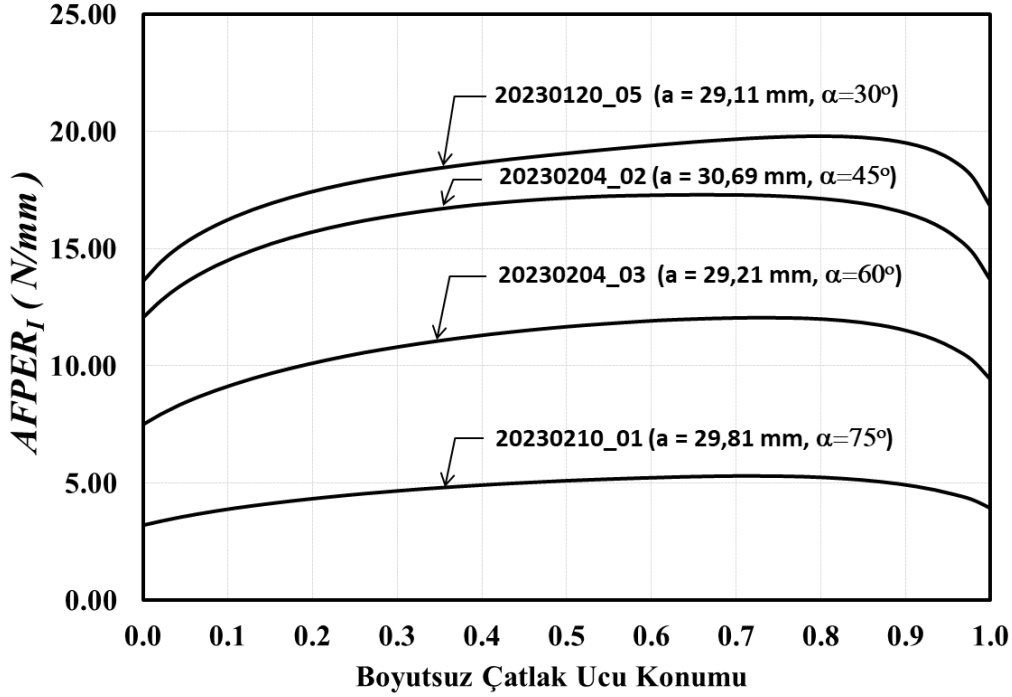
Şekil 5.59. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



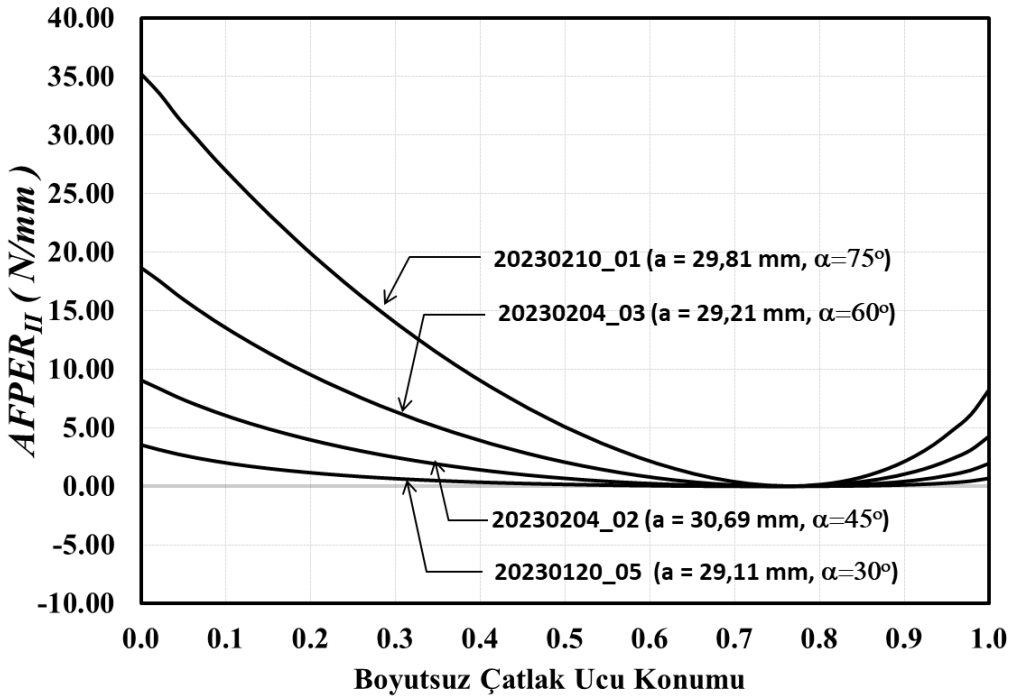
Şekil 5.60. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



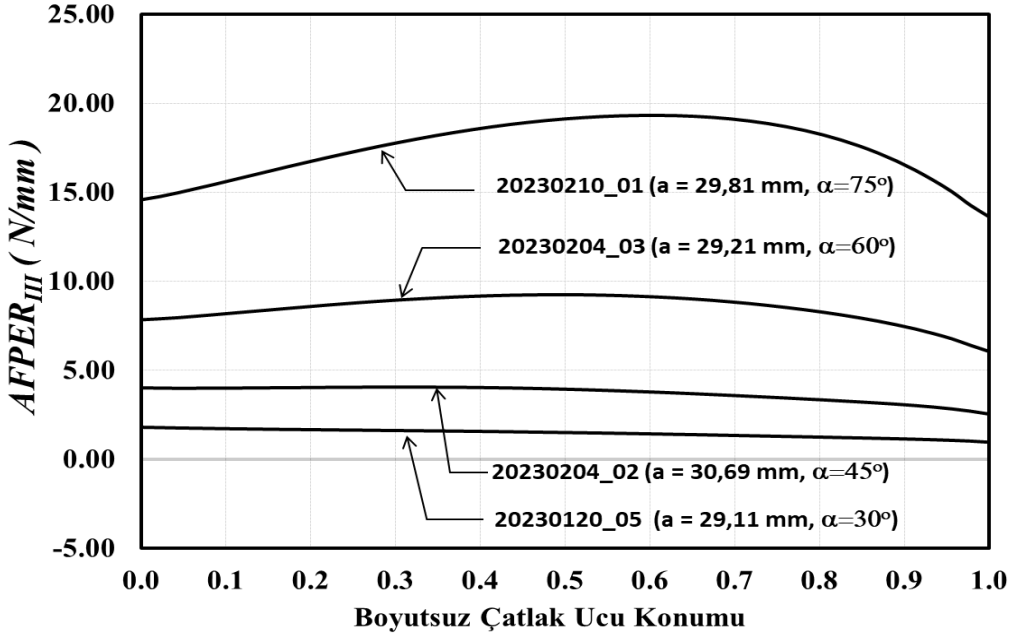
Şekil 5.61. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



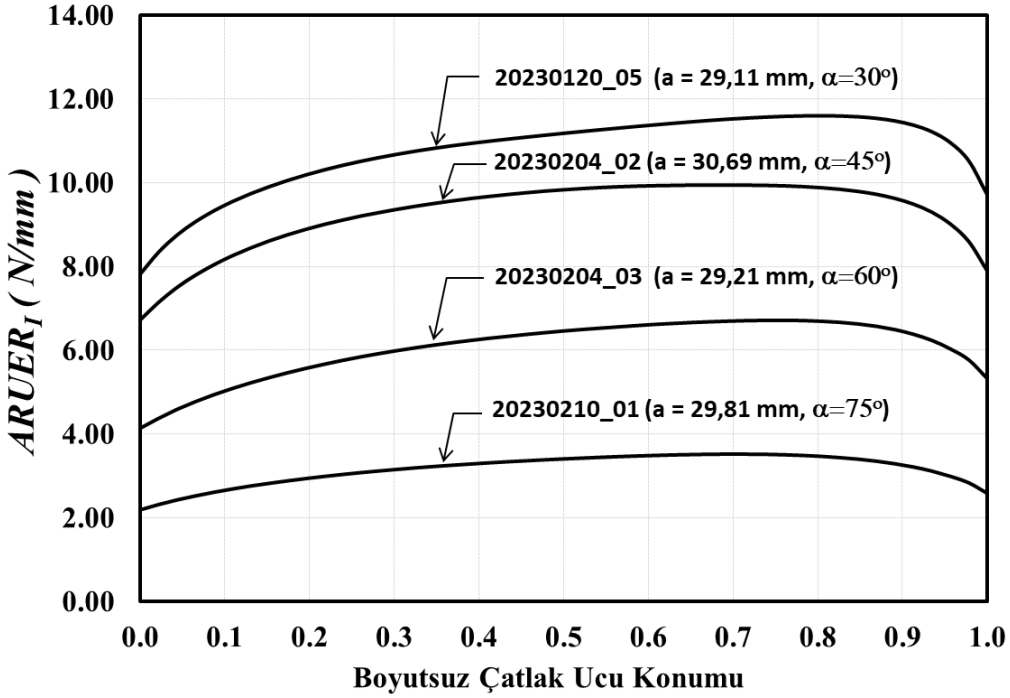
Şekil 5.62. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



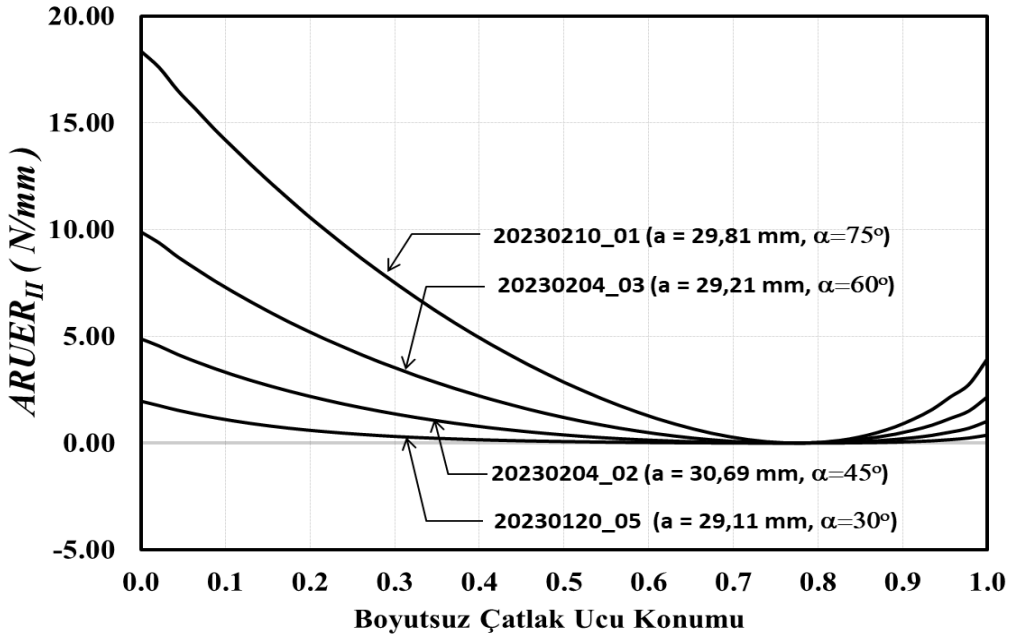
Şekil 5.63. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



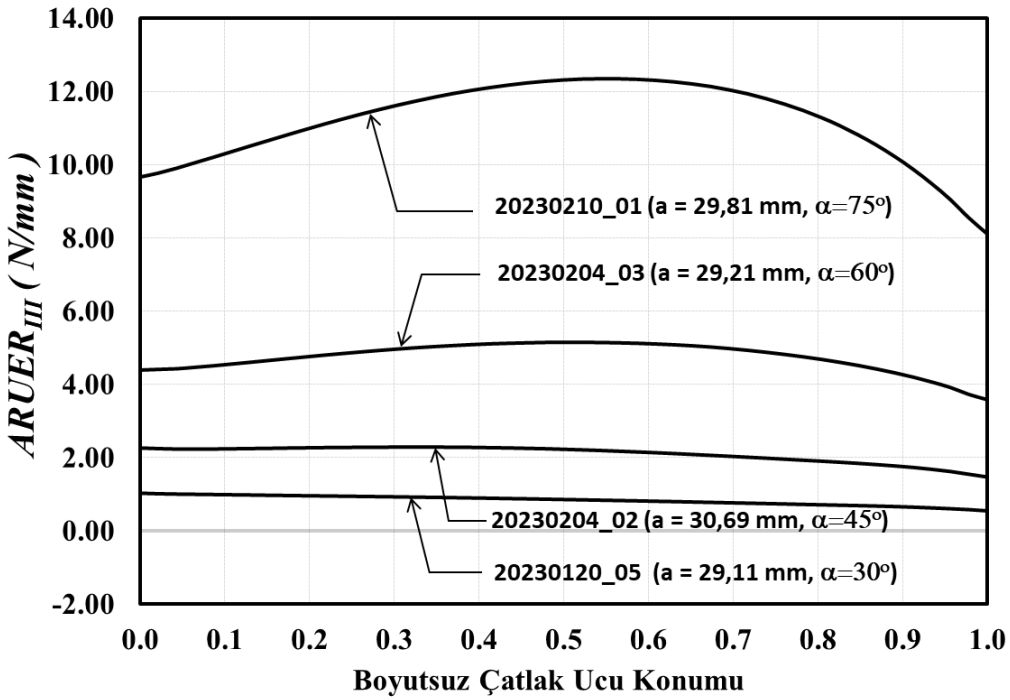
Şekil 5.64. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



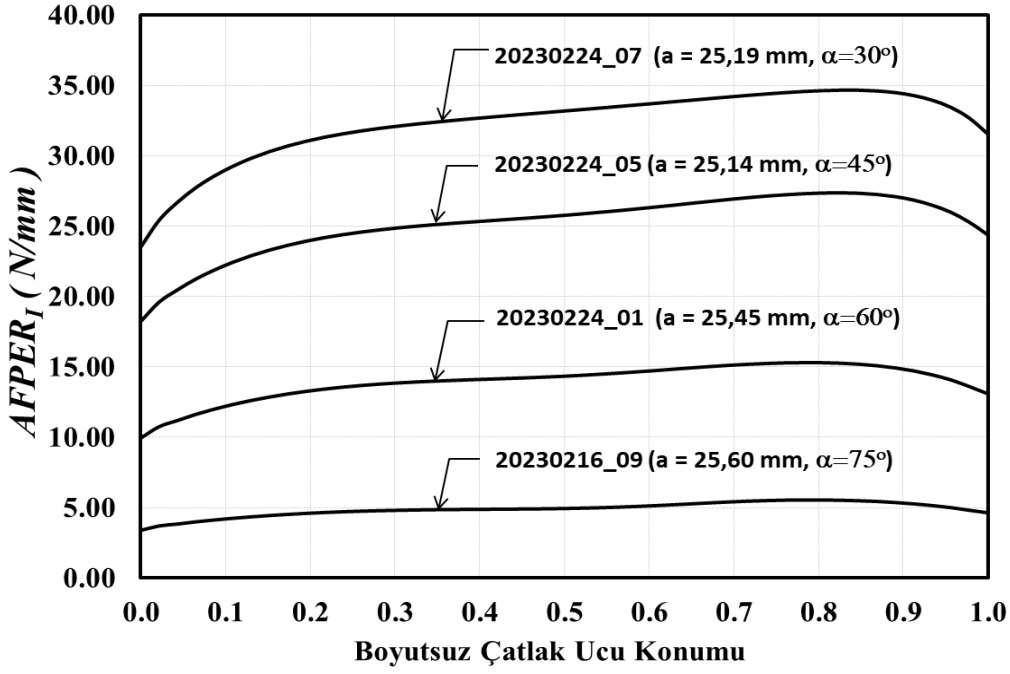
Şekil 5.65. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



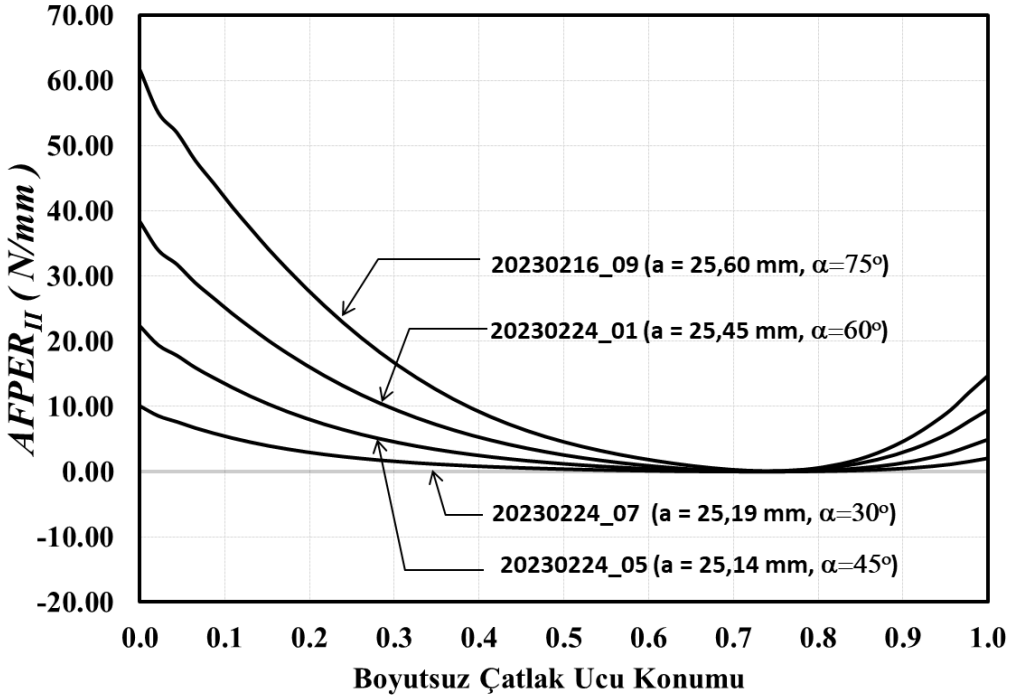
Şekil 5.66. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



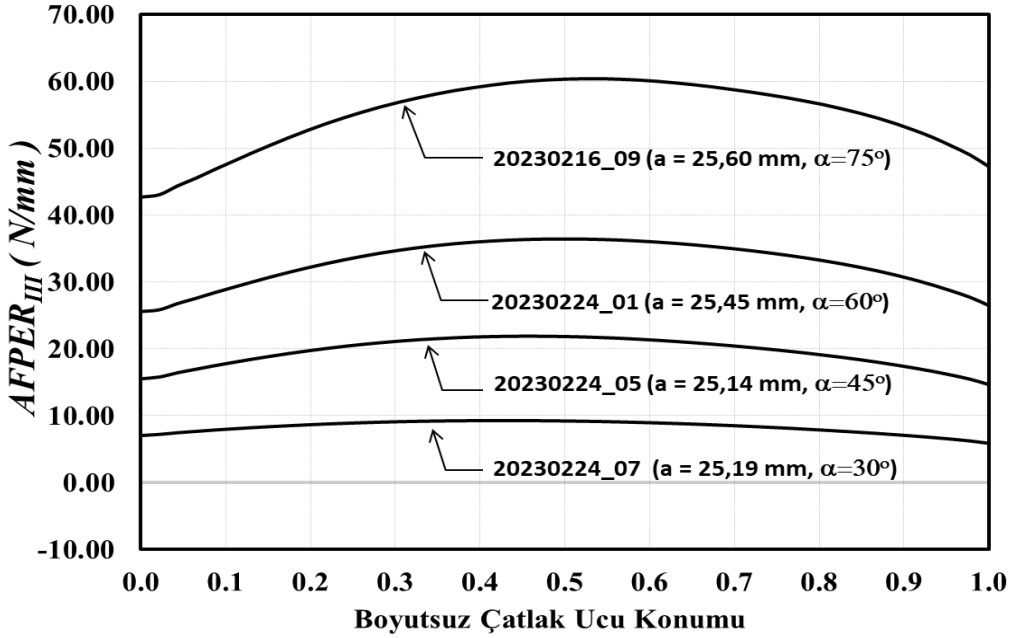
Şekil 5.67. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



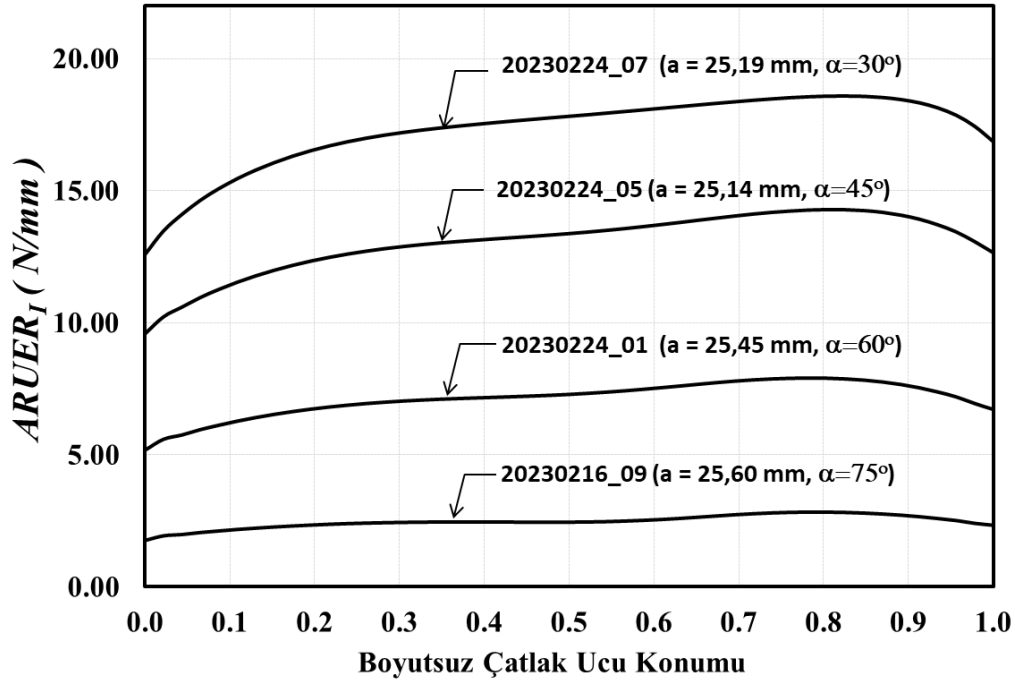
Şekil 5.68. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



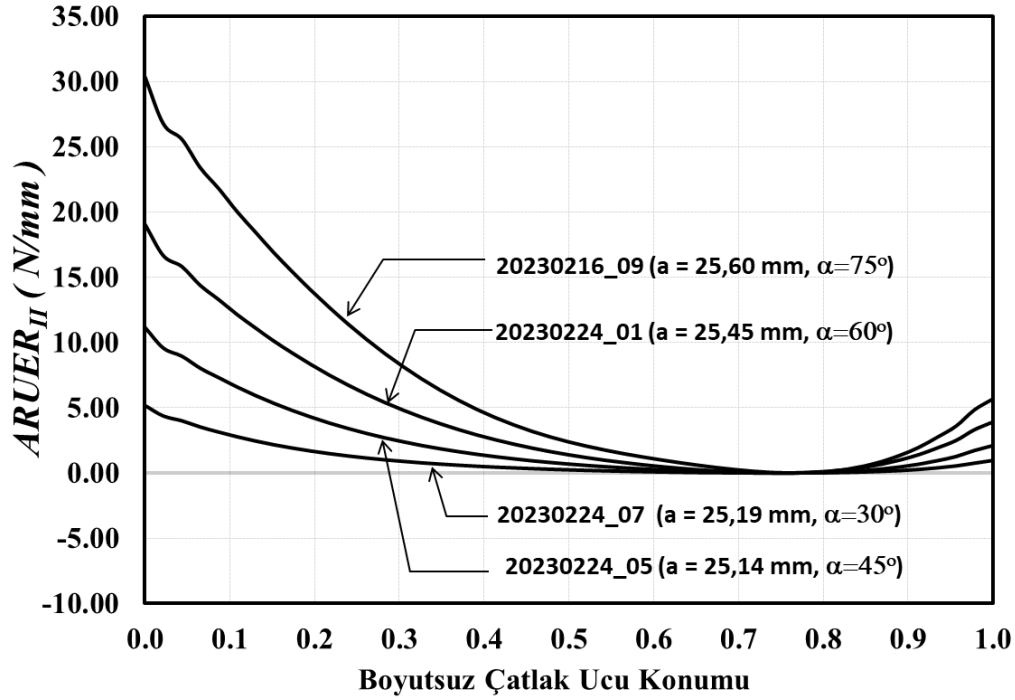
Şekil 5.69. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



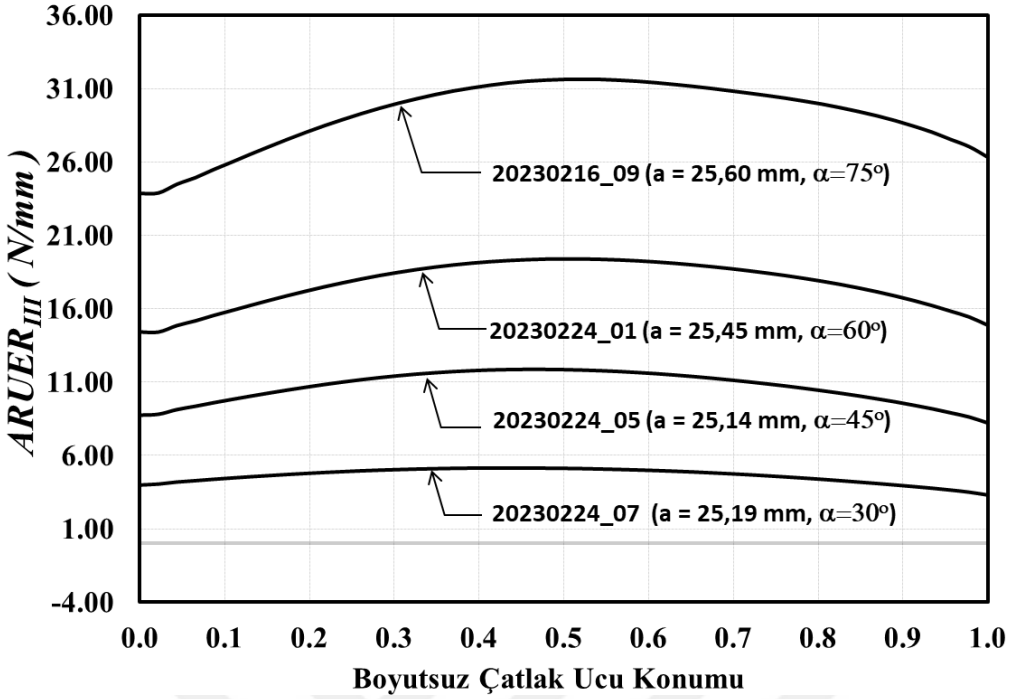
Şekil 5.70. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



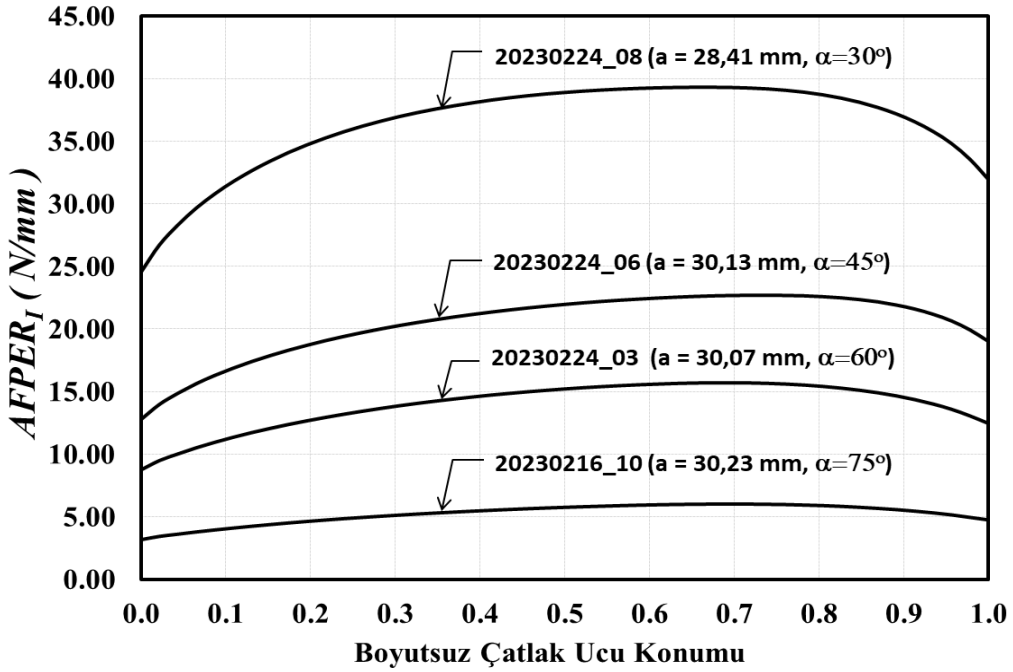
Şekil 5.71. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



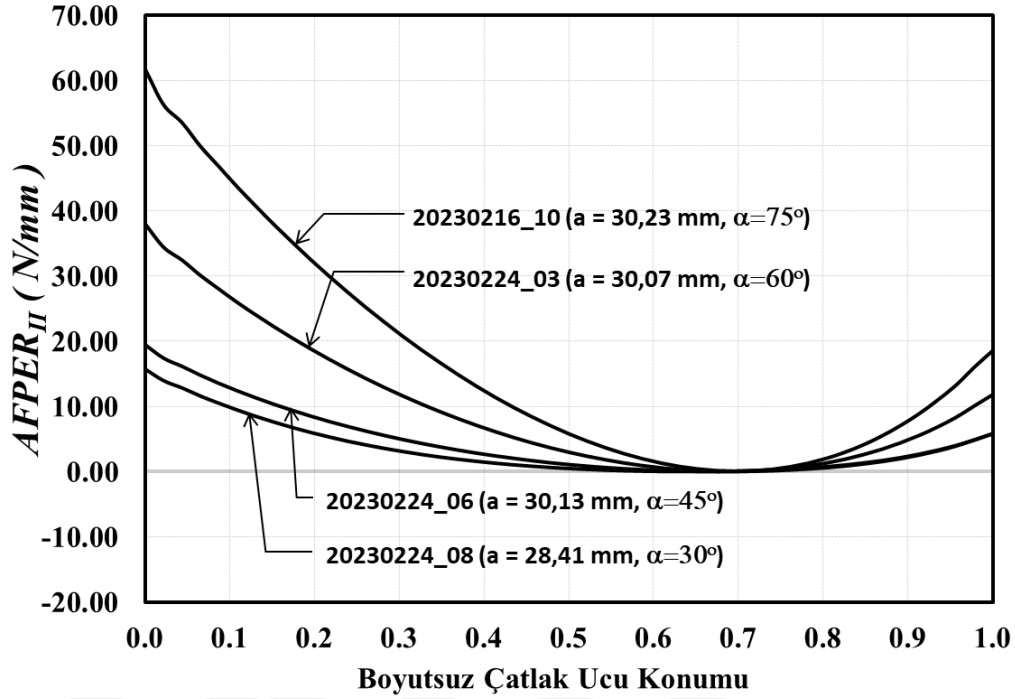
Şekil 5.72. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



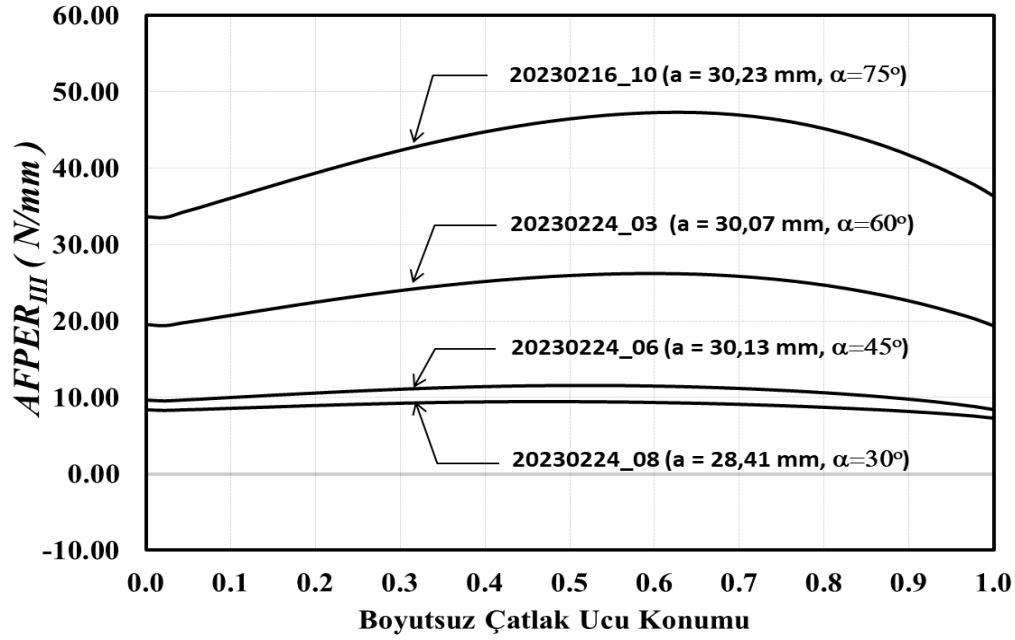
Şekil 5.73. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



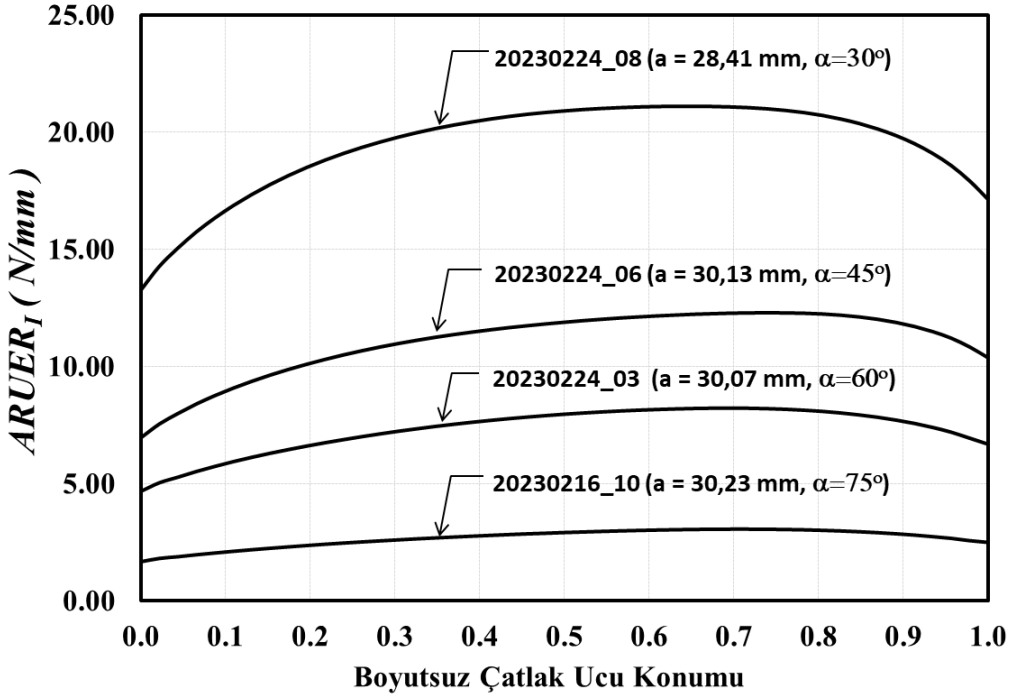
Şekil 5.74. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



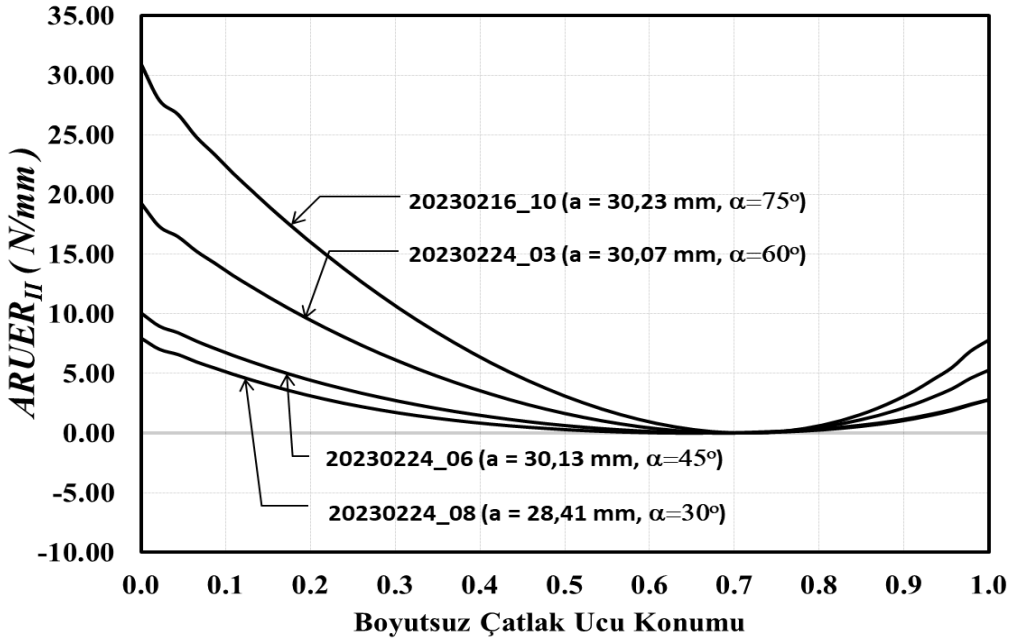
Şekil 5.75. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



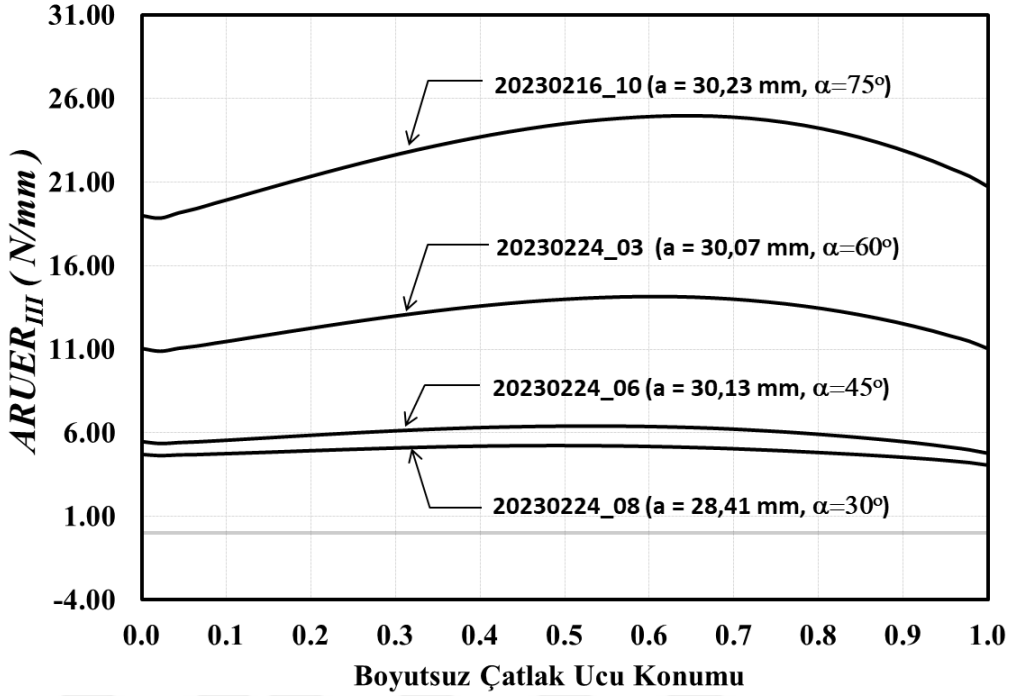
Şekil 5.76. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



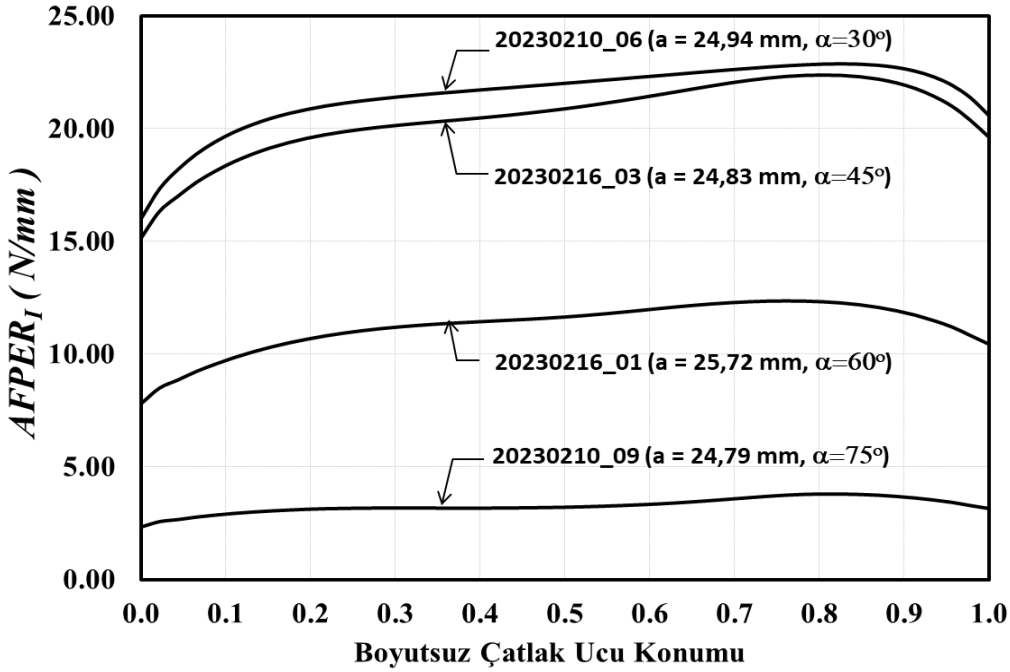
Şekil 5.77. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



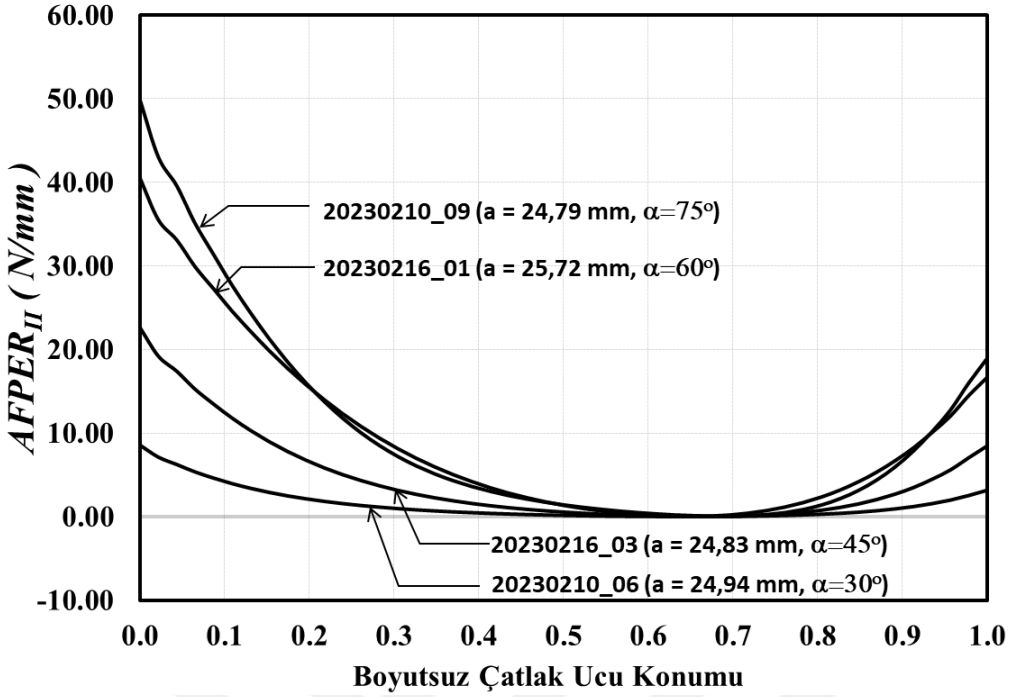
Şekil 5.78. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



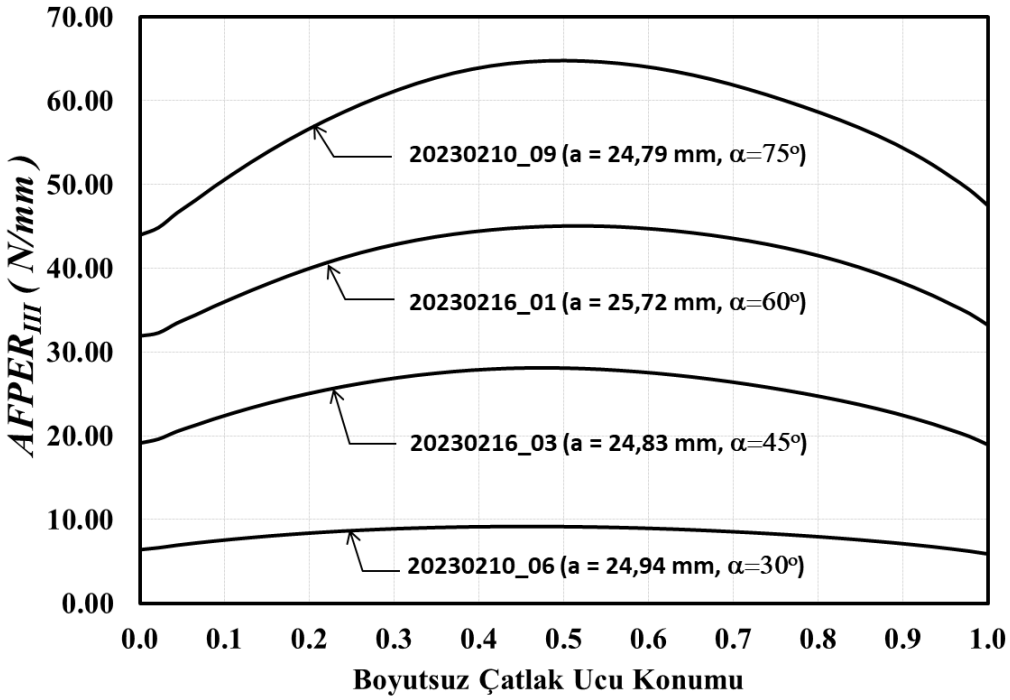
Şekil 5.79. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



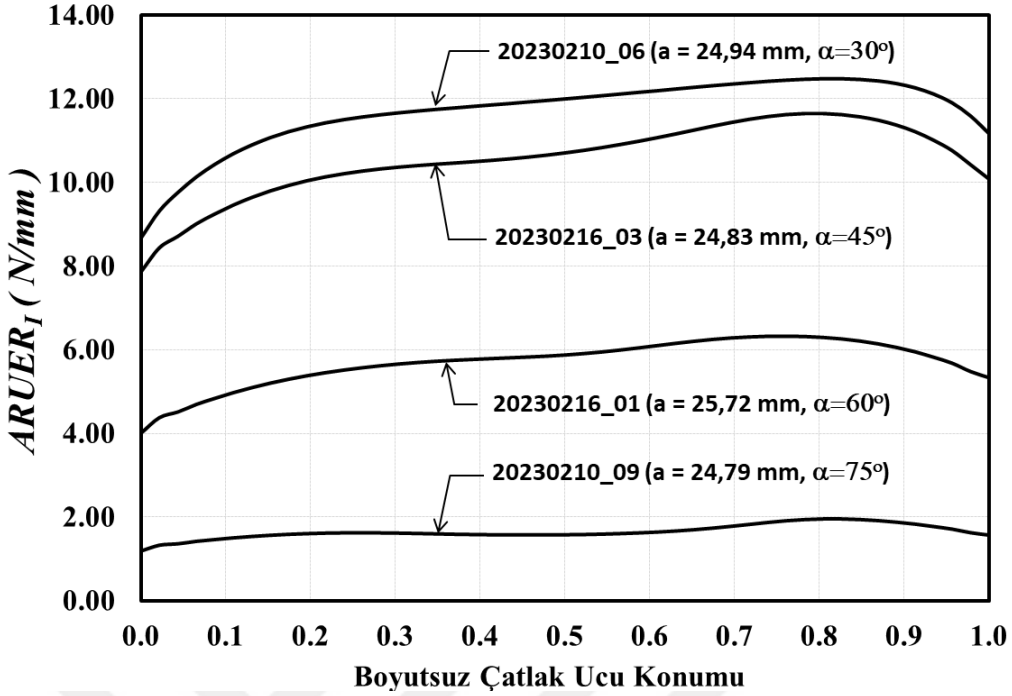
Şekil 5.80. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



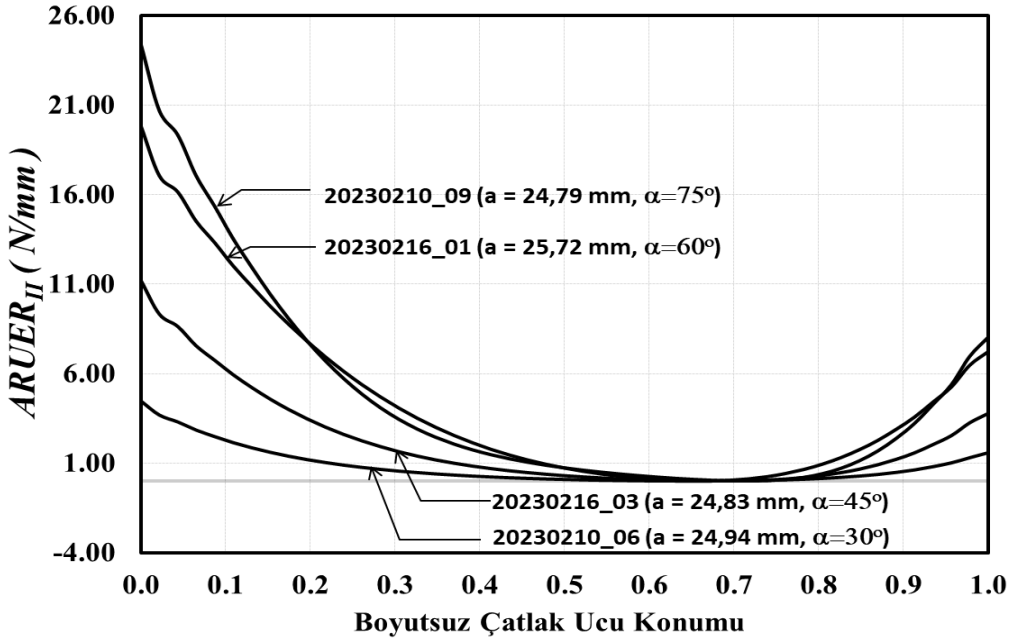
Şekil 5.81. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



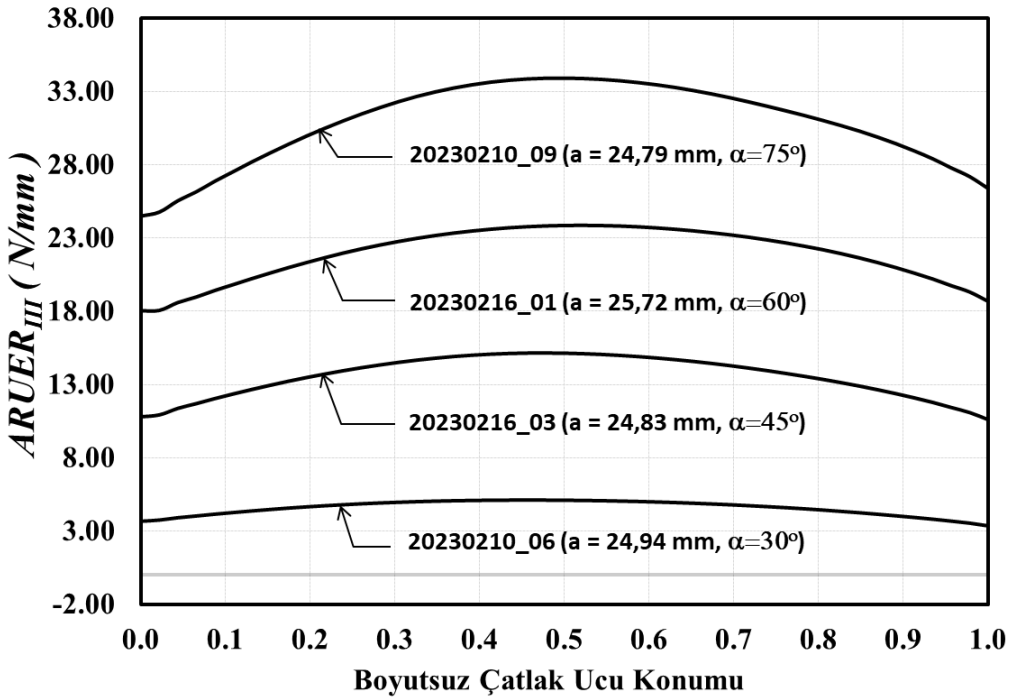
Şekil 5.82. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



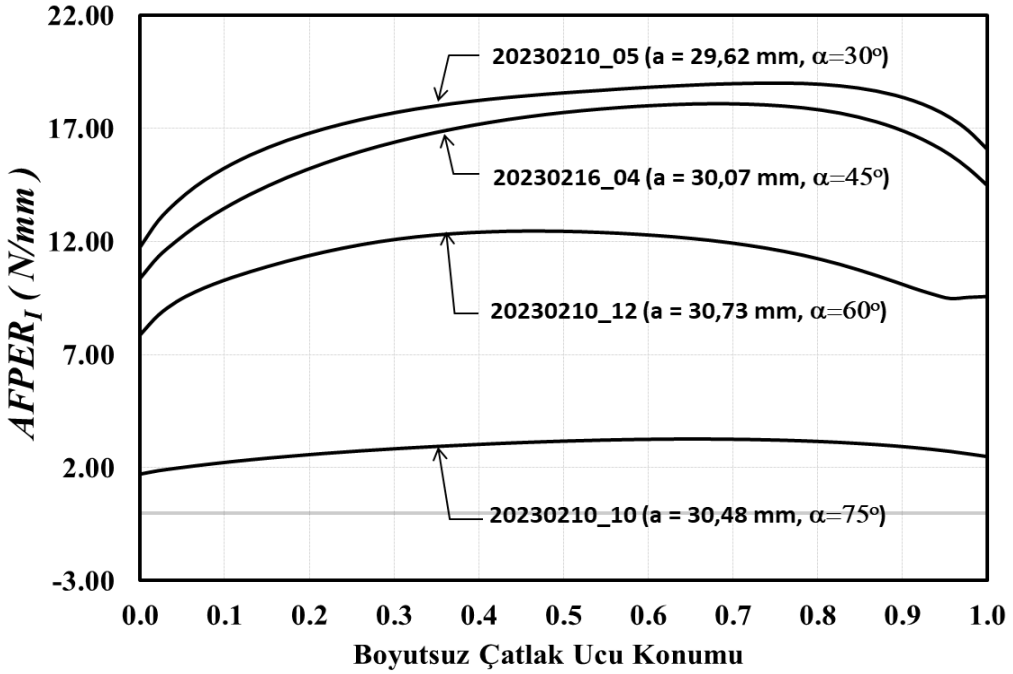
Şekil 5.83. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



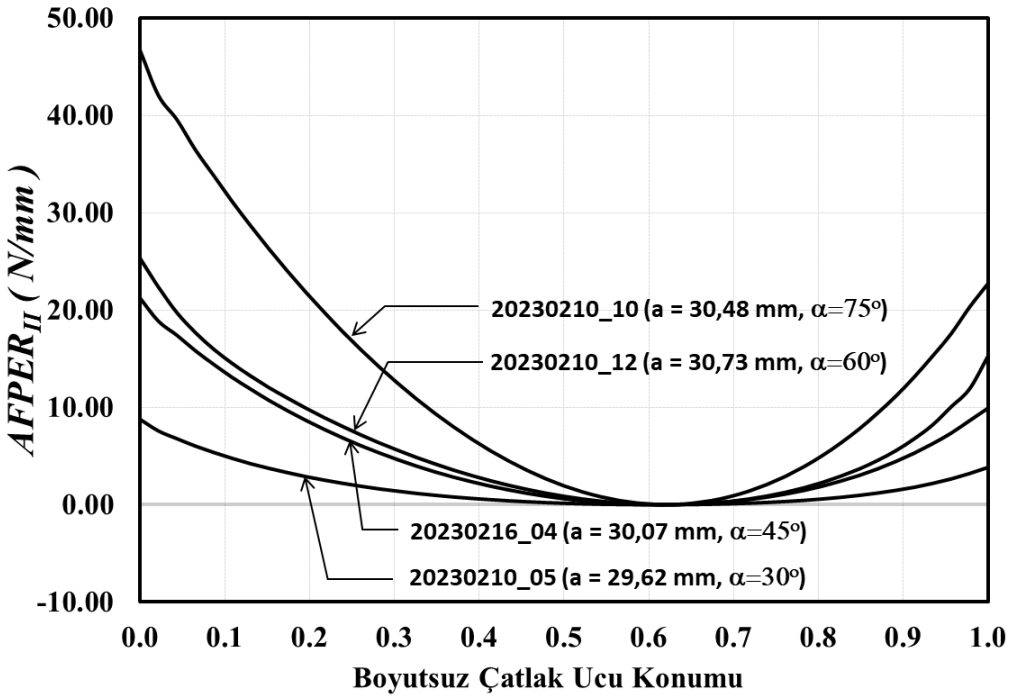
Şekil 5.84. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



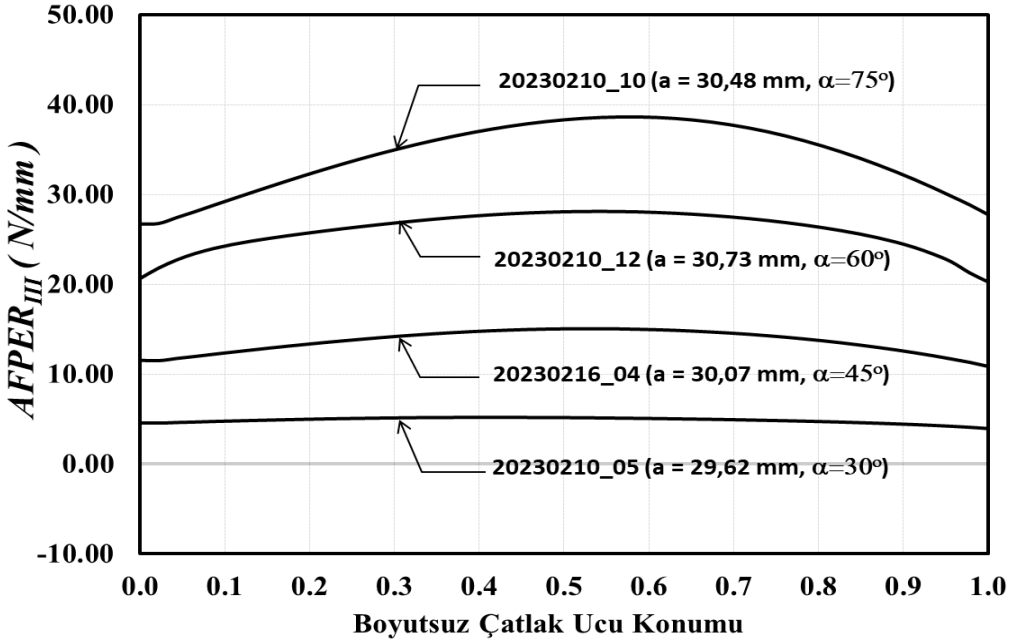
Şekil 5.85. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



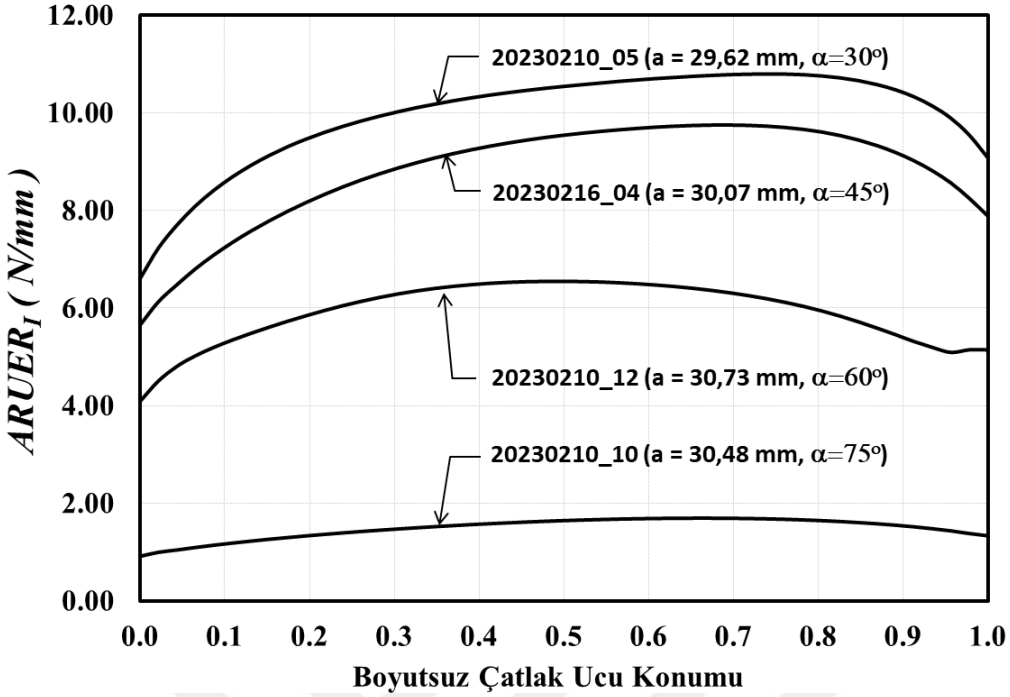
Şekil 5.86. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



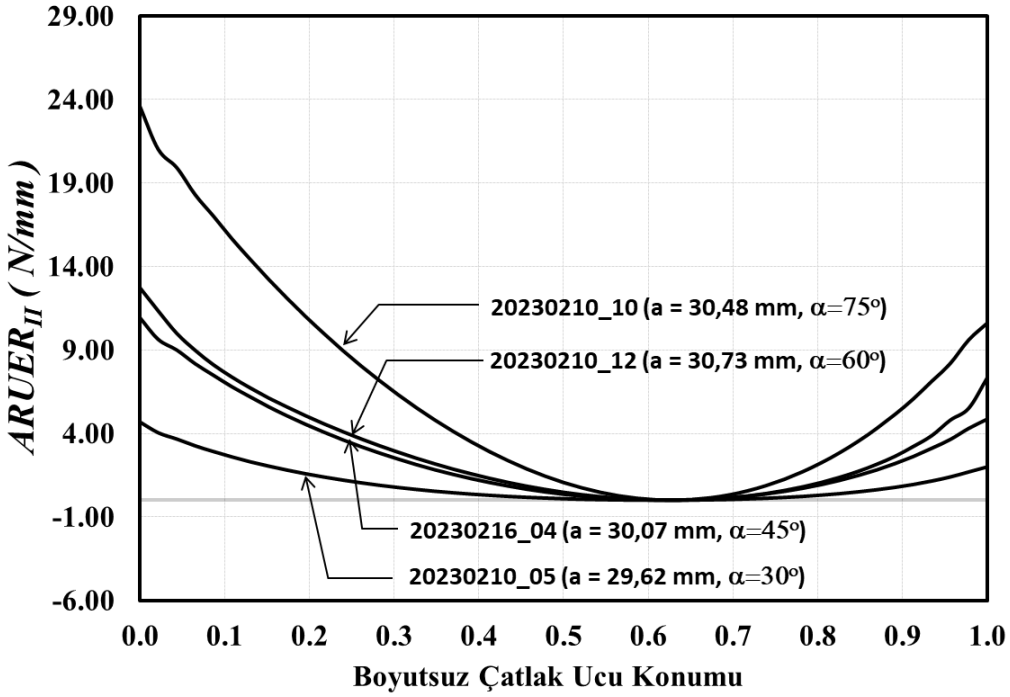
Şekil 5.87. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



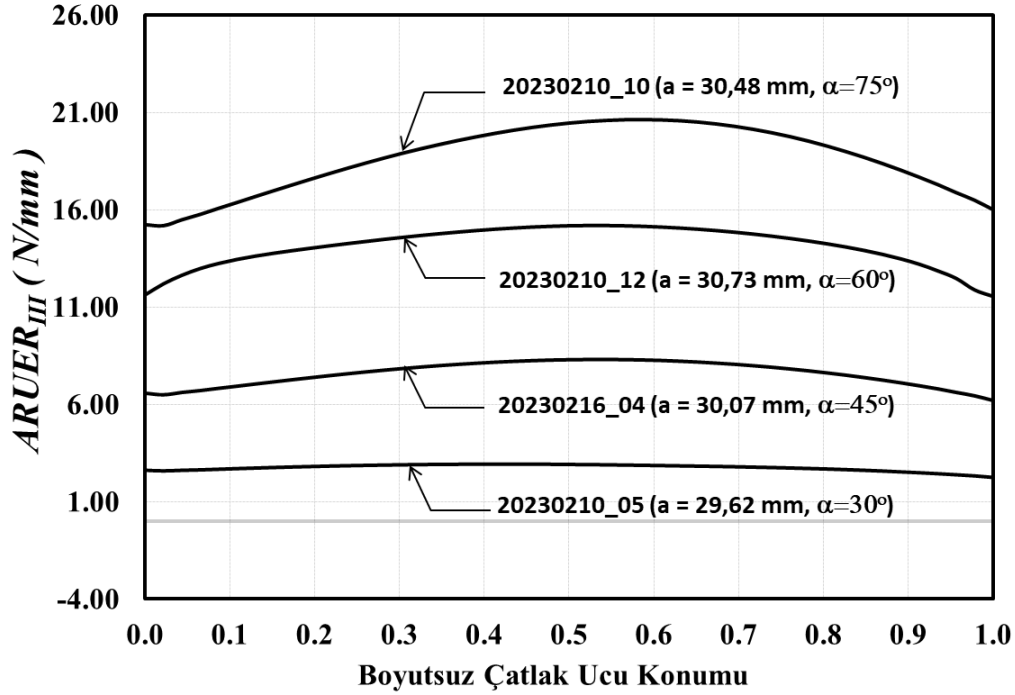
Şekil 5.88. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



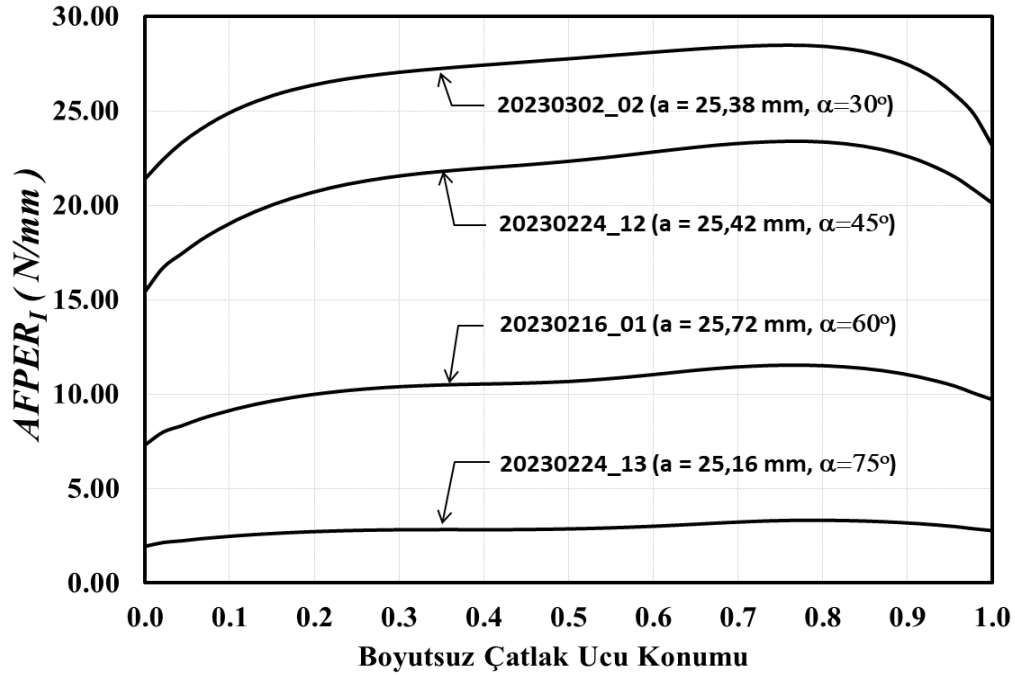
Şekil 5.89. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



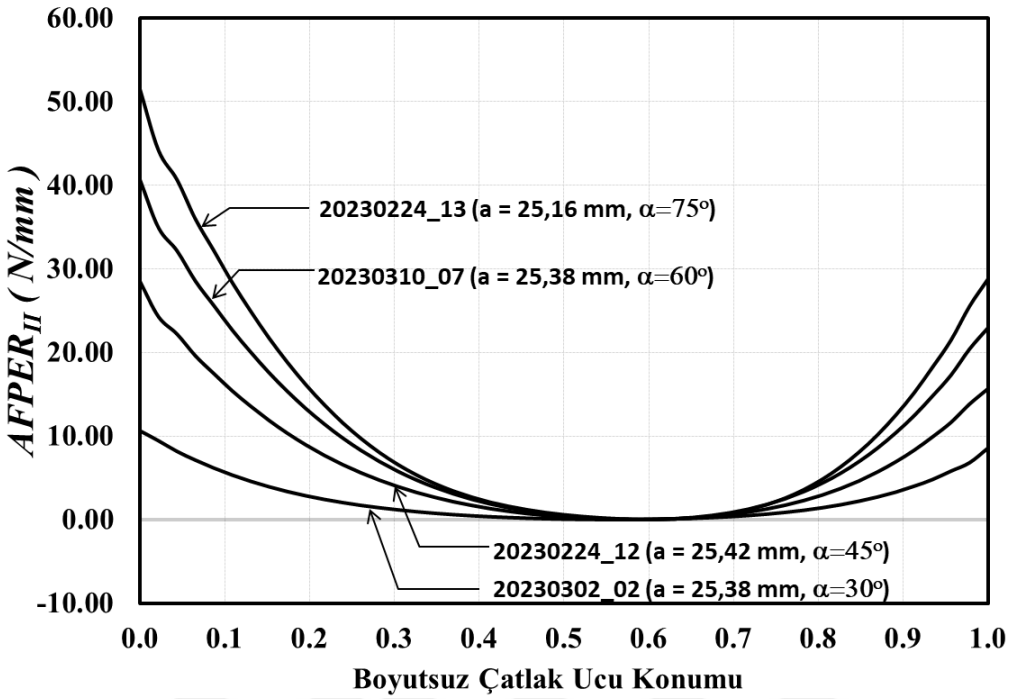
Şekil 5.90. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



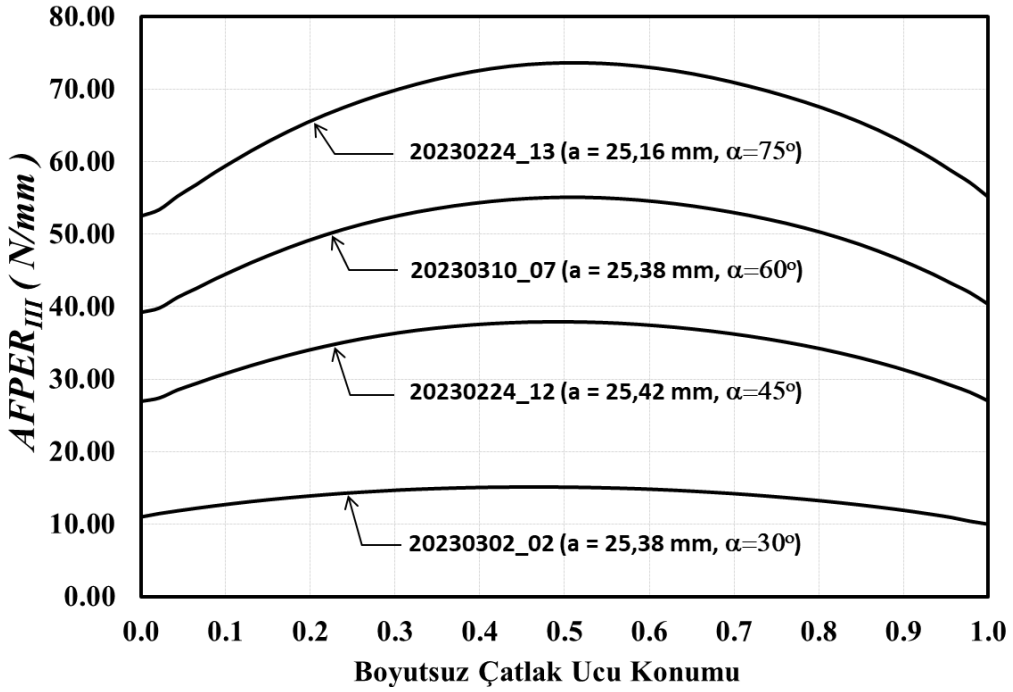
Şekil 5.91. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



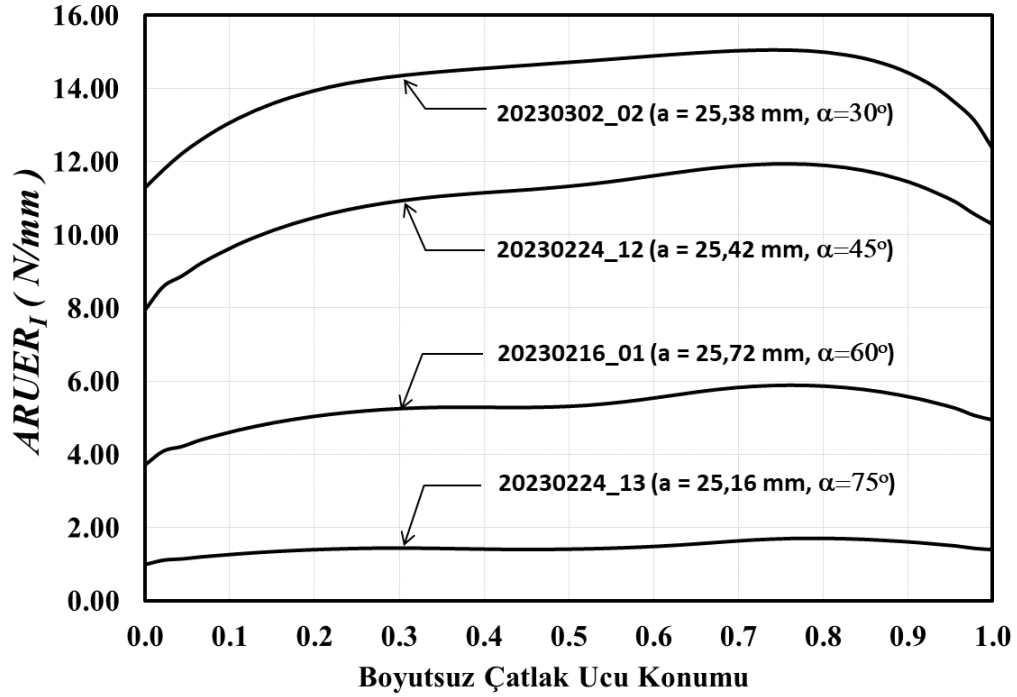
Şekil 5.92. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



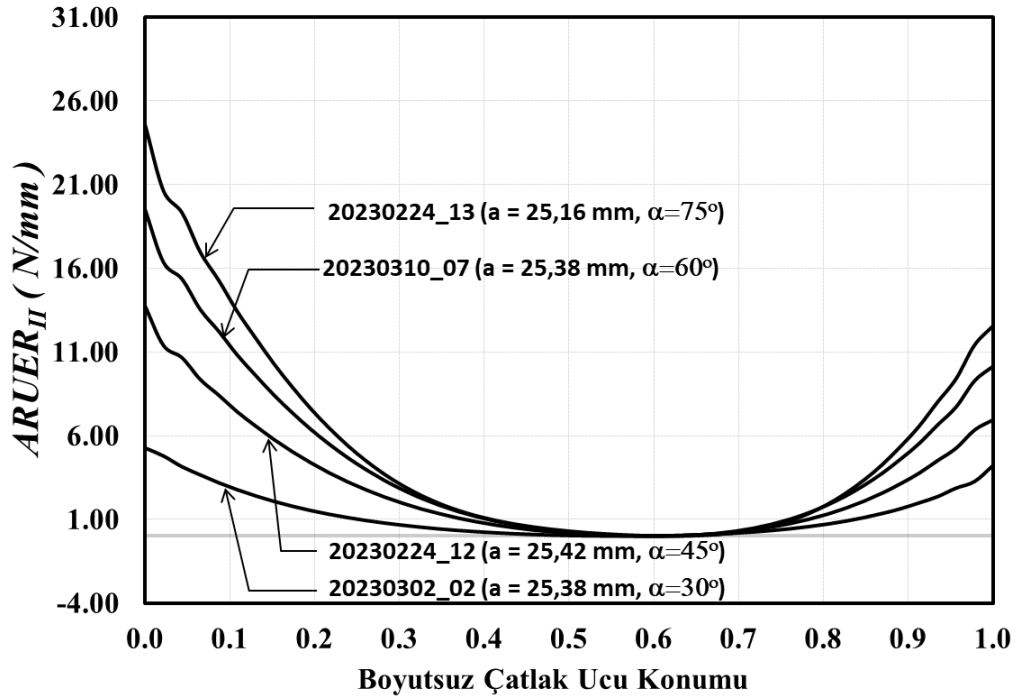
Şekil 5.93. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



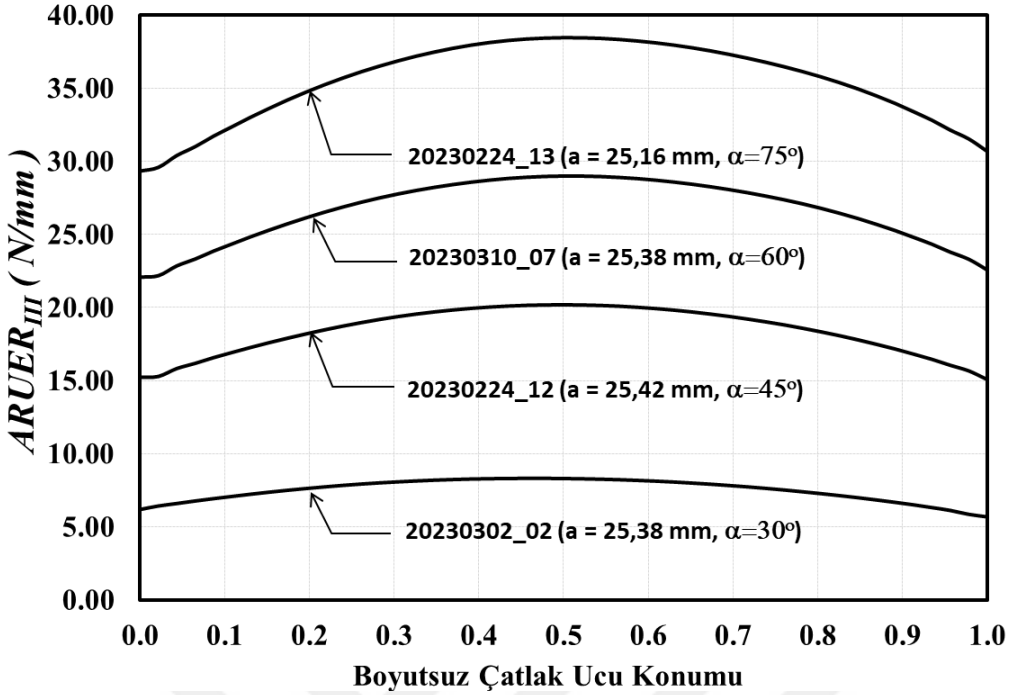
Şekil 5.94. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



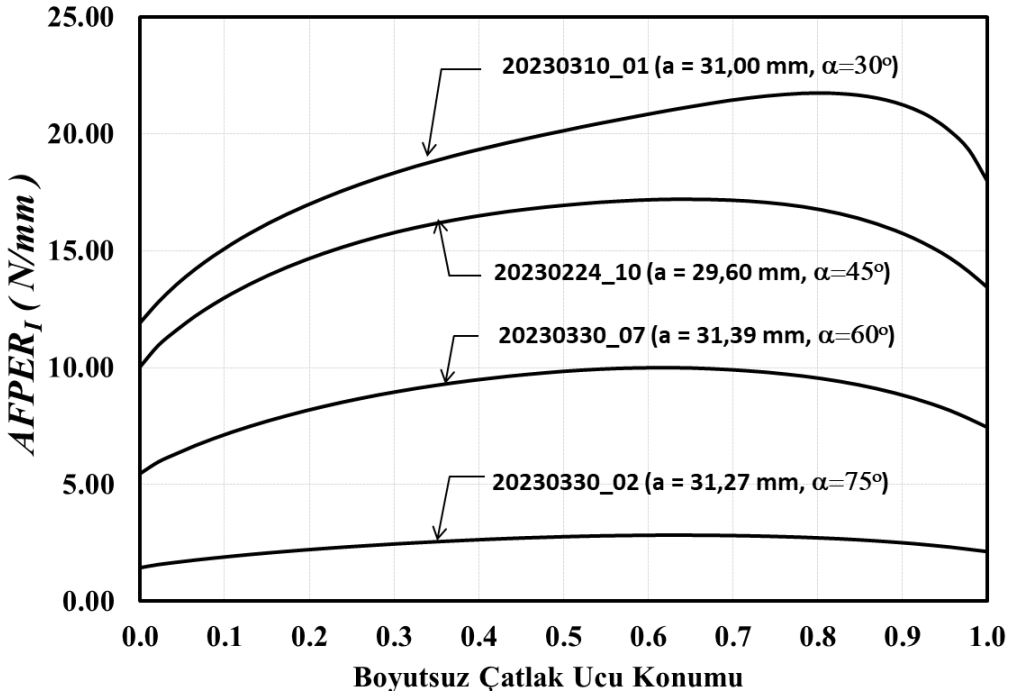
Şekil 5.95. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



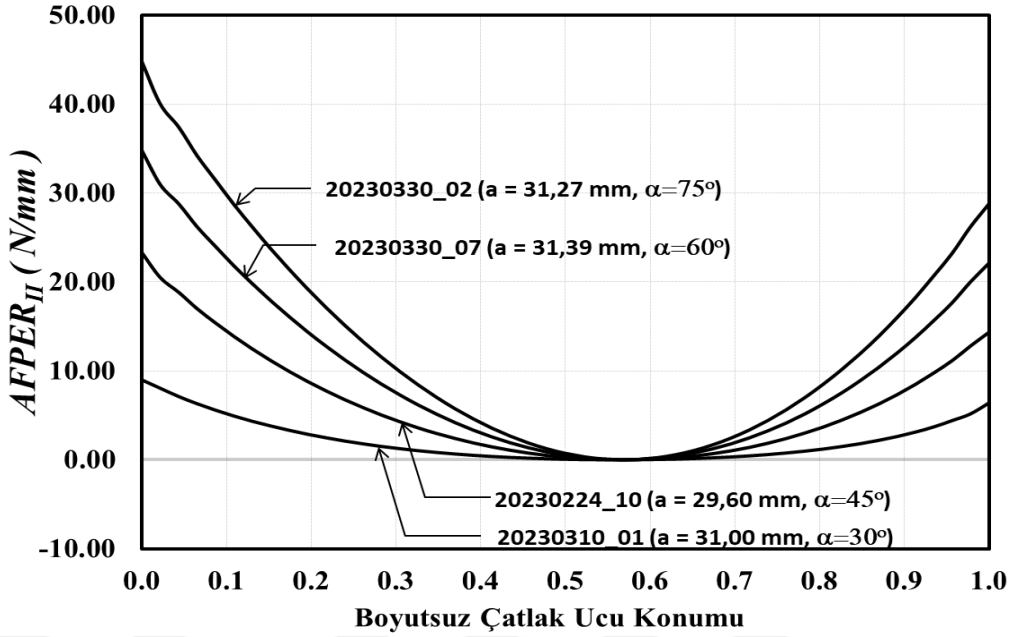
Şekil 5.96. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



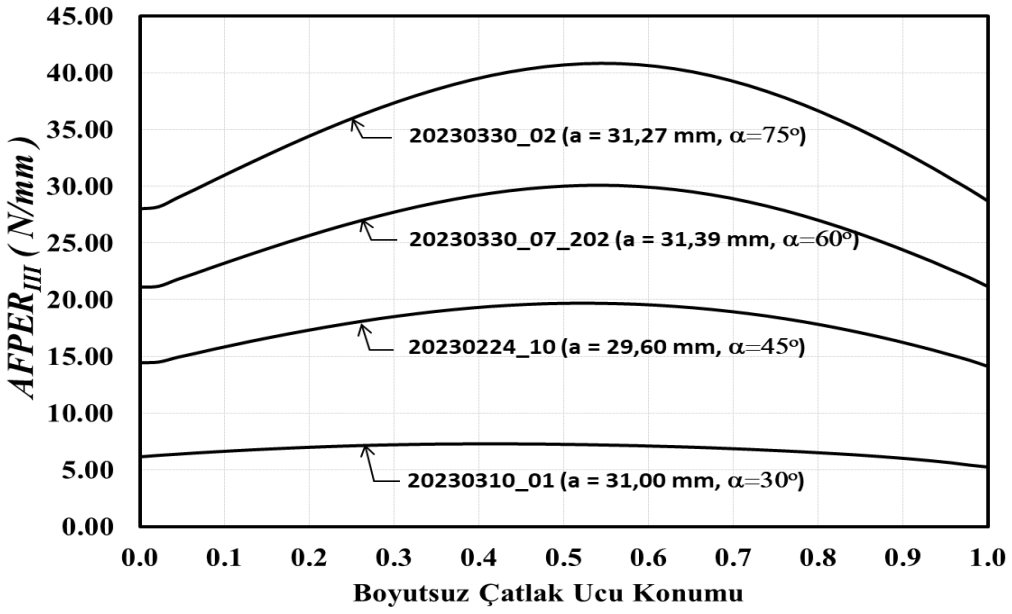
Şekil 5.97. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



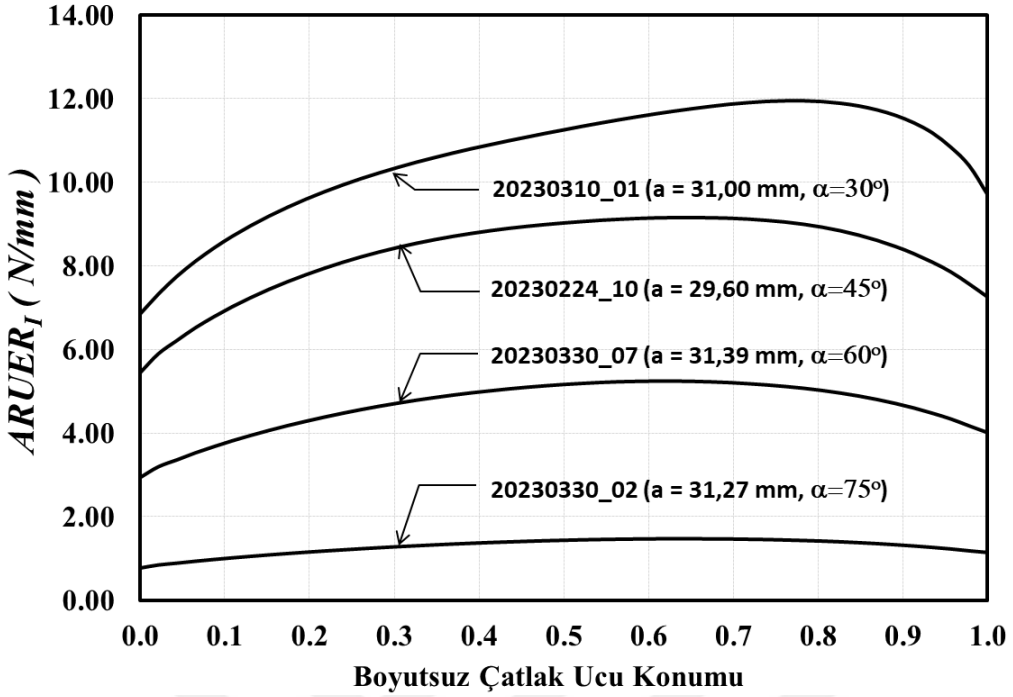
Şekil 5.98. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



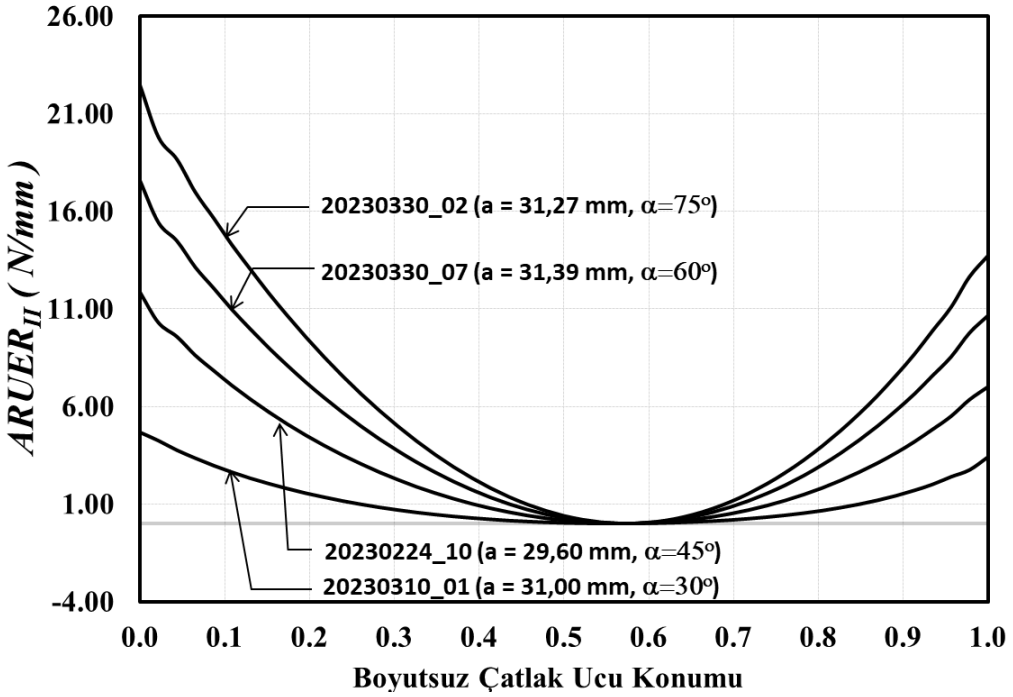
Şekil 5.99. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



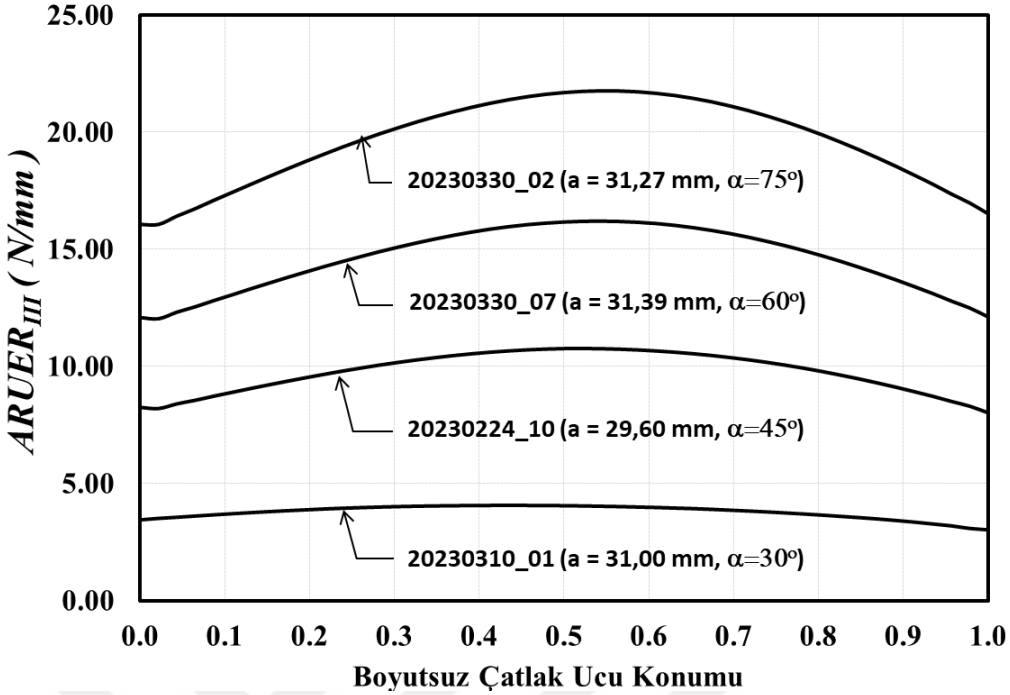
Şekil 5.100. 3 Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



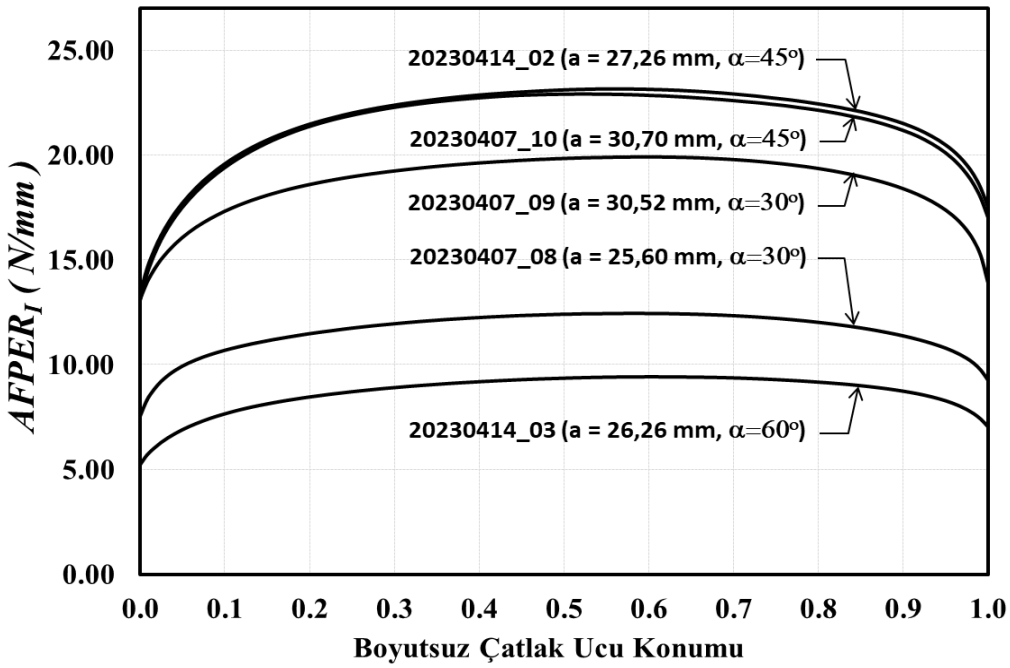
Şekil 5.101. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



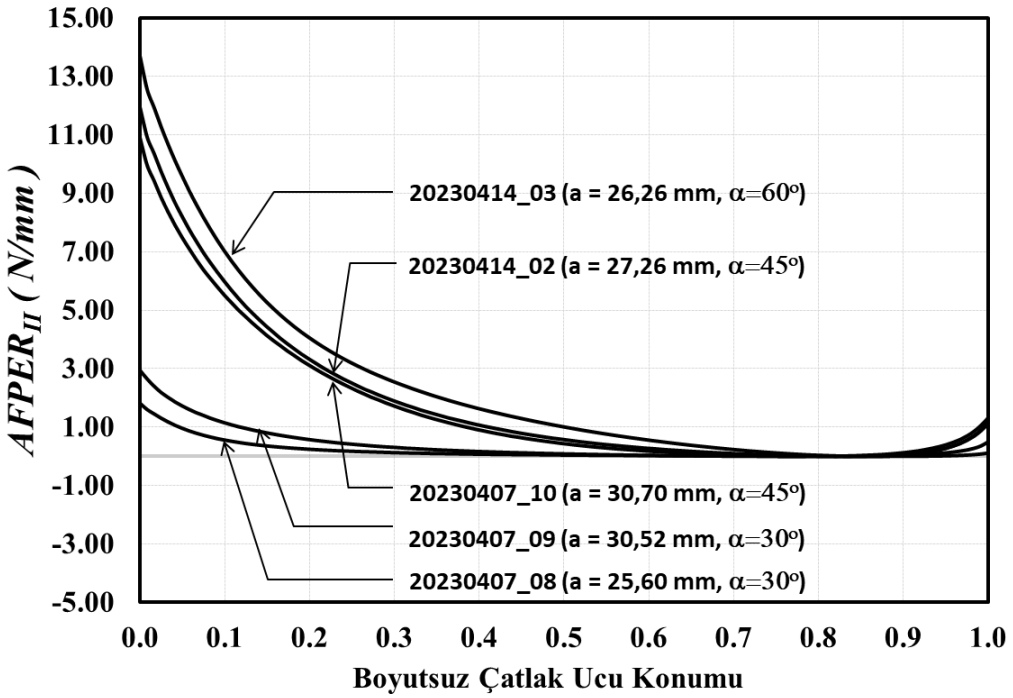
Şekil 5.102. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



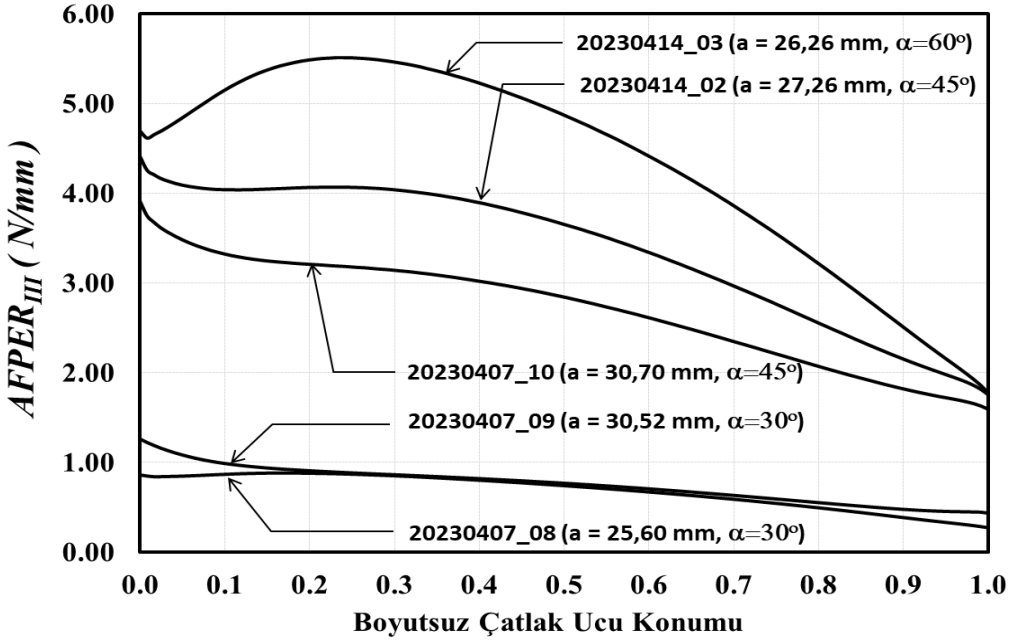
Şekil 5.103. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 10 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



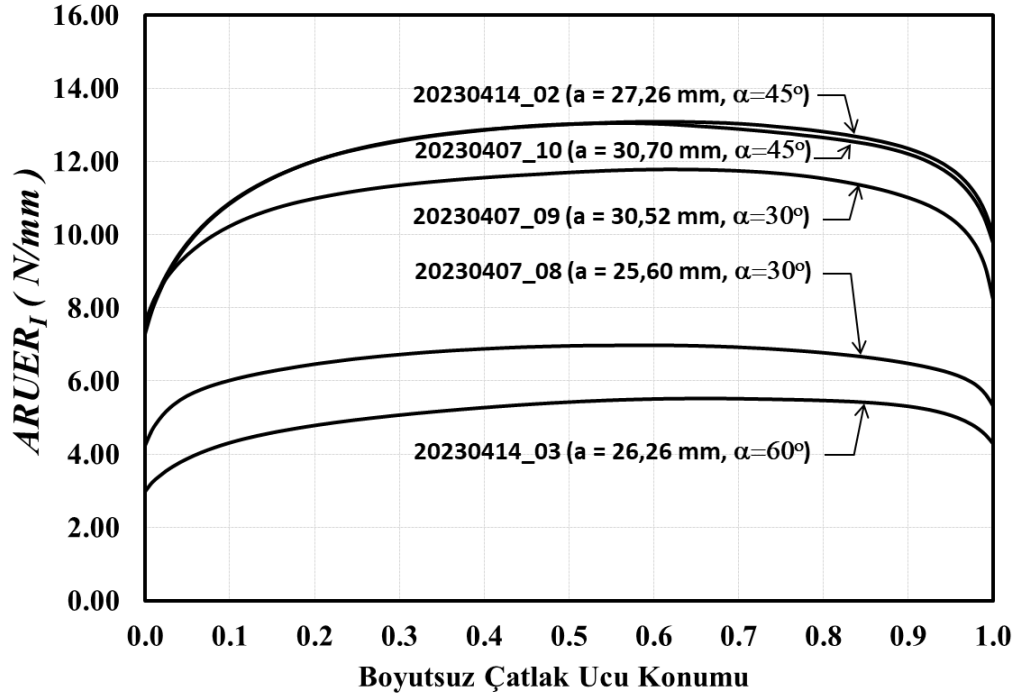
Şekil 5.104. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



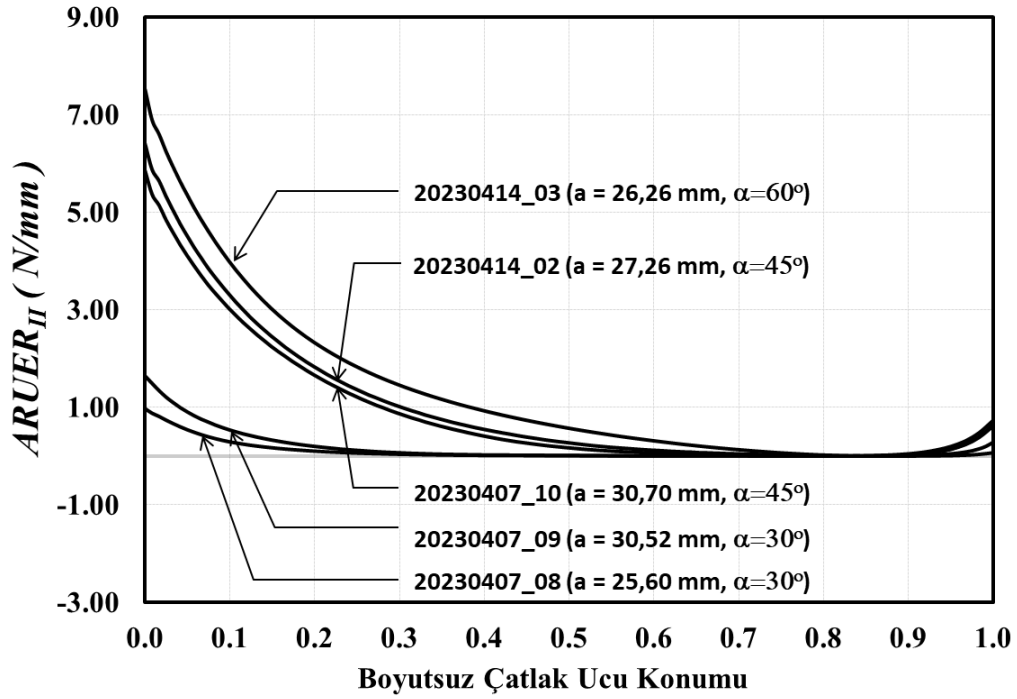
Şekil 5.105. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



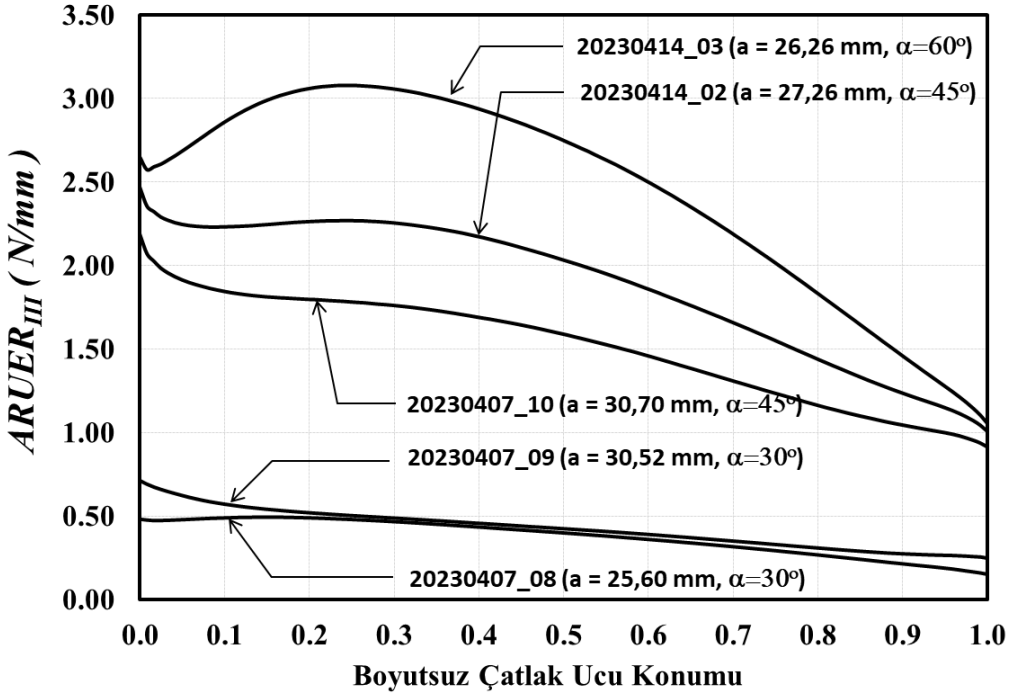
Şekil 5.106. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



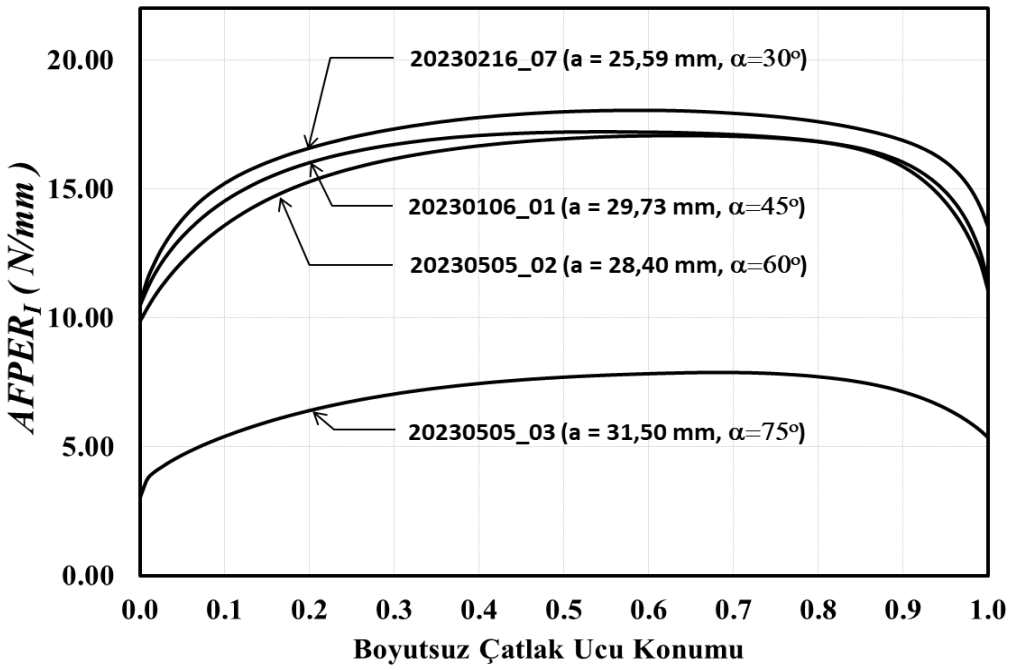
Şekil 5.107. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



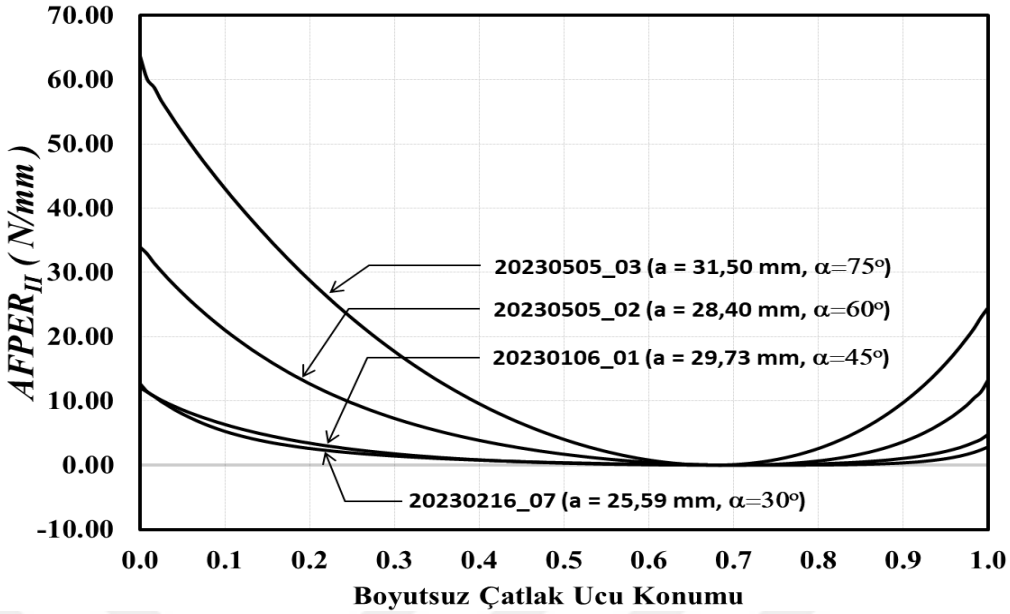
Şekil 5.108. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



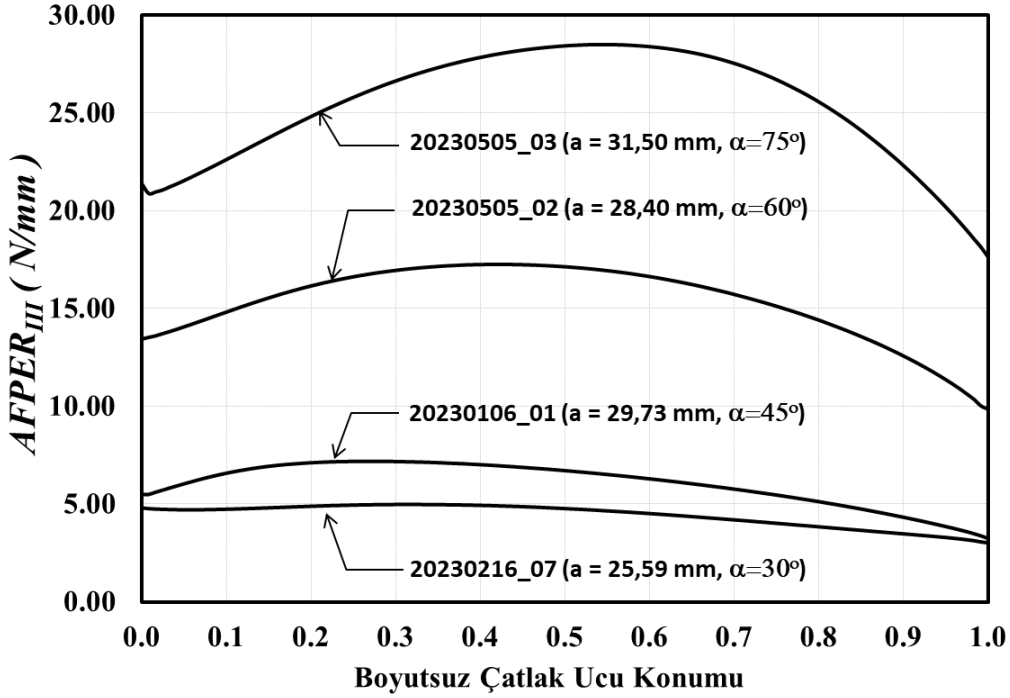
Şekil 5.109. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 30° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



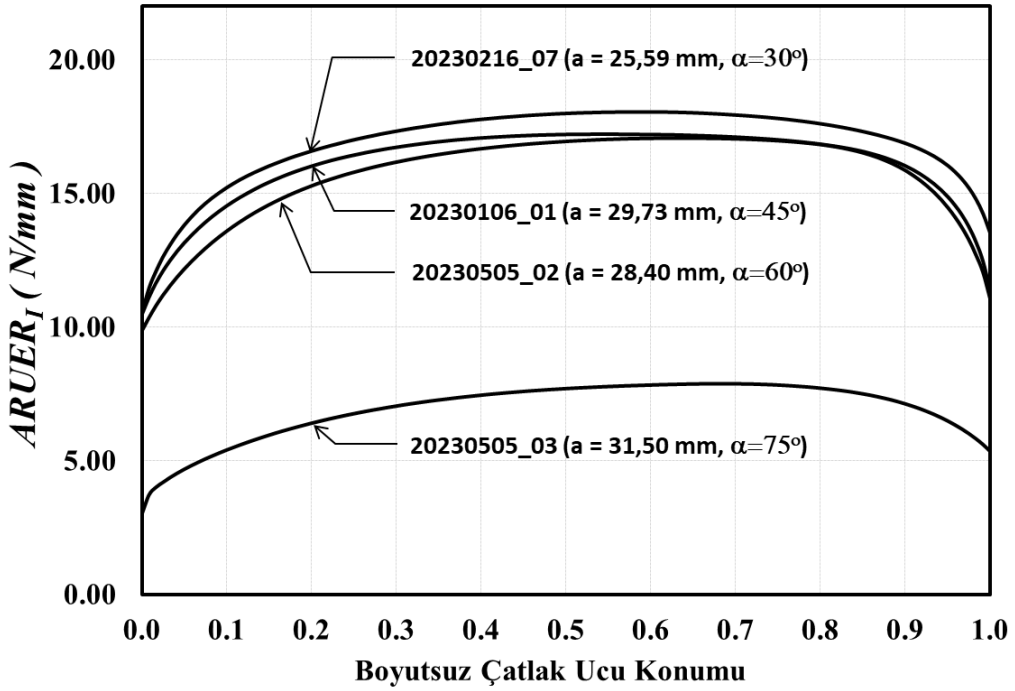
Şekil 5.110. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



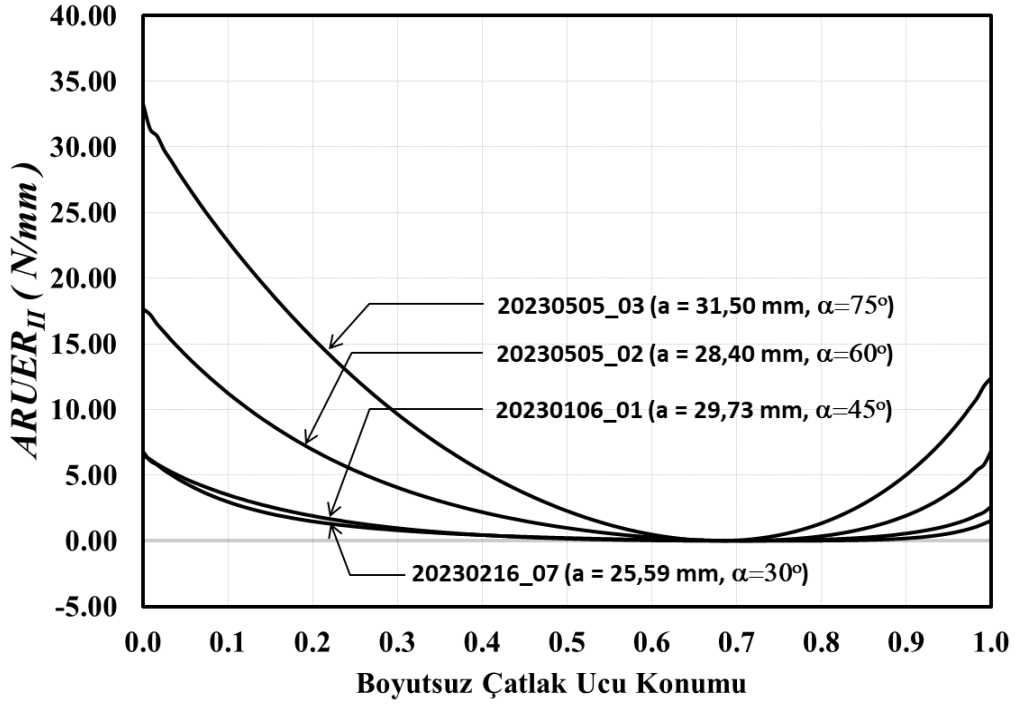
Şekil 5.111. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



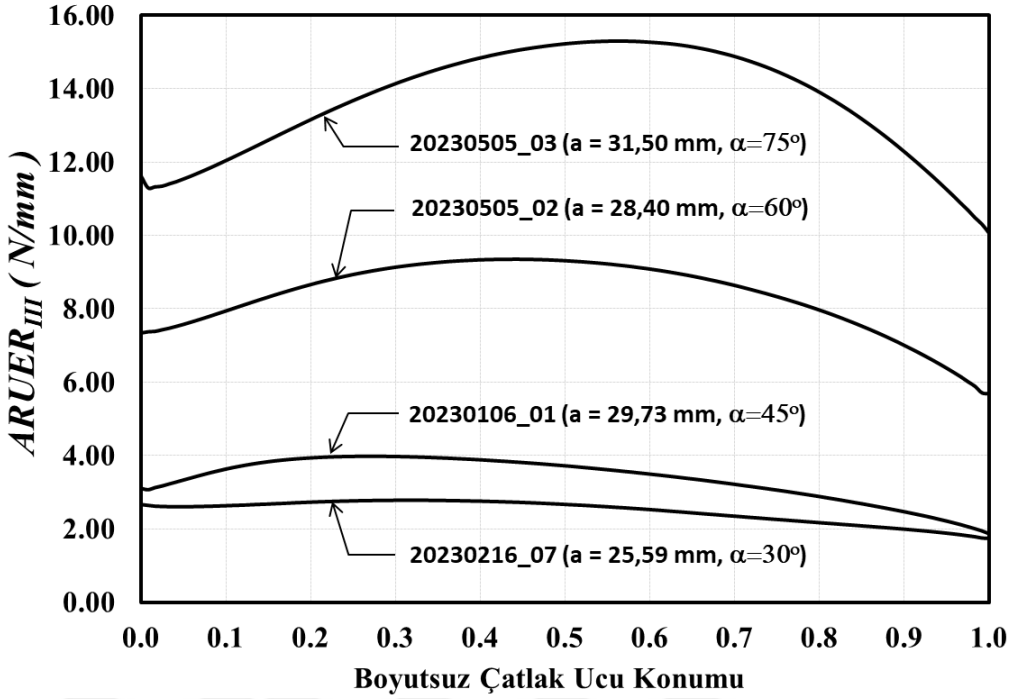
Şekil 5.112. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



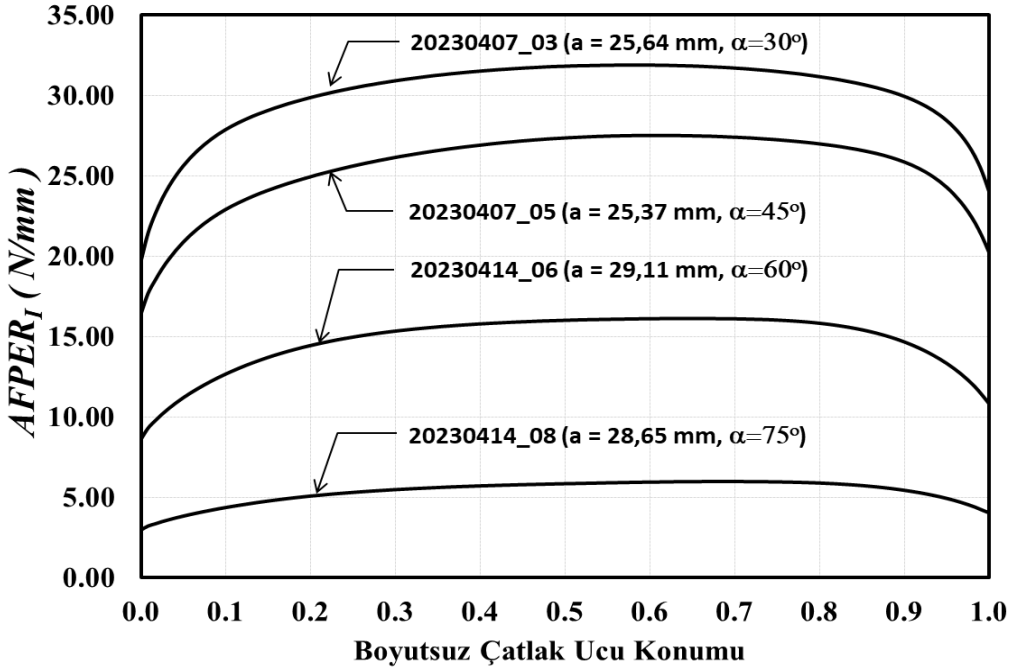
Şekil 5.113. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



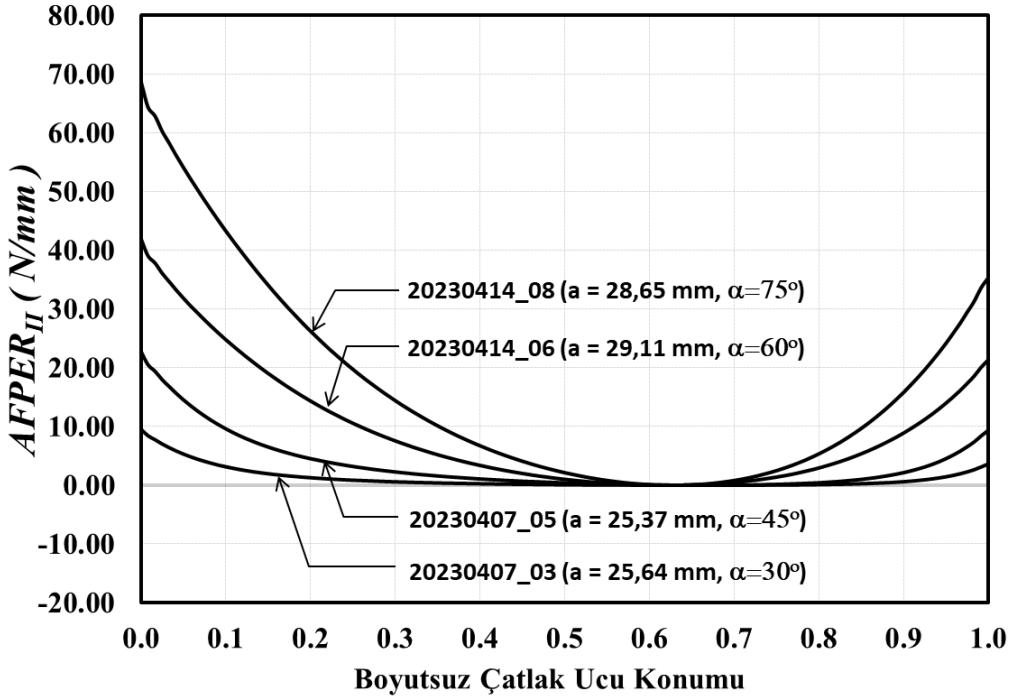
Şekil 5.114. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



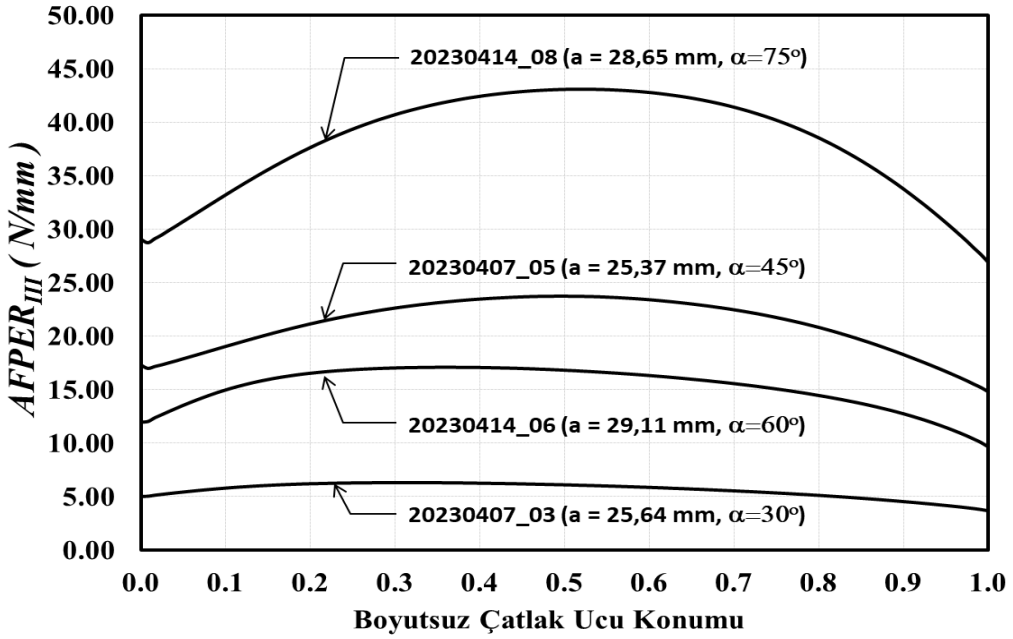
Şekil 5.115. Farklı boyutlarda çatlak içeren, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 45º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



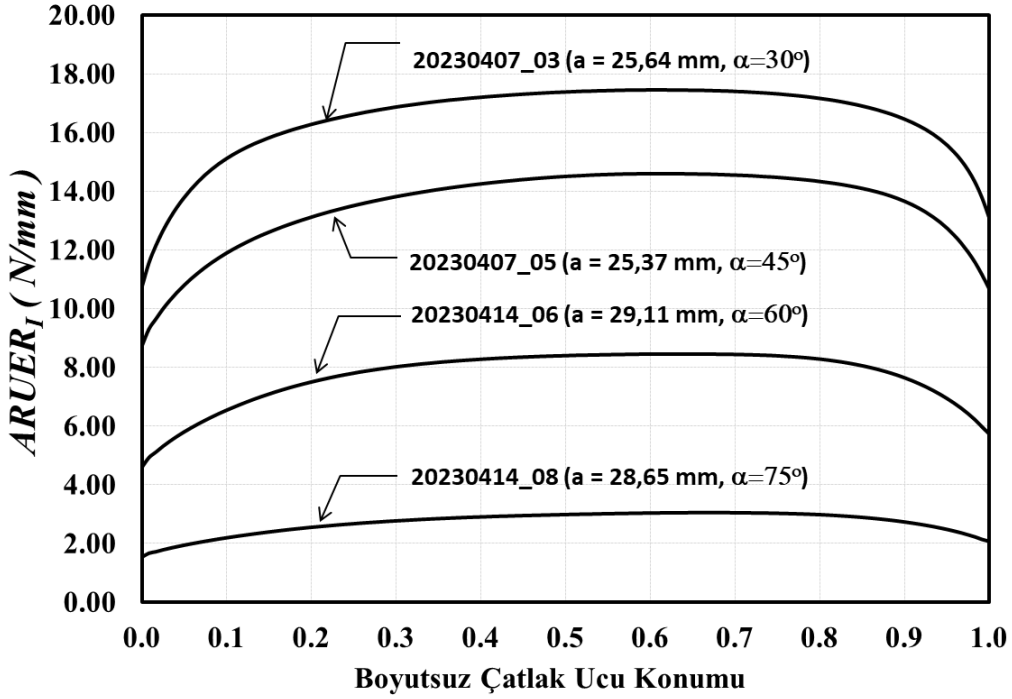
Şekil 5.116. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



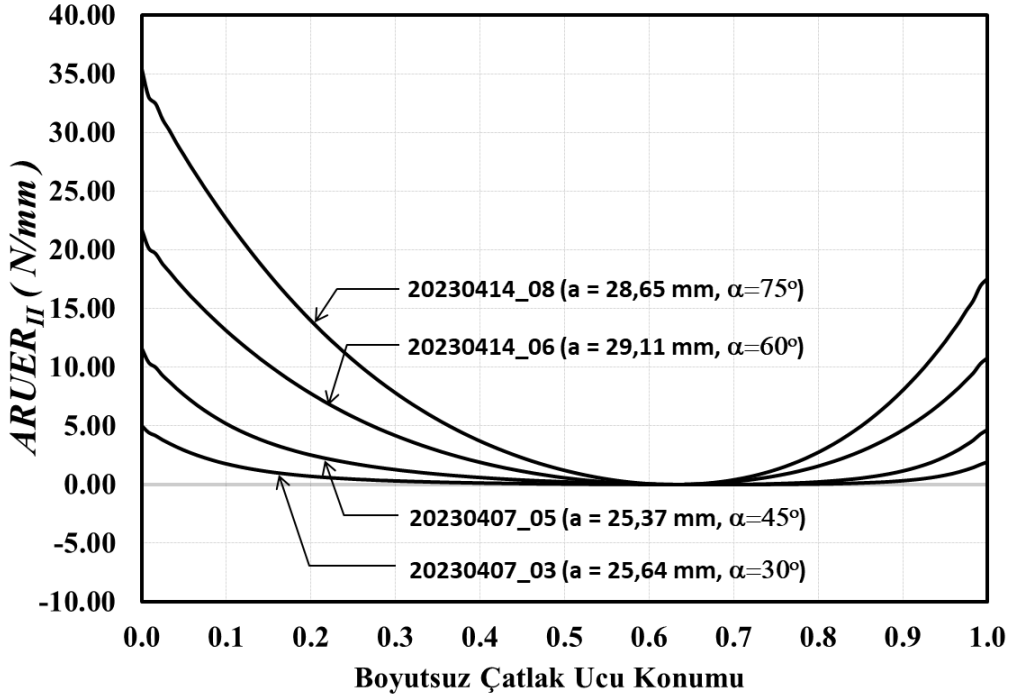
Şekil 5.117. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



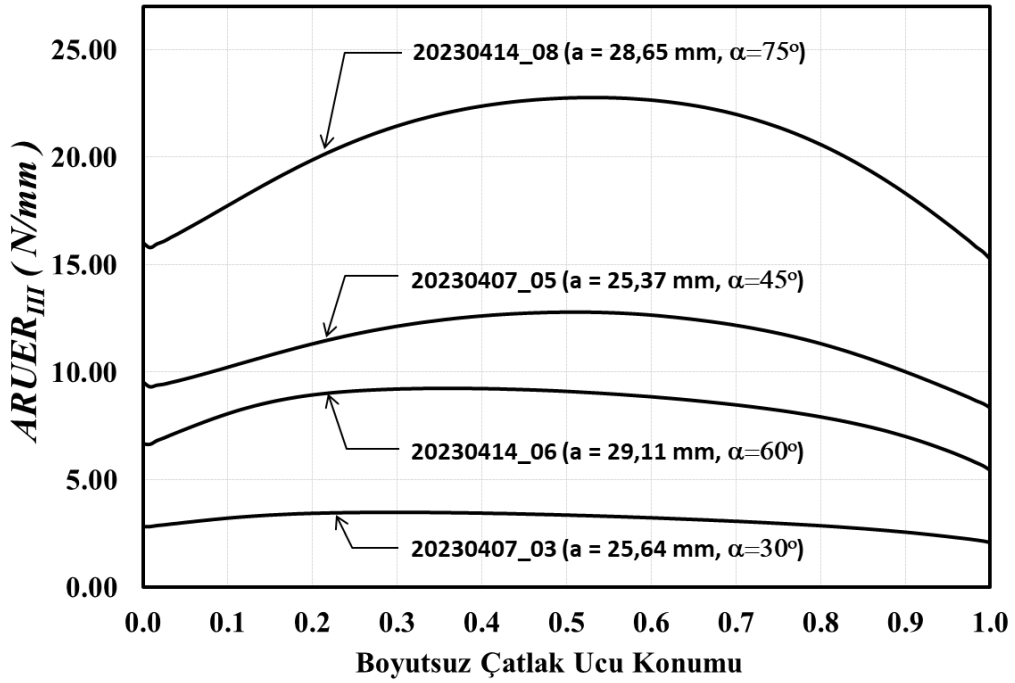
Şekil 5.118. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



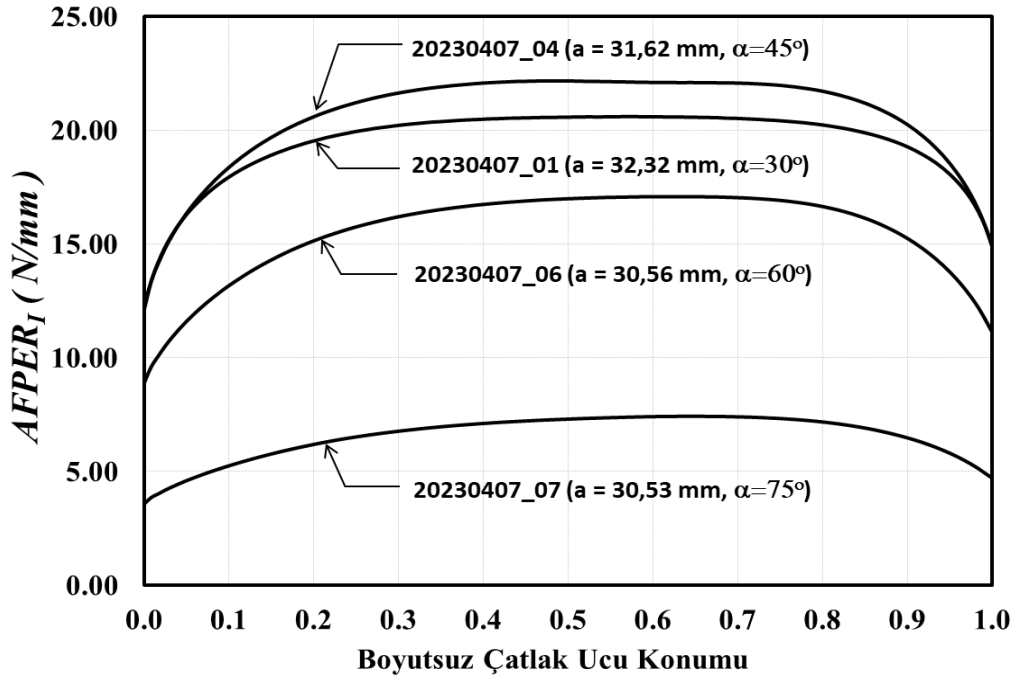
Şekil 5.119. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



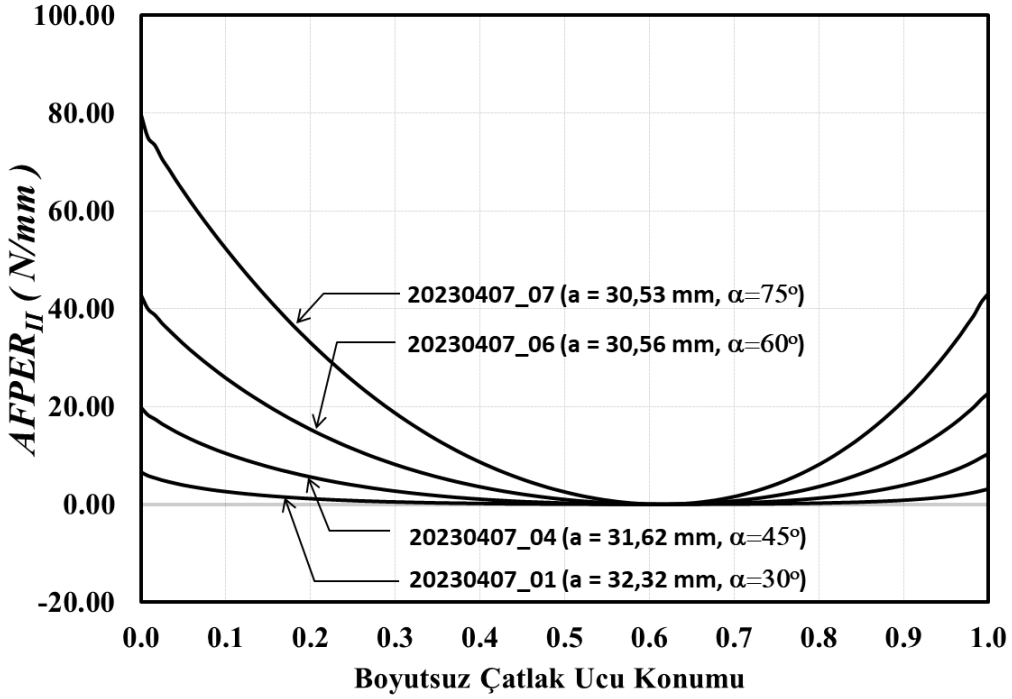
Şekil 5.120. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



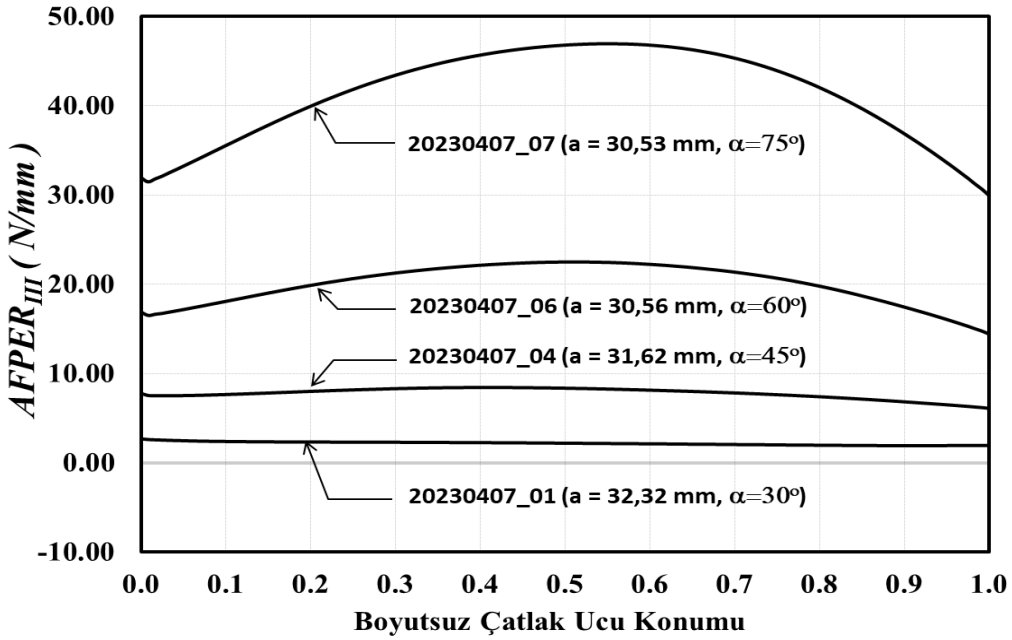
Şekil 5.121. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları..



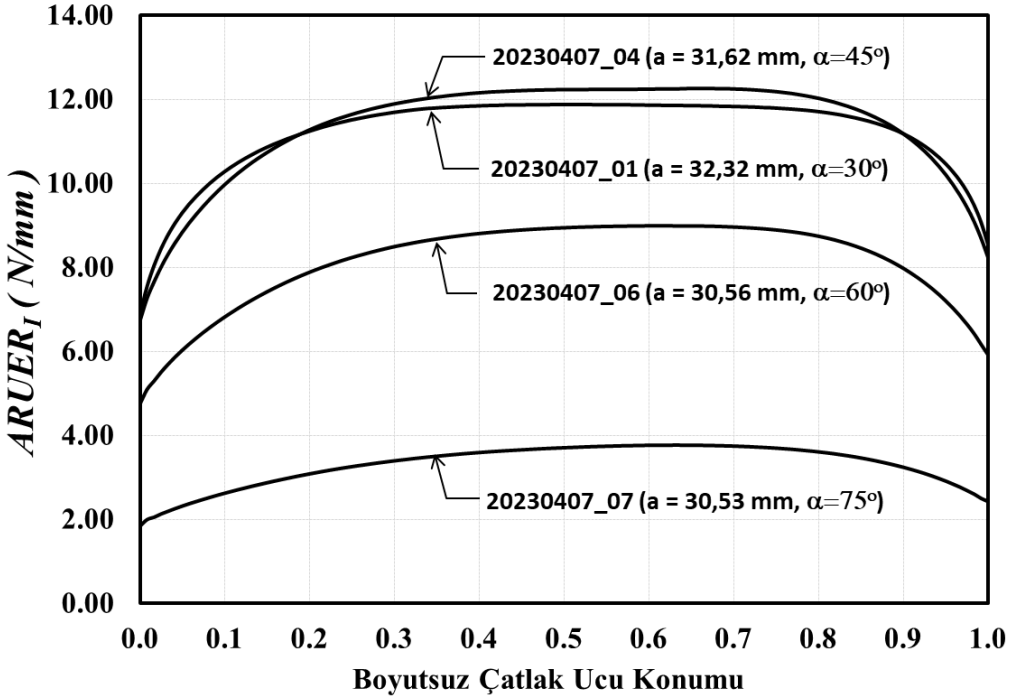
Şekil 5.122. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları..



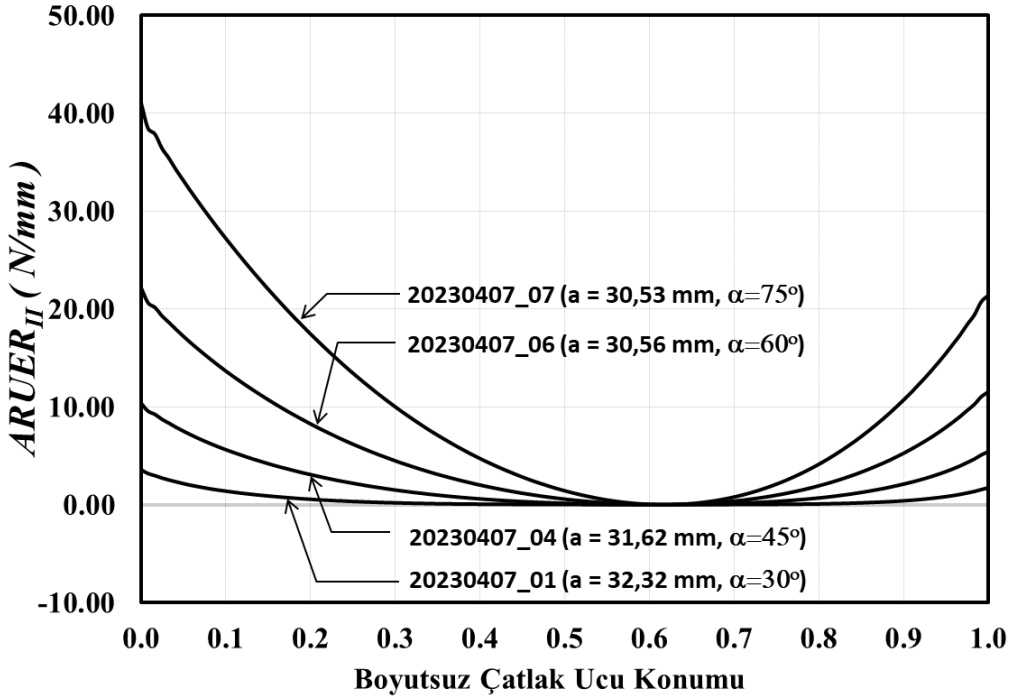
Şekil 5.123. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



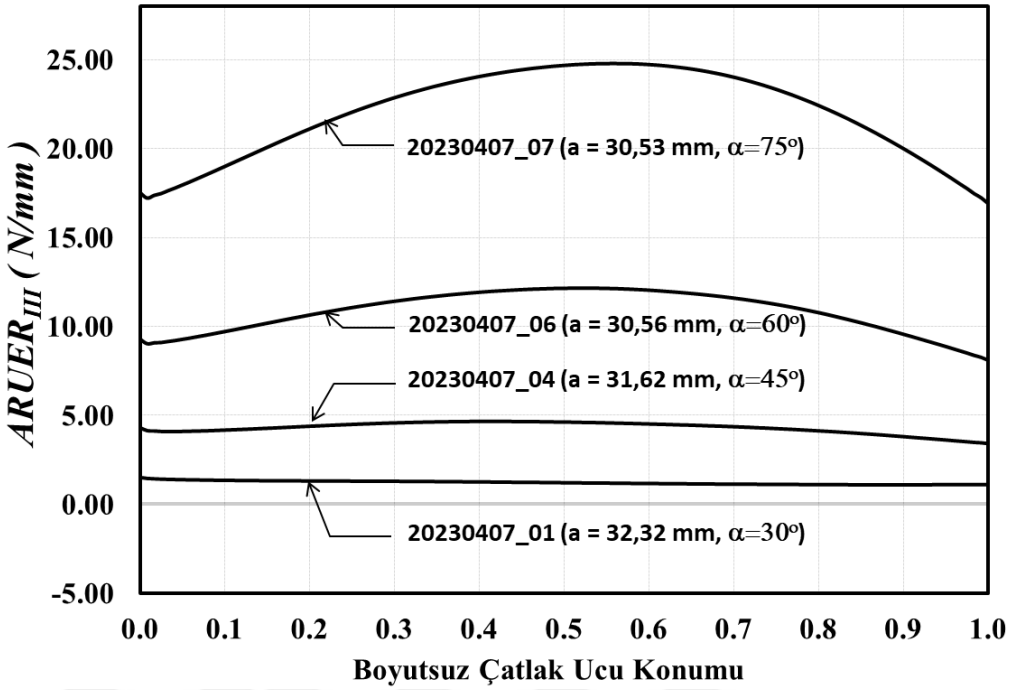
Şekil 5.124. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



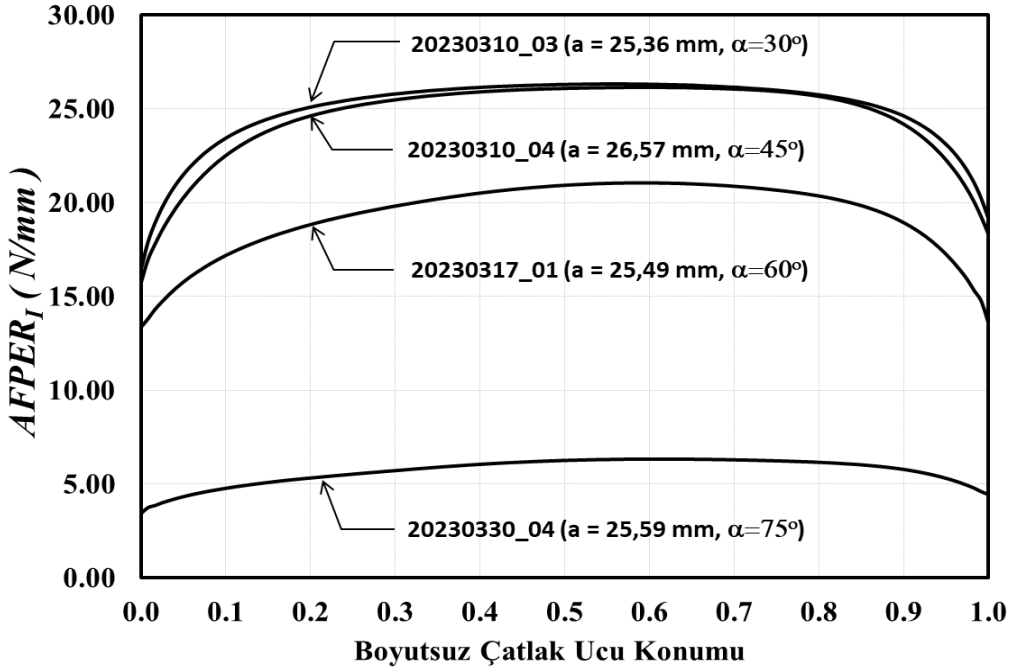
Şekil 5.125. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



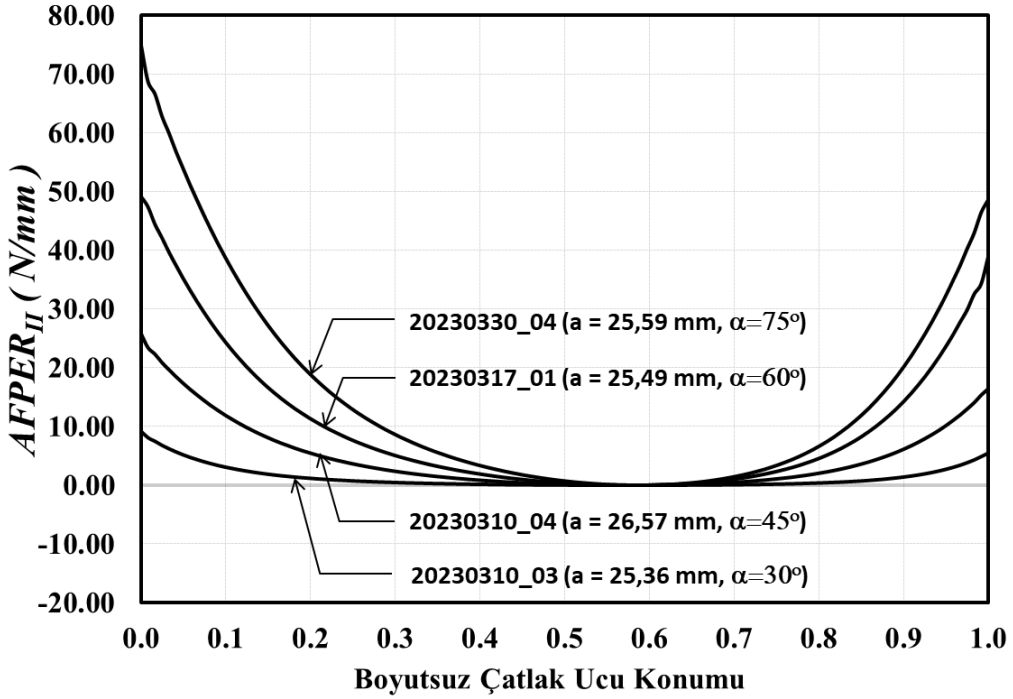
Şekil 5.126. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



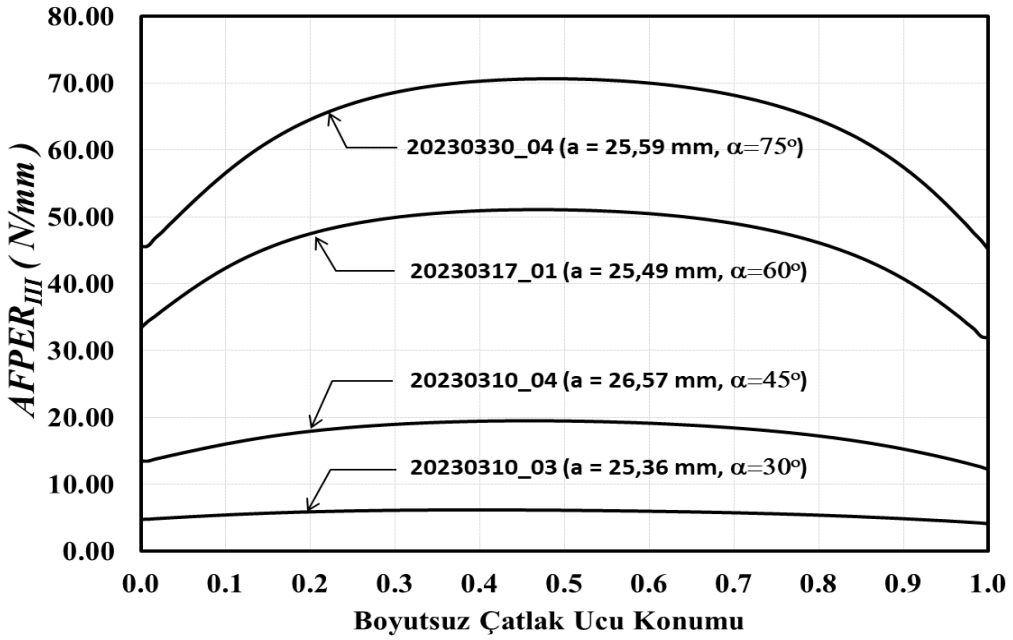
Şekil 5.127. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 60º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



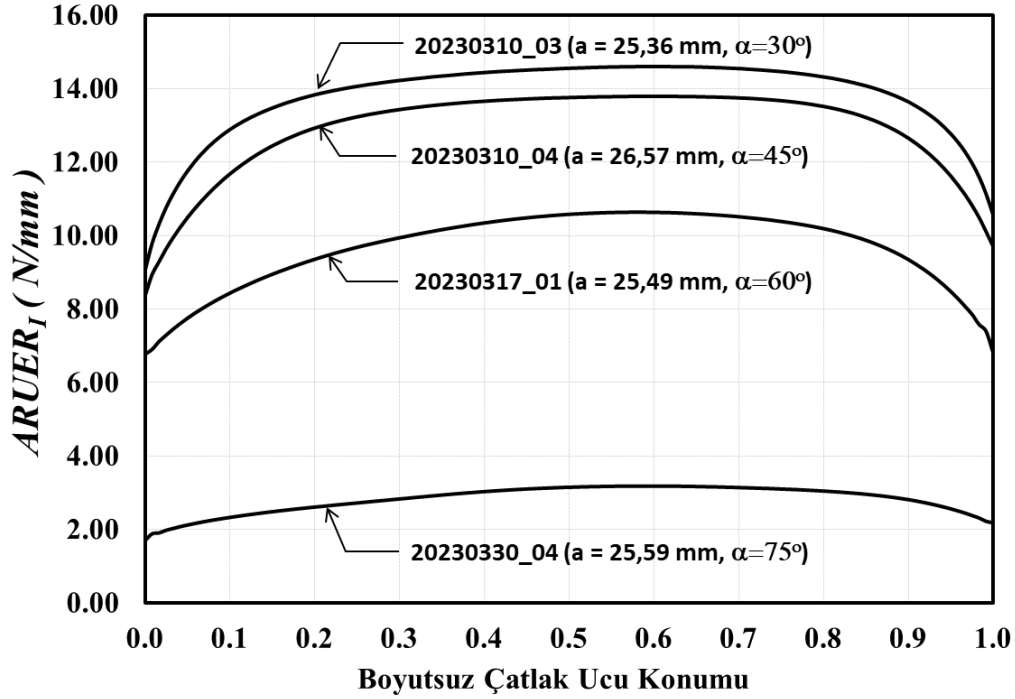
Şekil 5.128. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



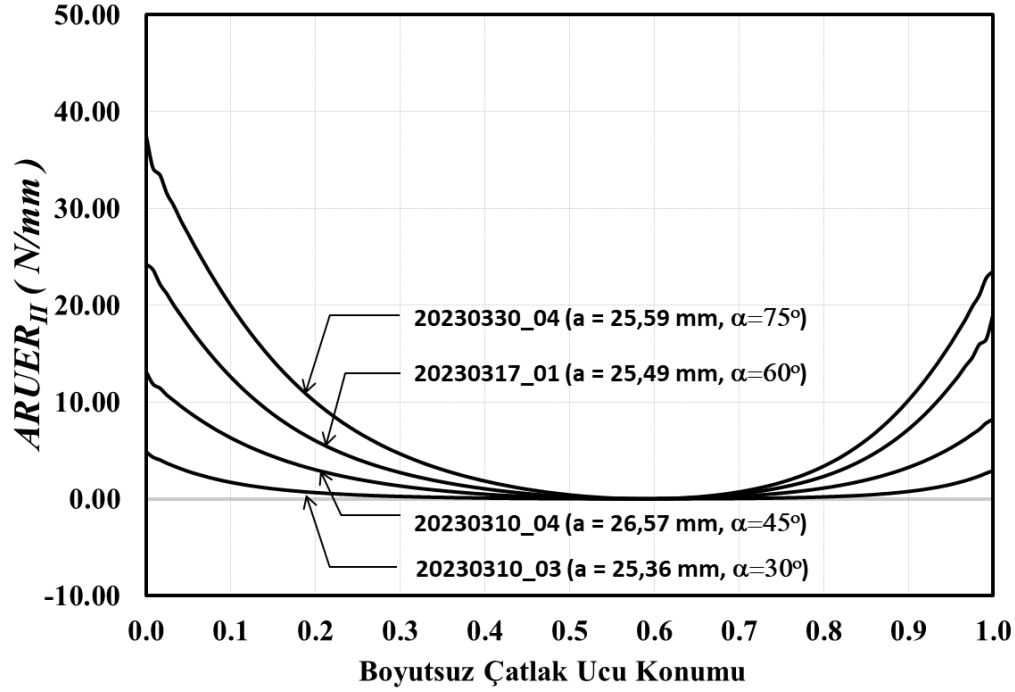
Şekil 5.129. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II AFPERII dağılımları.



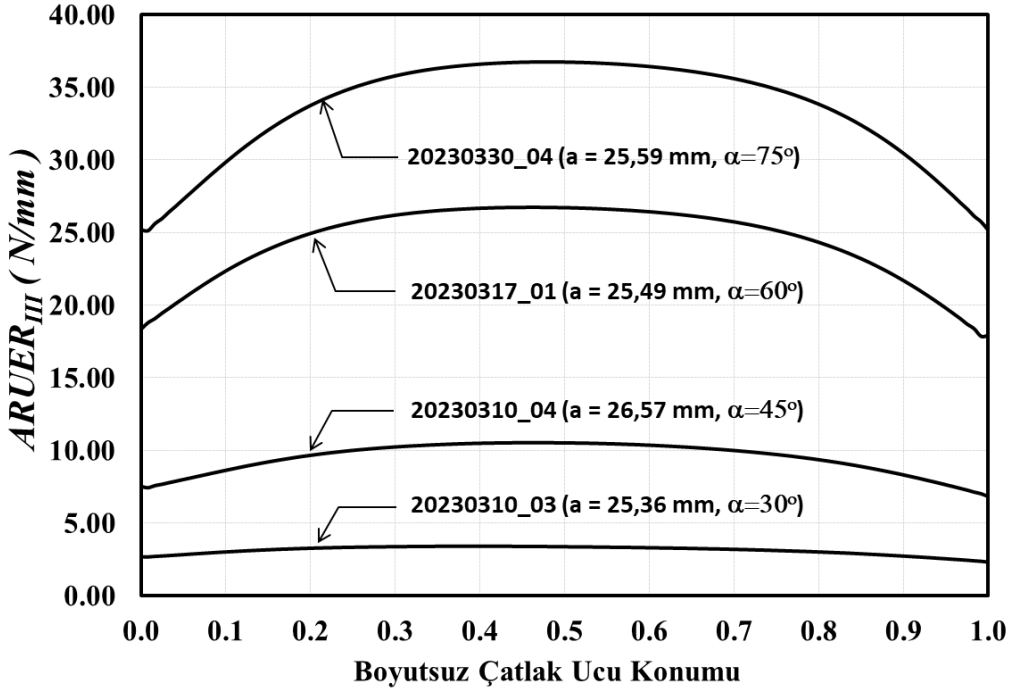
Şekil 5.130. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



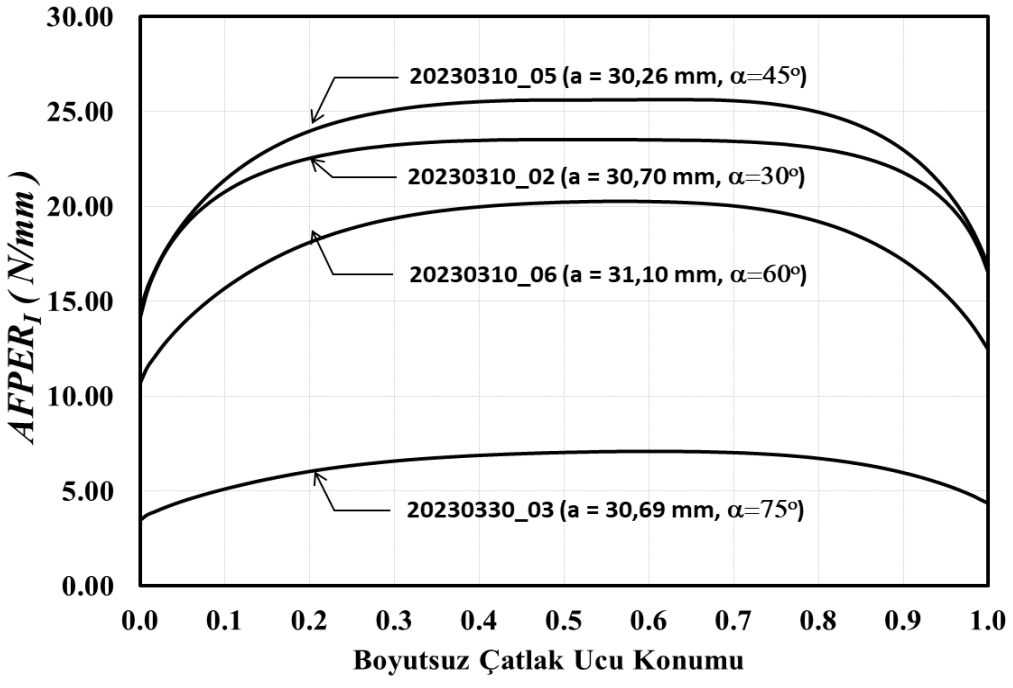
Şekil 5.131. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



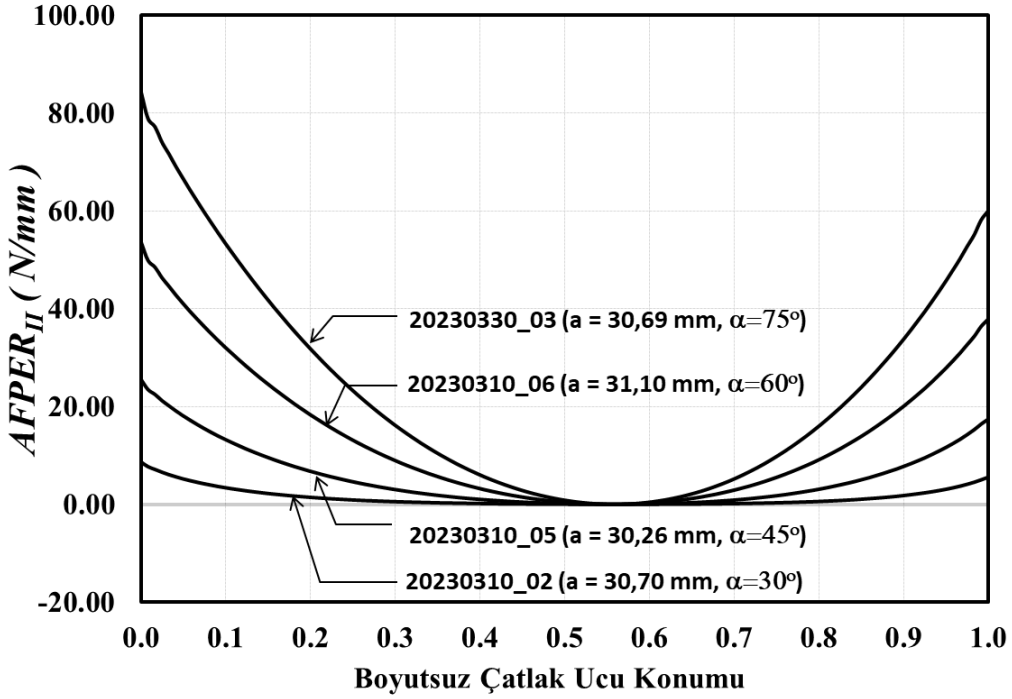
Şekil 5.132. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



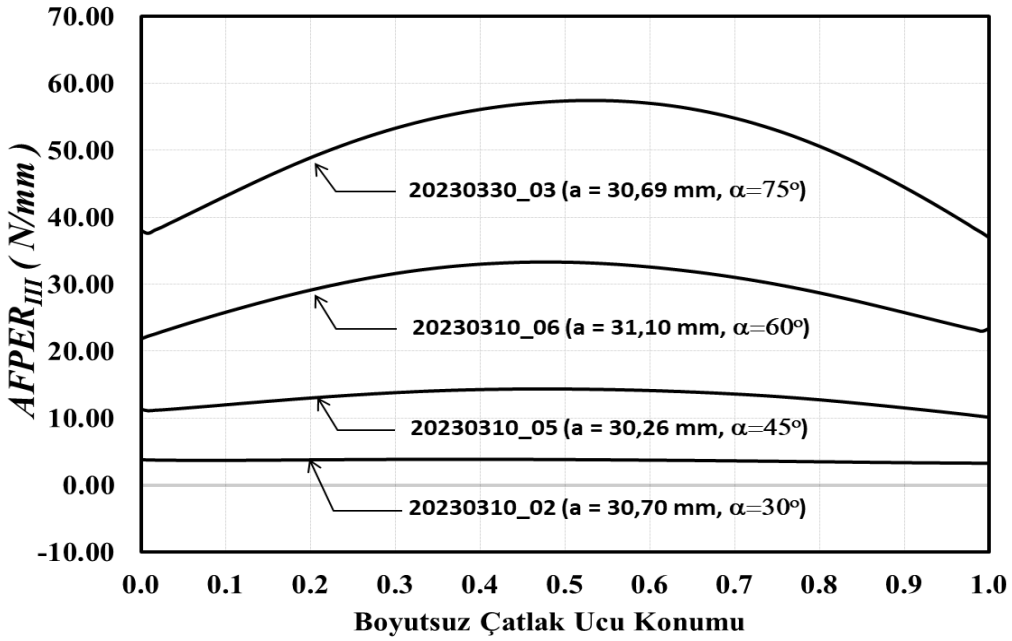
Şekil 5.133. Çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.



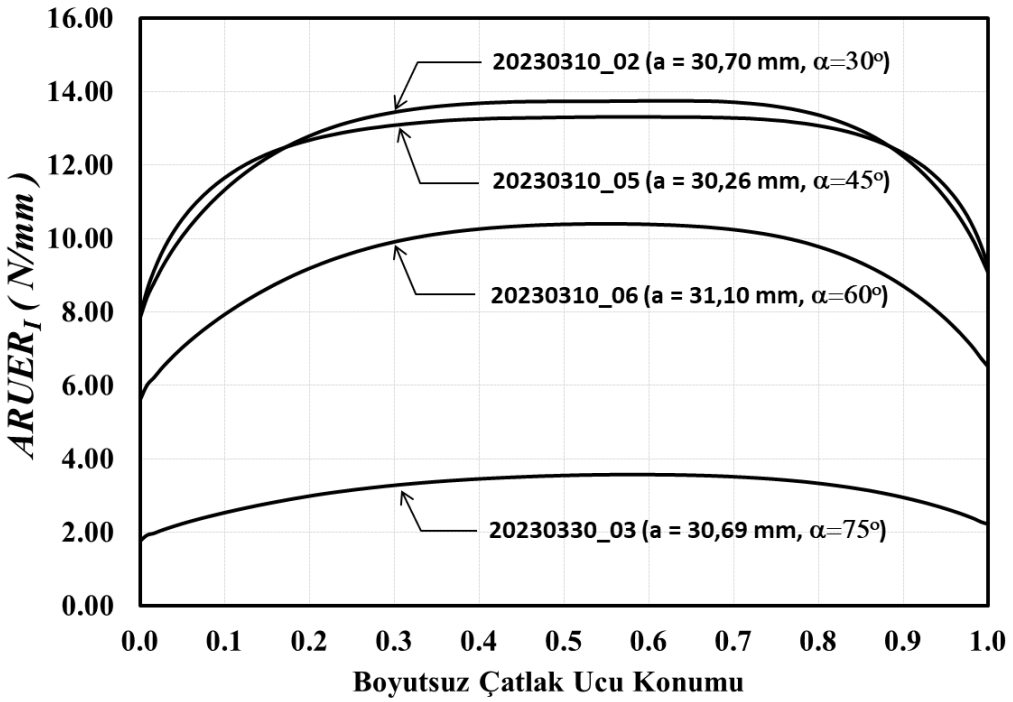
Şekil 5.134. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $AFPER_I$ dağılımları.



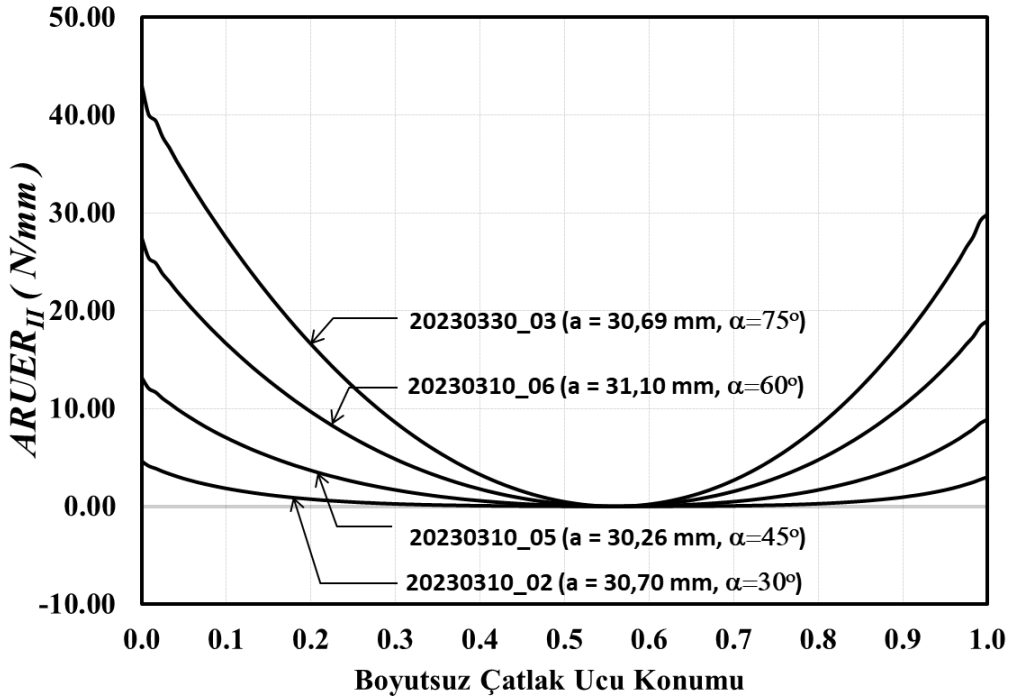
Şekil 5.135. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $AFPER_{II}$ dağılımları.



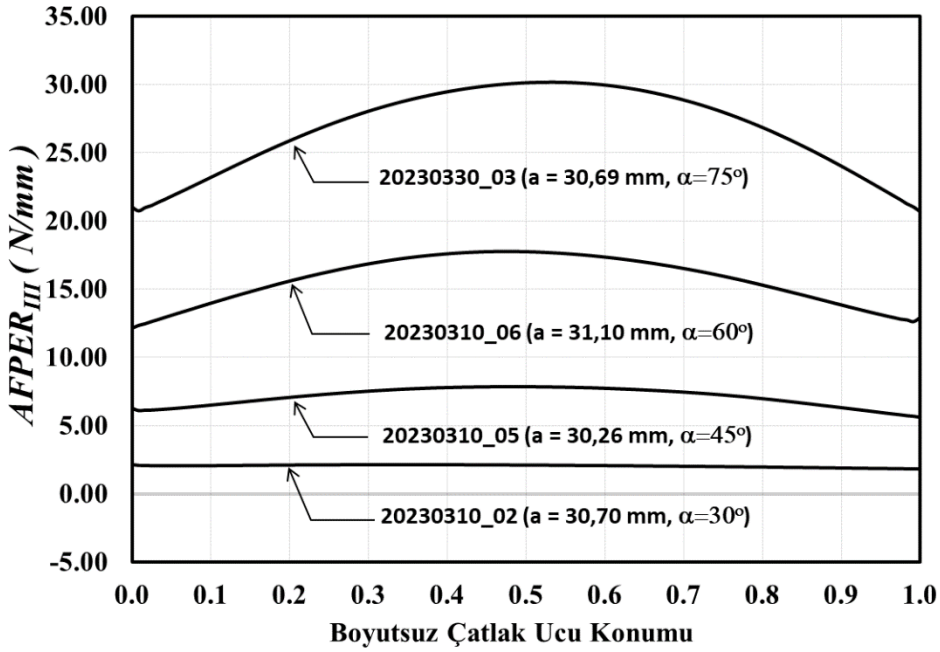
Şekil 5.136. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75° olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $AFPER_{III}$ dağılımları.



Şekil 5.127. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-I $ARUER_I$ dağılımları.



Şekil 5.138. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-II $ARUER_{II}$ dağılımları.



Şekil 5.139. Çatlak uzunluğu yaklaşık 30 mm, kalınlığı 25 mm, mod-II/III açısı 75º olan numuneler için farklı mod-I/III yükleri altında mod-III $ARUER_{III}$ dağılımları.

Tablo 5.4 Mod-I/II/III kırılma analizleri sonucu çatlak önü boyunca elde edilen en yüksek AFPER ve ARUER değerleri.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Mod-II/III Yükleme Acısı	Mod-I/III Yükleme Acısı	$AFPER_I$ (N/mm)	$AFPER_{II}$ (N/mm)	$AFPER_{III}$ (N/mm)	$ARUER_I$ (N/mm)	$ARUER_{II}$ (N/mm)	$ARUER_{III}$ (N/mm)
20230106_01	25	45º	45º	14.10	16.94	7.49	7.64	8.87	4.18
20230118_01	10	30º	60º	15.82	26.05	18.07	8.19	13.26	9.94
20230120_02	10	30º	75º	5.53	40.98	27.69	2.88	20.85	15.13
20230120_03	10	30º	45º	13.58	7.94	4.94	7.51	4.33	2.76
20230120_04	10	30º	30º	20.85	0.16	2.43	11.88	0.08	1.37
20230120_05	10	30º	30º	19.15	0.22	1.10	11.22	0.11	0.63
20230204_02	10	30º	45º	13.39	7.61	3.99	7.50	4.16	2.23
20230204_03	10	30º	60º	8.34	16.31	7.96	4.58	8.73	4.43
20230210_01	10	30º	75º	3.54	31.52	14.97	1.89	16.53	8.29
20230210_05	10	60º	30º	11.74	8.78	4.57	6.60	4.69	2.62
20230210_06	10	60º	30º	16.01	8.56	6.40	8.67	4.47	3.66
20230210_09	10	60º	75º	2.33	49.87	43.97	1.19	24.39	24.49
20230210_10	10	60º	75º	1.71	46.67	26.71	0.91	23.58	15.23
20230210_12	10	60º	60º	9.34	19.73	22.73	4.80	9.99	12.63
20230216_01	10	60º	60º	7.80	40.52	31.92	4.01	19.83	18.03
20230216_03	10	60º	45º	15.15	22.63	19.13	7.86	11.21	10.80
20230216_04	10	60º	45º	10.36	21.23	11.55	5.65	10.93	6.58
20230216_07	25	45º	30º	10.54	12.67	5.50	5.85	6.79	3.10
20230216_09	10	45º	75º	3.39	61.56	42.69	1.76	30.35	23.86
20230216_10	10	45º	75º	3.16	61.80	33.67	1.68	30.95	19.00

Tablo 5.4. (Devamı) Mod-I/II/III kırılma analizleri sonucu çatlak önü boyunca elde edilen en yüksek AFPER ve ARUER değerleri.

20230224_01	10	45º	60º	9.95	38.32	25.59	5.18	19.06	14.42
20230224_03	10	45º	60º	38.03	8.74	19.56	19.29	4.68	11.05
20230224_05	10	45º	45º	18.25	22.31	15.53	9.58	11.16	8.75
20230224_06	10	45º	45º	12.77	19.48	9.67	6.97	10.07	5.48
20230224_07	10	45º	30º	33.18	0.39	9.23	17.81	0.24	5.13
20230224_08	10	45º	30º	24.53	15.75	8.40	13.27	7.97	4.71
20230224_10	10	75º	45º	10.03	23.29	14.45	5.44	11.84	8.25
20230224_12	10	75º	45º	15.42	28.48	26.94	7.94	13.74	15.23
20230224_13	10	75º	75º	1.94	51.43	52.49	0.98	24.58	29.33
20230310_01	10	75º	30º	18.00	6.40	5.25	9.70	3.41	3.03
20230310_02	25	75º	30º	14.11	8.66	3.83	7.89	4.63	2.15
20230310_03	25	75º	30º	26.30	0.03	6.12	14.56	0.01	3.37
20230310_04	25	75º	45º	15.70	25.85	13.52	8.37	13.18	7.53
20230310_05	25	75º	45º	14.46	25.57	11.35	7.84	13.19	6.29
20230310_06	25	75º	60º	10.67	53.68	23.40	5.61	27.49	12.92
20230310_07	10	75º	60º	7.31	40.63	39.21	3.71	19.50	22.07
20230317_01	25	75º	60º	14.30	44.43	35.12	7.12	22.17	19.08
20230330_02	10	75º	75º	1.44	44.76	28.01	0.77	22.44	16.06
20230330_03	25	75º	75º	3.45	84.39	38.02	1.76	43.13	21.03
20230330_04	25	75º	75º	3.42	75.09	45.57	1.70	37.66	25.20
20230330_07	10	75º	60º	5.46	34.78	21.11	2.93	17.56	12.09
20230407_01	25	60º	30º	12.10	6.59	2.68	6.87	3.58	1.51
20230407_03	25	60º	30º	31.82	0.08	6.10	17.39	0.05	3.35
20230407_04	25	60º	45º	12.25	19.83	7.77	6.73	10.40	4.31
20230407_05	25	60º	45º	16.43	22.80	11.98	8.73	11.64	6.67
20230407_06	25	60º	60º	8.88	42.84	16.88	4.75	22.22	9.29
20230407_07	25	60º	75º	3.57	79.79	31.94	1.84	41.13	17.52
20230407_08	25	30º	30º	12.41	0.04	0.74	6.96	0.01	0.40
20230407_09	25	30º	30º	19.83	0.09	0.77	11.70	0.01	0.43
20230407_10	25	30º	45º	13.07	10.89	3.91	7.28	5.85	2.19
20230414_02	25	30º	45º	13.34	11.93	4.41	7.41	6.40	2.47
20230414_03	25	30º	60º	5.22	13.68	4.69	2.97	7.52	2.65
20230414_06	25	60º	60º	8.62	42.01	17.30	4.60	21.77	9.55
20230414_08	25	60º	75º	2.97	68.80	29.06	1.54	35.48	16.03
20230505_02	25	45º	60º	10.80	31.46	13.60	5.72	16.50	7.38
20230505_03	25	45º	75º	3.72	63.65	21.39	1.96	33.28	11.61

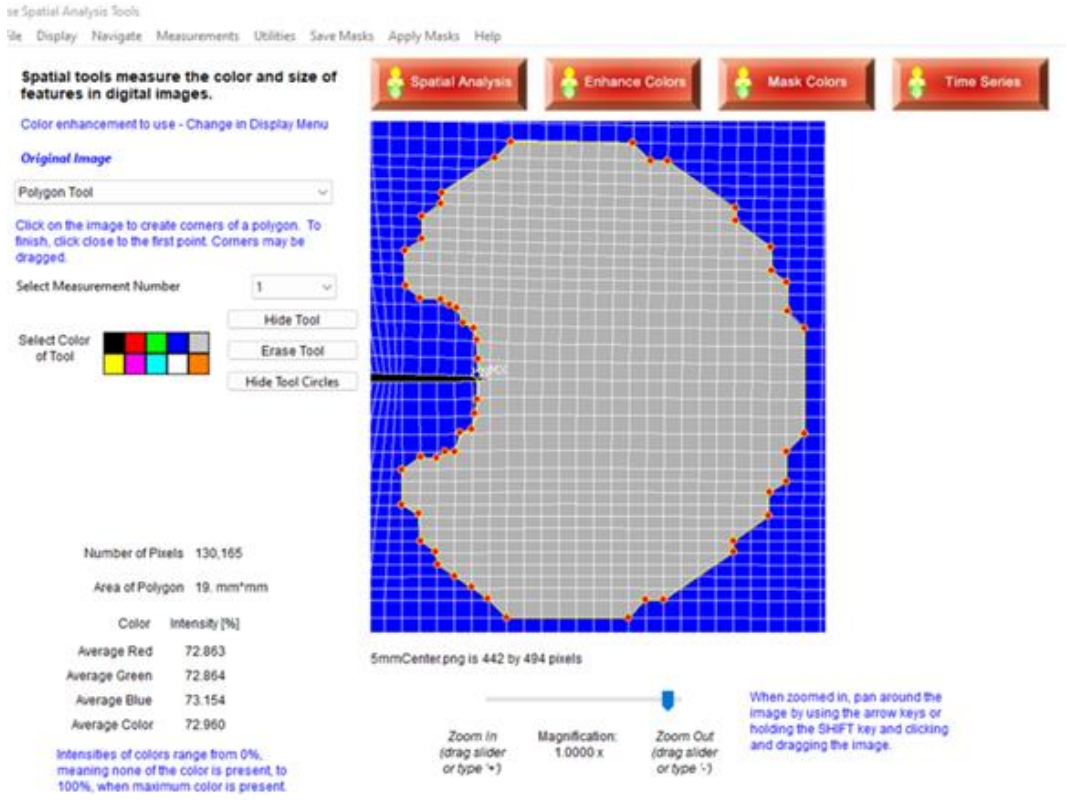
6. KIRILMA KRİTERİ GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI.

Sünek malzemeler için gerçekleştirilen elastik-plastik kırılma mekaniği analizleri sonuçlarına göre numunenin kalınlığı, çatlak boyutu, yükleme şekli gibi konular direkt olarak AFPER sonuçlarını değiştirmektedir. Dolayısı ile, AFPER değerlerinin tek başına kırılma kriteri olarak kullanılması mümkün değildir. Bu yönü ile elastik-plastik kırılma mekaniği, lineer elastik kırılma mekaniğinden keskin bir şekilde ayrışmakta ve gevrek malzemeler için literatürde kırılma yükü tahmininde kullanılan bir çok kriter yer alırken sünek malzemeler için bir kriter literatürde yer almamaktadır. Bu bölüm içerisinde sünek malzemeler için kriter geliştirme çalışmaları sunulacaktır.

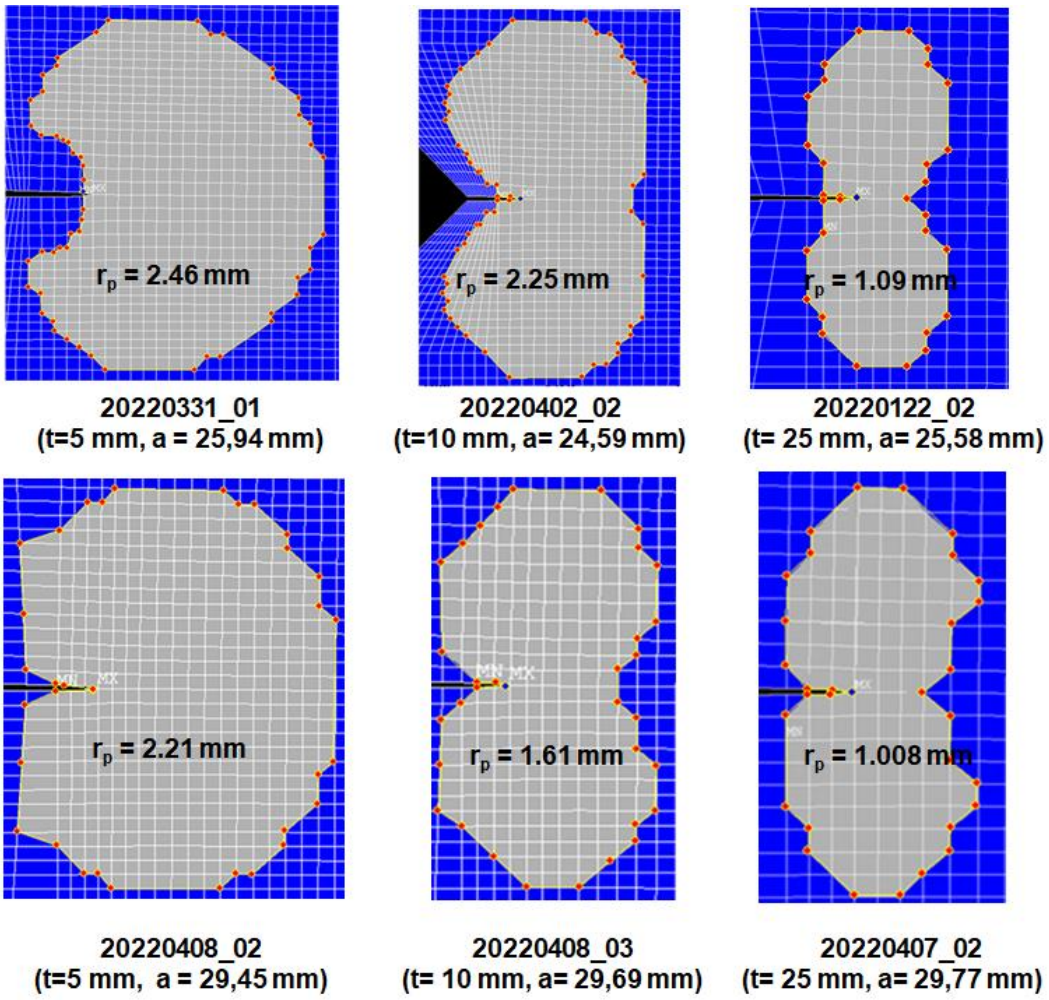
6.1. Mod-I Kırılma için Bileşik Kriter Denklemi

Kriter geliştirme çalışmalarına ilk olarak mod-I problemleri ile başlanmıştır. Bölüm 5'te kırılma deneylerinde var olan numune kalınlığı, çatlak boyu ve kırılma yükü ile elastik plastik kırılma analizi gerçekleştirilerek, her bir deney için AFPER ve ARUER değerleri hesaplanmıştır. Bu bölümde, ek olarak çatlak ucu eşdeğer plastik bölge yarıçapı ve çatlak ucundan bir eleman boyutu uzaklıktaki çatlak açılma miktarları temel alınarak farklı boyutsuz parametreler içeren bileşik bir polinom denklem ile sünek malzemelerdeki kırılma mekaniği problemleri karekterize edilmeye çalışılmıştır. Çatlak ucu plastik bölge yarı çapı hesaplamaları için sonlu elemanlar analizi sonucu hesaplanan eşdeğer plastik şekil değişimleri AFPER değerinin en yüksek olduğu çatlak önü düzleminde gerçek (1/1) ölçek ile kontur grafik olarak çizdirilmiştir. Bu şekilde elde edilen çatlak ucu plastik bölge konturu üzerinden bölge konturu üzerinden görüntü işleme programı kullanılarak plastik bölgenin alanı hesaplanmıştır [51]. Bu alandan ise dairenin alanı formülü ile eşdeğer yarı çap (R_P) hesaplanmıştır. Şekil 6.1'de bir mod-I problemi için görüntü işleme programı ile hesaplanan alan gösterilmektedir. Grafik üzerindeki gri renkli alan plastik şekil değişiminin olduğu çatlak ucu plastik bölgesidir. Bu alanın sınır noktalarına kırmızı markalar yerleştirilerek alanın tamamı taranmıştır. Sonrasında ise program vasıtası ile toplam taranan alan hesaplanmıştır. Şekil 6.2'de ise, mod-I problemleri için plastik bölgeler ve açıklanan yöntem ile hesaplanan eşdeğer yarıçap değerleri

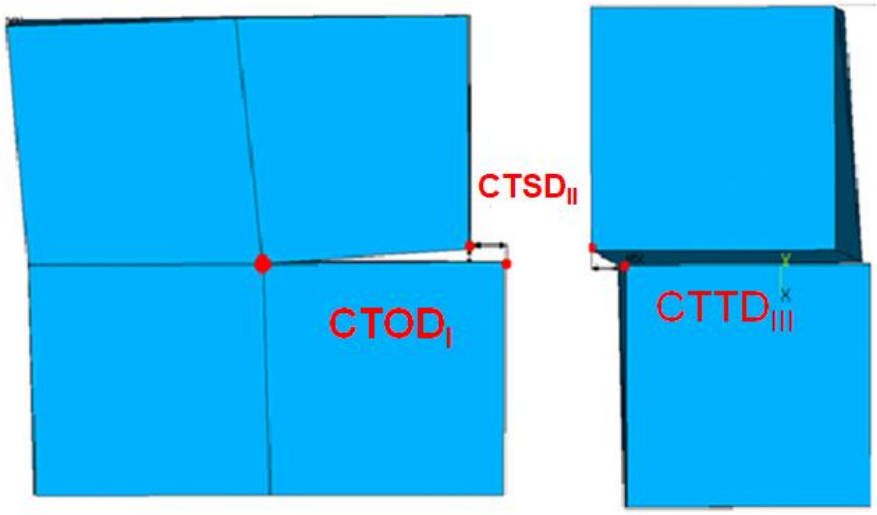
gösterilmektedir. Şekil 6.3'de ise, karışık mode problemler için çatlak arkasındaki ilk elemanda hesaplanan çatlak ucu açılma yerdeğiştirmesi ($CTOD_I$), çatlak ucu kayma yerdeğiştirmesi ($CTSD_{II}$) ve çatlak ucu yırtılma yerdeğiştirmesi ($CTTD_{III}$) hesabı için kullanılan bölgelerin resimleri sunulmaktadır. Mod-I analizleri için $CTOD_I$ değeri kullanılmıştır. Karışık mod problemler için ise bu üç değerin vektörel toplamı kullanılmaktadır.



Şekil 6.1. Görüntü işleme programı yardımıyla çatlak ucu plastik bölge alanı ve eşdeğer plastik yarıçap hesaplanması [51].



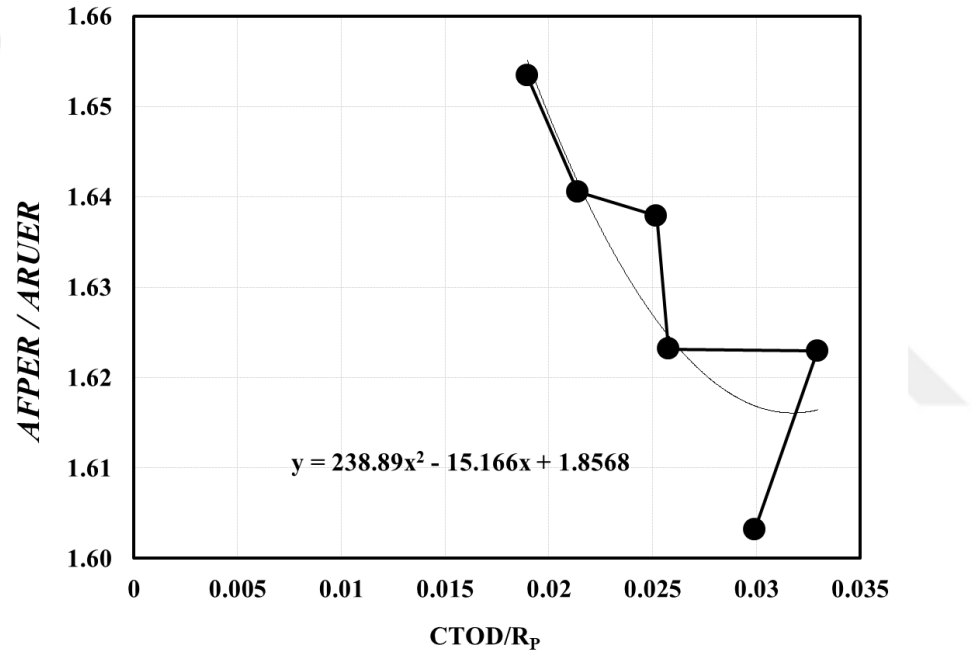
Şekil 6.2. Mod-I problemleri için hesaplanan plastik bölge eşdeğer yarıçap değerleri değerleri.



Şekil 6.3. Karışık mod kırılma analizleri için çatlak ucu açılma miktarı ($CTOD_I$), çatlak ucu kayma yerdeğiştirme miktarı ($CTSD_{II}$) ve çatlak ucu yırtılma yerdeğiştirmesi hesaplanması ($CTTD_{III}$).

Tablo 6.1 Mod-I kırılma analizleri sonucu kırılma kriteri geliştirme aşamasında kullanılan parametreler.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	AFPER (N/mm)	ARUER (N/mm)	R_P (mm)	CTOD/2 (mm)
20220331_01	5	56.90	34.68	3.12	0.033
20220402_02	10	43.23	26.63	1.93	0.025
20220408_02	5	37.33	22.58	2.43	0.023
20220408_03	10	32.37	19.76	1.61	0.020
20220407_02	25	29.92	18.66	1.09	0.016
20220122_02	25	26.98	16.63	1.00	0.017

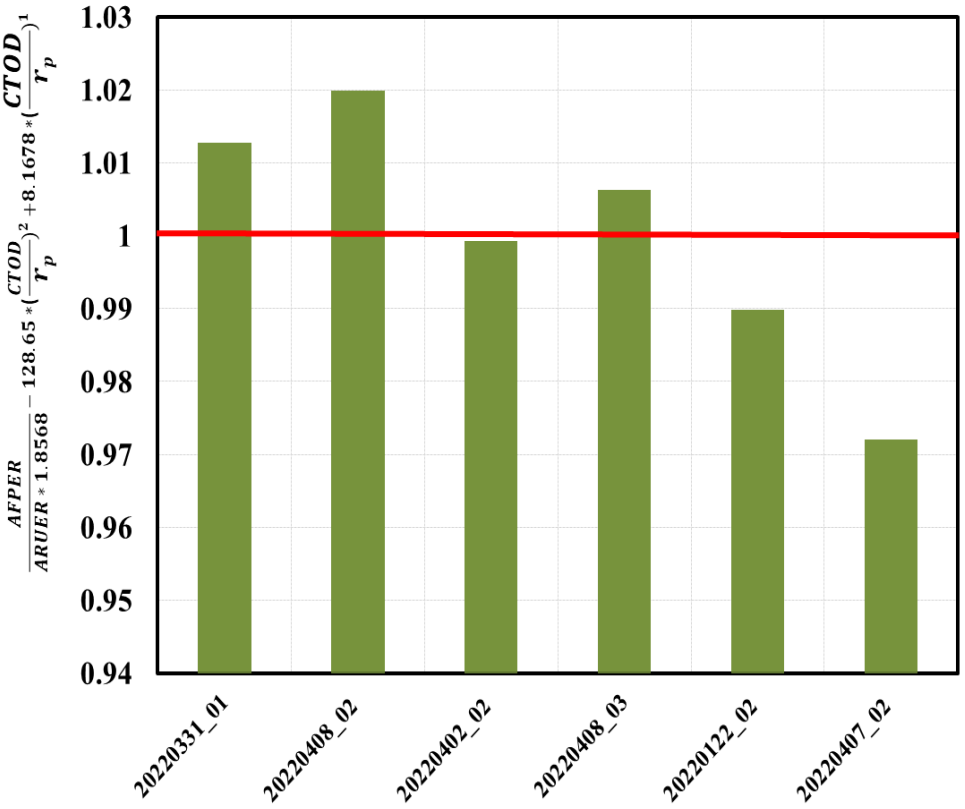


Şekil 6.4. Polinom kriter geliştirme çalışmaları için AFPER/ARUER ve CTOD/R_P oranına bağlı mod-I kırılma tokluğu analizleri ile geliştirilen denklem.

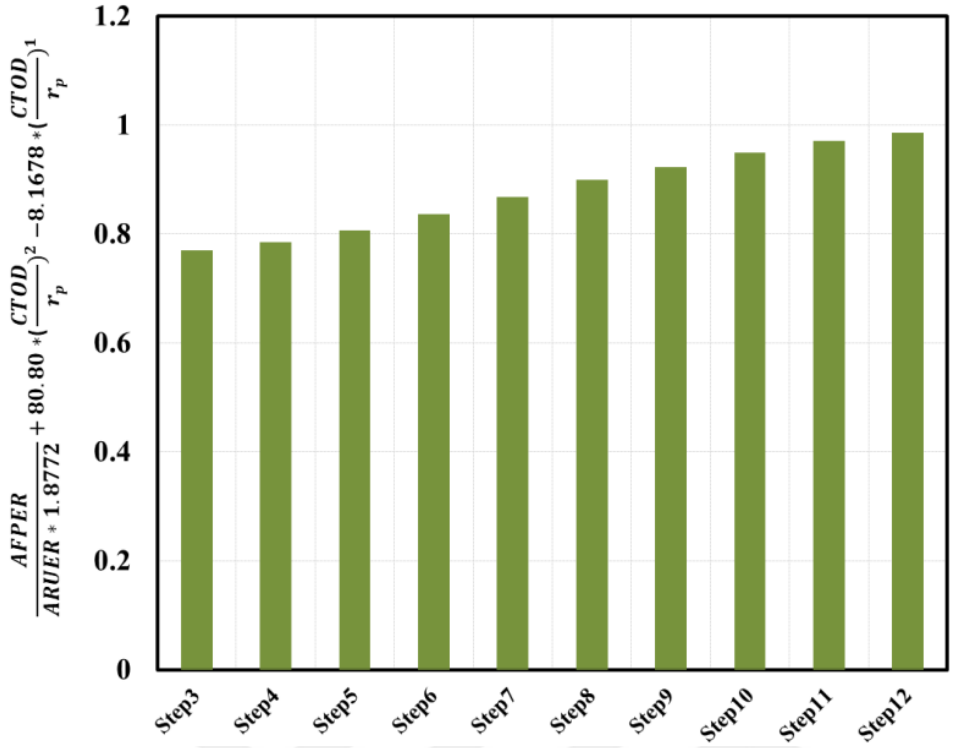
Şekil 6.4'te verilen grafikte ise y ekseni AFPER/ARUER oranını, x ekseni ise CTOD/R_P oranını temsil etmektedir. İlgili değişkenler yerine koyulursa kırılma yükü hesaplamak için bir denklem elde edilir (denklem 6.1). Bileşik polinom denklemi kriterinde, sonlu elemanlar analizinden AFPER, ARUER, CTOD ve R_P hesaplanarak denklemde yerine koyulur. Denklemin değeri 1 olduğunda kararsız kırılmanın gerçekleşeceği öngörülmektedir. Şekil 6.5'te kırılma analizi sonucu elde edilen parametrelerin denklem sonucu sunulmaktadır. Değerler 1 değerine maksimum % 2,7 farkla yakındır. Şekil 6.6'te ele alınan bir problem için sonlu elemanlar analizindeki

artırımlı yük adımlarının denklem sonuçları adımların kriter sonuçları sunulmaktadır. Şekil 6.6'te görüldüğü üzere, 6.1 nolu denklemin değeri, artırımlı yüklemeler ile gerçekleştirilen lineer olmayan analiz ara sonuçlarına göre monotonik olarak artmaya ve en son yük adımı sonunda yaklaşık 1 değerini almaktadır.

$$\frac{AFPER}{ARUER * 1{,}8568} - 128{,}6568 * \left(\frac{CTOD}{R_P}\right)^2 + 8{,}1678 * \left(\frac{CTOD}{R_P}\right) = 1 \qquad (6.1)$$



Şekil 6.5. Mod-I bileşik kriter denklemi sonuçları



Şekil 6.6. Mod-I entegre denklem arttırımlı yükleme adım sonuçları.

6.2. Mod-I/II Bileşik Denklem

Önceki bölümden görüldüğü üzere, bileşik denklem geliştirme çalışmaları kapsamında geliştirilen ilk denklem mod-I problemleri için kabul edilebilir doğruluk oranı ile çalışmaktadır. Bu bölüm içerisinde aynı kriterin mod-I/II problemlerine uyumluluğu incelenecek ve mod-I/II problemlerini de kapsayan yeni bir polinom denklem geliştirme çalışmaları sunulacaktır. Tablo 6.2 mod-I/II kırılma analizleri sonucu hesaplanan $AFPER_1$, $AFPER_2$, $ARUER_1$, $ARUER_2$, CTOD (Çatlak ucu açılma yerdeğiştirmesi miktarı), CTSD (Çatlak ucu kayma yerdeğiştirmesi miktarı), ve R_P sonuçlarını vermektedir. Tablo 6.2'de verilen verilerin bir kısmı kriter geliştirme aşamasında, kalan kısmı ise kriter doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır. Karışık mod problemler için $APFER_{TOP}$ değeri $AFPER_1$ ve $AFPER_2$ nin nümerik toplamı olarak alınmıştır. Aynı şekilde $ARUER_{TOP}$ değeri $ARUER_1$ ve $ARUER_2$ nin sayısal toplamı olarak alınmaktadır. CTCD (Çatlak ucu birleşik yerdeğiştirme miktar) ise CTOD ve CTSD'nin vektörel toplamı olarak ifade edilmektedir. Sırasıyla Denklem 6.2, 6.3 ve 6.4 $APFER_{TOP}$, $ARUER_{TOP}$ ve CTCD değerlerinin hesaplanma formüllerini vermektedir. Şekil 6.7, numune kalınlığı 5 mm, yaklaşık 25 mm uzunluğunda bulunduran problemler için plastik bölge alanlarını vermektedir. Şekil 6.8 ise kriter

denklemini vermektedir. Şekil 6.9'da mod-I test ve analizleri ile geliştirilen denklemin mod-I/II problemlerine uygulamasını gösterilmektedir. Yüzde maksimum 7 fark ile sonuçlar örtüşmektedir. Şekil 6.10'da ise mod-I/II test ve analizleri ile geliştirilen denklemin mod-I/II problemlerine uygulamasını göstermektedir. Yüzde maksimum 6 fark ile sonuçlar örtüşmektedir. Şekil 6.11'te görüldüğü üzere, 6.4 nolu denklemin değeri, artırımlı yüklemeler ile gerçekleştirilen lineer olmayan analiz ara sonuçlarına göre monotonik olarak artmaya ve en son yük adımı sonunda yaklaşık 1 değerini almaktadır.

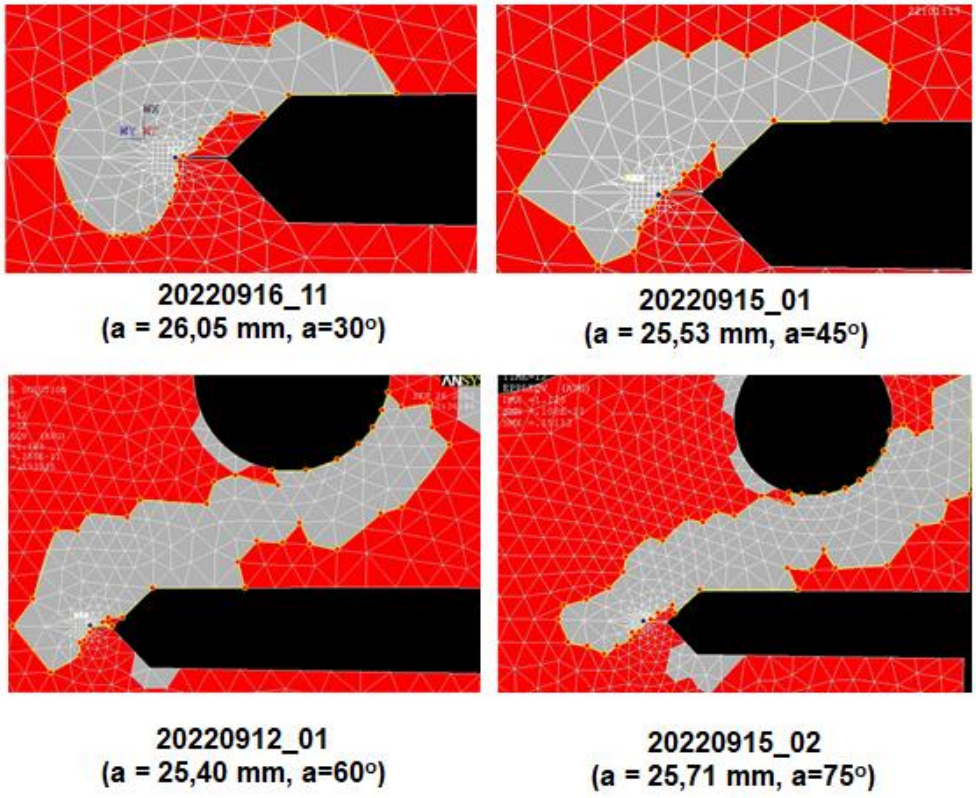
$$AFPER_{TOP} = AFPER_1 + AFPER_2 \tag{6.2}$$

$$ARUER_{TOP} = ARUER_1 + ARUER_2 \tag{6.3}$$

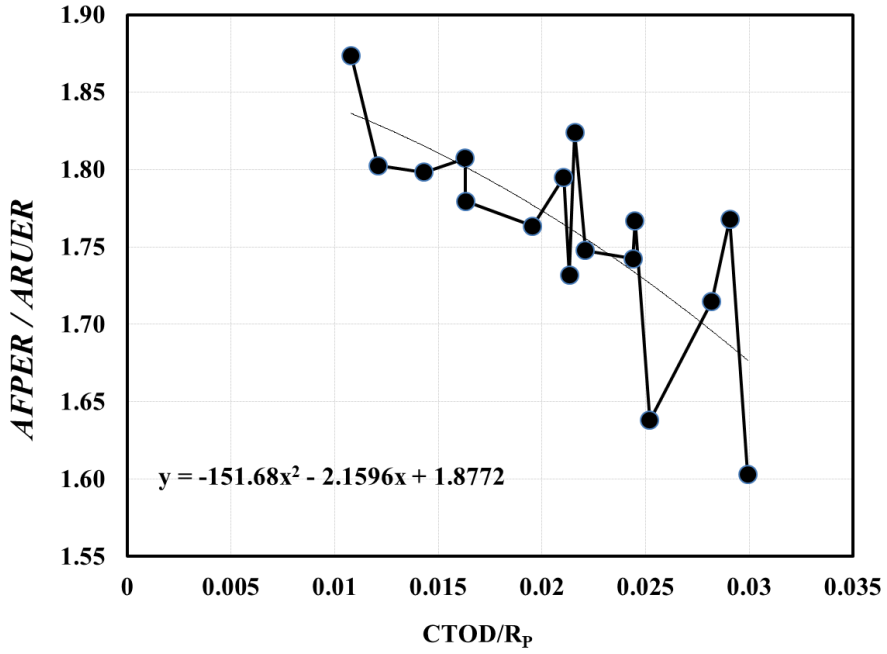
$$CTSD = \sqrt{CTOD^2 + CTSD^2} \tag{6.4}$$

Tablo 6.2 Mod-I/II kırılma analizleri sonucu kırılma kriteri geliştirme aşamasında kullanılan parametreler.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	$AFPER_I$ (N/mm)	$AFPER_{II}$ (N/mm)	$ARUER_I$ (N/mm)	$AFPER_{II}$ (N/mm)	CTOD (mm)	CTSD (mm)	R_P (mm)
20220722_01	10	15º	35.22	0.07	19.94	0.02	0.06	-0.01	1.94
20220819_02	10	45º	26.94	2.10	15.32	1.00	0.05	-0.01	3.10
20220822_01	10	60º	16.03	6.37	9.05	3.54	0.03	-0.03	3.43
20220626_01	10	30º	35.40	0.52	20.17	0.16	0.05	-0.02	2.20
20220826_03	10	60º	15.73	5.26	9.16	2.85	0.04	-0.01	1.94
20220909_02	10	75º	10.66	24.84	5.30	13.65	0.09	-0.02	8.24
20220909_01	10	45º	25.25	1.48	14.75	0.59	0.04	-0.01	1.85
20220912_01	5	60º	19.31	9.18	10.17	5.41	0.04	-0.04	7.04
20220915_01	5	45º	29.63	3.78	16.22	2.36	0.05	-0.03	3.96
20220915_02	5	75º	4.84	14.88	2.34	8.44	0.02	-0.05	8.23
20220916_02	5	75º	5.97	13.46	3.25	7.54	0.02	-0.05	2.49
20220916_06	5	60º	23.13	11.07	12.38	6.37	0.05	-0.05	3.22
20220916_08	5	45º	33.60	3.88	18.43	2.45	0.05	-0.03	3.04
20220916_10	5	30º	40.04	1.22	22.22	0.81	0.06	-0.02	2.76
20220916_11	5	30º	40.64	1.54	22.31	1.03	0.06	-0.02	4.01
20220923_01	20	30º	27.02	0.42	15.46	0.10	0.04	-0.01	2.20
20220920_01	20	45º	26.20	2.01	14.91	0.83	0.04	-0.02	2.89
20220923_03	20	45º	20.11	1.20	11.93	0.39	0.03	-0.02	1.48
20220930_06	20	60º	20.03	6.99	11.25	3.74	0.04	-0.04	4.48
20220930_01	20	30º	22.30	0.25	13.13	0.02	0.03	-0.01	1.24
20220930_05	20	60º	16.02	3.62	9.46	1.88	0.03	-0.02	1.80

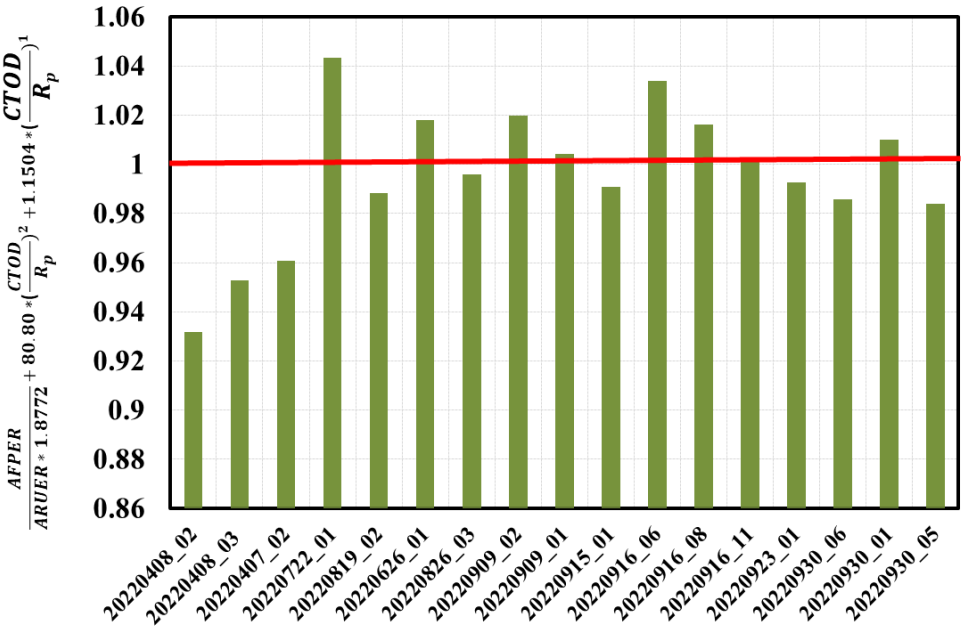


Şekil 6.7. Numune kalınlığı 5 mm, çatlak uzunluğu yaklaşık 25 mm olan mod-I/II problemleri için hesaplanan plastik bölge alanları değerleri.

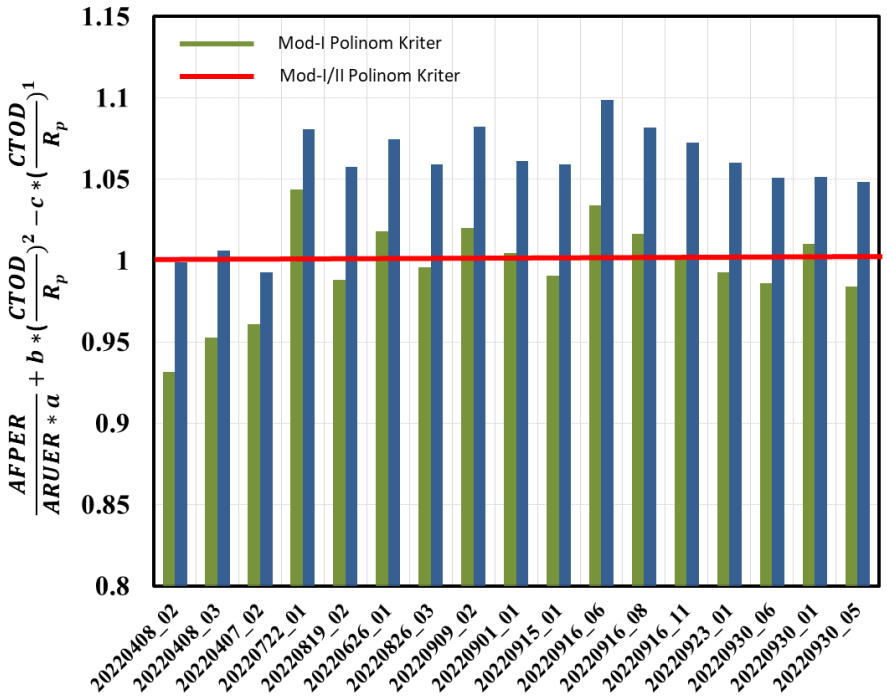


Şekil 6.8. Polinom kriter geliştirme çalışmaları için AFPER/ARUER ve CTCD/R_P oranına bağlı mod-I/II kırılma tokluğu analizleri ile geliştirilen denklem.

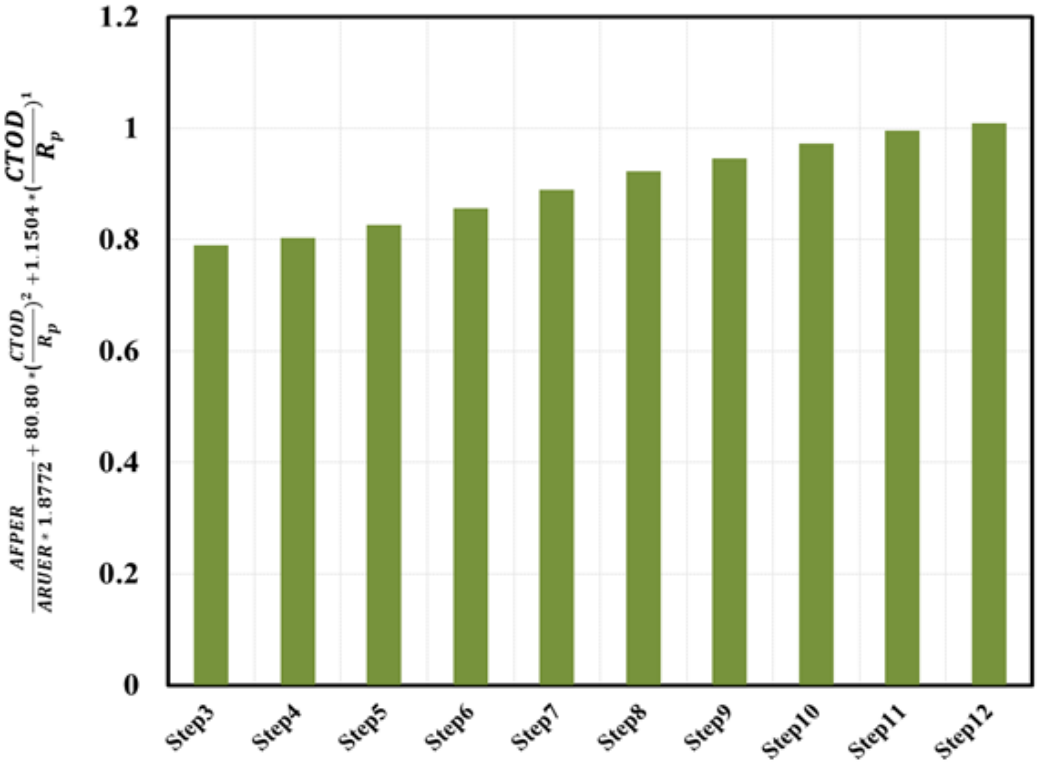
$$\frac{AFPER}{ARUER * 1{,}8772} + 80{,}80 * \left(\frac{CTCD}{R_P}\right)^2 + 1{,}156 * \left(\frac{CTCD}{R_P}\right) = 1 \qquad (6.5)$$



Şekil 6.9. Mod-I/II Entegre polinom denklem kriter sonuçları.



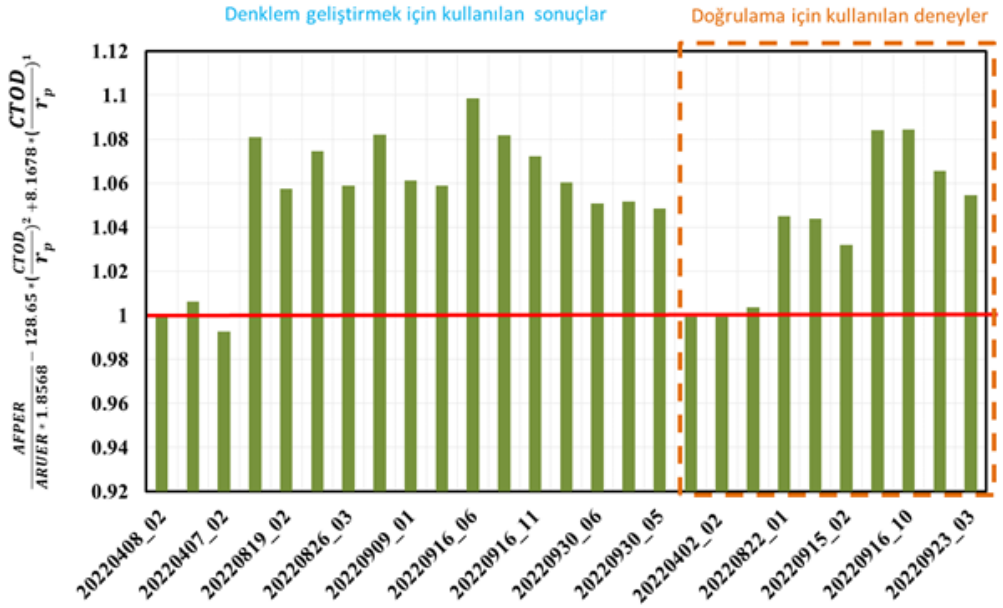
Şekil 6.10. Mod-I ve Mod-I/II Entegre polinom denklem kriter sonuçları karşılaştırmaları.



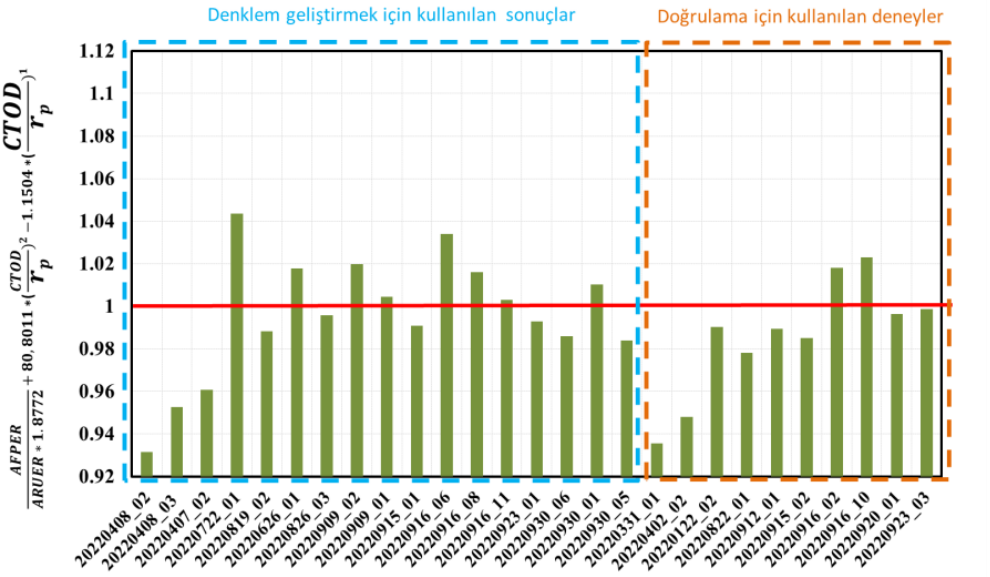
Şekil 6.11. Farklı yükleme adımları için kriter denklem sonuçları.

6.3. Polinom Denklem Doğrulama

Bu kısım içerisinde doğrulama analizlerine yer verilecektir. Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilen analiz sonuçlarından bir kısmı kriter geliştirme çalışmaları için, diğer kısmı ise doğrulama çalışmaları için kullanılmıştır. Şekil 6.12. mod-I problemleri ile geliştirilen denkleminin için mod-I ve mod-I/II problemlerine uyarlaması sunulmaktadır. Mod-I problemleri ile geliştirilen kriter denklemi mod-I/II problemleri içinde maksimum yüzde 10 fark ile çalışmaktadır. Şekil 6.13 ise mod-I/II problemleri için geliştirilen kriter sonuçlarını göstermektedir. Mod-I/II kriteri mod-I/II problemleri için yaklaşık yüzde 5 fark ile çalışmaktadır. Mod-I problemlerine uyguladığımızda ise fark yaklaşık olarak maksimum yüzde 10 seviyesindedir.



Şekil 6.12. Mod-I/II bileşik kriter denkleminin doğrulama deneyleri dahil tüm mod-I kırılma deneylerin uygulaması ile elde edilen kriter değerleri.



Şekil 6.13. Mod-I/II Entegre polinom denklem kriter sonuçları doğrulama sonuçları ile karşılaştırmaları.

Benzer yaklaşım ile mod-I/III problemleri içinde kriter geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ancak mod-I/III problemlerinde elde edilen yer değiştirme değerleri, mod-I ve mod-I/II problemlerine göre oldukça yüksektir. Mod-I/III analizlerinin dahil edildiği regresyon analizlerinde elde edilen bileşik kriter denklemlerinde son adımda, yüksek doğruluklu değerler hesaplayan kriterler geliştirilebilmiştir. Ancak farklı yük değerlerinde de bileşik polinom denkleminin 1

değerine çok yaklaşmasından dolayı, bileşik kriter yönteminin mod-III yönünde kuvvet içeren problemler için kullanılamayacağına kanaat getirilmiş ve başka bir yöntem arayışına gidilmiştir.

6.4. Mod-I AFPER/ARUER oranına bağlı kriter çalışması

Mod-I problemlerinin sonuçları incelendiğinde, farklı kalınlık ve çatlak boyuna sahip problemler için AFPER/ARUER oranlarının birbirlerine yakın değerler olduğu görülmektedir. Bu değerlerin yakınlığı direkt olarak AFPER/ARUER oranı ile kırılma yükü tahmin edebilen bir kriter geliştirilebileceğini göstermektedir. Tablo 6.3 mod-I kırılma analizi sonucu AFPER, ARUER ve AFPER/ARUER oranı değerlerini vermektedir. Bu değerin tamamının ortalaması ise sünek malzemeler için kritik AFPER/ARUER oranı olarak isimlendirilmiştir. Tablo 6.4 ise mod-I problemlerinin AFPER/ARUER değerleri ile ortalama (kritik) AFPER/ARUER değeri arasındaki yüzde farkları içermektedir. Tablo 6.4'den görüldüğü üzere mod-I problemleri için maksimum fark yaklaşık %1,5 değerinde oldukça yakındır.

Tablo 6.3 Mod-I AFPER, ARUER değerleri ve AFPER/ARUER oranları.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	AFPER (N/mm)	ARUER (N/mm)	AFPER/ARUER
20220331_01	5	56.90	34.68	1.64
20220402_02	10	43.23	26.63	1.62
20220408_02	5	37.33	22.58	1.65
20220408_03	10	32.37	19.76	1.64
20220407_02	25	29.92	18.66	1.60
20220122_02	25	26.98	16.63	1.62
			ortalama	**1.63**

Tablo 6.4 Mod-I AFPER/ARUER oran değerleri ile kritik AFPER/ARUER oranları arasındaki yüzde farklar.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	AFPER/ARUER	% Fark
20220331_01	5	1.64	0.64
20220402_02	10	1.62	-0.42
20220408_02	5	1.65	1.39
20220408_03	10	1.64	0.49
20220407_02	25	1.60	-1.67
20220122_02	25	1.62	-0.48

6.5. Mod-I/II AFPER/ARUER Oranına Bağlı Kriter Çalışması

Mod-I/II problemleri için elde edilen $AFPER_I$, $AFPER_{II}$, $ARUER_I$ ve $ARUER_{II}$ sonuçları Bölüm 5.2 de yer alan Tablo 5.2 de verilmektedir. $ARUER_I$ ve $ARUER_{II}$ değerleri nümerik olarak toplanarak $ARUER_{TOP}$ elde edilmektedir (Denklem 6.5). Tablo 6.5 Mod-I/II problemleri için hesaplanan $AFPER_I$, $AFPER_{II}$, $ARUER_I$, $ARUER_{II}$, $ARUER_I/AFPER_{TOP}$ ve $ARUER_{II}/AFPER_{TOP}$ değerlerini vermektedir. Bu iki değerin a ve b sabit sayıları ile çarpılarak ve birbirleri ile toplanarak mod-I analizlerinden elde edilen kritik AFPER/ARUER oranına eşit olması hedeflenmiştir.

$$ARUER_{TOP} = ARUER_I + ARUER_{II} + ARUER_{III} \tag{6.5}$$

$$\left(\frac{AFPER_{TOP}}{ARUER_{TOP}}\right)_{I/II} = 1.63 = 0.9258\left(\frac{AFPER_I}{ARUER_{TOP}}\right) + 0.8719\left(\frac{AFPER_{II}}{ARUER_{TOP}}\right) \tag{6.6}$$

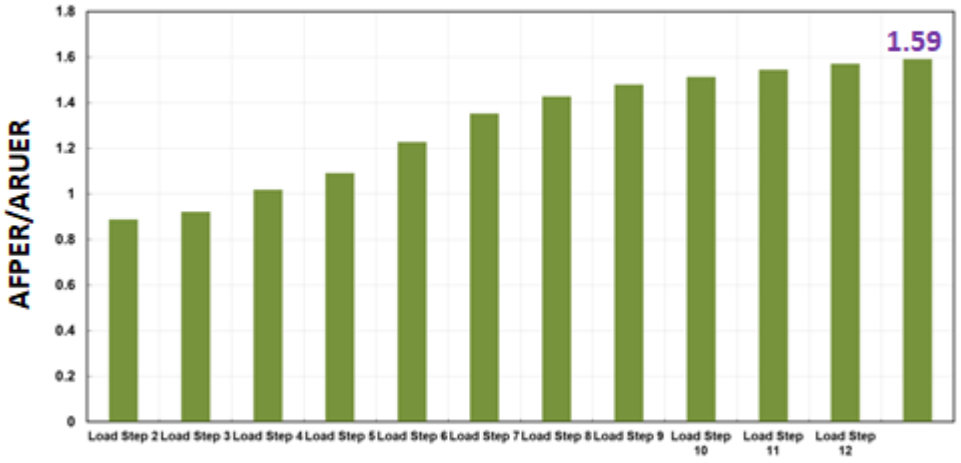
Bu doğrultuda, tüm mod-I/II AFPER ve ARUER verileri ile regresyon analizi yapılarak a ve b sabit sayıları hesaplanmıştır. Regresyon analizi sonucuna göre a =0,9258, b=0,8719'dir. Mod-I/II problemleri için geliştirilen bu kriter denklem 6.6'da verilmektedir. Tablo 6.6 ise mod-I/II problemlerinin kritik AFPER/ARUER oranı ile arasındaki farkı vermektedir. Mod-I/II problemleri için maksimum fark yaklaşık %2,5 değerinde oldukça yakındır. Şekil 6.14 analiz edilen mod-I/II problemlerinden biri için analizin başından itibaren farklı artırımlı yükleme adımlarındaki $(AFPER/ARUER)_{I/II}$ oran kriteri sonuçlarını vermektedir. Kırılma yüküne yaklaştıkça monotonik olarak değerlerin kritik AFPER/ARUER oranına yaklaştığı, dolayısıyla kriterin mod-I/II yüklemesi altında tutarlı bir şekilde kırılma yükünü tahmin edebilme kabiliyetinin olduğu görülmektedir.

Tablo 6.5 Mod-I/II AFPER,ARUER değerleri ve AFPER/ARUER oranları.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	$AFPER_I$ (N/mm)	$AFPER_{II}$ (N/mm)	$ARUER_I$ (N/mm)	$ARUER_{II}$ (N/mm)	$ARUER_{TOP}$ (N/mm)	$AFPER_I$ / $ARUER_{TOP}$	$AFPER_{II}$ / $ARUER_{TOP}$
20220722_01	10	15º	35.22	0.07	19.94	0.02	19.96	1.76	0.00
20220819_02	10	45º	26.94	2.10	15.32	1.00	16.32	1.65	0.13
20220822_01	10	60º	16.03	6.37	9.05	3.54	12.59	1.27	0.51
20220626_01	10	30º	35.40	0.52	20.17	0.16	20.33	1.74	0.03
20220826_03	10	60º	15.73	5.26	9.16	2.85	12.01	1.31	0.44
20220909_02	10	75º	10.66	24.84	5.30	13.65	18.95	0.56	1.31
20220909_01	10	45º	25.25	1.48	14.75	0.59	15.34	1.65	0.10
20220912_01	5	60º	19.31	9.18	10.17	5.41	15.58	1.24	0.59
20220915_01	5	45º	29.63	3.78	16.22	2.36	18.58	1.59	0.20
20220915_02	5	75º	4.84	14.88	2.34	8.44	10.78	0.45	1.38
20220916_02	5	75º	5.97	13.46	3.25	7.54	10.79	0.55	1.25
20220916_06	5	60º	23.13	11.07	12.38	6.37	18.75	1.23	0.59
20220916_08	5	45º	33.60	3.88	18.43	2.45	20.88	1.61	0.19
20220916_10	5	30º	40.04	1.22	22.22	0.81	23.03	1.74	0.05
20220916_11	5	30º	40.64	1.54	22.31	1.03	23.34	1.74	0.07
20220923_01	20	30º	27.02	0.42	15.46	0.10	15.56	1.74	0.03
20220920_01	20	45º	26.20	2.01	14.91	0.83	15.74	1.66	0.13
20220923_03	20	45º	20.11	1.20	11.93	0.39	12.32	1.63	0.10
20220930_06	20	60º	20.03	6.99	11.25	3.74	14.99	1.34	0.47
20220930_01	20	30º	22.30	0.25	13.13	0.02	13.15	1.70	0.02
20220930_05	20	60º	16.02	3.62	9.46	1.88	11.34	1.41	0.32

Tablo 6.6 Mod-I AFPER/ARUER oran değerleri ile kritik AFPER/ARUER oranı arasındaki fark.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	$AFPER_{I}/ARUER_{TOP}$	$AFPER_{II}/ARUER_{TOP}$	$(AFPER/ARUER)_{JII}$	% Fark
20220722_01	10	15º	1.76	0.00	1.637	0.19
20220819_02	10	45º	1.65	0.13	1.641	-0.04
20220822_01	10	60º	1.27	0.51	1.620	1.22
20220626_01	10	30º	1.74	0.03	1.635	0.33
20220826_03	10	60º	1.31	0.44	1.595	2.77
20220909_02	10	75º	0.56	1.31	1.664	-1.45
20220909_01	10	45º	1.65	0.10	1.608	1.94
20220912_01	5	60º	1.24	0.59	1.661	-1.30
20220915_01	5	45º	1.59	0.20	1.654	-0.85
20220915_02	5	75º	0.45	1.38	1.619	1.26
20220916_02	5	75º	0.55	1.25	1.600	2.44
20220916_06	5	60º	1.23	0.59	1.657	-1.04
20220916_08	5	45º	1.61	0.19	1.652	-0.73
20220916_10	5	30º	1.74	0.05	1.656	-0.97
20220916_11	5	30º	1.74	0.07	1.670	-1.81
20220923_01	20	30º	1.74	0.03	1.631	0.53
20220920_01	20	45º	1.66	0.13	1.653	-0.77
20220923_03	20	45º	1.63	0.10	1.596	2.67
20220930_06	20	60º	1.34	0.47	1.644	-0.23
20220930_01	20	30º	1.70	0.02	1.587	3.25
20220930_05	20	60º	1.41	0.32	1.586	3.27



Şekil 6.14. Bir mod-I/II problemi için farklı yükleme adımlarında AFPER/ARUER oran kriteri sonuçları.

6.6. Mod-I/III AFPER/ARUER Oranına Bağlı Denklem Kriter Geliştirilmesi

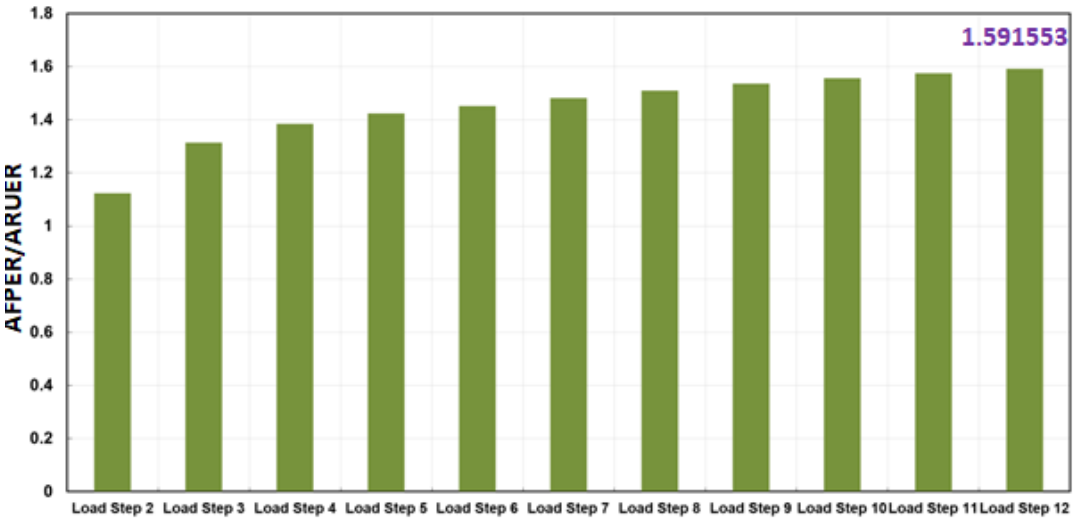
Mod-I/III problemleri için elde edilen $AFPER_I$, $AFPER_{II}$, $AFPER_{III}$, $ARUER_I$, $ARUER_{II}$ ve $ARUER_{III}$ sonuçları Bölüm 5.3 de yer alan Tablo 5.3 de verilmektedir. $ARUER_I$, $ARUER_{II}$ ve $ARUER_{III}$ değerleri nümerik olarak toplanarak $ARUER_{TOP}$ elde edilmektedir. Tablo 6.7 Mod-I/III problemleri için hesaplanan $AFPER_I$, $AFPER_{II}$, $AFPER_{III}$ $ARUER_I$, $ARUER_{II}$, $ARUER_{III}$, $ARUER_I/AFPER_{TOP}$, $ARUER_{II}/AFPER_{TOP}$ ve $ARUER_{II}/AFPER_{TOP}$ değerlerini vermektedir. Mod-I/II için geliştirilen denklem kullanılarak $(AFPER/ARUER)_{I/II}$ hesaplanabilir. Sonrasında ise $(AFPER/ARUER)_{I/II}$ ve $AFPER_{III}/ARUER_{TOP}$ değerleri c ve d sabit sayıları ile çarpılarak mod-I analizlerinden elde edilen kritik AFPER/ARUER oranına (1.63) eşit olması hedeflenmiştir.

$$\left(\frac{AFPER_{TOP}}{ARUER_{TOP}}\right)_{I/II/III} = 1.63 = 1{,}02\left(\frac{AFPER_{TOP}}{ARUER_{TOP}}\right)_{I/II} + 0.79.\left(\frac{AFPER_{III}}{ARUER_{TOP}}\right) \qquad (6.7)$$

Bu doğrultuda excel de regresyon analizi yapılmış, c ve d sabit sayıları hesaplanmıştır. Regresyon analizi sonucuna göre c =1.0184, d=0.7919'dir. Mod-I/III vasıtası ile geliştirilen bu kriter denklem 6.7'de verilmektedir. Elde edilen bu denklem mod-I, mod-II ve mod-III yönünde tüm kırılma parametrelerinin tümünü içermektedir. Tablo 6.7'de denklem 6.7 vasıtası ile hesaplanan $(AFPER_{TOP}/ARUER_{TOP})_{I/II/III}$ değerleri gösterilmektedir. Değerler arasında ki maksimum fark %3 mertebesinde kritik $(AFPER_{TOP}/ARUER_{TOP})$ değerine yakındır. Dolayısı ile karışık mod problemlerin kırılma yükü tahminin de kullanılabileceği ön görülmektedir.

Tablo 6.7 Mod-I/III AFPER/ARUER oranları ve kritik AFPER/ARUER oranı arasındaki fark.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	$AFPER_I/ARUER_{TOP}$	$AFPER_{II}/ARUER_{TOP}$	$AFPER_{III}/ARUER_{TOP}$	$(AFPER/ARUER)_{I/II}$	$(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$	% Fark
20221014_02	10	45º	0.32	0.90	0.68	1.082	1.639	-0.57
20221014_01	10	45º	0.47	0.84	0.59	1.164	1.652	-1.35
20221026_01	10	60º	0.19	0.95	0.77	1.006	1.635	-0.31
20221026_02	10	30º	0.85	0.60	0.41	1.315	1.666	-2.23
20221026_03	10	75º	0.04	0.98	0.90	0.892	1.619	0.66
20221026_05	10	60º	0.17	0.93	0.81	0.968	1.627	0.20
20221111_01	10	30º	0.72	0.67	0.47	1.253	1.651	-1.31
20221026_04	10	75º	0.04	0.88	1.02	0.804	1.624	0.40
20221118_02	25	45º	0.55	0.87	0.46	1.265	1.649	-1.19
20221118_03	25	45º	0.54	0.84	0.41	1.232	1.583	2.86
20221118_04	25	30º	0.97	0.56	0.24	1.383	1.600	1.81
20221118_05	25	30º	1.02	0.50	0.28	1.379	1.624	0.35
20221119_01	25	60º	0.23	1.11	0.55	1.189	1.647	-1.03
20221119_02	25	75º	0.06	1.25	0.58	1.144	1.625	0.32
20221202_02	25	60º	0.24	1.03	0.63	1.125	1.644	-0.83
20221202_01	25	75º	0.06	1.14	0.70	1.049	1.626	0.24
20230505_06	25	90º	0.00	1.13	0.78	0.988	1.627	0.17



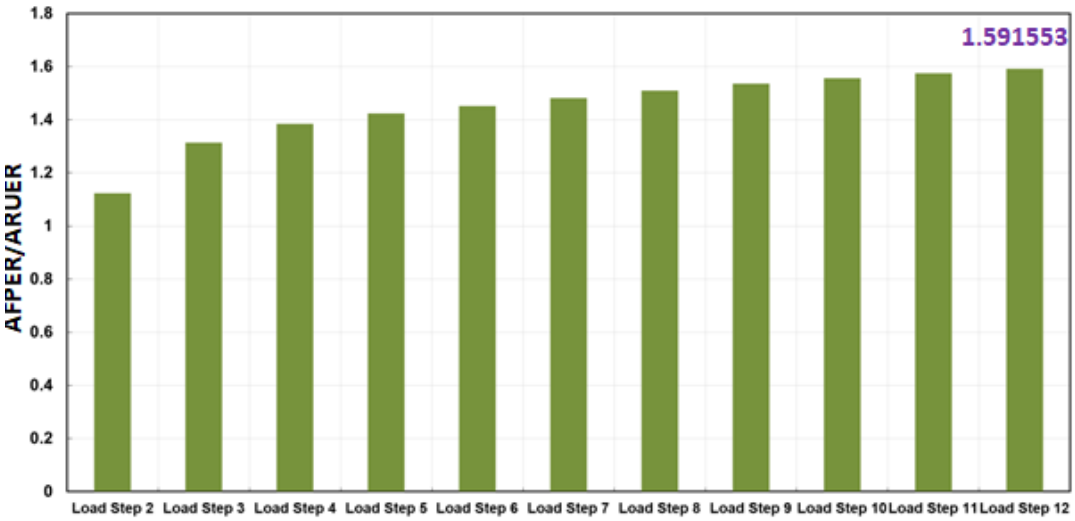
Şekil 6.15. Mod-I/III problemi farklı yükleme adımları için AFPER/ARUER oran kriteri sonuçları.

6.7. Mod-I/II/III Deneyleri ile AFPER/ARUER Oranına Bağlı Denklem Doğrulama Çalışmaları.

Bu kısımda mod-I, mod-I/II ve mod-I/III kırılma analizleri ile geliştirilen kriterin doğrulama çalışmaları sunulacaktır. Önceki bölümde, her ne kadar dış yük global olarak mod-I ve mod-III yönlerinde olsa da, düzlem dışı yükleme (mod-III) nedeniyle çatlak yüzeylerinin birbirlerine relatif olarak dönmesi sonucu indirekt olarak çatlak ucunda mod-II deformasyonu da oluşmasından dolayı geliştirilen kriterin lokal olarak mod-I, mod-II ve mod-III deformasyonuna maruz kalan farklı boyutlardaki çatlaklar için çalıştığı görülmüştü. Ancak önceki bölümlerde tüm mod yönlerindeki dış kuvvetler global olarak uygulanmamıştır. Bu kısımda ise mod-I/II/II tutucusu sayesinde çatlak aynı anda mod-I, mod-II ve mod-III global yüklerine maruz kalmaktadır. Tablo 6.7 mod-I/II/II problemleri için $AFPER_I/ARUER_{TOP}$, $AFPER_{II}/ARUER_{TOP}$ ve $AFPER_{III}/ARUER_{TOP}$ sonuçlarını ve denklem 6.7 vasıtasıyla hesaplanan $(AFPER/ARUER)_{I/II}$ ve $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerlerini vermektedir. Değerler arasında ki maksimum fark %3 mertebesinde kritik ($AFPER_{TOP}/ARUER_{TOP}$) değerine yakındır. Dolayısı ile karışık mod problemlerin kırılma yükü tahminin de kullanılabileceği ön görülmektedir. Şekil 6.14'da ise analiz edilen mod-I/II problemlerinden biri için analizin başından itibaren farklı artırımlı yükleme adımlarındaki $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ oran kriteri sonuçlarını gösterilmektedir.

Tablo 6.7 Mod-I/II/III AFPER/ARUER oranları ve kritik AFPER/ARUER oranı arasındaki fark.

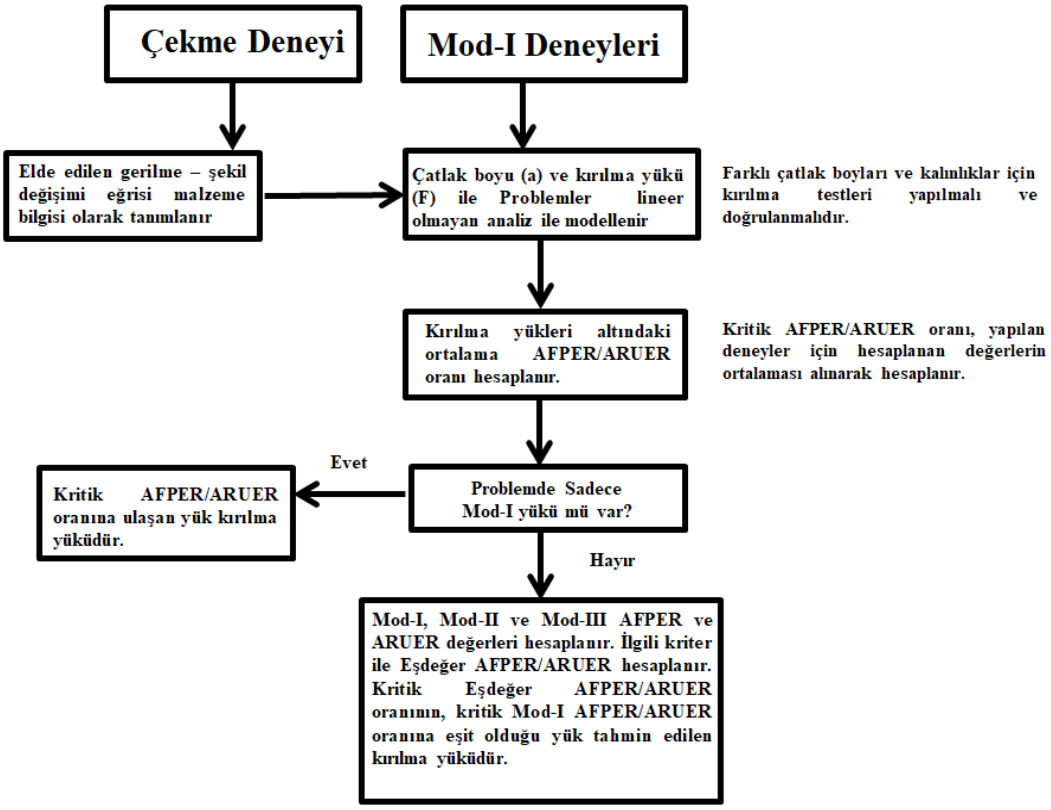
Numune ismi	Kalınlık (mm)	Mod-II/III Yükleme Açısı	Mod-I/III Yükleme Açısı	$AFPER_I / ARUER_{TOP}$	$AFPER_{II} / ARUER_{TOP}$	$AFPER_{III} / ARUER_{TOP}$	$(AFPER/ARUER_{TOP})_{III}$	$(AFPER/ARUER_{TOP})_{III/II}$	% Fark
20230106_01	25	45º	45º	0.68	0.82	0.36	1.34	1.66	-1.62
20230118_01	10	30º	60º	0.50	0.83	0.58	1.19	1.67	-2.34
20230120_02	10	30º	75º	0.14	1.05	0.71	1.05	1.64	-0.30
20230120_03	10	30º	45º	0.93	0.54	0.34	1.34	1.63	0.17
20230120_04	10	30º	30º	1.56	0.01	0.18	1.46	1.63	0.01
20230120_05	10	30º	30º	1.60	0.02	0.09	1.50	1.60	1.90
20230204_02	10	30º	45º	0.96	0.55	0.29	1.37	1.62	0.43
20230204_03	10	30º	60º	0.47	0.92	0.45	1.24	1.62	0.92
20230210_01	10	30º	75º	0.13	1.18	0.56	1.15	1.62	0.81
20230210_05	10	60º	30º	0.84	0.63	0.33	1.33	1.62	0.83
20230210_06	10	60º	30º	0.95	0.51	0.38	1.33	1.65	-1.40
20230210_09	10	60º	75º	0.05	1.00	0.88	0.91	1.62	0.38
20230210_10	10	60º	75º	0.04	1.17	0.67	1.06	1.62	0.83
20230210_12	10	60º	60º	0.34	0.72	0.83	0.94	1.62	0.82
20230216_01	10	60º	60º	0.19	0.97	0.76	1.02	1.64	-0.54
20230216_03	10	60º	45º	0.51	0.76	0.64	1.13	1.66	-1.73
20230216_04	10	60º	45º	0.45	0.92	0.50	1.21	1.63	-0.05
20230216_07	25	45º	30º	0.67	0.80	0.35	1.32	1.62	0.43
20230216_09	10	45º	75º	0.06	1.10	0.76	1.02	1.64	-0.48
20230216_10	10	45º	75º	0.06	1.20	0.65	1.10	1.64	-0.44
20230224_01	10	45º	60º	0.26	0.99	0.66	1.10	1.65	-1.05
20230224_03	10	45º	60º	1.09	0.25	0.56	1.22	1.69	-3.55
20230224_05	10	45º	45º	0.62	0.76	0.53	1.23	1.67	-2.60
20230224_06	10	45º	45º	0.57	0.87	0.43	1.28	1.64	-0.79
20230224_07	10	45º	30º	1.43	0.02	0.40	1.34	1.68	-3.07
20230224_08	10	45º	30º	0.95	0.61	0.32	1.40	1.69	-3.48
20230224_10	10	75º	45º	0.39	0.91	0.57	1.16	1.63	0.07
20230224_12	10	75º	45º	0.42	0.77	0.73	1.06	1.66	-1.67
20230224_13	10	75º	75º	0.04	0.94	0.96	0.85	1.62	0.45
20230310_01	10	75º	30º	1.12	0.40	0.33	1.38	1.66	-1.92
20230310_02	25	75º	30º	0.96	0.59	0.26	1.41	1.64	-0.49
20230310_03	25	75º	30º	1.47	0.00	0.34	1.36	1.65	-1.47
20230310_04	25	75º	45º	0.54	0.89	0.46	1.28	1.67	-2.25
20230310_05	25	75º	45º	0.53	0.94	0.42	1.31	1.66	-1.79
20230310_06	25	75º	60º	0.23	1.17	0.51	1.23	1.66	-1.67
20230310_07	10	75º	60º	0.16	0.90	0.87	0.93	1.64	-0.30
20230317_01	25	75º	60º	0.30	0.92	0.73	1.08	1.67	-2.42
20230330_02	10	75º	75º	0.04	1.14	0.71	1.03	1.61	1.13
20230330_03	25	75º	75º	0.05	1.28	0.58	1.17	1.64	-0.79
20230330_04	25	75º	75º	0.05	1.16	0.71	1.06	1.64	-0.72
20230330_07	10	75º	60º	0.17	1.07	0.65	1.09	1.62	0.67
20230407_01	25	60º	30º	1.01	0.55	0.22	1.42	1.62	0.57
20230407_03	25	60º	30º	1.53	0.00	0.29	1.42	1.68	-3.00
20230407_04	25	60º	45º	0.57	0.92	0.36	1.34	1.65	-1.05
20230407_05	25	60º	45º	0.61	0.84	0.44	1.30	1.67	-2.61
20230407_06	25	60º	60º	0.24	1.18	0.47	1.26	1.65	-1.15
20230407_07	25	60º	75º	0.06	1.32	0.53	1.21	1.65	-0.93
20230407_08	25	30º	30º	1.68	0.01	0.10	1.56	1.67	-2.58
20230407_09	25	30º	30º	1.63	0.01	0.06	1.52	1.60	2.02
20230407_10	25	30º	45º	0.85	0.71	0.26	1.41	1.64	-0.48
20230414_02	25	30º	45º	0.82	0.73	0.27	1.40	1.64	-0.49
20230414_03	25	30º	60º	0.40	1.04	0.36	1.28	1.58	2.96
20230414_06	25	60º	60º	0.24	1.17	0.48	1.24	1.65	-1.00
20230414_08	25	60º	75º	0.06	1.30	0.55	1.18	1.64	-0.51
20230505_02	25	45º	60º	0.36	1.06	0.46	1.27	1.65	-1.33
20230505_03	25	45º	75º	0.08	1.36	0.46	1.26	1.64	-0.79



Şekil 6.16. Mod-I/II/III problemi farklı yükleme adımları için AFPER/ARUER oran kriteri sonuçları.

6.8. AFPER/ARUER Metodu Akış Diyagramı

AFPER/ARUER yöntemi sünek malzemeler için kırılma yükü tahmin etme amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem ile çatlak ucunda yüksek plastik deformasyon bulunan çatlakların kalınlık, çatlak uzunluğu ve yükleme açısından bağımsız olarak karışık mod kırılma yükü tahmin edilebilir. Bu yöntemdeki ilk aşama çekme deneyi gerçekleştirilmesidir. Sonlu elemanlar modelindeki yer değiştirme değerlerinin hesaplanmasında malzeme kartı içerisindeki gerilme – şekil değişimi eğrisi önemli bir yer ihtiva etmektedir. Bu nedenle, çekme testlerinin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Sonraki adım ise kırılma tokluğu testleridir. Farklı çatlak boyu ve kalınlıklarda mod-I deneyleri yapılarak AFPER/ARUER oranları her bir problem için hesaplanır. Bu deneylerin AFPER/ARUER sonuçlarının ortalaması alınarak kritik AFPER/ARUER oranı belirlenir. Yöntemin en temel noktası mod-I deneyleridir. Bu deneylerin sayısı olabildiğince çok olmalı ve deneyler doğrulanmalıdır. Kırılma yükü tahmin edilmesi gereken problem bir mod-I problemi ise, ilgili problemin AFPER/ARUER oranı hesaplanıp direkt olarak kritik AFPER/ARUER oranı ile değerlendirme yapılabilir. Ancak problem, iki- veya üç-boyutlu karışık mod karışık mod yük içeriyorsa, ilgili kriterler kullanılarak uygun olan kriter eşdeğer AFPER/ARUER oranı hesaplanmalıdır. Bu orana karşılık gelen yük ise kırılma yükü olarak değerlendirilmelidir. Şekil 6.17'de AFPER/ARUER yöntemi için hazırlanmış olan akış diyagram gösterilmektedir.



Şekil 6.17. AFPER/ARUER yöntemi akış diyagramı.

7. KIRILMA YÜKÜ TAHMİNLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Önceki bölümlerde, kırılma tokluğu deneylerinden elde edilen kırılma yükleri ve çatlak boyları ile lineer ve lineer olmayan kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları paylaşılmıştır. Lineer elastik problemler için kırılma yükü altında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen gerilme-şiddet faktörü hesaplamaları ile direkt olarak yük tahmini gerçekleştirilebilir ve deneysel kırılma yükü ile karşılaştırılabilir. Ancak lineer olmayan elastik-plastik malzemelerde analizler artırımlı yük adımları uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Her bir adımdaki AFPER/ARUER değerleri birbirinden farklı olabilir. Özellikle yapının üzerindeki gerilmeler akma mukavemetinin üzerine çıktığında reaksiyon kuvvetlerindeki artış azalmakta ve yer değiştirmeler artmaktadır. Dolayısıyla AFPER/ARUER yönteminde kırılma yükü hesabı yapmak için analizin son adımı ile birlikte önceki adımlarda da hesaplamalar yapılarak interpolasyon uygulanmalı ve yük tahmini gerçekleştirilmelidir.

7.1. Mod-I Yüklemesi İçin LEKM Analizleri ve AFPER/ARUER Oranına Bağlı Tahmin Edilen Kırılma Yükleri

Bu bölüm içerisinde Tablo 3.1'de belirtilen mod-I deneylerinin kırılma yükü hesaplamalarının lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ve lineer olmayan elastik-plastik analizleri ve kırılma mekaniği uygulamaları ile tez kapsamında geliştirilmiş olan AFPER/ARUER oranına bağlı olarak tahminleri sunulacaktır. LEKM ile yük tahmini hesaplamaları direkt olarak VCCT metodu ile hesaplanan gerilme-şiddet faktörü ve ASTM E399 standardında yer alan denklem ile hesaplanmıştır. Denklem 7.1 ve 7.2 ASTM E399'daki formülasyonu vermektedir [58]. LEKM yaklaşımı için AL-2024 T351 malzemesinin düzlem şekil değişimi koşullarındaki kırılma tokluğu 37 (Mpa.$\sqrt{\text{m}}$) olarak alınmış ve bu değere karşılık gelen kırılma yükü tahmini gerçekleştirilmiştir [55]. Tablo 7.1 LEKM yöntemi ile elde edilen kırılma yükü değerlerinin test yükü ile karşılaştırmasını sunmaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinden hesaplanan gerilme-şiddet faktörleri ile gerçekleşen tahminlerde ortalama fark %9 seviyesinde, ASTM E399 formülasyonları ile hesaplanan gerilme-şiddet faktörü değerleri ile gerçekleşen tahminlerde ise ortalama fark %19

seviyesindedir. LEKM yöntemleriyle gerçekleşen tahminlerde kalınlık azaldıkça test yükü ile arasındaki fark artmankatadır. Bu beklenen bir durumdur ve sebebi, kalınlık azaldıkça plastik deformasyon arttığından problem LEKM şartlarından uzaklaşmaktadır. AFPER/ARUER yönteminde ise eşit adım aralıklarında artırımlı olarak gerçekleştirilen yüklenen sonlu elemanlar analizinin son adımında uygulanan yük ve bir önceki adımında uygulanan yük değerleri arasında interpolasyon veya extrapolasyon yapılarak kritik AFPER/ARUER değerine denk gelecek yük değeri hesaplanmaktadır. Mevcut problemler 12 yükleme adımında çözdürülmüştür. AL-2024 T351 malzemesi için kritik AFPER/ARUER değeri 1,63 olarak önceki bölümlerde hesaplanmıştır. Tablo 7.2 AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan kırılma yükleri değerlerinin test kırılma yükü ile karşılaştırmasını sunmaktadır. AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan kırılma yükü tahminlerinde ortalama fark yüzde 4 seviyesidedir. Şekil 7.1 ise LEKM ve AFPER/ARUER yöntemleri ile hesaplanan kırılma yükü değerlerinin, test yükü ile arasındaki farkları bar grafiği olarak sunmaktadır.

$$K_I = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{7.1}$$

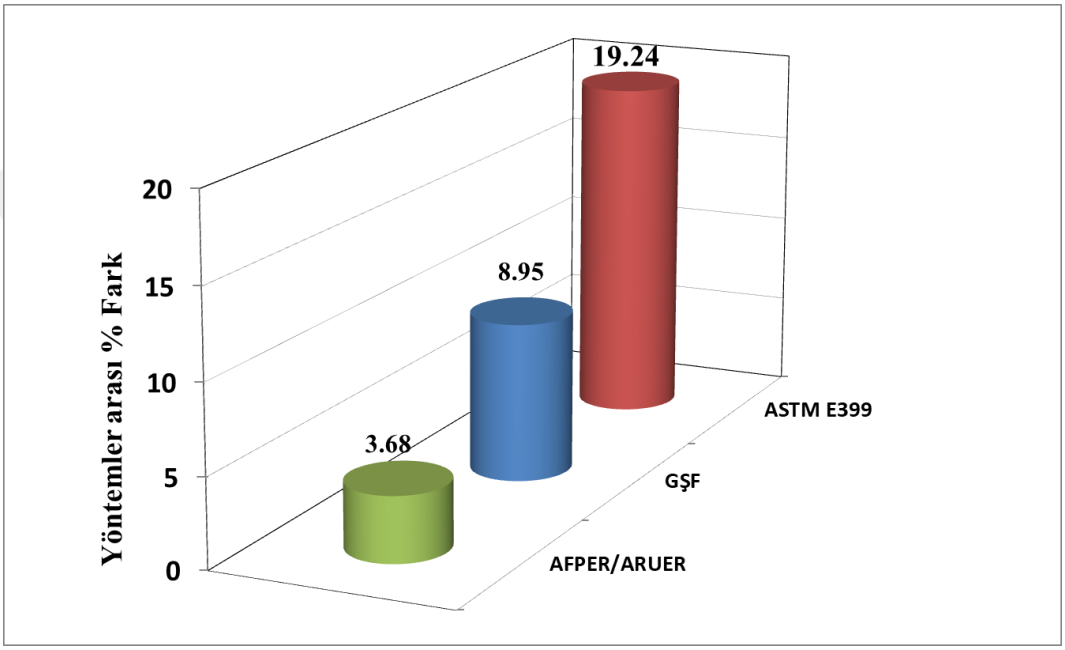
$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2+\frac{a}{W})(0{,}886+464\frac{a}{W}-13{,}32\left(\frac{a}{W}\right)^2+14{,}72\left(\frac{a}{W}\right)^3-5{,}6\left(\frac{a}{W}\right)^4)}{\sqrt{(1-\frac{a}{W})^3}} \tag{7.2}$$

Tablo 7.1 LEKM kuralları ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri ve test yükleri ile karşılaştırmaları.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Kı (Mpa.$\sqrt{m}$)	Test Kırılma Yükü (N)	GŞF Kırılma Yükü (N)	ASTM E399 Kırılma Yükü (N)	GŞF % Fark	ASTM E399 % Fark
20220331_01	5	44,47	5678,0	4724,03	4023,51	16,80	29,14
20220402_02	10	43,88	12068,59	10175,66	8766,81	15,68	27,36
20220408_01	5	41,32	4093,50	3665,48	3161,12	10,46	22,72
20220408_03	10	40,66	7752,74	7054,517	6041,88	9,00	22,07
20220407_02	25	37,00	16647,2	16647,1	15434,08	0,01	7,29
20220122_02	25	36,35	22184,53	22579,03	20662,37	-1,78	6,86

Tablo 7.2. AFPER/ARUER yöntemi ile tahmin edilen kırılma yükü ve test yükleri ile karşılaştırmaları.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	AFPER/ARUER (12 Adım)	AFPER/ARUER (11 Adım)	Test Kırılma Yükü	AFPER/ARUER Kırılma Yükü (N)	AFPER/ARUER % Fark
20220331_01	5	1,64	1,61	5678,0	5530,65	2,59
20220402_02	10	1,62	1,60	12068,59	12391,78	-2,68
20220408_01	5	1,65	1,62	4093,50	3836,99	6,26
20220408_03	10	1,64	1,61	7752,74	7621,73	1,69
20220407_02	25	1,60	1,57	16647,19	17788,26	-6,85
20220122_02	25	1,62	1,59	22184,53	22627,43	-1,99



Şekil 7.1. Mod-I problemleri için AFPER/ARUER , GŞF ve ASTM E399 ile hesaplanan kırılma yükü tahminlerinin test yükü ile arasındaki ortalama farklar.

7.2. Mod-I/II Yüklemesi İçin LEKM Analizleri ve AFPER/ARUER Oranına Bağlı Tahmin Edilen Kırılma Yükleri

Bu bölüm içerisinde Tablo 3.2 da belirtilen mod-I/II deneylerinin kırılma yükü hesaplamalarının lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ve AFPER/ARUER oranına bağlı olarak tahminleri sunulacaktır. LEKM ile yük tahmini hesaplamaları için VCCT metodu ile mod-I ve mod-II gerilme-şiddet faktörleri hesaplanlanmıştır. Sonrasında Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile eşdeğer gerilme-şiddet faktörü hesaplanmış ve kırılma yükü tahminlerinde eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri kullanılmıştır. LEKM yaklaşımı için AL-2024 T351 malzemesinin düzlem şekil değişimi koşullarındaki kırılma tokluğu 37 $(Mpa.\sqrt{m})$ olarak alınmış ve bu değere karşılık gelen kırılma yükü tahmini gerçekleştirilmiştir [55]. Tablo 7.3 Richard ve Demir-

ayhan kriteri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerlerini vermektedir. Tablo 7.4'de ise Richard ve Demir-ayhan kriteri kullanılarak hesaplanan kırılma yükü tahminlerinin, test yükleri ile karşılaştırmasını göstermektedir. Demir – Ayhan kriteri kullanılarak tahminlerde ortalama fark %34 seviyesinde, Richard kriteri ile gerçekleşen tahminlerde ise ortalama fark %29 seviyesindedir. AFPER/ARUER yönteminde ise eşit artırımlı adımlarla yüklenen sonlu elemanlar analizinin son adımında uygulanan yük ve bir önceki adımında uygulanan yük değerlerinde hesaplanan $(AFPER/ARUER)_{I/II}$ değerleri arasında interpolasyon veya extrapolasyon yapılarak kritik AFPER/ARUER değerine denk gelecek yük değeri hesaplanmaktadır. Mevcut problemler 12 yükleme adımında çözdürülmüştür. AL-2024 T351 malzemesi için kritik $(AFPER/ARUER)_{I/II}$ değeri 1,63 olarak önceki bölümlerde hesaplanmıştır. Tablo 7.5 mod-I/II kırılma analizleri sonucunda hesaplanan 12. adım ve 11. Adım $(AFPER/ARUER)_{I/II}$ değerlerini sunmaktadır. Tablo 7.6 ise AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan kırılma yükü değerlerinin test kırılma yükleri ile karşılaştırmalarını sunmaktadır. Tahmin edilen değerler ile test yükü arasındaki ortalama fark %7 mertebesindedir. Şekil 7.2 ise LEKM ve AFPER/ARUER yöntemleri ile hesaplanan kırılma yükü değerlerinin, test yükü ile arasındaki ortalama farkları bar grafiği olarak sunmaktadır. Gerilme-şiddet faktörü hesaplanarak gerçekleştirilen LEKM yaklaşımlarında kalınlık arttıkça kırılma yükü tahminleri ile test yükü arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. Özellikle düşük kalınlıklı malzemelerde, çatlak ucu bölge yarı çapı ve plastik deformasyon artmasından dolayı LEKM yaklaşımları ile hesaplanan kırılma yükü değerleri ile test yükü arasındaki fark artmaktadır.

Tablo 7.3 Mod-I/II deneyleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I ve mod-II gerilme-şiddet faktörü değerleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörleri değerleri.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	$K_{eş}$ (Richard) (MPa.$\sqrt{m}$)	$K_{eş}$ (Demir-Ayhan) (MPa.$\sqrt{m}$)
20220722_01	10	15º	54.45	43.95
20220819_02	10	45º	52.98	38.71
20220822_01	10	60º	49.43	29.89
20220626_01	10	30º	56.83	44.20
20220826_02	10	45º	60.85	44.68
20220901_01	10	45º	50.25	36.89
20220912_01	5	60º	53.69	32.95
20220915_01	5	45º	51.69	36.81
20220915_02	5	75º	47.32	15.57
20220916_02	5	75º	48.19	15.61
20220916_06	5	60º	57.45	33.81
20220916_08	5	45º	56.22	40.15
20220916_10	5	30º	56.78	43.87
20220923_01	20	30º	50.25	39.12
20220920_01	20	45º	52.49	38.08
20220923_03	20	45º	45.79	33.6
20220930_06	20	60º	54.87	33.76
20220930_01	20	30º	45.34	35.59
20220930_05	20	60º	46.38	30.02

Tablo 7.4. LEKM kuralları ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri ve test yükü ile arasındaki fark.

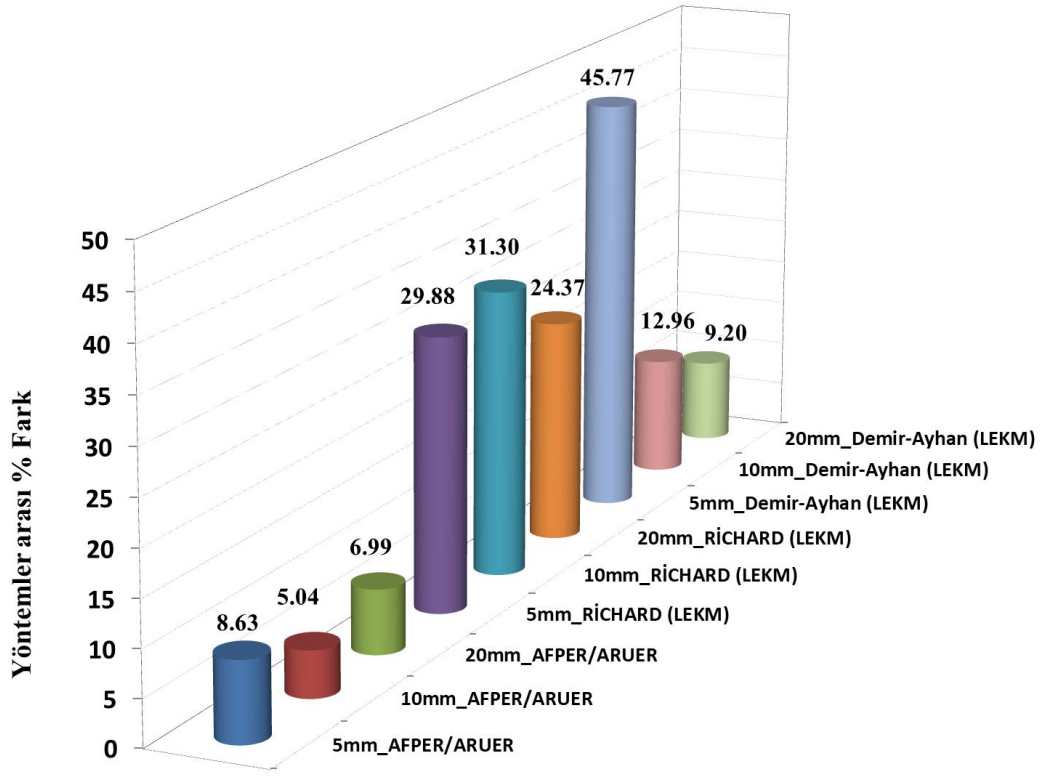
Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	Test Kırılma Yükü (N)	GŞF (Richard) Kırılma Yükü (N)	GŞF (Demir-Ayhan) Kırılma Yükü (N)	GŞF (Richard) % Fark	GŞF (Demir-Ayhan) % Fark
20220722_01	10	15º	13465.9	9150.38	11336.48	32.05	15.81
20220819_02	10	45º	17025.3	11890.07	16273.21	30.16	4.42
20220822_01	10	60º	17465.4	13073.43	21619.93	25.15	23.79
20220626_01	10	30º	11205.6	7295.57	9380.253	34.89	16.29
20220826_02	10	45º	12610.2	7667.66	10442.65	39.19	17.19
20220901_01	10	45º	10410.1	7665.60	10441.14	26.36	0.30
20220912_01	5	60º	10919.6	7525.14	12261.77	31.09	12.29
20220915_01	5	45º	8851.1	6335.66	8896.786	28.42	0.52
20220915_02	5	75º	11723.7	9166.88	27859.79	21.81	137.64
20220916_02	5	75º	8548.7	6563.64	20262.77	23.22	137.03
20220916_06	5	60º	8442.2	5437.1	9238.728	35.60	9.44
20220916_08	5	45º	6717	4420.65	6190.012	34.19	7.85
20220916_10	5	30º	6151.3	4008.42	5188.012	34.84	15.66
20220923_01	20	30º	26122	19234.11	24706.39	26.37	5.42
20220920_01	20	45º	30126.9	21236.34	29272.46	29.51	2.84
20220923_03	20	45º	19442.2	15710.01	21409.57	19.20	10.12
20220930_06	20	60º	36654	24716.57	40171.74	32.57	9.60
20220930_01	20	30º	15512.4	12658.99	16126.97	18.39	3.96
20220930_05	20	60º	23058.8	18395.33	28420.24	20.22	23.25

Tablo 7.5. Sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan 12. adım ve 11. adım $(AFPER/ARUER)_{I/II}$ değerleri.

Numune ismi	**Kalınlık (mm)**	**Yükleme Açısı**	**Test Kırılma Yükü (N)**	**$(AFPER/ARUER)_{I/II}$** (12.Adım)	**$(AFPER/ARUER)_{I/II}$** (11.Adım)
20220722_01	10	15º	13465.9	1.637	1.614
20220819_02	10	45º	17025.3	1.641	1.618
20220822_01	10	60º	17465.4	1.620	1.596
20220626_01	10	30º	11205.6	1.635	1.610
20220826_03	10	60º	13360.3	1.595	1.570
20220826_04	10	75º	17855.8	1.611	1.570
20220901_01	10	45º	10410.1	1.608	1.582
20220909_02	10	75º	23239.8	1.664	1.639
20220909_01	10	45º	13747.3	1.608	1.582
20220912_01	5	60º	10919.6	1.661	1.639
20220915_01	5	45º	8851.1	1.654	1.630
20220915_02	5	75º	11723.7	1.619	1.593
20220916_02	5	75º	8548.7	1.600	1.581
20220916_06	5	60º	8442.2	1.657	1.634
20220916_08	5	45º	6717	1.652	1.627
20220916_10	5	30º	6151.3	1.656	1.628
20220916_11	5	30º	7813.6	1.670	1.641
20220923_01	20	30º	26122	1.631	1.604
20220920_01	20	45º	30126.9	1.653	1.622
20220923_03	20	45º	19442.2	1.596	1.559
20220930_06	20	60º	36654	1.644	1.622
20220930_01	20	30º	15512.4	1.587	1.550
20220930_05	20	60º	23058.8	1.586	1.557

Tablo 7.6. AFPER/ARUER yöntemi kırılma yükü tahminleri ve test yükleri ile arasındaki yüzde farklar.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	Test Kırılma Yükü (N)	AFPER/ARUER Kırılma Yükü (N)	AFPER/ARUER % Fark
20220722_01	10	15º	13465.9	13218.74	1.84
20220819_02	10	45º	17025.3	16466.21	3.28
20220822_01	10	60º	17465.4	18196.49	-4.19
20220626_01	10	30º	11205.6	11091.22	1.02
20220826_02	10	45º	12610.2	13932.64	-4.28
20220826_03	10	60º	13360.3	15025.85	-12.47
20220901_01	10	45º	10410.1	11187.67	-7.47
20220909_02	10	75º	23239.8	20798.72	10.50
20220909_01	10	45º	13747.3	14803.19	-7.68
20220912_01	5	60º	10919.6	9699.952	11.17
20220915_01	5	45º	8851.1	8160.471	7.80
20220915_02	5	75º	11723.7	12209.39	-4.14
20220916_02	5	75º	8548.7	9776.571	-14.36
20220916_06	5	60º	8442.2	7687.367	8.94
20220916_08	5	45º	6717	6266.421	6.71
20220916_10	5	30º	6151.3	5702.797	7.29
20220916_11	5	30º	7813.6	6964.935	10.86
20220923_01	20	30º	26122	26194.55	-0.28
20220920_01	20	45º	30126.9	28412.08	5.69
20220923_03	20	45º	19442.2	21013.51	-8.08
20220930_06	20	60º	36654	34973.07	4.59
20220930_01	20	30º	15512.4	17081.59	-10.12
20220930_05	20	60º	23058.8	26106.31	-13.22



Şekil 7.2. Farklı kalınlıklarda mod-I/II problemleri için AFPER/ARUER , Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü ile tahmin edilen kırılma yükü tahminlerinin test yükü ile arasındaki ortalama farklar.

7.3. Mod-I/III Yüklemesi İçin LEKM Analizleri ve AFPER/ARUER Oranına Bağlı Tahmin Edilen Kırılma Yükleri

Bu bölüm içerisinde Tablo 3.3'de belirtilen mod-I/III deneylerinin kırılma yükü hesaplamalarının lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ve AFPER/ARUER oranına bağlı olarak kırılma kırılma yükü tahminleri sunulacaktır. LEKM ile yük tahmini hesaplamaları için VCCT metodu ile mod-I, mod-II ve mod-III enerji salınım oranı değerleri hesaplanmış ve sonrasında gerilme-şiddet faktörüne dönüştürülmüştür. Sonrasında Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile eşdeğer gerilme-şiddet faktörü hesaplanmış ve kırılma yükü tahminlerinde eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri kullanılmıştır. LEKM yaklaşımı için AL-2024 T351 malzemesinin düzlem şekil değişimi koşullarındaki kırılma tokluğu 37 $(\text{Mpa}.\sqrt{\text{m}})$ olarak alınmış ve bu değere karşılık gelen kırılma yükü tahmini gerçekleştirilmiştir [55]. Tablo 7.7 richard ve demir-ayhan kriteri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerlerini vermektedir. Tablo 7.8 LEKM yöntemi ile elde edilen kırılma yükü değerlerinin test yükleri ile karşılaştırmasını sunmaktadır. Demir – Ayhan kriteri kullanılarak

hesaplanan yük tahminlerinde ortalama fark %11 seviyesinde, Richard gerçekleşen tahminlerde ise ortalama fark %42 seviyesindedir. AFPER/ARUER yönteminde ise eşit artırımlı adımlarla yüklenen sonlu elemanlar analizinin son adımında uygulanan yük ve bir önceki adımında uygulanan yük değerlerinde hesaplanan $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerleri arasında interpolasyon veya extrapolasyon yapılarak kritik AFPER/ARUER değerine denk gelecek yük değeri hesaplanmaktadır. Mevcut problemler 12 yükleme adımında çözdürülmüştür. AL-2024 T351 malzemesi için kritik $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değeri 1,63 olarak önceki bölümlerde hesaplanmıştır. Tablo 7.9 mod-I/III kırılma analizleri sonucunda hesaplanan 12. adım ve 11. Adım $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerlerini sunmaktadır. Tablo 7.10 ise AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan kırılma yükü değerlerinin test kırılma yükleri ile karşılaştırmasını sunmaktadır. Tahmin edilen değerler ile test yükü arasındaki ortalama fark %7 mertebesindedir. Şekil 7.3 ise LEKM ve AFPER/ARUER yöntemleri ile hesaplanan kırılma yükü değerlerinin, test yükü ile arasındaki ortalama farkları bar grafiği olarak sunmaktadır. Gerilme-şiddet faktörü hesaplanarak gerçekleştirilen LEKM yaklaşımlarında kalınlık arttıkça kırılma yükü tahminleri ile test yükü arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. Özellikle düşük kalınlıklı malzemelerde, çatlak ucu bölge yarı çapı ve plastik deformasyon artmasından dolayı LEKM yaklaşımları ile hesaplanan kırılma yükü değerleri ile test yükü arasındaki fark artmaktadır.

Tablo 7.7. Mod-I/III deneyleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I, mod-II ve mod-III gerilme-şiddet faktörü değerleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	Keş (Richard) (MPa. $\sqrt{m}$)	Keş (Demir-Ayhan) (MPa. $\sqrt{m}$)
20221014_02	10 mm	45º	70.62	38.77
20221014_01	10 mm	45º	65.7	38.45
20221026_01	10 mm	60º	81.51	40.34
20221026_02	10 mm	30º	59.37	42.21
20221026_03	10 mm	75º	90.23	N/A
20221026_05	10 mm	60º	76.93	37.91
20221111_01	10 mm	30º	51.98	38.94
20221026_04	10 mm	75º	80.15	N/A
20221118_02	25 mm	45º	58.74	36.51
20221118_03	25 mm	45º	54.38	33.54
20221118_04	25 mm	30º	38.56	29.57
20221118_05	25 mm	30º	42.558	33.55
20221119_01	25 mm	60º	71.29	36.69
20221119_02	25 mm	75º	108.93	68.52
20221202_02	25 mm	60º	65.85	34.68
20221202_01	25 mm	75º	67.37	29.03
20230505_06	25 mm	90º	64.69	N/A

Tablo 7.8 LEKM kuralları ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri ve yükleri ile yüzde farklar.

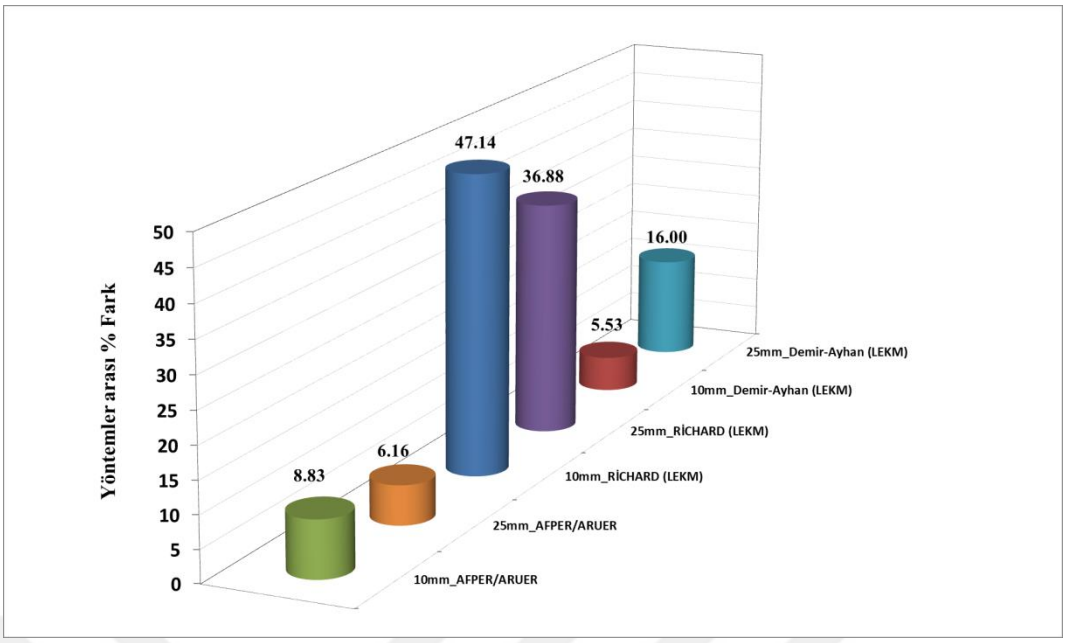
Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	Test Kırılma Yükü (N)	GŞF (Richard) Kırılma Yükü (N)	GŞF (Demir-Ayhan) Kırılma Yükü (N)	GŞF (Richard) % Fark	GŞF (Demir-Ayhan)
20221014_02	10	45º	9696.23	5080.15	9253.56	47.61	4.57
20221014_01	10	45º	7924.20	4462.64	7625.37	43.68	3.77
20221026_01	10	60º	8611.60	3909.08	7898.59	54.61	8.28
20221026_02	10	30º	8644.10	5387.09	7577.15	37.68	12.34
20221026_05	10	60º	9371.90	4507.48	9146.93	51.90	2.40
20221111_01	10	30º	9918.40	7060.04	9424.26	28.82	4.98
20221026_04	10	75º	11074.10	5112.19	N/A	53.84	N/A
20221118_02	25	45º	25162.90	15849.97	25500.61	37.01	-1.34
20221118_03	25	45º	20018.60	13620.60	22083.73	31.96	-10.32
20221118_04	25	30º	13576.30	13027.05	16987.59	4.05	-25.13
20221118_05	25	30º	22925.70	19931.64	25283.19	13.06	-10.28
20221119_01	25	60º	23349.00	12118.29	23546.28	48.10	-0.84
20221119_02	25	75º	22713.40	7715.01	12264.97	66.03	46.00
20221202_02	25	60º	30410.70	17087.26	32445.10	43.81	-6.69
20221202_01	25	75º	31007.30	17029.39	39520.16	45.08	-27.45
20230505_06	25	90º	35000.00	20018.55	N/A	42.81	N/A

Tablo 7.9. Sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan 12.adım ve 11. adım $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerleri.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	$(ARUER/ARUER)_{I/II/III}$ (12.Adım)	$(ARUER/ARUER)_{I/II/III}$ (11.Adım)
20221014_02	10 mm	45º	1.639	1.625
20221014_01	10 mm	45º	1.652	1.637
20221026_01	10 mm	60º	1.635	1.624
20221026_02	10 mm	30º	1.666	1.645
20221026_03	10 mm	75º	1.619	1.611
20221026_05	10 mm	60º	1.627	1.615
20221111_01	10 mm	30º	1.651	1.631
20221026_04	10 mm	75º	1.624	1.614
20221118_02	25 mm	45º	1.649	1.629
20221118_03	25 mm	45º	1.583	1.609
20221118_04	25 mm	30º	1.62	1.594
20221118_05	25 mm	30º	1.624	1.603
20221119_01	25 mm	60º	1.647	1.630
20221119_02	25 mm	75º	1.625	1.613
20221202_02	25 mm	60º	1.644	1.627
20221202_01	25 mm	75º	1.626	1.613
20230505_06	25 mm	90º	1.627	1.615

Tablo 7.10. AFPER/ARUER yöntemi kırılma yükü tahminleri ve test yükü ile arasındaki fark.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Yükleme Açısı	Test Kırılma Yükü (N)	AFPER/ARUER Kırılma Yükü (N)	AFPER ARUER % Fark
20221014_02	10	45º	9696.23	9296.34	4.12
20221014_01	10	45º	7924.20	7059.80	10.90
20221026_01	10	60º	8611.60	8408.30	2.36
20221026_02	10	30º	8644.10	7449.77	13.81
20221026_03	10	75º	8881.10	10150.60	-14.29
20221026_05	10	60º	9371.90	9699.92	-3.50
20221111_01	10	30º	9918.40	9130.24	7.95
20221026_04	10	75º	11074.10	12587.53	-13.67
20221118_02	25	45º	25162.90	21497.21	14.57
20221118_03	25	45º	20018.60	16888.45	15.64
20221118_04	25	30º	13576.30	13734.60	-1.17
20221118_05	25	30º	22925.70	23654.56	-3.18
20221119_01	25	60º	23349.00	21607.88	7.46
20221119_02	25	75º	22713.40	22721.45	-0.03
20221202_02	25	60º	30410.70	28564.64	6.07
20221202_01	25	75º	31007.30	32177.39	-3.78
20230505_06	25	90º	35000.00	36239.64	-3.54



Şekil 7.3. Farklı kalınlıklarda mod-I/III problemleri için AFPER/ARUER , Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü ile tahmin edilen kırılma yükü tahminlerinin test yükü ile arasındaki ortalama farklar.

7.4. Mod-I/II/III Yüklemesi İçin LEKM Analizleri ve AFPER/ARUER Oranına Bağlı Tahmin Edilen Kırılma Yükleri

Bu bölüm içerisinde Tablo 3.4 de belirtilen mod-I/II/III deneylerinin kırılma yükü hesaplamalarının lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ve AFPER/ARUER oranına bağlı olarak kırılma yükü tahminleri sunulacaktır. Bu kısımda gerçekleştirilen deney ve analizler kriter geliştirme aşamalarında kullanılmamış olup, sadece geliştirilen kriterlerin doğrulanması amacı ile olarak kullanılmaktadır. LEKM ile yük tahmini hesaplamaları için VCCT metodu ile mod-I, mod-II ve mod-III enerji salınım oranı değerleri hesaplanmış ve gerilme-şiddet faktörüne dönüştürülmüştür. Sonrasında Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile eşdeğer gerilme-şiddet faktörü hesaplanmış ve kırılma yükü tahminlerinde eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri kullanılmıştır. LEKM yaklaşımı için AL-2024 T351 malzemesinin düzlem şekil değişimi koşullarındaki kırılma tokluğu 37 $(\text{Mpa}.\sqrt{\text{m}})$ olarak alınmış ve bu değere karşılık gelen yük kopma yükü olarak kabul edilmiştir [55]. Tablo 7.11 Richard ve Demir-Ayhan kriteri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerlerini vermektedir. Tablo 7.12 LEKM yöntemi ile elde edilen kırılma yükü değerlerinin test yükü ile karşılaştırmasını sunmaktadır. Demir – ayhan kriteri kullanılarak tahminlerde ortalama fark %32 seviyesinde, Richard kriteri kullanılarak gerçekleşen tahminlerde ise

ortalama fark %55 seviyesindedir. AFPER/ARUER yönteminde ise eşit artırımlı adımlarla yüklenen sonlu elemanlar analizinin son adımında uygulanan yük ve bir önceki adımında uygulanan yük değerlerinde hesaplanan $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerleri arasında interpolasyon veya extrapolasyon yapılarak kritik AFPER/ARUER değerine denk gelecek yük değeri hesaplanmaktadır. Mevcut problemler 12 yükleme adımında çözdürülmüştür. AL-2024 T351 malzemesi için kritik $(AFPER/ARUER)_{I/III}$ değeri 1,63 olarak önceki bölümlerde hesaplanmıştır. Tablo 7.13 mod-I/II/III kırılma analizleri sonucunda hesaplanan 12. adım ve 11. adım $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerlerini sunmaktadır. Tablo 7.14 ise AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan kırılma yükü değerlerinin test kırılma yükü ile karşılaştırmasını sunmaktadır. Tahmin edilen değerler ile test yükleri arasındaki ortalama fark %9 mertebesindedir. Şekil 7.4 ise LEKM ve AFPER/ARUER yöntemleri ile hesaplanan kırılma yükü değerlerinin, test yükü ile arasındaki ortalama farkları bar grafiği olarak sunmaktadır. Gerilme-şiddet faktörü hesaplanarak gerçekleştirilen LEKM yaklaşımlarında kalınlık arttıkça kırılma yükü tahminleri ile test yükü arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. Özellikle düşük kalınlıklı malzemelerde, çatlak ucu bölge yarı çapı ve plastik deformasyon artmasından dolayı LEKM yaklaşımları ile hesaplanan kırılma yükü değerleri ile test yükü arasındaki fark artmaktadır.

Tablo 7.11. Mod-I/II/III deneyleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I ,mod-II ve mod-III gerilme-şiddet faktörü değerleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Mod-II/III Yükleme Açısı	Mod-I/III Yükleme Açısı	Test Kırılma Yükü (N)	$K_{eş}$ (Richard) (Mpa.$\sqrt{m}$)	$K_{eş}$ (Demir Ayhan) (Mpa.$\sqrt{m}$)
20230106_01	25	45º	45º	20178.3	44.40	30.63
20230106_03	25	45º	45º	30366.1	47.15	34.15
20230118_01	10	30º	60º	16542.5	66.14	38.02
20230120_02	10	30º	75º	18653.3	63.93	31.96
20230120_03	10	30º	45º	10477.8	41.61	31.92
20230120_04	10	30º	30º	10596.6	34.17	36.72
20230120_05	10	30º	30º	6461.6	30.42	27.22
20230204_02	10	30º	45º	6253.9	44.35	35.64
20230204_03	10	30º	60º	10308.1	50.47	29.30
20230210_01	10	30º	75º	12571.4	58.32	28.20
20230210_05	10	60º	30º	7549.063	46.42	33.39

Tablo 7.11. (Devamı) Mod-I/II/III deneyleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I ,mod-II ve mod-III gerilme-şiddet faktörü değerleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri.

20230210_06	10	60º	30º	10954.3	45.01	34.47
20230210_09	10	60º	75º	13675.4	66.68	N/A
20230210_10	10	60º	75º	9163.113	75.73	N/A
20230210_12	10	60º	60º	9266.658	55.17	33.06
20230216_01	10	60º	60º	12443.51	70.80	36.27
20230216_03	10	60º	45º	12714.82	56.29	36.10
20230216_04	10	60º	45º	8437.75	59.86	35.48
20230216_07	25	45º	30º	27056.85	43.40	27.73
20230216_09	10	45º	75º	15925.8	80.16	N/A
20230216_10	10	45º	75º	12488.75	85.22	N/A
20230224_01	10	45º	60º	14228.31	72.21	51.24
20230224_03	10	45º	60º	10912.4	72.85	37.55
20230224_05	10	45º	45º	13868.78	57.95	38.54
20230224_06	10	45º	45º	9326.501	59.76	37.82
20230224_07	10	45º	30º	12974.3	51.58	40.99
20230224_08	10	45º	30º	10069.27	61.28	45.43
20230224_10	10	75º	45º	8403.634	60.47	34.82
20230224_12	10	75º	45º	12348.48	63.15	38.11
20230224_13	10	75º	75º	12324.84	72.46	N/A
20230310_01	10	75º	30º	13015.12	35.94	36.42
20230310_02	25	75º	30º	18145.79	45.14	34.22
20230310_03	25	75º	30º	25707.38	47.10	36.28
20230310_04	25	75º	45º	29330.65	54.60	33.66
20230310_05	25	75º	45º	22703.01	63.36	38.38
20230310_06	25	75º	60º	24463.51	75.54	39.45
20230310_07	10	75º	60º	11997.91	69.58	35.10
20230317_01	25	75º	60º	36245.81	60.58	34.99
20230330_02	10	75º	75º	7938.086	74.89	N/A
20230330_03	25	75º	75º	33407.05	106.82	N/A
20230330_04	25	75º	75º	35153.46	71.99	N/A
20230330_07	10	75º	60º	7800.027	70.11	34.30
20230407_01	25	60º	30º	15064.8	40.51	31.07
20230407_03	25	60º	30º	28377.3	47.38	36.89
20230407_04	25	60º	45º	19572.86	58.87	36.20
20230407_05	25	60º	45º	32699.01	59.59	38.81
20230407_06	25	60º	60º	24594.69	70.75	36.18
20230407_07	25	60º	75º	28456.49	84.91	#SAYI!
20230407_08	25	30º	30º	27601.12	26.23	27.78
20230407_09	25	30º	30º	16548.5	35.15	37.97

Tablo 7.11. (Devamı) Mod-I/II/III deneyleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I ,mod-II ve mod-III gerilme-şiddet faktörü değerleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri.

20230407_10	25	30º	45º	21710.18	46.64	36.74
20230414_03	25	30º	60º	24250.2	39.83	22.56
20230414_06	25	60º	60º	26586.79	68.78	35.91
20230414_08	25	60º	75º	30177.18	78.91	N/A
20230505_02	25	45º	60º	24445.07	65.93	36.18
20230505_03	25	45º	75º	28445.94	79.66	35.18

Tablo 7.12 LEKM kuralları ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri ve test yükü ile arasındaki yüzde farklar.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Mod-II/III Yükleme Acısı	Mod-I/III Yükleme Açısı	Test Kırılma Yükü (N)	GŞF (Richard) Kırılma Yükü (N)	GŞF (Demir-Ayhan) Kırılma	GŞF (Richard) % Fark	GŞF (Demir-Ayhan) % Fark
20230106_01	25	45º	45º	16815.25	14012.71	20312.25	30.56	-0.66
20230106_03	25	45º	45º	23829.18	18699.46	25817.85	38.42	14.98
20230118_01	10	30º	60º	9254.20	5176.98	9005.92	68.70	45.56
20230120_02	10	30º	75º	10795.75	6248.13	12498.21	66.50	33.00
20230120_03	10	30º	45º	9316.96	8284.73	10799.73	20.93	-3.07
20230120_04	10	30º	30º	11474.22	12424.53	11561.72	-17.25	-9.11
20230120_05	10	30º	30º	7859.28	9559.28	10683.07	-47.94	-65.33
20230204_02	10	30º	45º	5217.46	4352.78	5416.55	30.40	13.39
20230204_03	10	30º	60º	7556.96	5540.07	9542.92	46.26	7.42
20230210_01	10	30º	75º	7975.68	5060.02	10464.55	59.75	16.76
20230210_05	10	60º	30º	6017.13	4796.08	6667.68	36.47	11.68
20230210_06	10	60º	30º	9004.87	7402.36	9665.80	32.43	11.76
20230210_09	10	60º	75º	7588.33	4210.68	N/A	69.21	N/A
20230210_10	10	60º	75º	4476.89	2187.31	N/A	76.13	N/A
20230210_12	10	60º	60º	6214.72	4167.93	6955.38	55.02	24.94
20230216_01	10	60º	60º	6502.96	3398.44	6633.85	72.69	46.69
20230216_03	10	60º	45º	8357.58	5493.53	8565.94	56.79	32.63
20230216_04	10	60º	45º	5215.45	3223.72	5438.88	61.79	35.54
20230216_07	25	45º	30º	23066.90	19665.33	30778.05	27.32	-13.75
20230216_09	10	45º	75º	7350.98	3393.04	N/A	78.69	N/A
20230216_10	10	45º	75º	5422.25	2354.18	N/A	81.15	N/A
20230224_01	10	45º	60º	7290.51	3735.61	5264.42	73.75	63.00
20230224_03	10	45º	60º	5542.33	2814.91	5461.15	74.20	49.95
20230224_05	10	45º	45º	8854.96	5653.73	8501.13	59.23	38.70
20230224_06	10	45º	45º	5774.44	3575.21	5649.24	61.67	39.43
20230224_07	10	45º	30º	9306.88	6676.13	8400.94	48.54	35.25
20230224_08	10	45º	30º	6079.68	3670.83	4951.54	63.54	50.83

Tablo 7.12. (Devamı) LEKM kuralları ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri ve test yükü ile arasındaki yüzde farklar.

20230224_10	10	75º	45º	5141.96	3146.23	5463.89	62.56	34.98
20230224_12	10	75º	45º	7235.06	4239.07	7024.33	65.67	43.12
20230310_01	10	75º	30º	13398.98	13794.17	13612.37	-5.99	-4.59
20230310_02	25	75º	30º	14873.60	12191.47	16081.92	32.81	11.37
20230310_03	25	75º	30º	20194.76	15864.25	20595.54	38.29	19.88
20230310_04	25	75º	45º	19876.08	13469.14	21848.34	54.08	25.51
20230310_05	25	75º	45º	13257.76	7742.06	12781.06	65.90	43.70
20230310_06	25	75º	60º	11982.39	5869.06	11238.24	76.01	54.06
20230310_07	10	75º	60º	6380.03	3392.66	6725.39	71.72	43.95
20230317_01	25	75º	60º	22137.59	13520.81	23409.28	62.70	35.42
20230330_02	10	75º	75º	3921.87	1937.63	N/A	75.59	N/A
20230330_03	25	75º	75º	11571.44	4008.08	N/A	88.00	N/A
20230330_04	25	75º	75º	18067.48	9285.97	N/A	73.58	N/A
20230330_07	10	75º	60º	4116.40	2172.40	4440.43	72.15	43.07
20230407_01	25	60º	30º	13759.51	12567.31	16385.64	16.58	-8.77
20230407_03	25	60º	30º	22160.41	17305.51	22226.49	39.02	21.68
20230407_04	25	60º	45º	12301.61	7731.61	12573.47	60.50	35.76
20230407_05	25	60º	45º	20303.13	12606.41	19356.24	61.45	40.80
20230407_06	25	60º	60º	12862.24	6726.54	13153.76	72.65	46.52
20230407_07	25	60º	75º	12400.07	5403.40	#SAYI!	81.01	#SAYI!
20230407_08	25	30º	30º	38934.10	54920.38	51856.07	-98.98	-87.88
20230407_09	25	30º	30º	17419.47	18336.29	16974.47	-10.80	-2.57
20230407_10	25	30º	45º	17222.91	13663.12	17344.80	37.07	20.11
20230414_03	25	30º	60º	22527.18	20926.58	36946.17	13.71	-52.35
20230414_06	25	60º	60º	14302.29	7693.87	14736.41	71.06	44.57
20230414_08	25	60º	75º	14149.74	6634.65	N/A	78.01	N/A
20230505_02	25	45º	60º	13718.60	7698.90	14029.53	68.51	42.61
20230505_03	25	45º	75º	13212.40	6136.82	13895.93	78.43	51.15

Tablo 7.13 Sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan 12. adım ve 11. adım $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerleri.

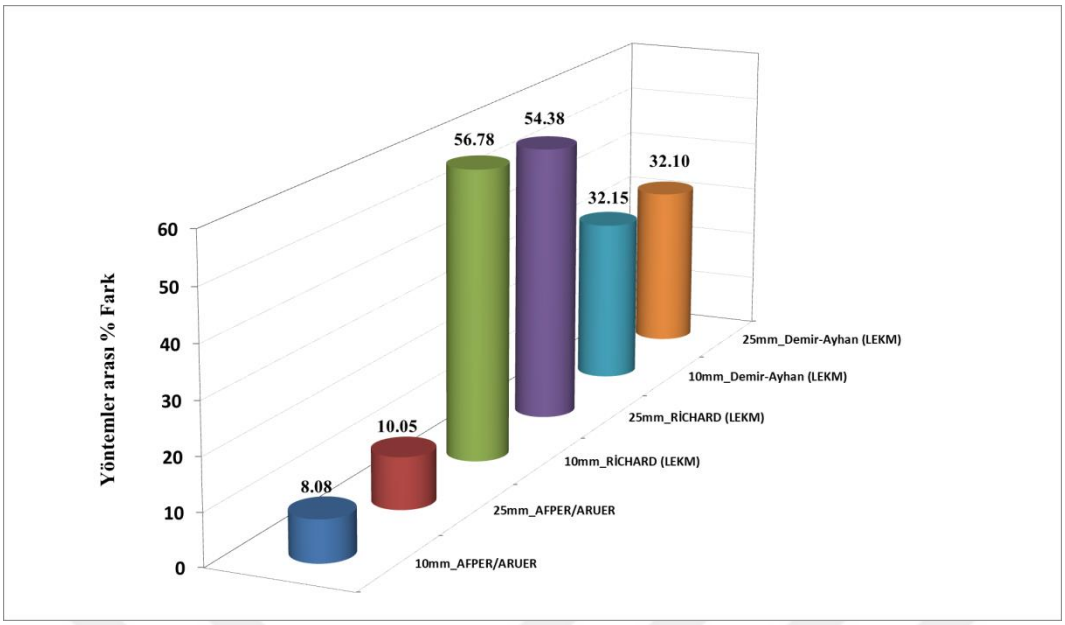
Numune ismi	**Kalınlık (mm)**	**Mod-II/III Yükleme Açısı**	**Mod-I/III Yükleme Açısı**	**$(ARUER/ARUER)_{I/II/III}$** (12.Adım)	**$(ARUER/ARUER)_{I/II/II}$** I (11.Adım)
20230106_01	25	45º	45º	1.656	1.635
20230118_01	10	30º	60º	1.668	1.655
20230120_02	10	30º	75º	1.635	1.622
20230120_03	10	30º	45º	1.627	1.606
20230120_04	10	30º	30º	1.630	1.604

Tablo 7.13.(Devamı) Sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan 12. adım ve 11. adım (AFPER/ARUER)I/II/III değerleri.

20230120_05	10	30º	30º	1.599	1.570
20230204_02	10	30º	45º	1.623	1.605
20230204_03	10	30º	60º	1.615	1.598
20230210_01	10	30º	75º	1.617	1.603
20230210_05	10	60º	30º	1.617	1.600
20230210_06	10	60º	30º	1.653	1.630
20230210_09	10	60º	75º	1.624	1.614
20230210_10	10	60º	75º	1.617	1.606
20230210_12	10	60º	60º	1.617	1.604
20230216_01	10	60º	60º	1.639	1.625
20230216_03	10	60º	45º	1.658	1.640
20230216_04	10	60º	45º	1.631	1.614
20230216_07	25	45º	30º	1.623	1.603
20230216_09	10	45º	75º	1.638	1.628
20230216_10	10	45º	75º	1.637	1.628
20230224_01	10	45º	60º	1.647	1.632
20230224_03	10	45º	60º	1.637	1.628
20230224_05	10	45º	45º	1.672	1.656
20230224_06	10	45º	45º	1.643	1.626
20230224_07	10	45º	30º	1.680	1.661
20230224_08	10	45º	30º	1.687	1.668
20230224_10	10	75º	45º	1.629	1.614
20230224_12	10	75º	45º	1.657	1.641
20230224_13	10	75º	75º	1.623	1.601
20230310_01	10	75º	30º	1.661	1.635
20230310_02	25	75º	30º	1.638	1.618
20230310_03	25	75º	30º	1.654	1.630
20230310_04	25	75º	45º	1.667	1.648
20230310_05	25	75º	45º	1.659	1.642
20230310_06	25	75º	60º	1.657	1.643
20230310_07	10	75º	60º	1.635	1.622
20230317_01	25	75º	60º	1.669	1.654
20230330_02	10	75º	75º	1.623	1.614
20230330_03	25	75º	75º	1.643	1.632
20230330_04	25	75º	75º	1.642	1.630
20230330_07	10	75º	60º	1.619	1.606
20230407_01	25	60º	30º	1.621	1.603
20230407_03	25	60º	30º	1.679	1.657
20230407_04	25	60º	45º	1.647	1.629
20230407_05	25	60º	45º	1.673	1.653
20230407_06	25	60º	60º	1.649	1.635
20230407_07	25	60º	75º	1.645	1.635
20230407_08	25	30º	30º	1.672	1.651
20230407_09	25	30º	30º	1.597	1.558
20230407_10	25	30º	45º	1.638	1.619
20230414_02	25	30º	45º	1.638	1.620
20230414_03	25	30º	60º	1.582	1.565
20230414_06	25	60º	60º	1.646	1.631
20230414_08	25	60º	75º	1.638	1.627
20230505_02	25	45º	60º	1.652	1.635
20230505_03	25	45º	75º	1.643	1.631

Tablo 7.14. AFPER/ARUER yöntemi kırılma yükü tahminleri, test yükleri ve yüzde farklar.

Numune ismi	Kalınlık (mm)	Mod-II/III Yükleme Açısı	Mod-I/III Yükleme Açısı	Test Kırılma Yükü (N)	AFPER/ARUER Kırılma Yükü (N)	AFPER ARUER % Fark
20230106_01	25	45º	45º	20178.3	18279.48	9.41
20230118_01	10	30º	60º	16542.5	13495.61	18.42
20230120_02	10	30º	75º	18653.3	18299.98	1.89
20230120_03	10	30º	45º	10477.8	10668.18	-1.82
20230120_04	10	30º	30º	10596.6	10666.69	-0.66
20230120_05	10	30º	30º	6461.6	7068.81	-9.40
20230204_02	10	30º	45º	6253.9	6507.98	-4.06
20230204_03	10	30º	60º	10308.1	11136.58	-8.04
20230210_01	10	30º	75º	12571.4	13727.00	-9.19
20230210_05	10	60º	30º	7549.063	8151.55	-7.98
20230210_06	10	60º	30º	10954.3	10114.97	7.66
20230210_09	10	60º	75º	13675.4	14615.46	-6.87
20230210_10	10	60º	75º	9163.113	10277.90	-12.17
20230210_12	10	60º	60º	9266.658	10194.53	-10.01
20230216_01	10	60º	60º	12443.51	11928.40	4.14
20230216_03	10	60º	45º	12714.82	11143.38	12.36
20230216_04	10	60º	45º	8437.75	8487.07	-0.58
20230216_07	25	45º	30º	27056.85	28049.45	-3.67
20230216_09	10	45º	75º	15925.8	15101.81	5.17
20230216_10	10	45º	75º	12488.75	11879.51	4.88
20230224_01	10	45º	60º	14228.31	13024.20	8.46
20230224_03	10	45º	60º	10912.4	10376.93	4.91
20230224_05	10	45º	45º	13868.78	11299.99	18.52
20230224_06	10	45º	45º	9326.501	8806.92	5.57
20230224_07	10	45º	30º	12974.3	10539.74	18.76
20230224_08	10	45º	30º	10069.27	7711.91	23.41
20230224_10	10	75º	45º	8403.634	8547.49	-1.71
20230224_12	10	75º	45º	12348.48	10696.44	13.38
20230224_13	10	75º	75º	12324.84	12758.17	-3.52
20230310_01	10	75º	30º	13015.12	11814.13	9.23
20230310_02	25	75º	30º	18145.79	17691.27	2.50
20230310_03	25	75º	30º	25707.38	23726.05	7.71
20230310_04	25	75º	45º	29330.65	24708.79	15.76
20230310_05	25	75º	45º	22703.01	19653.83	13.43
20230310_06	25	75º	60º	24463.51	20711.08	15.34
20230310_07	10	75º	60º	11997.91	11764.20	1.95
20230317_01	25	75º	60º	36245.81	29579.99	18.39
20230330_02	10	75º	75º	7938.086	8644.72	-8.90
20230330_03	25	75º	75º	33407.05	30474.95	8.78
20230330_04	25	75º	75º	35153.46	32679.98	7.04
20230330_07	10	75º	60º	7800.027	8426.97	-8.04
20230407_01	25	60º	30º	15064.8	15851.51	-5.22
20230407_03	25	60º	30º	28377.3	23385.84	17.59
20230407_04	25	60º	45º	19572.86	18224.74	6.89
20230407_05	25	60º	45º	32699.01	26904.86	17.72
20230407_06	25	60º	60º	24594.69	22171.25	9.85
20230407_07	25	60º	75º	28456.49	25482.63	10.45
20230407_08	25	30º	30º	27601.12	23260.96	15.72
20230407_09	25	30º	30º	16548.5	17765.84	-7.36
20230407_10	25	30º	45º	21710.18	21145.99	2.60
20230414_02	25	30º	45º	25850.5	25130.46	2.79
20230414_03	25	30º	60º	24250.2	30158.51	-24.36
20230414_06	25	60º	60º	26586.79	24497.95	7.86
20230414_08	25	60º	75º	30177.18	28770.37	4.66
20230505_02	25	45º	60º	24445.07	22029.69	9.88
20230505_03	25	45º	75º	28445.94	26267.12	7.66



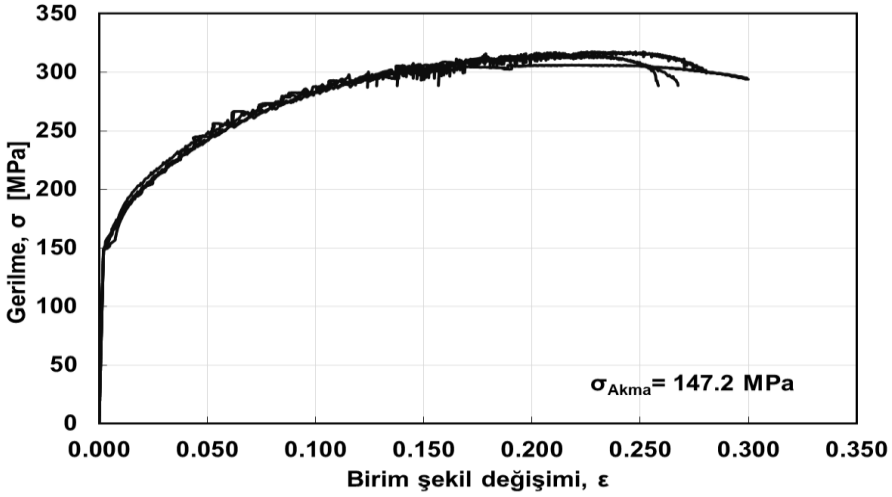
Şekil 7.4. Farklı kalınlıklarda mod-I/II/III problemleri için AFPER/ARUER , Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü ile tahmin edilen kırılma yükü tahminlerinin test yüklerine göre ortalama yüzde farkları.

8. DAHA SÜNEK BİR MALZEME İLE YÖNTEM DOĞRULAMA VE LEKM ANALİZLERİ İLE KARŞILAŞTIRMA VE MİKROYAPI ANALİZLERİ

Bölüm 7'de geliştirilen ve doğrulan sünek malzemeler için kırılma yük tahmin etme amacıyla hazırlanmış olan kriter geliştirme çalışmaları AL-2024 T351 malzemesi ile gerçekleştirilmiş ve yine AL-2024 T351 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen ek testler doğrulama deney ve analizleri de yapılmıştır. Geliştirilen bu yöntemin diğer malzemeler ile kullanılabilirliğinin incelenmesi gerçekleştirilmiş ve yine AL-2024 T351 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen ek testler doğrulama deney ve analizleri de yapılmıştır. Bu bölüm içerisinde AL-5083 H111 isimli malzeme ile AL-2024 T351 için tez kapsamında gerçekleştirilen çekme testi ve kırılma tokluğu testleri AL-5083 H111 ile çok daha az sayıda numune ile tekrarlanarak kriterin diğer sünek malzemeler ile de kullanılabilirliği incelenecektir.

8.1. Al-5083 Malzeme Özellikleri ve Çekme Deneyleri

Malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi amacı ile AL-5083 H111 malzemesine çekme testleri uygulanmıştır. Şekil 8.1'te çekme testi sonucu elde edilen gerilme-şekil değişimi eğrisini gösterilmektedir. Gerçekleştirilen 4 farklı testten birbilerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Malzemenin akma mukavemeti 147.2 MPa, çekme mukavemeti ise 314 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8.1. AL 2024 Çekme testi sonrası gerilme-şekil değişimi diyagramları.

8.2. Mod-I Kırılma Testleri

Bu bölümde AL-5083 H111 malzemesi için mod-I (Açılma modu) kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.1'de olduğu gibi bu kısımda da CT numunesi kullanılmıştır. İlk olarak yorulma çatlağı oluşturulmuş ve çatlak ilerleme süreci kamera ile takip edilmiştir. Sonrasında ise kırılma tokluğu testi gerçekleştirilmiştir.Test sonrası çatlak boyu görüntü işleme programı yardımıyla hesaplanmıştır. Tablo 8.1 kırılma tokluğu gerçekleştirilen mod-I numunelerinin kalınlık, çatlak boyu, kırılma yükü bilgilerini vermektedir.

Tablo 8.1. AL-5083 H111 mod-I kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri.

Numune ismi	Malzeme	Numune Kalınlığı (mm)	Kırılma Yükü (N)	Çatlak boyu (mm)
20230529_01	AL-5083 H111	25	14134.3	30.35
20230529_02	AL-5083 H111	25	25979.2	24.60
20230529_05	AL-5083 H111	25	20056.8	25.27
20230530_01	AL-5083 H111	10	6374	25.53
20230530_02	AL-5083 H111	10	5368.2	28,02
20230530_03	AL-5083 H111	10	8213.8	24.81

8.3. Mod-I/II Kırılma Testleri

Bu kısımda, AL-5083 H111 malzemesi için T-numune ile gerçekleştirilen Mod-I/II test verileri sunulacaktır. Bölüm 3.2'de AL-2024 kırılma tokluğu testlerine benzer şekilde bu bölümde de ilk olarak yorulma çatlağı oluşturulmuş ve kamera ile çatlak boyu gözlemlenmiştir. Sonrasında karışık mod-I/II kırılma testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonrası çatlak boyu görüntü işleme programı yardımıyla hesaplanmıştır. Tablo 8.2 Mod-I/II kırılma tokluğu gerçekleştirilen T-numunelerin kalınlık, çatlak boyu, kırılma yükü bilgilerini vermektedir.

Tablo 8.2. AL-5083 H111 mod-I/II kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri.

Numune ismi	Malzeme	Numune Kalınlığı (mm)	Çatlak boyu (mm)	Yükleme Açısı	Kırılma Yükü (N)
20230610_01	AL-5083 H111	10	25.02	60º	19188.84
20230610_02	AL-5083 H111	25	32.27	30º	21262.3
20230610_03	AL-5083 H111	10	31.20	75º	16944.64
20230610_04	AL-5083 H111	10	25.46	45º	15422.32

8.4. Mod-I/III Kırılma Testleri

Bu kısımda, AL-5083 H111 malzemesi için CTT numunesi ile gerçekleştirilen Mod-I/III test verileri sunulacaktır. Bölüm 3.3'te AL-2024 kırılma tokluğu testlerine benzer şekilde bu bölümde de ilk olarak yorulma çatlağı oluşturulmuş ve kamera ile çatlak boyu gözlemlenmiştir. Sonrasında kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonrası çatlak boyu görüntü işleme programı yardımıyla hesaplanmıştır. Tablo 8.4 Mod-I/III kırılma tokluğu gerçekleştirilen CTT numunelerin kalınlık, çatlak boyu, kırılma yükü bilgilerini vermektedir.

Tablo 8.3. AL-5083 H111 mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonucu kırılma yükleri.

Numune ismi	**Malzeme**	**Numune Kalınlığı (mm)**	**Çatlak boyu (mm)**	**Yükleme Açısı**	**Kırılma Yükü (N)**
20230529_03	AL-5083 H111	10	30.12	45º	6611
20230529_04	AL-5083 H111	10	24.80	45º	9038.824
20230602_02	AL-5083 H111	10	25.42	60º	9188
20230602_03	AL-5083 H111	10	31.02	75º	7305.5
20230602_04	AL-5083 H111	10	29.26	30º	6765.96
20230603_02	AL-5083 H111	25	26.3	45º	25039.5
20230603_03	AL-5083 H111	25	29.55	30º	20388.9

8.5. Mod-I/II/III Kırılma Testleri

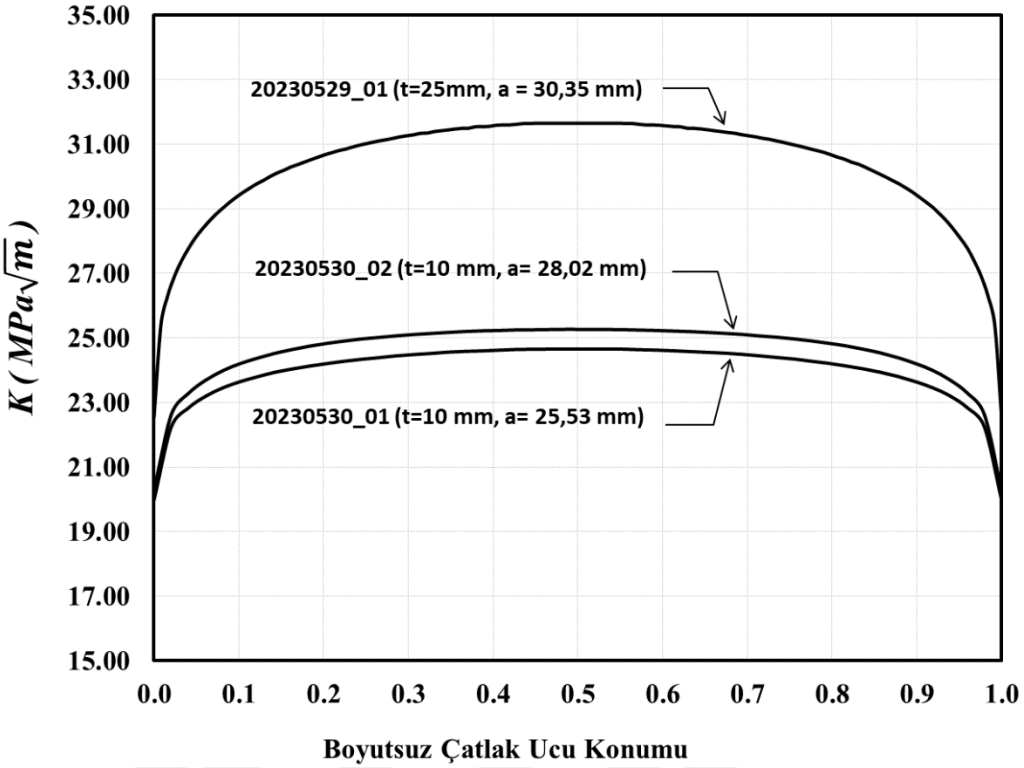
Bu kısımda, AL-5083 H111 malzemesi için CTST numunesi ile gerçekleştirilen Mod-I/II/III test verileri sunulmaktadır. Bölüm 3.4'te AL-2024 kırılma tokluğu testlerine benzer şekilde bu bölümde de ilk olarak yorulma çatlağı oluşturulmuş ve kamera ile çatlak boyu gözlemlenmiştir. Sonrasında kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonrası çatlak boyu görüntü işleme programı yardımıyla hesaplanmıştır. Tablo 8.4 Mod-I/III kırılma tokluğu gerçekleştirilen CTST numunelerinin kalınlık, çatlak boyu, kırılma yükü bilgilerini vermektedir.

Tablo 8.4. AL-5083 H111 mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri sonucu kopma yükleri.

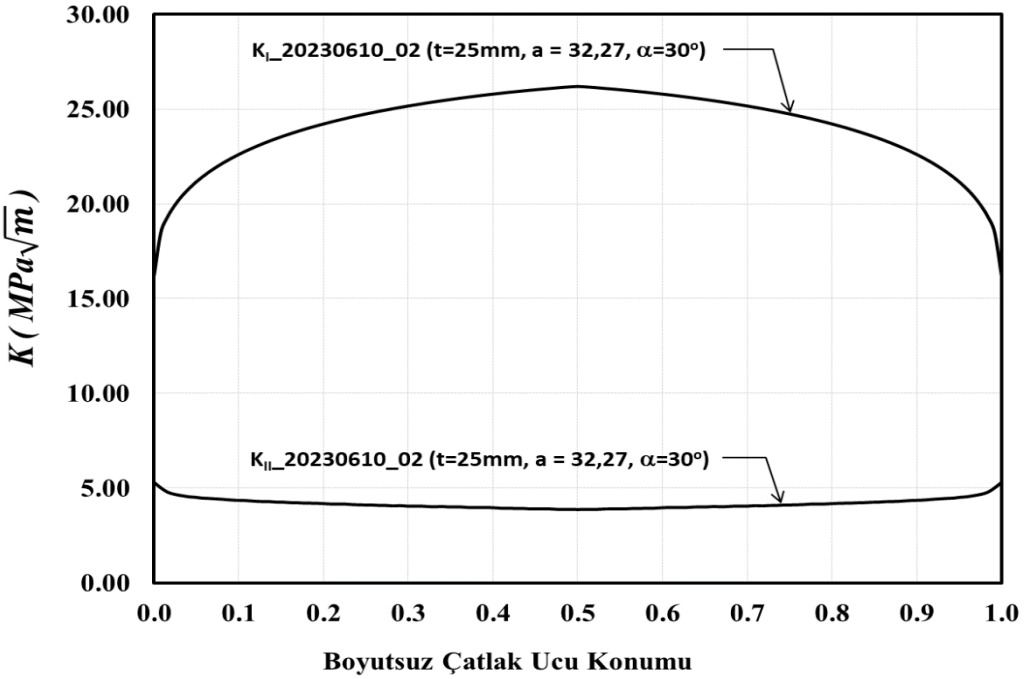
Numune ismi	Malzeme	Numune Kalınlığı (mm)	Çatlak boyu (mm)	Mod-II/III Yükleme Açısı	Mod-I/III Yükleme Açısı	Kopma Yükü (N)
20230602_01	AL-5083 H111	10	25.17	30º	60º	9659.8
20230602_02	AL-5083 H111	10	25.41	45º	45º	9145
20230609_01	AL-5083 H111	25	30.86	45º	75º	26234.7
20230609_03	AL-5083 H111	25	26.17	60º	45º	28514.6
20230609_04	AL-5083 H111	10	29.04	60º	45º	8319.9

8.6. Mod-I, Mod-I/II, Mod-I/III, Mod-I/II/III LEKM ve Elastik-Plastik Kırılma Analizleri

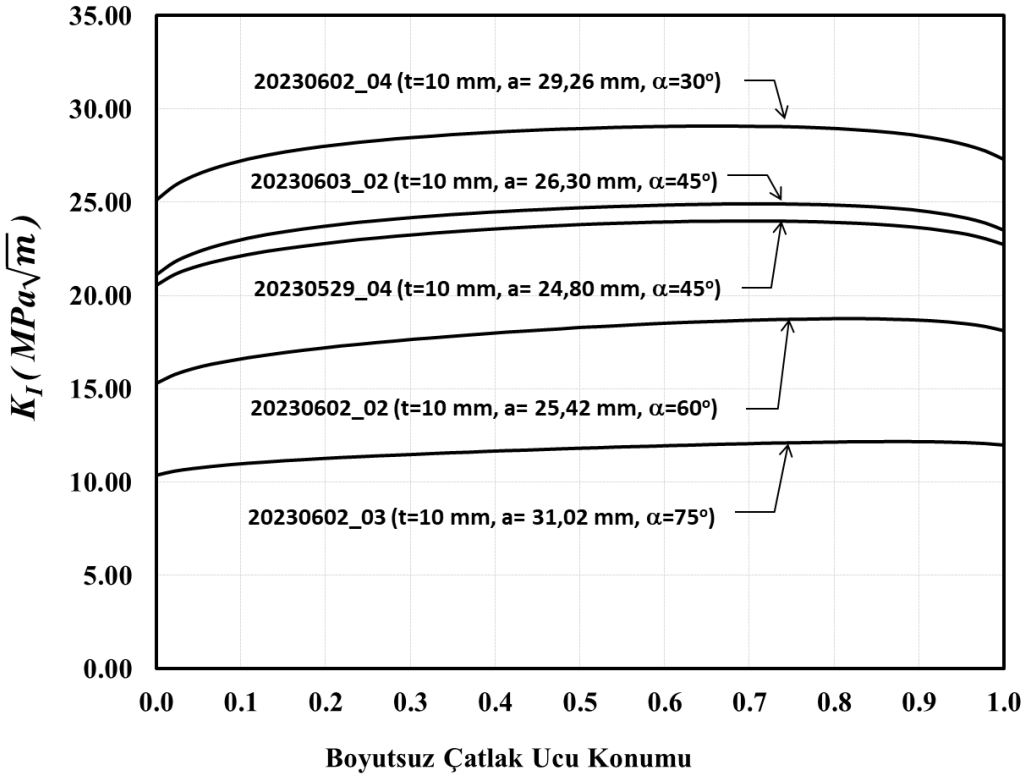
Bu kısımda AL-5083 H111 malzemesi için gerçekleştirilen mod-I, mod-I/II, mod-I/III ve mod-I/II/III kırılma tokluğu testleri sonucu hesaplanan çatlak boyu ve kırılma yükü değerleri ile gerçekleştirilen LEKM yaklaşımı ile hesaplanan GŞF ve elastik-plastik yaklaşım ile elde edilen AFPER ve ARUER analiz sonuçları sunulacaktır. Şekil 8.2'de mod-I kırılma analizleri sonucu farklı kalınlık ve çatlak boyları için GŞF sonuçları gösterilmektedir. Şekil 8.3'te mod-I/II kırılma analizleri sonucu K_I ve K_{II} GŞF değerleri gösterilmektedir. Şekil 8.4'te mod-I/III kırılma analizleri sonucu hesaplanan K_I GŞF sonuçları, Şekil 8.5'de K_{II} ve Şekil 8.6'da ise K_{III} GŞF sonuçları gösterilmektedir. Şekil 8.7'te mod-I/II/III kırılma analizleri sonucu hesaplanan K_I GŞF sonuçlarını, Şekil 8.8'te K_{II} ve Şekil 8.9'da ise K_{III} GŞF dağılımları gösterilmektedir. Şekil 8.10'da mod-I kırılma analizleri sonucu farklı kalınlık ve çatlak boyları için AFPER sonuçları, Şekil 8.11'te ise ARUER sonuçlarını vermektedir. Şekil 8.12'de mod-I/II kırılma analizleri sonucu hesaplana $AFPER_I$ ve $AFPER_{II}$ sonuçlarını, Şekil 8.13'te ise $ARUER_I$ ve $ARUER_{II}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 8.14'de mod-I/III kırılma analizleri sonucu hesaplanan $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 8.15'te $AFPER_{II}$ ve Şekil 8.16 ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 8.17'de mod-I/III kırılma analizleri sonucu hesaplanan $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 8.18'te $ARUER_{II}$ ve Şekil 8.19'da ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 8.20'te mod-I/II/III kırılma analizleri sonucu hesaplanan $AFPER_I$ sonuçları, Şekil 8.21'te $AFPER_{II}$ ve Şekil 8.22'de ise $AFPER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Şekil 8.23'te mod-I/II/III kırılma analizleri sonucu hesaplanan $ARUER_I$ sonuçları, Şekil 8.24'de $ARUER_{II}$ ve Şekil 8.25'te ise $ARUER_{III}$ sonuçları gösterilmektedir. Tablo 8.5 Richard ve Demir-Ayhan kriterleriyle hesaplanan eşdeğer GŞF sonuçlarını, Tablo 8.6 ise 12. adım ve 11. adım için AFPER/ARUER sonuçlarını sunmaktadır.



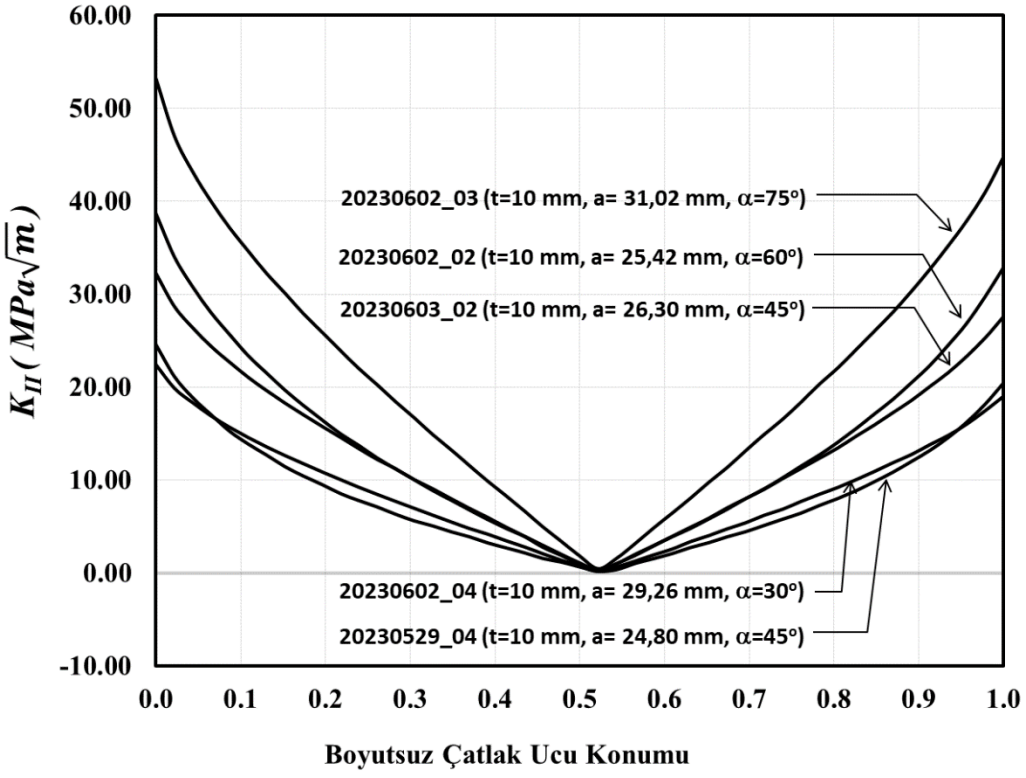
Şekil 8.2. AL-5083 Mod-I GŞF sonuçları.



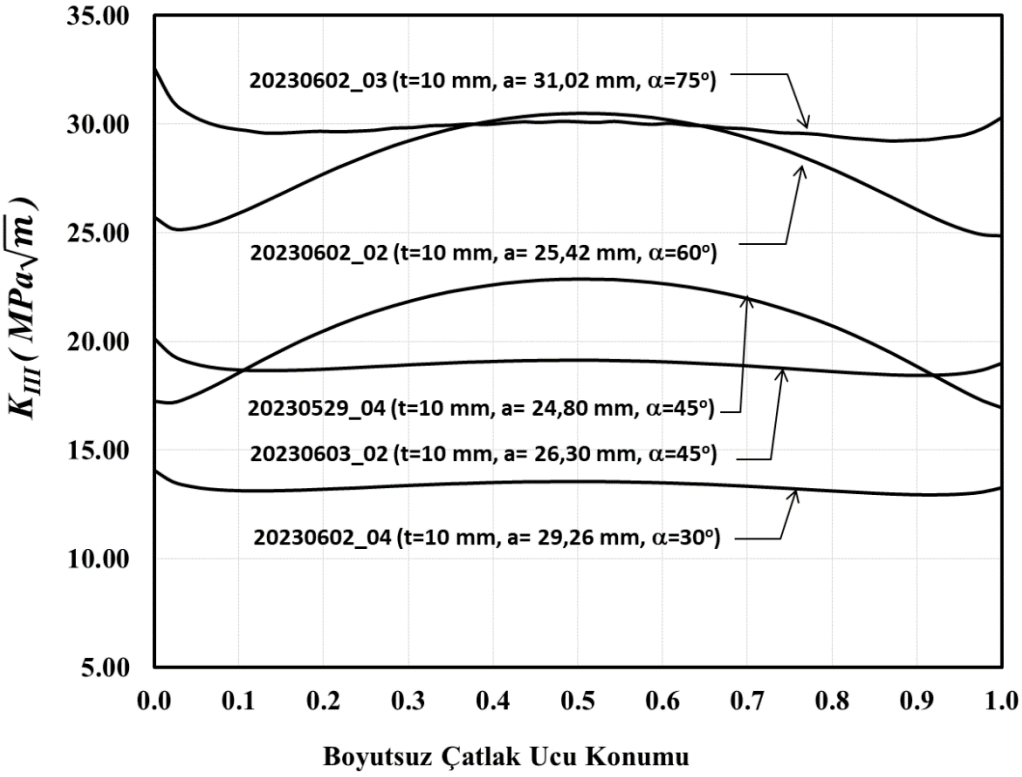
Şekil 8.3. AL-5083 Mod-I/II GŞF sonuçları.



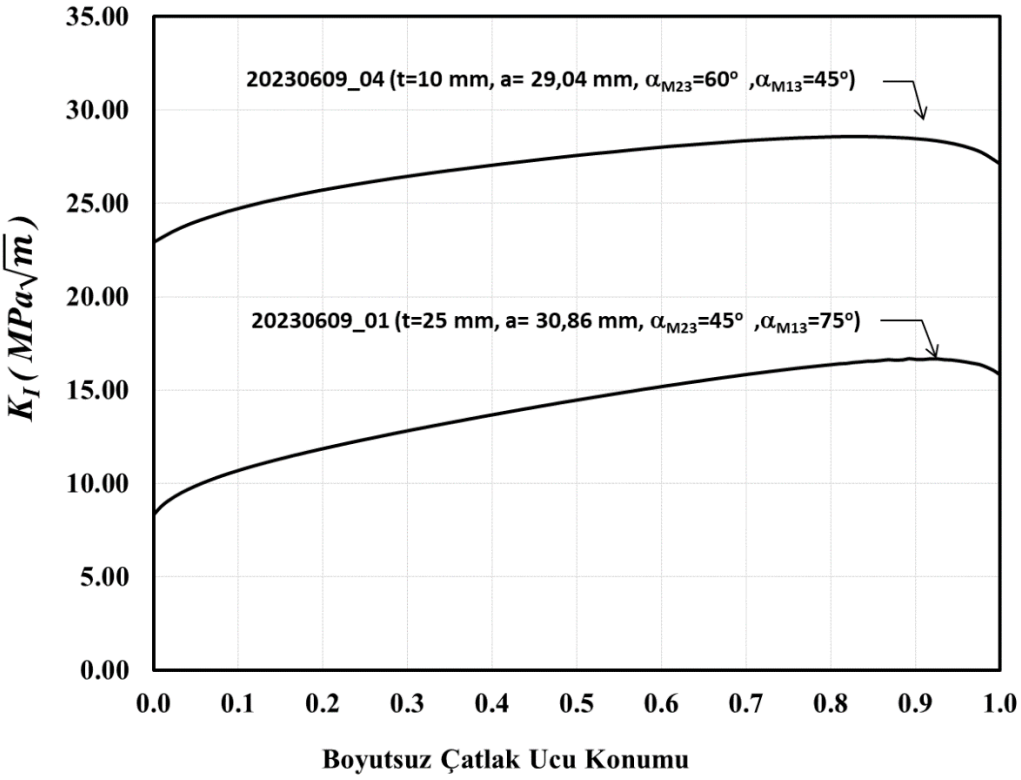
Şekil 8.4. AL-5083 Mod-I/III K_I GŞF sonuçları.



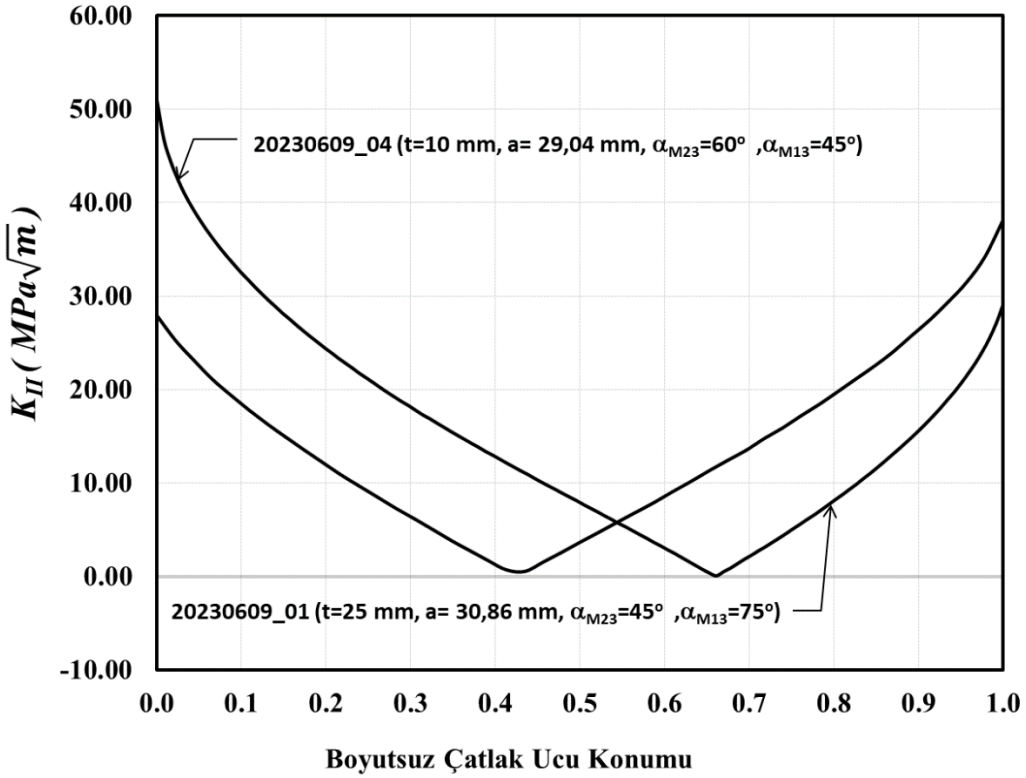
Şekil 8.5. AL-5083 Mod-I/III K_{II} GŞF sonuçları



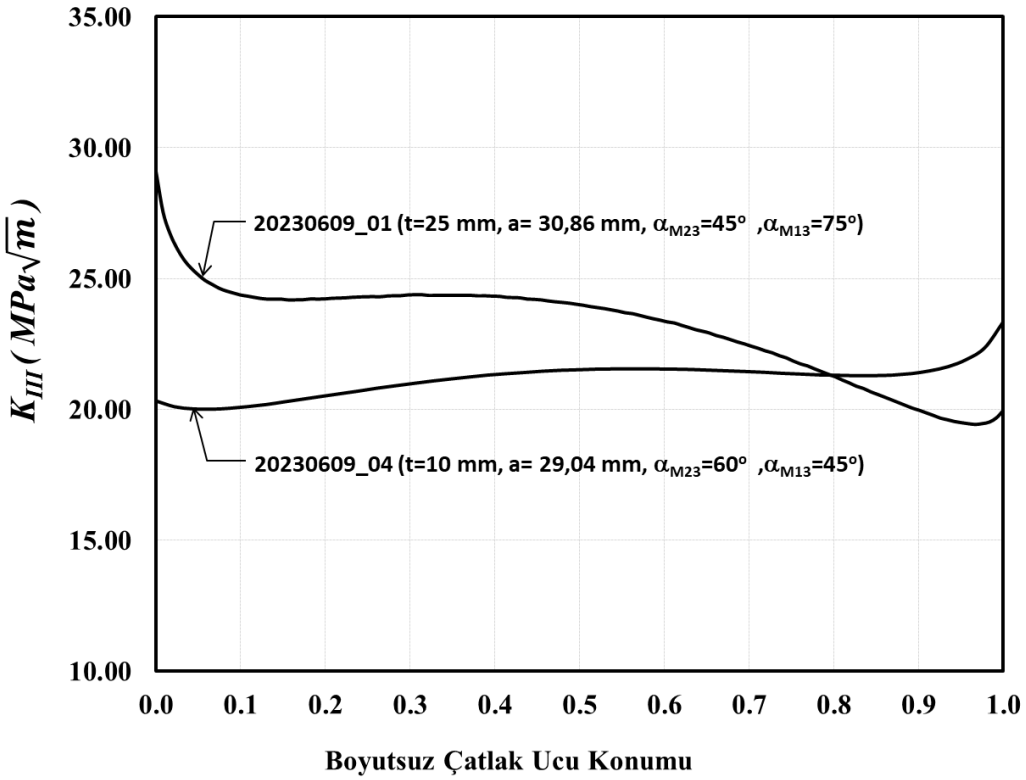
Şekil 8.6. AL-5083 Mod-I/III KIII GŞF sonuçları



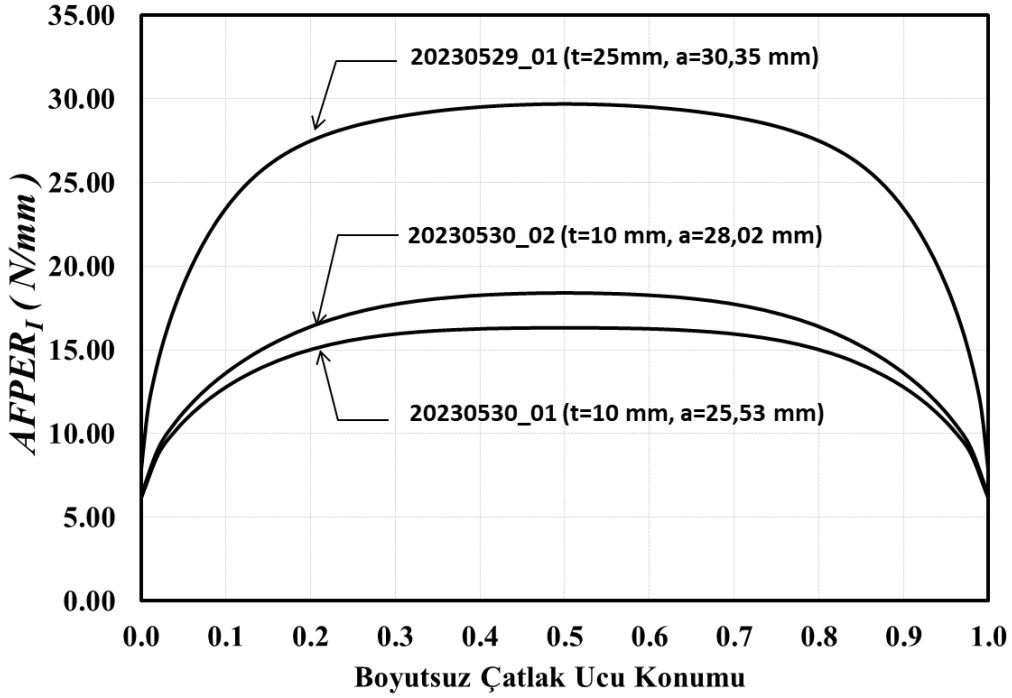
Şekil 8.7. AL-5083 Mod-I/II/III K_I GŞF sonuçları.



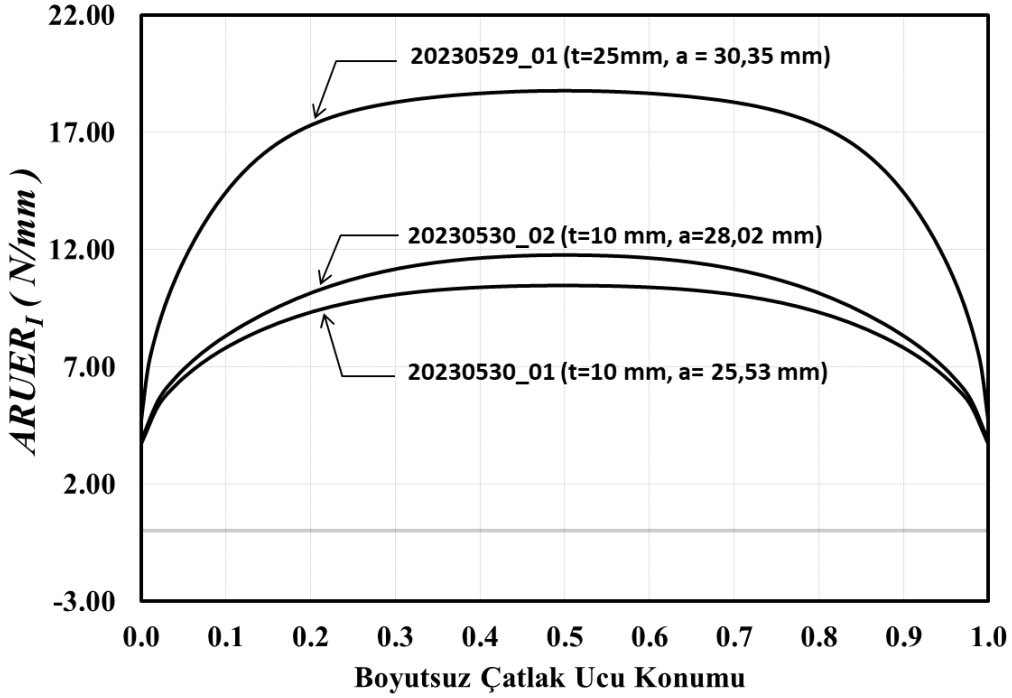
Şekil 8.8. AL-5083 Mod-I/II/III KII GŞF sonuçları.



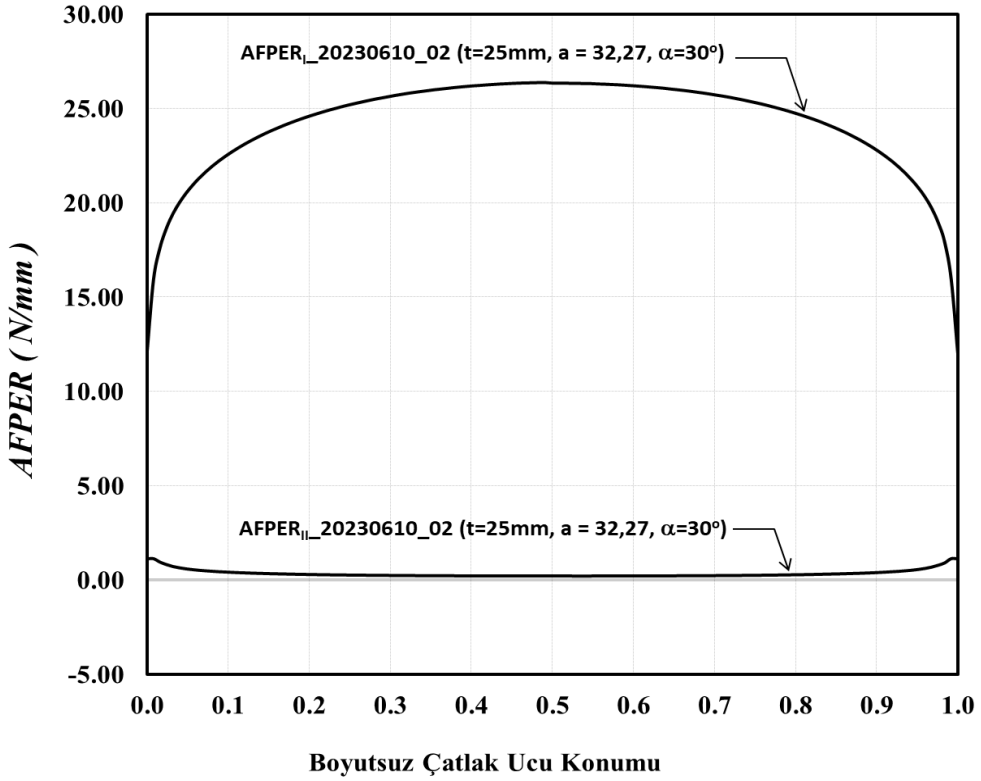
Şekil 8.9. AL-5083 Mod-I/II/III K_{III} GŞF sonuçları.



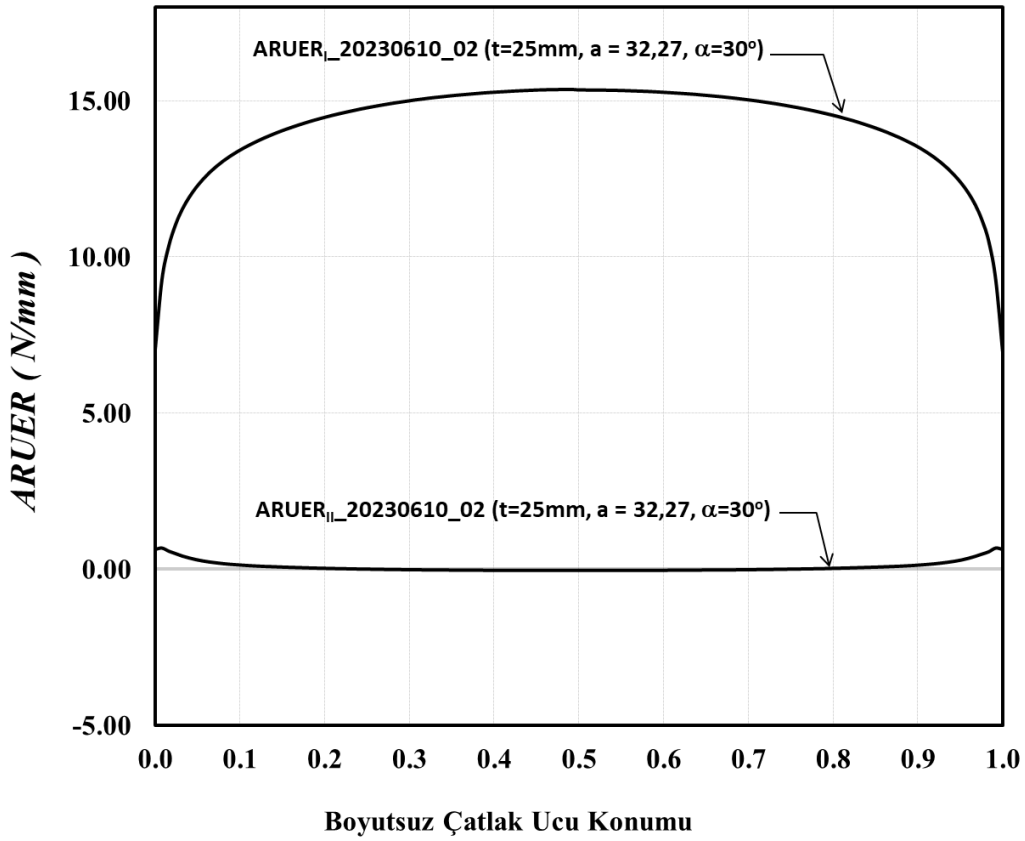
Şekil 8.10. AL-5083 Mod-I AFPER sonuçları.



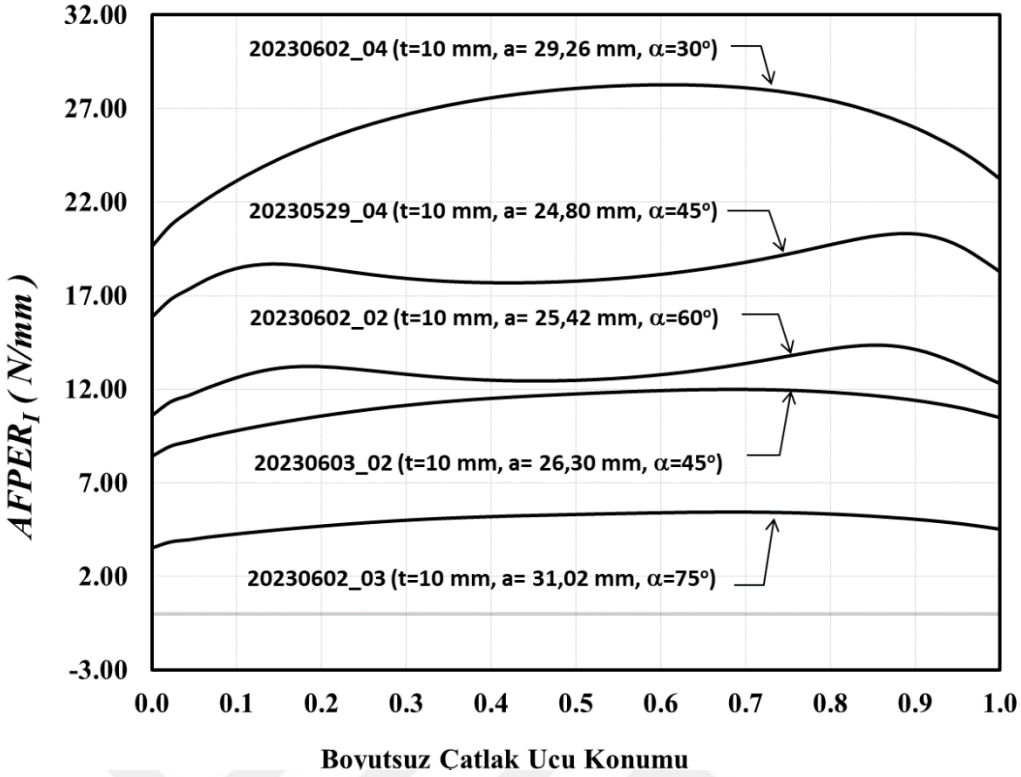
Şekil 8.11. AL-5083 Mod-I ARUER sonuçları.



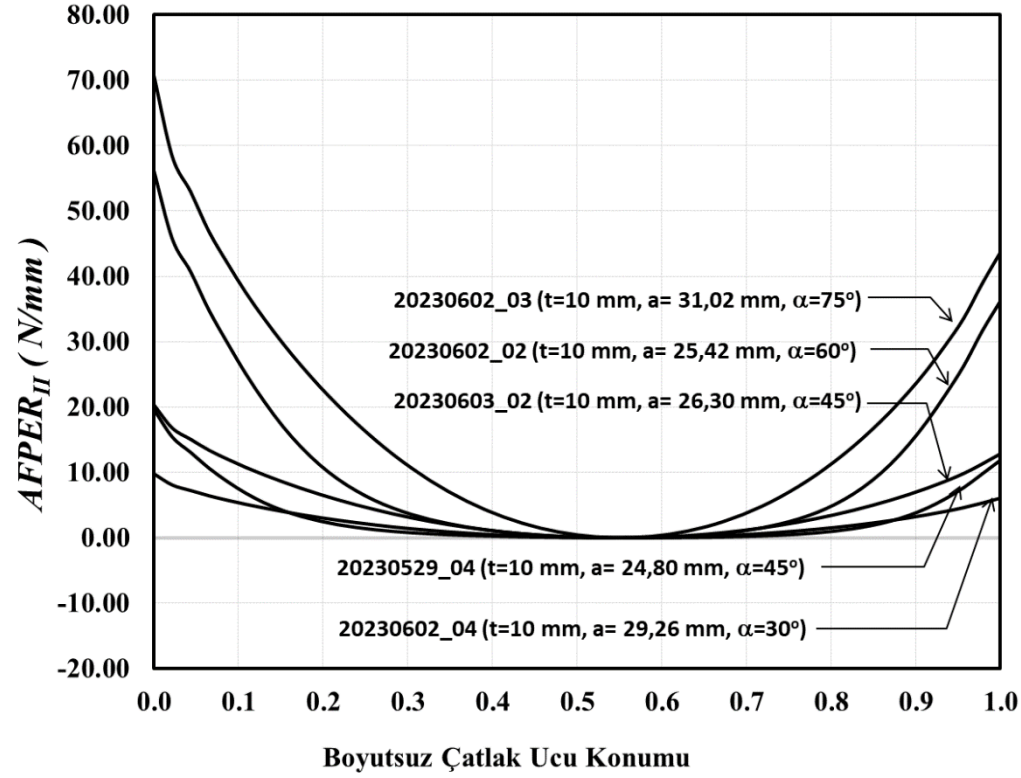
Şekil 8.12. AL-5083 Mod-I/II AFPER sonuçları.



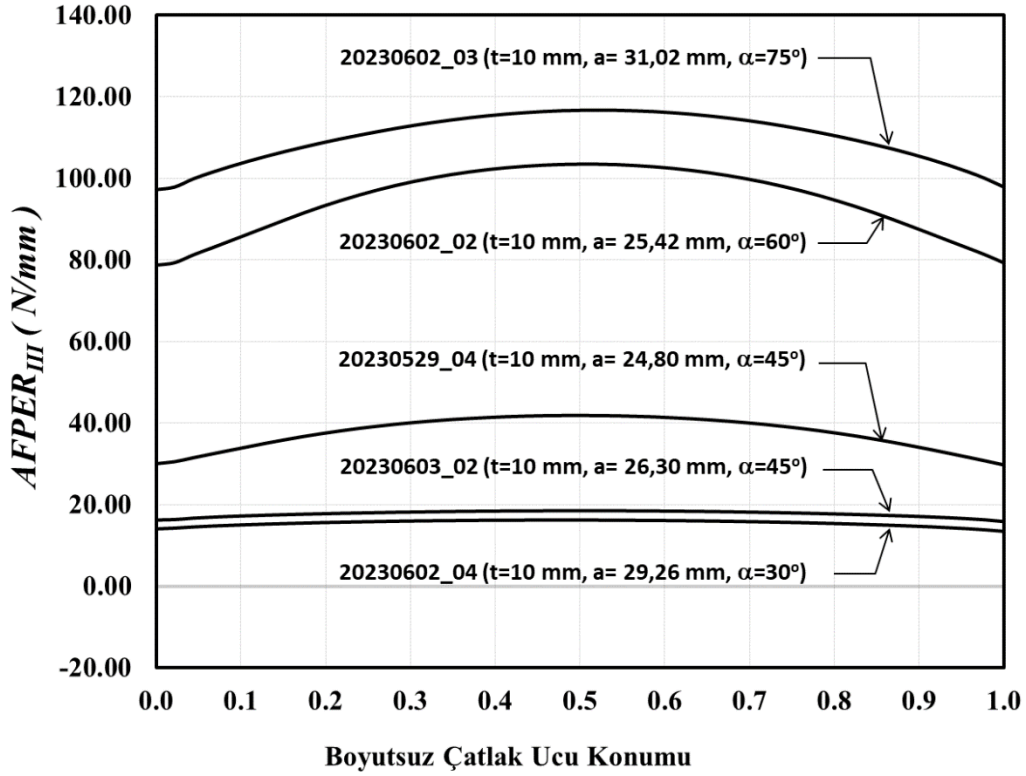
Şekil 8.13. AL-5083 Mod-I/II ARUER sonuçları.



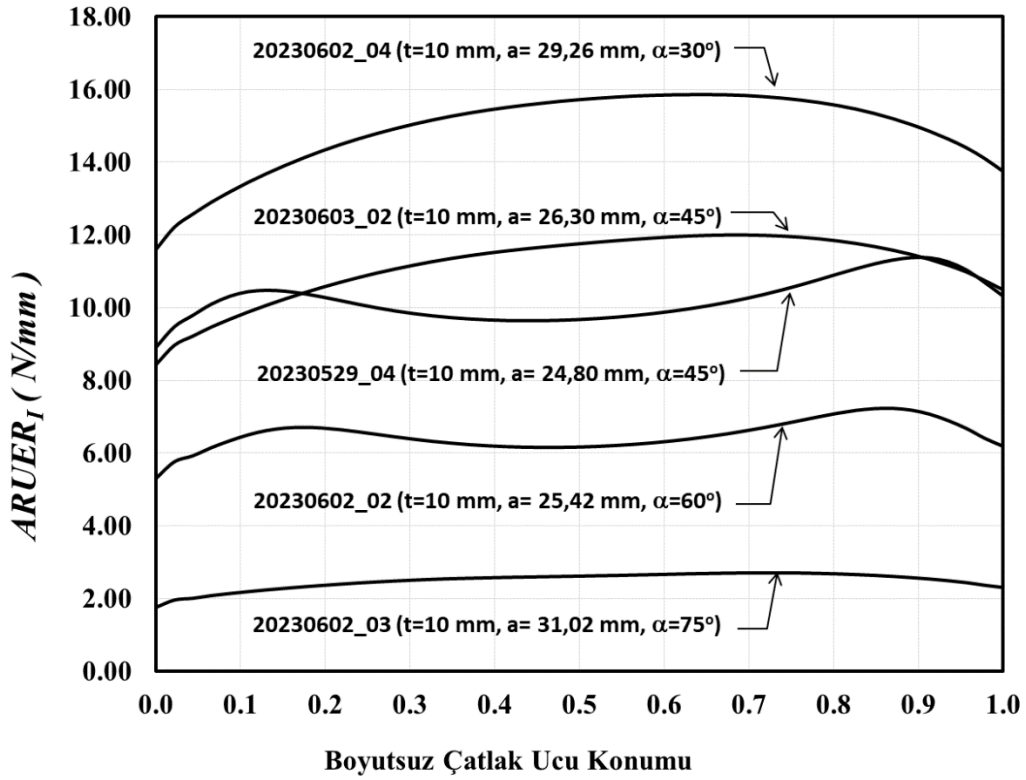
Şekil 8.14. AL-5083 Mod-I/III $AFPER_I$ sonuçları.



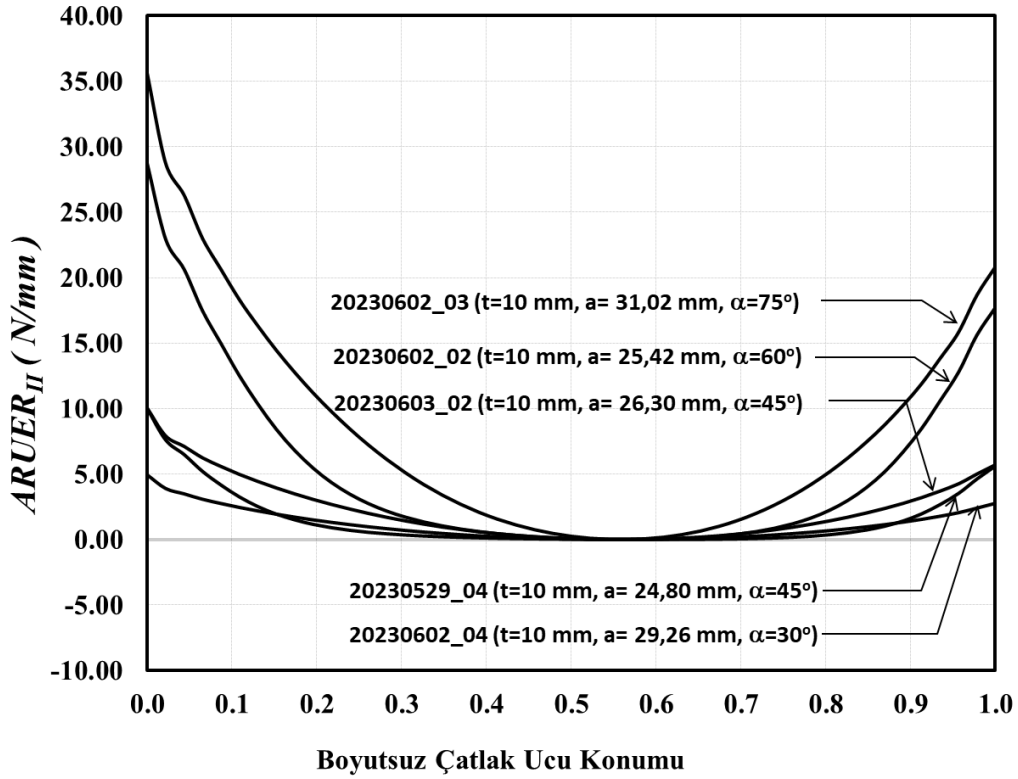
Şekil 8.15. AL-5083 Mod-I/III $AFPER_{II}$ sonuçları.



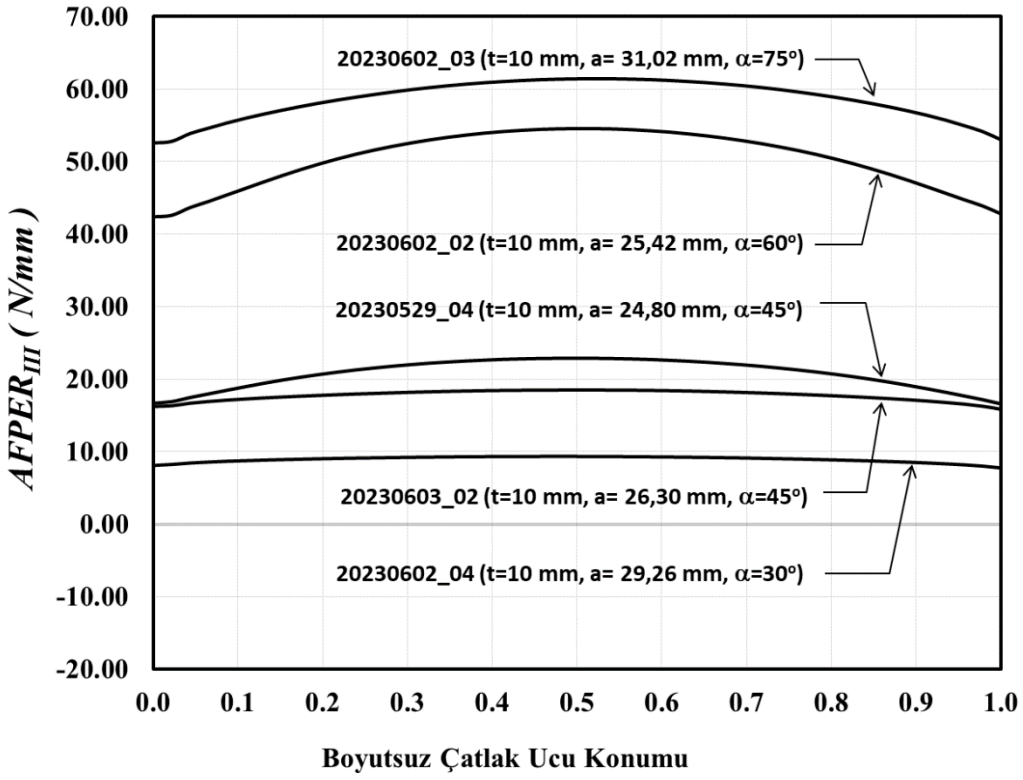
Şekil 8.16. AL-5083 Mod-I/III AFPERIII sonuçları.



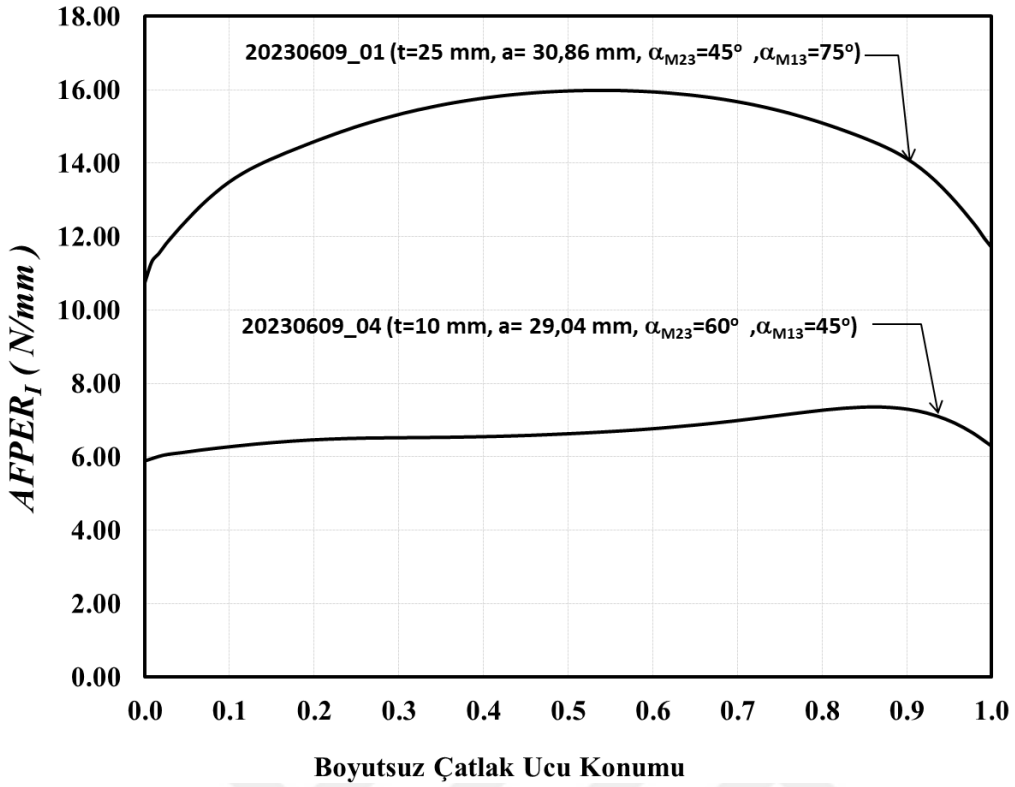
Şekil 8.17. AL-5083 Mod-I/III ARUERI sonuçları.



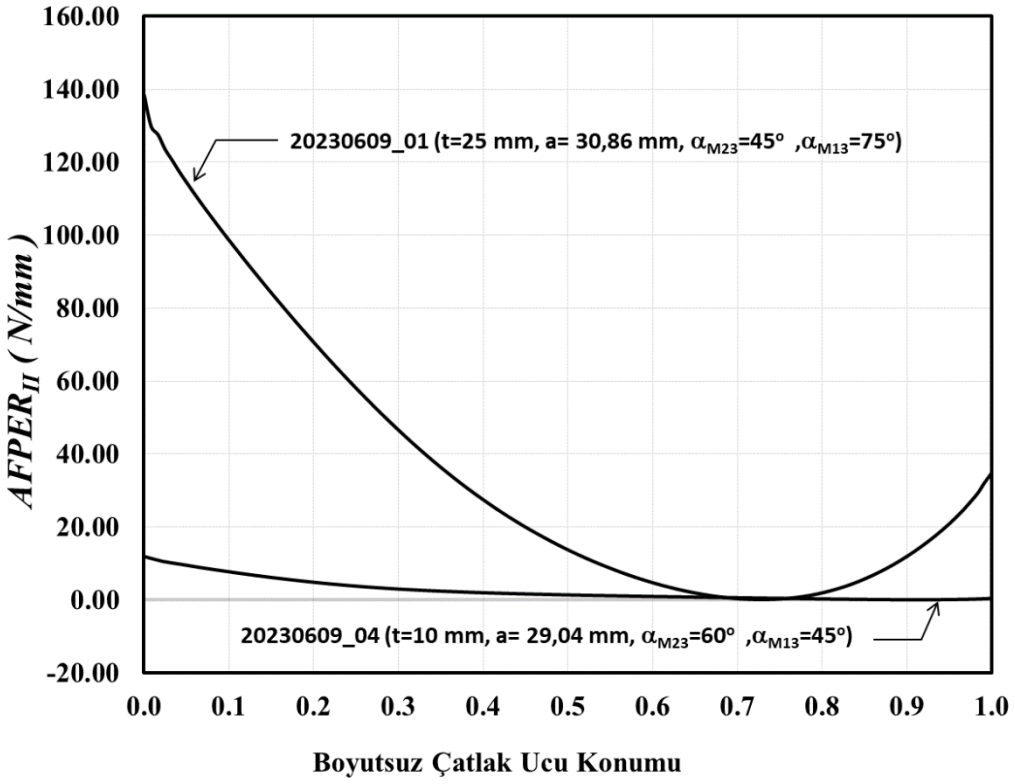
Şekil 8.18. AL-5083 Mod-I/III $ARUER_{II}$ sonuçları.



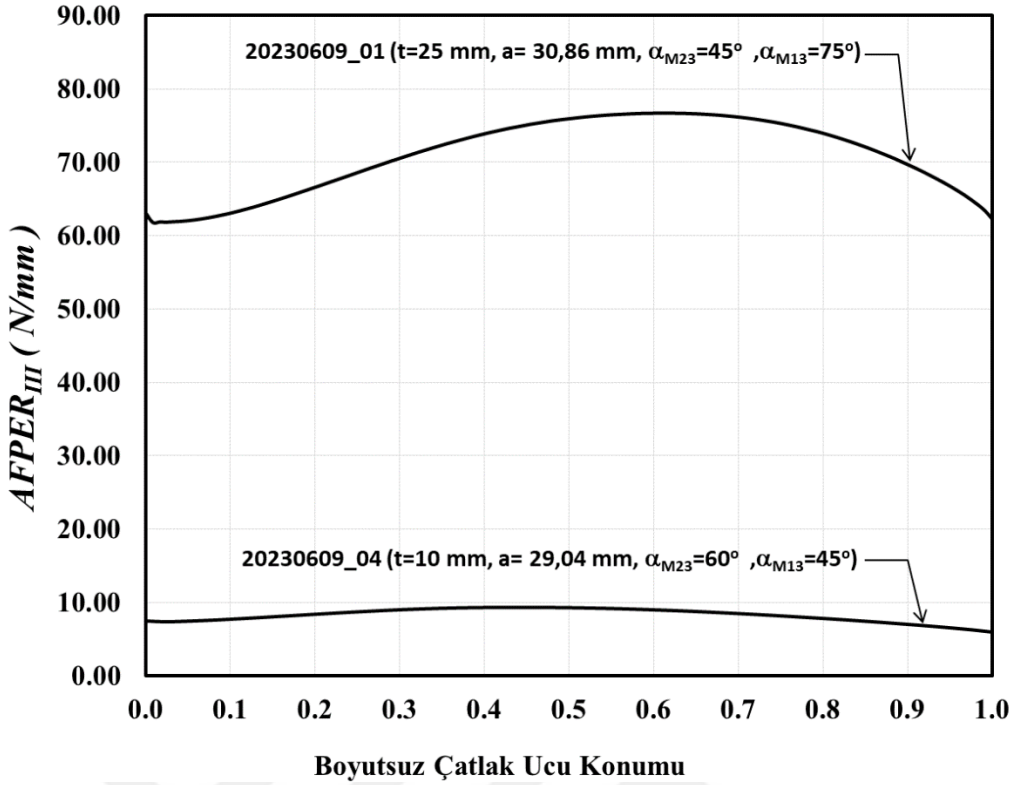
Şekil 8.19. AL-5083 Mod-I/III $ARUER_{III}$ sonuçları.



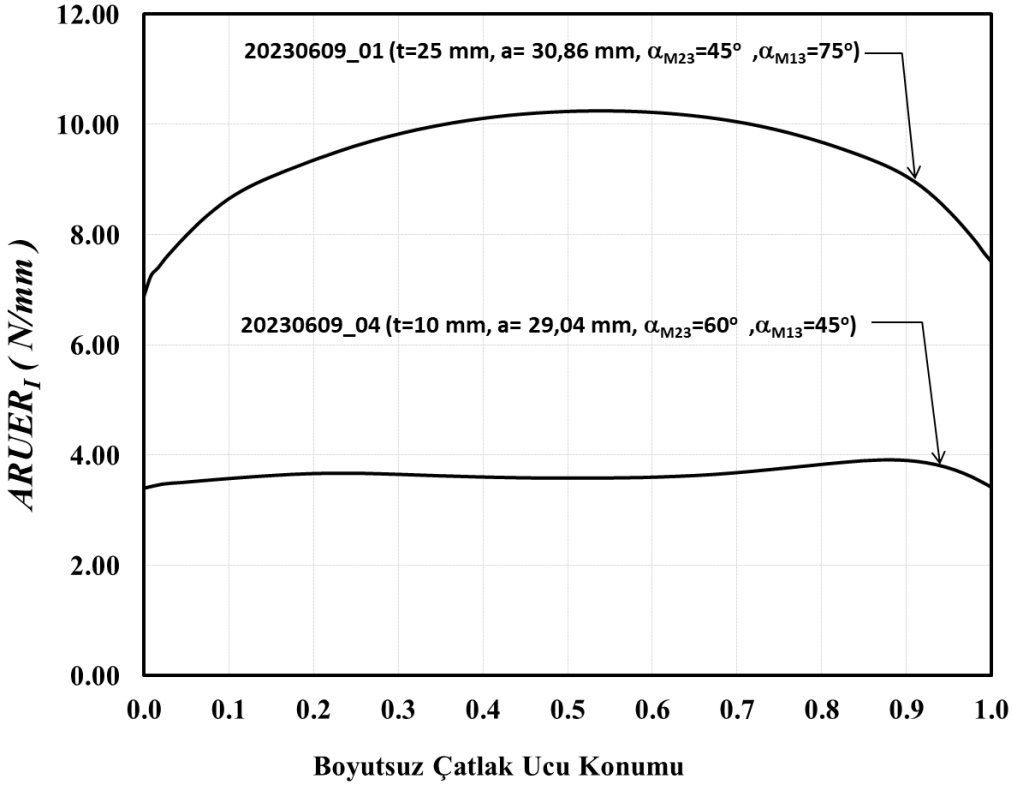
Şekil 8.20. AL-5083 Mod-I/II/III $AFPER_I$ sonuçları.



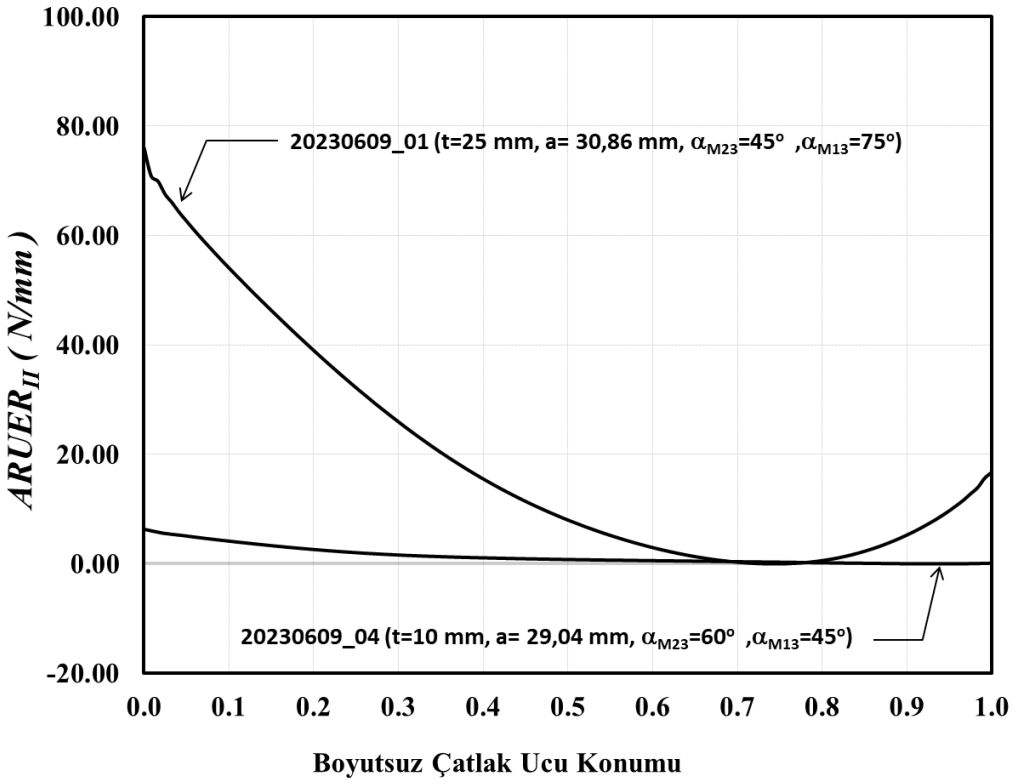
Şekil 8.21. AL-5083 Mod-I/II/III $AFPER_{II}$ sonuçları.



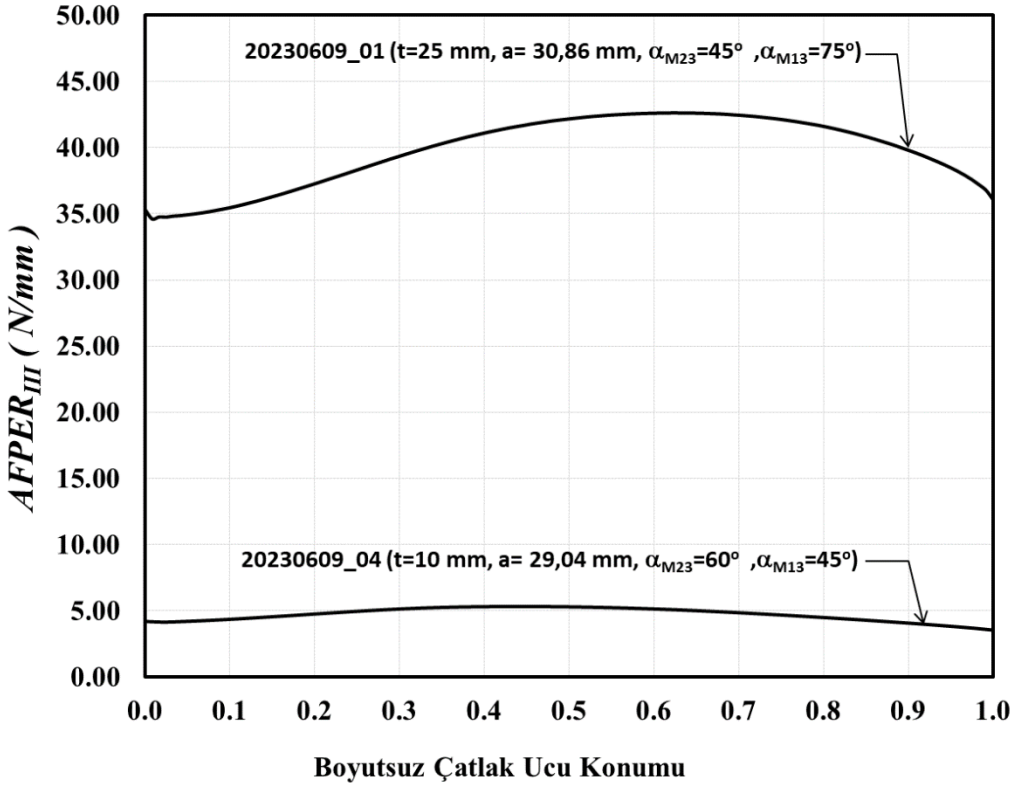
Şekil 8.22. AL-5083 Mod-I/II/III $AFPER_{III}$ sonuçları.



Şekil 8.23. AL-5083 Mod-I/II/III $ARUER_I$ sonuçları.



Şekil 8.24. AL-5083 Mod-I/II/III $ARUER_{II}$ sonuçları.



Şekil 8.25. AL-5083 Mod-I/II/III $ARUER_{III}$ sonuçları.

Tablo 8.5 AL-5083 kırılma tokluğu testleri için LEKM yöntemleriyle hesaplanan mod-I ,mod-II ve mod-III gerilme-şiddet faktörü ve eşdeğer gerilme-şiddet faktörü değerleri.

Numune ismi	Numune Kalınlığı (mm)	Yükleme Açısı	Keş GŞF (RİCHARD) (Mod-I için GŞF) (Mpa.$\sqrt{m}$)	Keş GŞF (Demir-Ayhan) (Mod-I için ASTM E399) (Mpa.$\sqrt{m}$)
20230529_01	25	Mod-I	31.66	35.50
20230530_01	10	Mod-I	24.67	28.46
20230530_02	10	Mod-I	25.28	28.29
20230610_02	25	Mod-I/II= 30º	32.63	25.60
20230529_03	10	Mod-I/III= 45º	32.98	20.05
20230529_04	10	Mod-I/III= 45º	58.89	28.66
20230602_02	10	Mod-I/III= 60º	60.63	41.78
20230602_03	10	Mod-I/III= 75º	59.97	33.67
20230602_04	10	Mod-I/III= 30º	69.53	N/A
20230602_01	10	Mod-II/III= 30º Mod-I/III= 60º	33.14	16.91
20230609_01	25	Mod-II/III= 45º Mod-I/III=75º	70.07	N/A

Tablo 8.6 Sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan 12.adım ve 11. adım $(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ değerleri.

Numune ismi	Numune Kalınlığı (mm)	Yükleme Açısı	$(AFPER/ARUER)_{I/III}$ (N) (12. Step)	$(AFPER/ARUER)_{I/II/III}$ (N) (11. Step)
20230529_01	25	Mod-I	1.578	1.571
20230529_05	25	Mod-I	1.578	1.565
20230530_01	10	Mod-I	1.558	1.547
20230530_02	10	Mod-I	1.563	1.550
20230610_02	25	Mod-I/II= 30º	1.606	1.573
20230529_03	10	Mod-I/III= 45º	1.577	1.547
20230529_04	10	Mod-I/III= 45º	1.579	1.546
20230602_02	10	Mod-I/III= 60º	1.600	1.583
20230602_03	10	Mod-I/III= 75º	1.591	1.578
20230602_04	10	Mod-I/III= 30º	1.591	1.578
20230602_01	10	Mod-II/III= 30º Mod-I/III= 60º	1.584	1.563
20230609_01	25	Mod-II/III= 45º Mod-I/III=75º	1.560	1.549

8.7. Mod-I, Mod-I/II, Mod-I/III, Mod-I/II/III Yükleri Altında LEKM GŞF ve EPKM AFPER/ARUER Oranları Kullanılarak Kırılma Yükü Tahminleri ve Deneyler ile Karşılaştırıları

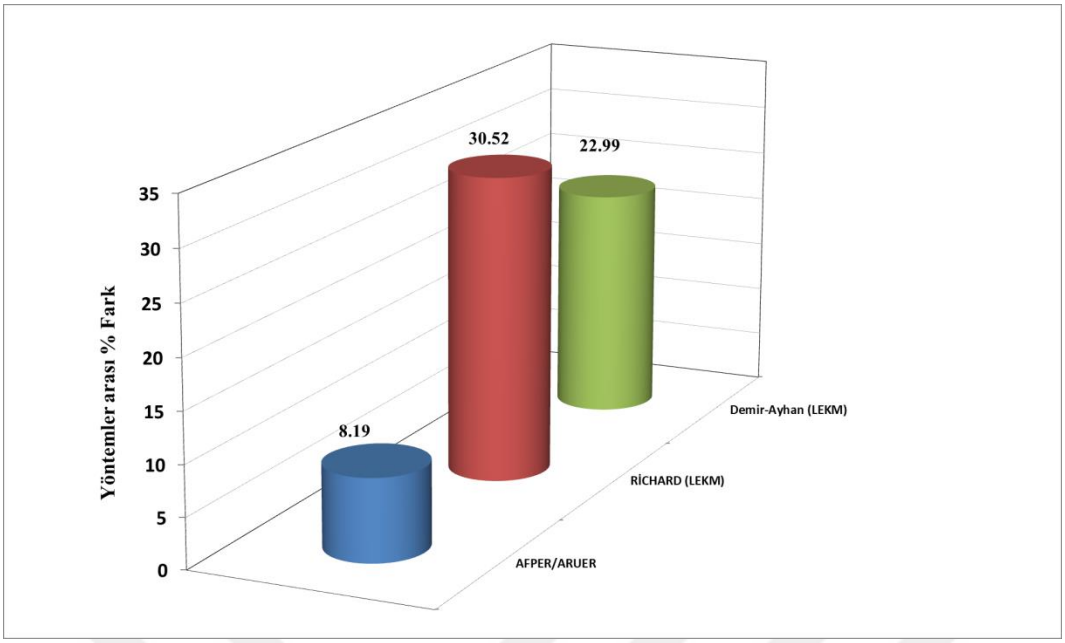
Bu kısımda Al-5083 H111 malzemesi için gerçekleştirilen Mod-I, mod-I/II, mod-I/III ve mod-I/II/II kırılma tokluğu testlerinden elde edilen çatlak boyu ve kırılma yükleri ile gerçekleştirilen lineer elastik kırılma mekaniği ve lineer olmayan elastik-plastik kırılma makaniği (EPKM) analizleri ile hesaplanan AFPER/ARUER yöntemi sonucu hesaplanan kırılma yüklerinin test yükleri ile karşılaştırmaları sunulacaktır. Tablo 8.7 LEKM yöntemleri ve AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan kırılma yükleri ile test yüklerinin yüzde farklarını içermektedir. Tablo 8.8 LEKM yöntemleri ve AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan kırılma yükleri ile test yüklerinin yüzde farklarını içermektedir. LEKM yöntemi kapsamında Richard kriteri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü ile gerçekleşen tahminlerin test yükü ile arasındaki maksimum fark %57, Demir-Ayhan kriteri ile hesaplanan maksimum fark % 77 ve lineer olmayan elastik-plastik kırılma mekaniği yöntemi olan AFPER/ARUER yöntemi ile hesaplanan maksimum fark ise % 14 mertebesindedir. Şekil 8.26'da ise Richard, Demir-Ayhan ve AFPER/ARUER yöntemleri ile tahmin edilen kırılma elastik-plastik ortalama farkı gösterilmektedir. Sünek malzemeler için LEKM kuralları ile gerçekleştirilen analiz sonuçları incelendiğinde maksimum fark seviyeleri Richard kriteri için %56, Demir-Ayhan kriteri için ise %49 seviyelerine ulaşmaktadır. Farklar arasındaki bu süreksizlik, sünek malzemeler için LEKM kurallarının kullanılamayacağını göstermektedir. Aynı kırılma problemleri için kullanılan AFPER/ARUER yönteminde ise maksimum fark % 15 seviyesindedir. Sünek malzemeler için LEKM kuralları dışında başka bir alternatif yaklaşımın olmadığı değerlendirildiğinde AFPER/ARUER yönteminin sünek malzemelerin kırılma davranışlarının karekterizasyonunda başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 8.7 LEKM kuralları ve AFPER/ARUER ile hesaplanan kırılma yükü tahminleri.

Numune ismi	Numune Kalınlığı (mm)	Yükleme Açısı	Kırılma Yükü (RİCHARD) (Mod-I için GŞF) (N)	Kırılma Yükü (Demir-Ayhan) (Mod-I için ASTM E399) (N)	Kırılma Yükü AFPER/ARUER (N)
20230529_01	25	Mod-I	13393.21	11944.48	12661.98
20230530_01	10	Mod-I	7751.11	6718.90	6917.239
20230530_02	10	Mod-I	6370.49	5692.68	5583.272
20230610_02	25	Mod-I/II= 30º	19548.54	24916.76	19289.09
20230529_03	10	Mod-I/III= 45º	6013.64	9891.77	6468.68
20230529_04	10	Mod-I/III= 45º	4604.60	9461.43	8816.277
20230602_02	10	Mod-I/III= 60º	4546.26	6597.42	7803.044
20230602_03	10	Mod-I/III= 75º	3654.58	6509.21	6286.945
20230602_04	10	Mod-I/III= 30º	2919.30	N/A	5822.629
20230602_01	10	Mod-II/III= 30º Mod-I/III= 60º	8744.54	17137.43	9094.395
20230609_01	25	Mod-II/III= 45º Mod-I/III=75º	11232.21	N/A	28073.12

Tablo 8.8 LEKM kuralları ve AFPER/ARUER ile tahmin edilen kırılma yükleri ile test yükleri arasındaki yüzde farklar.

Numune ismi	Numune Kalınlığı (mm)	Yükleme Açısı	% Fark (RİCHARD) (Mod-I için GŞF)	% Fark (Demir-Ayhan) (Mod-I için ASTM E399)	% Fark AFPER/ARUER
20230529_01	25	Mod-I	5.24	15.49	10.42
20230529_05	25	Mod-I	N/A	14.89	5.61
20230530_01	10	Mod-I	-21.61	-5.41	-8.52
20230530_02	10	Mod-I	-18.67	-6.04	-4.01
20230610_02	25	Mod-I/II= 30º	8.06	-17.19	9.28
20230529_03	10	Mod-I/III= 45º	9.04	-49.63	2.15
20230529_04	10	Mod-I/III= 45º	49.06	-4.68	2.46
20230602_02	10	Mod-I/III= 60º	50.52	28.20	15.07
20230602_03	10	Mod-I/III= 75º	49.97	10.90	13.94
20230602_04	10	Mod-I/III= 30º	56.85	N/A	13.94
20230602_01	10	Mod-II/III= 30º Mod-I/III= 60º	9.47	-77.41	5.85
20230609_01	25	Mod-II/III= 45º Mod-I/III=75º	57.19	N/A	-7.01

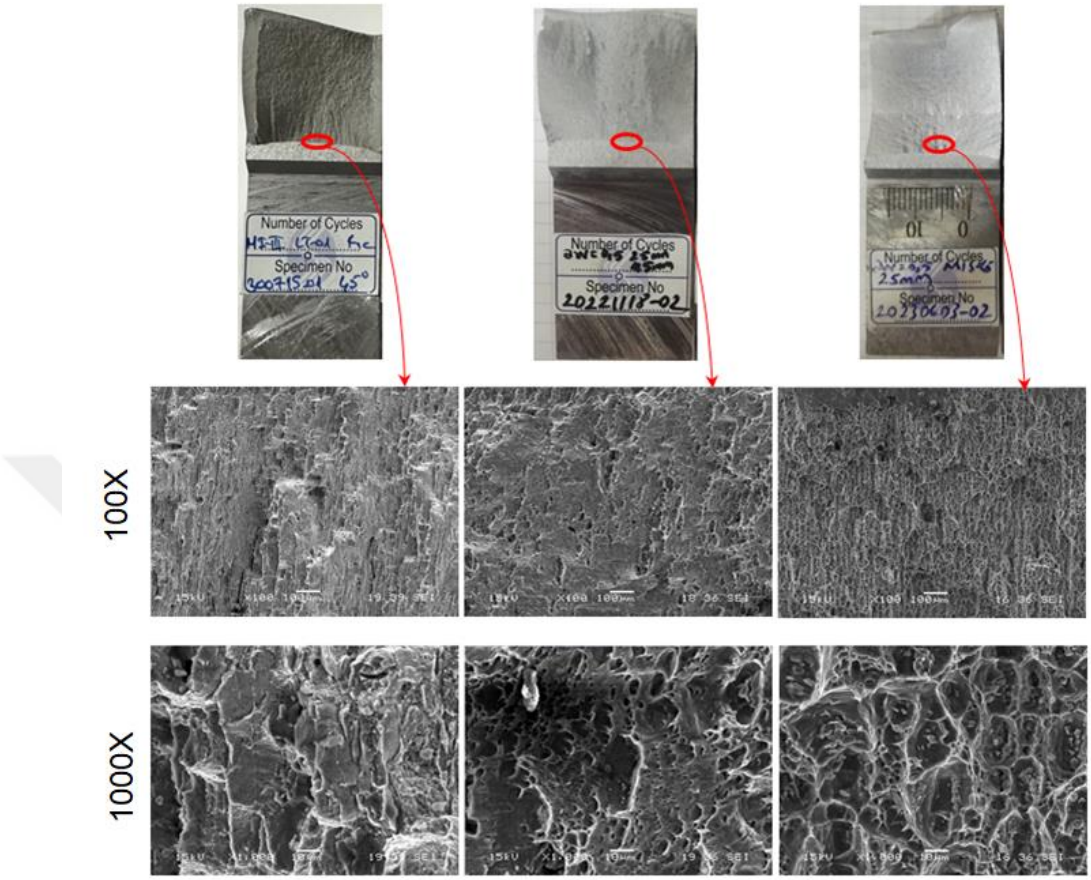


Şekil 8.26. Farklı kalınlıklarda AL-5083 numuneleri kullanılarak mod-I ve karışık mod kırılma problemleri için AFPER/ARUER , Richard ve Demir-Ayhan kriterleri ile hesaplanan eşdeğer gerilme-şiddet faktörü ile tahmin edilen kırılma yükü tahminlerinin test yükleri ile ortalama yüzde farkları.

8.8. Kırılma Yüzeylerinin Makro ve Mikro Seviye İncelenmesi

Tez çalışması kapsamında Al-2024 T351 ve AL-5083 H111 malzemelerinin çekme testi ve kırılma tokluğu testleri gerçekleştirilmiş ve mod-I, mod-I/II, mod-I/III ve mod-I/II/III karışık mod yükler altında kırılma yükünün sonlu elemanlar analizleri ile tahmin edilmesini sağlayan kriterler geliştirilmiştir. Ayrıca tez içerisinde bazı kısımlarda başka tez çalışmalarında kullanılmış olan AL-7075 malzemesinin kırılma davranışlarına atıflar ve karşılaştırmalar da yapılmıştır. Bu doğrultuda gevrek bir malzeme olan AL-7075 ile, elastik-plastik özellik gösteren AL-2024 ve AL-5083 malzemelerinin kırılma tokluğu testleri sonrası kırılma yüzeylerinin 100x ve 1000x yakınsama ile SEM görüntüleri alınmıştır. Bu görüntüler içerisinden bir örnek olarak, Şekil 8.27'de mod-I/III=45^{o} deneyleri gerçekleştirilen farklı malzemelerden yapılmış 25 mm kalınlıktaki numunelerin kalınlık yönünde çatlak önü boyunca orta noktalardaki SEM görüntüleri sunulmaktadır. Görüntü incelendiğindiğinde sünekliğin en belirgin özelliği olan çukur tümsek yapısının AL-7075'te hemen hemen hiç yer almadığını, AL-2024 de belirgin şekilde yer aldığı ve AL-5083'de ise sayısının arttığı Dolayısıyla, AL-7075 malzemesindeki gevrek kırılma problemleri lineer elastik kırılma mekaniği ilkeleri ile analiz edilebiliyorken, plastik deformasyonun en fazla oluştuğu AL-5083 ve orta derecede oluştuğu AL-2024 malzemesindeki kırılma

problemleri için ise lineer olmayan elastik-plastik kırılma mekaniği analizlerinin gerektiği mikro-yapı incelemeleri ile de ortaya konulmaktadır.



Şekil 8.27. AL-7075 [51], Al-2024 ve Al-5083 malzemeleri ile gerçekleştirilen mod-I/III kırılma tokluğu testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar ve değerlendirme

Bu tez kapsamında, karışık mod yük altında bulunan elastik-plastik malzemelerin üç boyutlu kırılma davranışları üzerine analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulguların kırılma mekaniği bilim alanına önemli katkılar sağlayacağı ön görülmektedir. Çalışmanın temel amacı, çeşitli yükleme modları altında malzemelerin mekanik tepkilerini analiz etmek ve bu tepkileri karakterize eden kırılma kriterleri ve yöntemler geliştirmektir.

Tezin ilk aşamasında, literatürde kullanılan yöntemler değerlendirilmiştir. Literatürdeki sünek malzemeler için mevcutta kullanılan Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) temelli yöntemler çatlaklı malzemenin maruz kaldığı plastik deformasyonu hesaba katmamaktadır. J-integral gibi LEKM ve Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) mekaniği problemlerinde ortak kullanılan yöntemler ise sadece toplam enerji salınım oranı değerini hesaplamakta, bu değerin kırılma modlarına ayrıştırılması ise ciddi efor gerektirmektedir. Bu doğrultuda VCCT yöntemi elastik-plastik malzemelere uyarlanmış ve mod-I problemleri için literatürde yer alan problemlerin çözümleri ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Elastik-plastik malzemelerde hesaplanan değerler plastik deformasyonu da içermektedir. Bu yönü ile hesaplama mantığı LEKM kurallarına benzese de sonuçları birbirinden farklıdır. Bu doğrultuda, elastik-plastik malzemelerin kırılma yüklerinin tahmin edilebilmesi için iki yeni parametre literatüre kazandırılmıştır. Bu parametreler , yapay kırılma süreci enerji salınım oranı (Artificial Fracture Process Energy Rate - AFPER) ve yapay tersinebilir boşaltım enerji salınım oranı (Artificial Recoverable Unloading Energy Rate - ARUER) olarak isimlendirilmektedir.

Tez kapsamında Al-2024 T351 ve Al-5083 H111 malzemeleri ile toplam 178 mod-I, mod-I/II, mod-I/III ve mod-I/II/III kırılma tokluğu testi gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin, doğrulama testleri dışında kalanlarının tamamının sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve kırılma yükü tahminlerinde kullanılmak üzere LEKM kuralları ile gerilme-şiddet faktörleri ve EPKM analizleri ile AFPER/ARUER değerleri

hesaplanmıştır. LEKM sonlu elemanlar analizleri sonucu hesaplanan K_I, K_{II} ve K_{III} gerilme-şiddet faktörüleri ile Richard ve Demir-Ayhan kriterleri kullanılarak eşdeğer gerilme-şiddet faktörleri hesaplanmıştır. LEKM yaklaşımıyla tahmin edilen kırılma yükleri ile test yükleri arasındaki farklar yüksek seviyelerdedir. Özellikle daha sünek bir malzeme olan Al-5083 için gerçekleşen tahminlerde farklar ortalama %35 seviyesindedir. Ancak EPKM yöntemlerinden biri olan AFPER/ARUER yöntemleri ile gerçekleşen kırılma tokluğu tahminlerinde farklar yüzde 10 seviyesinin altında hesaplanmıştır. Böylece, doğruluğu iki farklı sünek malzeme kullanılarak yapılan deneylerle ispat edilmiş olan AFPER/ARUER parametresi temelinde geliştirilen kriterlerin elastik-plastik ve üç-boyutlu karışık mod kırılma problemlerinin tahminlerinde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

9.2. Öneriler ve Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

- Tez kapsamında geliştirilen AFPER/ARUER yöntemi, Al-2024 T351 ve Al-5083 H111 malzemeleri için yüksek doğrulukta sonuç vermektedir. Ancak diğer malzemelerle özellikle çelik, bakır gibi yüksek tokluğa sahip farklı malzemeler üzerinde uyumluluğu ayrıca incelenmelidir.
- Yüksek sıcaklık altında çalışan malzemeler elastik-plastik özellik göstermektedir. Literatürde kalınlık ve çatlak boyundan bağımsız bir kriter yer almamaktadır. AFPER/ARUER yöntemi bu alandaki kriter açığını kapatma potansiyeline sahiptir.
- Geliştirilen AFPER/ARUER yöntemi kırılma yükünün karakterize edilmesini amaçlamaktadır. Kalınlık, çatlak boyu gibi değişkenler, çatlak ucundaki plastik deformasyonu değiştirdiğinden, bu yöntemin yorulma çatlak ilerleme ömrü hesabında kullanılması ömür tahminlerinde tutarsızlık getirebilir. Tez içerisinde tanımlanan, düğüm noktası yük boşaltma ile enerji salınım oranı hesabı ile gerçekleştirilecek kriterlerin de kırılma yükü ve çatlak ilerleme ömür tahminleri için kullanılabilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Cotterell, B. (2002). The past, present, and future of fracture mechanics. *Engineering fracture mechanics*, 69(5), 533-553.

[2] Griffith, A. A. (1921). VI. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 221(582-593), 163-198.

[3] Anderson, T. L., & Anderson, T. L. (2005). Fracture mechanics: fundamentals and applications. CRC press.

[4] Irwin, G. R. (1956). Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminum alloys.

[5] Orowan, E. (1949). Fracture and strength of solids. Reports on progress in physics, 12(1), 185.

[6] Irwin, G. R. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate.

[7] Westergaard, H. M. (1939). Bearing pressures and cracks: Bearing pressures through a slightly waved surface or through a nearly flat part of a cylinder, and related problems of cracks.

[8] Paris, P., & Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws. J. Basic Eng. Trans. ASME, 528–534. https://doi.org/10.1115/1.3656900

[9] Rice, J. (1967). Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue. Fatigue crack propagation. ASTM STP 415, *American Society for Testing and Materials,* 247–309. https://doi.org/10.1520/STP47234S

[10] Rice, J. R. (1968). "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks." ASME. *J. Appl. Mech.,* 35(2): 379–386. https://doi.org/10.1115/1.3601206.

[11] Gdoutos, E. E. (2020). Fracture mechanics: an introduction (Vol. 263). Springer Nature.

[12] Barenblatt, G. I. (1959). The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks. *Journal of applied mathematics and mechanics,* 23(3), 622-636.

[13] Barenblatt, G. I. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in applied mechanics,* 7, 55-129.

[14] Dugdale, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids,* 8(2), 100-104. https://doi.org/10.1016/0022-5096(60)90013-2

[15] Chowdhury, U., & Wu, X. F. (2021). Cohesive zone modeling of the elastoplastic and failure behavior of polymer nanoclay composites. *Journal of Composites Science,* 5(5), 131. https://doi.org/10.3390/jcs5050131

[16] Bican, İ. E. (2016). Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tabakalı kompozitlerde arayüzey kırılma tokluğunun analizi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü). https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/410718

[17] Krueger, R. (2004). Virtual crack closure technique: History, approach, and applications. *Appl. Mech. Rev.*, 57(2), 109-143. https://doi.org/10.1115/1.1595677

[18] Kurt, E. (2017). Basınçlı küresel kaplarda üç boyutlu karışık modlu çatlakların parametrik analizi (Yüksek lisans tezi, Sakarya Universitesi (Turkey).

[19] 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. https://doi.org/10.1002/nme.459

[20] Hutchinsn, J.W. (1968). Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 16, 13–31

[21] Hutchinson, J.W. (1968). Plastic stress and strain fields at a crack tip. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 16, 337–347.

[22] Wells, A. A. (1965). The application of fracture mechanics to yielding materials. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. *Mathematical and Physical Sciences*, 285(1400), 34-45. https://doi.org/10.1098/rspa.1965.0087

[23] Schijve, J. (1992). Multiple-site-damage fatigue of riveted joints. In Presented at the International Workshop on Structural Integrity of Aging Airplanes.

[24] Swift, T. (1994). Damage tolerance capability. *International Journal of Fatigue*, 16(1), 75-94.

[25] Newman Jr, J. C., James, M. A., & Zerbst, U. (2003). A review of the CTOA/CTOD fracture criterion. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(3-4), 371-385. https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00125-X

[26] Wells, A. A. (1963). Application of fracture mechanics at and beyond general yielding. *British Welding Journal*, 10.

[27] ASTM E2472-12e1, Standard Test Method for Determination of Resistance to Stable Crack Extension under Low-Constraint Conditions, *ASTM International*, 2013.

[28] Ma, L., Lam, P. W., Kokaly, M. T., & Kobayashi, A. S. (2003). CTOA of a stable crack in a thin aluminum fracture specimen. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(3-4), 427-442. https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00129-7

[29] Xu, W., Wang, H., Wu, X., Zhang, X., Bai, G., & Huang, X. (2014). A novel method for residual strength prediction for sheets with multiple site damage: Methodology and experimental validation. *International Journal of Solids and Structures*, 51(3-4), 551-565. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.10.012

[30] Begley, J. A., & Landes, J. D. (1971). The J integral as a fracture criterion. In Appeared in Fracture Toughness, proceedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics, Part II. University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois, August 31-September 2, 1971.

[31] Zhu, X. K., & Joyce, J. A. (2012). Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engineering fracture mechanics*, 85, 1-46. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.02.001

[32] Chorin, A. J., & Bažant, Z. P. (2022). Grigory Isaakovich Barenblatt. 10 July 1927—22 June 2018. https://doi.org/10.1098/rsbm.2021.0024

[33] Ungsuwarungsri, T., & Knauss, W. G. (1987). The role of damage-softened material behavior in the fracture of composites and adhesives. *International Journal of Fracture*, 35, 221-241.

[34] Needleman, A. (1990). An analysis of tensile decohesion along an interface. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 38(3), 289-324. https://doi.org/10.1016/0022-5096(90)90001-K

[35] Xu, W., & Waas, A. M. (2017). Multiple solutions in cohesive zone models of fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 177, 104-122. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.026

[36] Woelke, P. B., Shields, M. D., & Hutchinson, J. W. (2015). Cohesive zone modeling and calibration for mode I tearing of large ductile plates. *Engineering Fracture Mechanics*, 147, 293-305. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.03.015

[37] Xiao, S., Wang, H. L., Liu, B., & Hwang, K. C. (2017). The surface-forming energy release rate versus the local energy release rate. *Engineering Fracture Mechanics*, 175, 86-100. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.02.006

[38] Kfouri, A. P., & Miller, K. J. (1976). Crack separation energy rates in elastic-plastic fracture mechanics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 190(1), 571-584. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1976_190_060_

[39] Turner, C. E., & Kolednie, O. (1994). A micro and macro approach to the energy dissipation rate model of stable ductile crack growth. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 17(9), 1089-1107. https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1994.tb00837.x

[40] Sumpter, J. D. G. (2007). Size effects in tearing instability: An analysis based on energy dissipation rate. *Engineering fracture mechanics*, 74(15), 2352-2374. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.11.009

[41] ANSYS, Version 12.0. Ansys Inc., Canonsburg, PA, USA, 2009.

[42] Demir, O. (2016). Üç boyutlu karışık mod kırılma kriterlerinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi ve geliştirilmesi (Doktora Tezi, Sakarya Universitesi (Türkiye).

[43] Ayhan, A.O., 113M407 nolu TÜBİTAK projesi sonuç raporu, 2016.

[44] Ayhan, A. O. (2000). Finite element analysis of nonlinear deformation mechanisms in semiconductor packages. Lehigh University.

[45] Simha, N. K., Fischer, F. D., Shan, G. X., Chen, C. R., & Kolednik, O. (2008). J-integral and crack driving force in elastic–plastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56(9), 2876-2895. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2008.04.003

[46] Jandejsek, I., Gajdoš, L., Šperl, M., & Vavřík, D. (2017). Analysis of standard fracture toughness test based on digital image correlation data. *Engineering Fracture Mechanics*, 182, 607-620. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.045

[47] Gajjar, M., & Pathak, H. (2023). Elasto-plastic fracture modelling of 3-D metallic structure using XFEM. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 9(1), 237-262. https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2091187

[48] Xu, W., Ren, Y., Xiao, S., & Liu, B. (2023). A finite crack growth energy release rate for elastic-plastic fracture. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 181, 105447. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2023.105447

[49] EN 573-3:2019-12. (2019) Aluminum and Aluminum Alloys-Chemical Composition and Types of Wrought Products-Part 3: Chemical Composition and Types of Articles; European Committee For Standardization: Brussels, Belgium, 2019.

[50] ASTM International (2005) Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials. US Patent No. ASTM E399-05, West Conshohocken. https://www.astm.org/ https://doi.org/10.1520/E0399-05

[51] User Manual for Analyzing Digital Images (ADI16).

[52] Demir, O., Ayhan, A. O., & İriç, S. (2017). A new specimen for mixed mode-I/II fracture tests: Modeling, experiments and criteria development. *Engineering Fracture Mechanics*, 178, 457-476 . https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.02.019

[53] Yaren, M. F., Demir, O., Ayhan, A. O., & İriç, S. (2019). Three-dimensional mode-I/III fatigue crack propagation: Computational modeling and experiments. *International Journal of Fatigue*, 121, 124-134. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.12.005

[54] 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. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106597

[55] 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. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106671

[56] Mabrouki, T., Girardin, F., Asad, M., & Rigal, J. F. (2008). Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(11), 1187-1197. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.03.013

[57] Richard, H. A. (1985). Fracture predictions for cracks exposed to superimposed normal and shear stresses.

[58] Floros, Dimosthenis, Anders Ekberg, and Fredrik Larsson. "Evaluation of crack growth direction criteria on mixed-mode fatigue crack growth experiments." International Journal of Fatigue 129 (2019): 105075. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.04.013

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Emre KURT

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2014, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans :** 2017, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , Makine tasarım ve imalat ABD

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2020 yılından itibaren TIRSAN Treyler A.Ş firmasında Çalışmaktadır.
- 2017-2020 Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) – Aşama 3 adlı ve 217M690 TUBİTAK PROJESİ – Bursiyer Proje Asistanı.
- 2015-2016 Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) – Aşama 2 adlı ve 113M407 TUBİTAK PROJESİ – Bursiyer Proje Asistanı.

ESERLERİ :

- Kurt, E., Demir, O., & Ayhan, A. O. (2019). Applications on Three-Dimensional Mixed Mode Fatigue Crack Propagation Using Fracture and Crack Propagation Analysis System (FCPAS). *Procedia Structural Integrity*, *21*, 21-30.

- Kurt, E., & Ayhan, A. O. (2019). Three-dimensional mixed-mode stress intensity factors for deflected internal surface cracks in thin and midsize-thick-walled spherical pressure vessels. *International journal of pressure vessels and piping*, *171*, 10-33.

- Ayhan, A. O., & Kurt, E. (2022). Three-dimensional mixed-mode stress intensity factors for deflected external surface cracks in thin and midsize-thick-walled spherical pressure vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *195*, 104596.

- Kurt, E., Demir, O., & Ayhan, A. O. (2022). Three-dimensional non-planar crack growth analysis using enriched finite elements. *International Journal of Solids and Structures*, *241*, 111497.