

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKSENEL GERİLME, EĞİLME VE BURULMA YÜKLERİNE
MARUZ KATI SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ YÜZEY
ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağatay Orhun ORAL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

MAYIS 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKSENEL GERİLME, EĞİLME VE BURULMA YÜKLERİNE
MARUZ KATI SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ YÜZEY
ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağatay Orhun ORAL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali Osman AYHAN

MAYIS 2023

Çağatay Orhun ORAL tarafından hazırlanan “EKSENEL GERİLME, EĞİLME VE BURULMA YÜKLERİNE MARUZ KATI SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ” adlı tez çalışması 12.05.2023 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 Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Ali Osman AYHAN (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Serkan DAĞ**
Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğretim Üyesi 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 “EKSENEL GERİLME, EĞİLME VE BURULMA YÜKLERİNE MARUZ KATI SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ” 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.

(/06/2023).

Çağatay Orhun ORAL



TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi ile çalışma içeriğindeki uygulanması gereken yöntemler konusunda yardımlarını esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden mümkün olduğunca faydalanmaya çalıştığım çok değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Ali Osman AYHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasına başlarken altyapı oluşturmamı sağlayan ve oluşturduğu bilimsel eserle çalışmalarına ışık tutan Hakan ŞAHİN'e, çalışma başlangıcında fikir alışverişlerinde bulunduğum ve tecrübeleriyle bana yol gösteren Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Faruk YAREN'e ve Emre KURT'a, çalışma sürecinde yaptıkları yardım ve katkılarından dolayı Muhammet ÇALIK ve Mete YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi her türlü desteği vermekten çekinmeyen değerli aile büyüklerim annem Asuman ÇATAL ORAL'a, anneannem Güldane ÇATAL'a, annemin babası dedem Süleyman ÇATAL'a ve rahmetli babam Hüseyin ORAL'ın babası dedem Hasan ORAL'a teşekkür ederim.

Çağatay Orhun ORAL



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxxv
SUMMARY	xxxvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kırılma Mekanîği ve Tarihçesi	1
1.2. Kırılma Mekanîği	2
1.2.1. Kırılma modları	2
1.2.2. Karışık mod yük altında gerilme şiddet faktörleri	3
2. KATI SİLİNDİRLERDE KARIŞIK MOD YÜZEY ÇATLAKLARI	7
2.1. Problem Tanımı	7
2.2. Katı Silindirlerdeki Eliptik Çatlaklarla İlgili Literatürde Bulunan Çalışmalar	8
3. KATI SİLİNDİRİK YAPILARDA ÜÇ BOYUTLU DÖNMÜŞ YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD ANALİZLERİ	13
3.1. Sonlu Elemanlar (Ögeler) Yöntemi, ANSYS Tarihi ve FCPAS Yazılımının Tanıtımı	15
3.1.1. Mod-I gerilme şiddet faktörlerinin doğrulanması	24
3.1.2. Sonlu eleman ağ duyarlılık analizi	26
3.1.3. Karışık mod gerilme şiddet faktörlerinin doğrulanması	28
3.2. Eksenel Üniform Gerilmeye Maruz Katı Silindirik Yapıda Bulunan Dönmüş Çatlak Analizleri	33
3.3. Eğilme Gerilmesine Maruz Katı Silindirik Yapıda Bulunan Dönmüş Çatlak Analizleri	72
3.4. Burulma Yüküne Maruz Katı Silindirik Yapıda Bulunan Dönmüş Çatlak Analizleri	111
3.5. Çatlak Derinlik Oranı (a/D) Parametresinin Etkileri	152
3.5.1. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak	152
3.5.2. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak	153
3.5.3. Burulma yüküne maruz dönmüş çatlak	153
3.6. Çatlak Şekil Oranı (a/c) Parametresinin Etkileri	172
3.6.1. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak	172
3.6.2. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak	172
3.6.3. Burulma yüküne maruz dönmüş çatlak	172
4. KARIŞIK MOD GERİLME ŞİDDET FAKTÖRLERİ İÇİN EMİRİK DENKLEM GELİŞTİRİLMESİ	197
4.1. Çatlak Ucu Serbest Yüzey Noktaları ($s=0$)	203

4.1.1. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak	203
4.1.2. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak	210
4.2. Çatlak Ucu Derinlik Noktaları ($s=0.5$)	217
4.2.1. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak	218
4.2.2. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak	222
4.3. Empirik Denklemlerin Doğrulama Çalışmaları.....	225
5. ANSYS APDL MAKROLARI	247
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	261
KAYNAKLAR.....	263
ÖZGEÇMİŞ	267



KISALTMALAR

APDL	: Ansys Parametric Design Language (Ansys Parametrik Tasarım Dili)
FCPAS	: Fracture and Crack Propagation Analysis System (Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi)
GŞF	: Gerilme Şiddet Faktörü
LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekaniği





SİMGELER

a	: Çatlak derinlik uzunluğu
α	: Dönmüş çatlağın yatay eksenle yaptığı açı
β	: Eğik çatlağın yatay eksenle yaptığı açı
c	: Çatlak genişlik uzunluğu
D	: Katı silindir çapı
H	: Silindir yarım boy yüksekliği
K_c	: Kırılma tokluğu
K_r	: Normalizasyon için kullanılan referans GŞF sembolü
K	: Gerilme Şiddet Faktörü sembolü
K_I	: Gerilme şiddet faktörü mod-I bileşeni
K_{II}	: Gerilme şiddet faktörü mod-II bileşeni
K_{III}	: Gerilme şiddet faktörü mod-III bileşeni
R	: Silindir yarıçapı
σ	: Eksenel gerilme
s	: Boyutsuz çatlak ucu konumu
τ	: Kayma gerilmesi
μ	: Kayma modülü
κ	: Hacimsel modül



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Problemi tanımlayan parametreler.	14
Tablo 3.2. Analizler için belirlenen eliptik yüzey çatlak ve silindir ölçüleri.	14
Tablo 3.3. Her bir yükleme durumu için toplam analiz sayısı.	14
Tablo 3.4. Burulma yükü için normalize formülü parametreleri.....	23
Tablo 4.1. Çatlak şekil oranlarına bağlı olarak oluşturulan empirik denklemlerin indirgenmiş katsayı adetleri (Eksenel Gerilme).....	202
Tablo 4.2. Çatlak şekil oranlarına bağlı olarak oluşturulan empirik denklemlerin indirgenmiş katsayı adetleri (Eğilme Yükü).	202
Tablo 4.3. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.....	207
Tablo 4.4. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.....	207
Tablo 4.5. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.....	208
Tablo 4.6. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.....	208
Tablo 4.7. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.....	209
Tablo 4.8. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.....	210
Tablo 4.9. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.	214
Tablo 4.10. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.	214
Tablo 4.11. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.	215
Tablo 4.12. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.	215
Tablo 4.13. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.	216

Tablo 4.14. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.	217
Tablo 4.15. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.	220
Tablo 4.16. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.	221
Tablo 4.17. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.	221
Tablo 4.18. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.....	224
Tablo 4.19. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.....	224
Tablo 4.20. Eğilme yükü altında silindirde bulunan dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.....	225

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Çatlak deformasyon modları, (a) açılma, (b) düzlem içi kayma ve (c) yırtılma modu.	3
Şekil 1.2. Çatlak uzunluğu $2a$ olan çift-eksenli çekme gerilmesine maruz bir sonsuz levha.	4
Şekil 1.3. Çatlak ucunun koordinat eksenini önünün tanımı ve gerilme bileşenleri.	4
Şekil 1.4. Üç boyutlu bir çatlak ucu (crack front) üzerinde yerleştirilmiş r , θ , z koordinat sistemi ile gerilme elemanı ve bileşenlerinin gösterimi.	5
Şekil 2.1. Dönmüş eliptik yüzey çatlağı içeren silindir; (a) Eksenel üniform gerilme yüklemesi, (b) Eğilme yüklemesi, (c) Burulma yüklemesi.	8
Şekil 3.1. Silindir üst görünüş, ön görünüş, silindir yüzeyine konumlandırılan eliptik dönmüş yüzey çatlağı ve problemi tanımlayan parametreler.	15
Şekil 3.2. 20 düğüm noktalı ANSYS Solid-95 Elemanı.	17
Şekil 3.3. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$, $\alpha=45^\circ$ değerlerine sahip silindirde çatlak yerleştirme işlemi.	17
Şekil 3.4. Normal silindir tasarımı (başta) ve yüzey merkezine yerleştirilen dönmüş çatlak önü çizgisinin gösterimi (sonda).	18
Şekil 3.5. Eğilme yükü için oluşturulan silindir tasarımı ve çatlak tünel hacmi modeli.	18
Şekil 3.6. Dönmüş yüzey çatlağına sahip katı bir silindirin bölüntülenmiş modeli ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.	19
Şekil 3.7. FCPAS V2.2 Arayüz Görüntüsü.	19
Şekil 3.8. ANSYS TM Sonlu Öğeler Modeli Kullanarak Kırılma Analizi Gerçekleştirebilme Sekmeleri.	20
Şekil 3.9. Üç boyutlu bir çatlak ucundaki temsili bir ikinci dereceden eleman.	20
Şekil 3.10. FCPAS ile kırılma analizi basamakları.	21
Şekil 3.11. Serbest yüzey bölgesinde çatlak ucu boyunca zenginleştirilmiş, geçiş ve normal öğeler.	22
Şekil 3.12. Burulma yükü için maksimum kayma gerilmelerinin dağılımı.	24
Şekil 3.13. Çatlak şeklinin parametreleri.	24
Şekil 3.14. $a/D=0.2$ çatlak derinlik oranına sahip eksenel gerilmeye maruz katı silindirde değişik çatlak şekil oranları sonuçlarının kıyaslaması.	25
Şekil 3.15. $a/D=0.6$ çatlak derinlik oranına sahip eğilme yüküne maruz katı silindirde değişik çatlak şekil oranları sonuçlarının kıyaslaması.	25
Şekil 3.16. $a/c=1$, $a/D=0.1$, $\beta=45^\circ$ boyutlarına sahip eğik dairesel yüzey çatlağı içeren katı silindirin simetrik sonlu eleman modeli ve çatlak önü yakın görüntüsü.	27
Şekil 3.17. $a/c=1$, $a/D=0.1$, $\beta=45^\circ$ boyutlarına sahip eğik dairesel yüzey çatlağı için çatlak ucundaki eleman boyutunun farklı değerlerinde çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları.	27

Şekil 3.18. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$, $\beta =45^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Eksenel gerilme, [19]).	29
Şekil 3.19. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$, $\beta =45^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Eksenel gerilme, [19]).	29
Şekil 3.20. $a/c=1$, $a/D=0.05$, $\beta =45^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Eksenel gerilme, [19]).	30
Şekil 3.21. $a/c=1$, $a/D=0.1$, $\beta =45^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Eksenel gerilme, [19]).	30
Şekil 3.22. $a/c=0.75$, $a/D=0.05$, $\beta =22.5^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Burulma yükü, [21]).	31
Şekil 3.23. $a/D=0.05$, $\beta =45^\circ$ değişik çatlak şekil oranları için boyutsuz K_I sonuçlarının kıyaslanması (Burulma yükü, [17]).	31
Şekil 3.24. $a/c=2$, $a/D=0.05$, $\beta =0^\circ$ için boyutsuz K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Burulma yükü, [18]).	32
Şekil 3.25. $a/c=2$, $a/D=0.1$, $\beta =0^\circ$ için boyutsuz K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Burulma yükü, [18]).	32
Şekil 3.26. $a/c=1$, $a/D=0.1$, $\alpha =75^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlağına sahip bir katı silindirin global sonlu elemanlar modeli, eksenel gerilme yüklemesi ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.	34
Şekil 3.27. Eksenel gerilme yükü altında yatay düzlem ile 0° açı yapan yüzey çatlağının açılma durumu.	34
Şekil 3.28. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	36
Şekil 3.29. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	36
Şekil 3.30. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	37
Şekil 3.31. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	37
Şekil 3.32. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	38
Şekil 3.33. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	38
Şekil 3.34. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	39
Şekil 3.35. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	39
Şekil 3.36. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	40
Şekil 3.37. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	40
Şekil 3.38. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	41
Şekil 3.39. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	41
Şekil 3.40. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	42
Şekil 3.41. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	42

Şekil 3.42. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	43
Şekil 3.43. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	43
Şekil 3.44. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	44
Şekil 3.45. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	44
Şekil 3.46. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	45
Şekil 3.47. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	45
Şekil 3.48. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	46
Şekil 3.49. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	46
Şekil 3.50. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	47
Şekil 3.51. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	47
Şekil 3.52. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	48
Şekil 3.53. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	48
Şekil 3.54. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	49
Şekil 3.55. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	49
Şekil 3.56. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	50
Şekil 3.57. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	50
Şekil 3.58. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	51
Şekil 3.59. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	51
Şekil 3.60. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	52
Şekil 3.61. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	52
Şekil 3.62. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	53
Şekil 3.63. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	53
Şekil 3.64. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	54
Şekil 3.65. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	54
Şekil 3.66. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	55

Şekil 3.67. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	55
Şekil 3.68. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	56
Şekil 3.69. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	56
Şekil 3.70. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	57
Şekil 3.71. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	57
Şekil 3.72. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	58
Şekil 3.73. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	58
Şekil 3.74. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	59
Şekil 3.75. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	59
Şekil 3.76. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	60
Şekil 3.77. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	60
Şekil 3.78. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	61
Şekil 3.79. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	61
Şekil 3.80. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	62
Şekil 3.81. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	62
Şekil 3.82. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	63
Şekil 3.83. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	63
Şekil 3.84. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	64
Şekil 3.85. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	64
Şekil 3.86. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	65
Şekil 3.87. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).	65
Şekil 3.88. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	66
Şekil 3.89. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	66
Şekil 3.90. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	67
Şekil 3.91. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).	67

Şekil 3.92. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).....	68
Şekil 3.93. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).....	68
Şekil 3.94. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	69
Şekil 3.95. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).	69
Şekil 3.96. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).....	70
Şekil 3.97. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).....	70
Şekil 3.98. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).....	71
Şekil 3.99. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).....	71
Şekil 3.100. $a/c=1$, $a/D=0.05$, $\alpha =15^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlağına sahip katı bir silindirin global sonlu elemanlar modeli, eğilme gerilme yüklemesi ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.....	73
Şekil 3.101. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ ve 30 derece dönmüş çatlak içeren katı silindire uygulanan eğilme yükü sonrasında meydana gelen deformasyon ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.	74
Şekil 3.102. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	75
Şekil 3.103. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	75
Şekil 3.104. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	76
Şekil 3.105. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	76
Şekil 3.106. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	77
Şekil 3.107. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	77
Şekil 3.108. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	78
Şekil 3.109. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	78
Şekil 3.110. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	79
Şekil 3.111. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	79
Şekil 3.112. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	80
Şekil 3.113. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	80
Şekil 3.114. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	81
Şekil 3.115. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	81

Şekil 3.116. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	82
Şekil 3.117. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	82
Şekil 3.118. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	83
Şekil 3.119. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	83
Şekil 3.120. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	84
Şekil 3.121. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	84
Şekil 3.122. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	85
Şekil 3.123. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	85
Şekil 3.124. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	86
Şekil 3.125. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	86
Şekil 3.126. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	87
Şekil 3.127. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	87
Şekil 3.128. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	88
Şekil 3.129. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	88
Şekil 3.130. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	89
Şekil 3.131. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	89
Şekil 3.132. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	90
Şekil 3.133. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	90
Şekil 3.134. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	91
Şekil 3.135. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	91
Şekil 3.136. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	92
Şekil 3.137. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	92
Şekil 3.138. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	93
Şekil 3.139. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	93
Şekil 3.140. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	94

Şekil 3.141. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	94
Şekil 3.142. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	95
Şekil 3.143. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	95
Şekil 3.144. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	96
Şekil 3.145. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	96
Şekil 3.146. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	97
Şekil 3.147. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	97
Şekil 3.148. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	98
Şekil 3.149. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	98
Şekil 3.150. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	99
Şekil 3.151. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	99
Şekil 3.152. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	100
Şekil 3.153. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	100
Şekil 3.154. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	101
Şekil 3.155. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	101
Şekil 3.156. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	102
Şekil 3.157. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	102
Şekil 3.158. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	103
Şekil 3.159. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	103
Şekil 3.160. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	104
Şekil 3.161. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).....	104
Şekil 3.162. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).	105
Şekil 3.163. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).	105
Şekil 3.164. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).	106
Şekil 3.165. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).	106

Şekil 3.166. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).	107
Şekil 3.167. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).	107
Şekil 3.168. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).	108
Şekil 3.169. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).	108
Şekil 3.170. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).	109
Şekil 3.171. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).	109
Şekil 3.172. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).	110
Şekil 3.173. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).	110
Şekil 3.174. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$, $\alpha =15^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlağına sahip katı silindirin global sonlu elemanlar modeli, burulma yükü için kuvvet dağılımlarının ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.	112
Şekil 3.175. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$, $\alpha =45^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlağına sahip katı silindirin global sonlu elemanlar modeli ve kuvvet dağılımlarının perspektif görünümü.....	112
Şekil 3.176. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$, $\alpha =45^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlağına sahip katı silindirin çatlak bölgesinin yakından görünümü.	113
Şekil 3.177. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$, $\alpha =30$ derece dönmüş çatlağa sahip katı silindire uygulanan burulma yükü sonucu oluşan deformasyon ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.....	114
Şekil 3.178. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$, $\alpha =30$ derece dönmüş çatlağa sahip katı silindire uygulanan burulma yükü sonucu sağ bölgedeki çatlak kapanması ve sol bölgedeki çatlak açılması durumu.....	115
Şekil 3.179. Çatlak tam kapanma durumu ve çatlak tam açılma durumu.....	115
Şekil 3.180. $a/c=2$, $a/D=0.25$, $\alpha =60$ derece dönmüş çatlağa sahip katı silindire uygulanan burulma yükü sonucu oluşan deformasyon ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.	115
Şekil 3.181. Çatlak çizgilerinin açılma durumu ve çatlak çizgilerinin iç içe geçme durumu.....	116
Şekil 3.182. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	116
Şekil 3.183. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	117
Şekil 3.184. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	117
Şekil 3.185. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	118
Şekil 3.186. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	118
Şekil 3.187. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	119
Şekil 3.188. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	119

Şekil 3.189. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	120
Şekil 3.190. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	120
Şekil 3.191. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	121
Şekil 3.192. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	121
Şekil 3.193. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	122
Şekil 3.194. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	122
Şekil 3.195. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	123
Şekil 3.196. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	123
Şekil 3.197. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	124
Şekil 3.198. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	124
Şekil 3.199. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	125
Şekil 3.200. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	125
Şekil 3.201. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	126
Şekil 3.202. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	126
Şekil 3.203. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	127
Şekil 3.204. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	127
Şekil 3.205. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	128
Şekil 3.206. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	128
Şekil 3.207. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	129
Şekil 3.208. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	129
Şekil 3.209. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	130
Şekil 3.210. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	130
Şekil 3.211. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	131
Şekil 3.212. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	131
Şekil 3.213. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	132

Şekil 3.214. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	132
Şekil 3.215. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	133
Şekil 3.216. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	133
Şekil 3.217. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	134
Şekil 3.218. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	134
Şekil 3.219. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	135
Şekil 3.220. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	135
Şekil 3.221. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	136
Şekil 3.222. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	136
Şekil 3.223. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	137
Şekil 3.224. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	137
Şekil 3.225. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	138
Şekil 3.226. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	138
Şekil 3.227. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	139
Şekil 3.228. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	139
Şekil 3.229. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	140
Şekil 3.230. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	140
Şekil 3.231. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	141
Şekil 3.232. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	141
Şekil 3.233. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	142
Şekil 3.234. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	142
Şekil 3.235. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	143
Şekil 3.236. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	143
Şekil 3.237. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	144
Şekil 3.238. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	144

Şekil 3.239. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	145
Şekil 3.240. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	145
Şekil 3.241. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	146
Şekil 3.242. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	146
Şekil 3.243. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	147
Şekil 3.244. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	147
Şekil 3.245. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	148
Şekil 3.246. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	148
Şekil 3.247. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	149
Şekil 3.248. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	149
Şekil 3.249. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).	150
Şekil 3.250. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	150
Şekil 3.251. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).	151
Şekil 3.252. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	151
Şekil 3.253. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).	152
Şekil 3.254. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).	154
Şekil 3.255. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).	154
Şekil 3.256. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).	155
Şekil 3.257. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).	155
Şekil 3.258. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).	156
Şekil 3.259. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).	156
Şekil 3.260. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).	157
Şekil 3.261. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).	157
Şekil 3.262. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).	158
Şekil 3.263. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).	158

Şekil 3.264. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).	159
Şekil 3.265. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).	159
Şekil 3.266. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).	160
Şekil 3.267. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).	160
Şekil 3.268. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).	161
Şekil 3.269. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).	161
Şekil 3.270. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).	162
Şekil 3.271. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).	162
Şekil 3.272. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).	163
Şekil 3.273. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).	163
Şekil 3.274. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).	164
Şekil 3.275. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).	164
Şekil 3.276. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).	165
Şekil 3.277. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).	165
Şekil 3.278. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).	166
Şekil 3.279. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).	166
Şekil 3.280. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).	167
Şekil 3.281. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).	167
Şekil 3.282. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).	168
Şekil 3.283. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).	168
Şekil 3.284. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).	169
Şekil 3.285. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).	169
Şekil 3.286. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).	170
Şekil 3.287. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).	170

Şekil 3.288. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).	171
Şekil 3.289. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).	171
Şekil 3.290. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).	173
Şekil 3.291. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).	173
Şekil 3.292. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).	174
Şekil 3.293. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).	174
Şekil 3.294. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).	175
Şekil 3.295. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).	175
Şekil 3.296. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).	176
Şekil 3.297. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).	176
Şekil 3.298. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).	177
Şekil 3.299. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).	177
Şekil 3.300. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).	178
Şekil 3.301. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).	178
Şekil 3.302. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).	179
Şekil 3.303. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).	179
Şekil 3.304. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).	180
Şekil 3.305. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).	180
Şekil 3.306. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).	181
Şekil 3.307. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).	181
Şekil 3.308. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).	182
Şekil 3.309. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).	182
Şekil 3.310. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).	183
Şekil 3.311. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).	183

Şekil 3.312. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).	184
Şekil 3.313. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).	184
Şekil 3.314. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).	185
Şekil 3.315. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).	185
Şekil 3.316. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).	186
Şekil 3.317. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).	186
Şekil 3.318. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).	187
Şekil 3.319. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).	187
Şekil 3.320. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).	188
Şekil 3.321. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).	188
Şekil 3.322. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).	189
Şekil 3.323. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).	189
Şekil 3.324. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).	190
Şekil 3.325. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).	190
Şekil 3.326. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).	191
Şekil 3.327. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).	191
Şekil 3.328. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).	192
Şekil 3.329. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).	192
Şekil 3.330. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).	193
Şekil 3.331. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).	193
Şekil 3.332. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).	194
Şekil 3.333. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).	194
Şekil 3.334. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).	195
Şekil 4.1. $a/c=0.5$, $\alpha=15^\circ$ (solda), $a/c=1$, $\alpha=0^\circ$ (sağda) için eksenel gerilme yükü altında meydana gelen yapısal deformasyonlar.....	198
Şekil 4.2. Denklem takımlarını oluşturmak için kullanılan veri grupları.	198

Şekil 4.3. Veri noktalarının oluşturulan eğriye ve ortalama değere olan uzaklıkları.	199
Şekil 4.4. Minitab yazılımında regresyon analizi bölümünün açılması.	201
Şekil 4.5. Minitab yazılımında regresyon analizi aşamaları.	201
Şekil 4.6. Çatlak önü serbest yüzey bölgelerinin ağ yapıları.	203
Şekil 4.7. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	204
Şekil 4.8. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	204
Şekil 4.9. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	205
Şekil 4.10. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5- 2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	205
Şekil 4.11. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{III} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	206
Şekil 4.12. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{III} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	206
Şekil 4.13. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	211
Şekil 4.14. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	211
Şekil 4.15. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	212
Şekil 4.16. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	212
Şekil 4.17. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{III} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	213
Şekil 4.18. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{III} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	213
Şekil 4.19. Sonlu öğeler ağ modeli üzerinde çatlak önü derinlik noktasının görünümü.	218
Şekil 4.20. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için	

(s=0.5) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	219
Şekil 4.21. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için (s=0.5) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	219
Şekil 4.22. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için (s=0.5) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	220
Şekil 4.23. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için (s=0.5) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	222
Şekil 4.24. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için (s=0.5) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	223
Şekil 4.25. Eğilme yükü altında silindirde bulunan dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için (s=0.5) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.	223
Şekil 4.26. $a/c=0.3$, $a/D=0.2$, $\alpha=35^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	226
Şekil 4.27. $a/c=0.3$, $a/D=0.4$, $\alpha=70^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	226
Şekil 4.28. $a/c=0.4$, $a/D=0.15$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	227
Şekil 4.29. $a/c=0.4$, $a/D=0.15$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	227
Şekil 4.30. $a/c=0.4$, $a/D=0.15$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	228
Şekil 4.31. $a/c=0.7$, $a/D=0.32$, $\alpha=27^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	228
Şekil 4.32. $a/c=0.8$, $a/D=0.08$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	229
Şekil 4.33. $a/c=0.8$, $a/D=0.08$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	229
Şekil 4.34. $a/c=0.8$, $a/D=0.08$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	230
Şekil 4.35. $a/c=0.8$, $a/D=0.4$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	230
Şekil 4.36. $a/c=0.8$, $a/D=0.4$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	231
Şekil 4.37. $a/c=0.8$, $a/D=0.4$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	231
Şekil 4.38. $a/c=1.2$, $a/D=0.14$, $\alpha=55^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	232
Şekil 4.39. $a/c=1.4$, $a/D=0.24$, $\alpha=20^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	232
Şekil 4.40. $a/c=1.4$, $a/D=0.48$, $\alpha=26^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).	233

Şekil 4.41. $a/c=1.5$, $a/D=0.15$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).....	233
Şekil 4.42. $a/c=1.5$, $a/D=0.15$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).....	234
Şekil 4.43. $a/c=1.5$, $a/D=0.15$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).....	234
Şekil 4.44. $a/c=1.7$, $a/D=0.35$, $\alpha=24^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).....	235
Şekil 4.45. $a/c=1.8$, $a/D=0.25$, $\alpha=32^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).....	235
Şekil 4.46. $a/c=0.3$, $a/D=0.18$, $\alpha=18^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	236
Şekil 4.47. $a/c=0.3$, $a/D=0.3$, $\alpha=40^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	236
Şekil 4.48. $a/c=0.35$, $a/D=0.16$, $\alpha=55^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	237
Şekil 4.49. $a/c=0.4$, $a/D=0.4$, $\alpha=12^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	237
Şekil 4.50. $a/c=0.45$, $a/D=0.36$, $\alpha=70^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	238
Şekil 4.51. $a/c=0.6$, $a/D=0.07$, $\alpha=58^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	238
Şekil 4.52. $a/c=0.6$, $a/D=0.2$, $\alpha=24^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	239
Şekil 4.53. $a/c=0.7$, $a/D=0.32$, $\alpha=27^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	239
Şekil 4.54. $a/c=0.8$, $a/D=0.15$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	240
Şekil 4.55. $a/c=0.8$, $a/D=0.15$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	240
Şekil 4.56. $a/c=0.8$, $a/D=0.15$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	241
Şekil 4.57. $a/c=0.9$, $a/D=0.42$, $\alpha=14^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	241
Şekil 4.58. $a/c=1.2$, $a/D=0.07$, $\alpha=10^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	242
Şekil 4.59. $a/c=1.3$, $a/D=0.44$, $\alpha=35^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	242
Şekil 4.60. $a/c=1.4$, $a/D=0.25$, $\alpha=36^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	243
Şekil 4.61. $a/c=1.5$, $a/D=0.08$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	243
Şekil 4.62. $a/c=1.5$, $a/D=0.08$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	244
Şekil 4.63. $a/c=1.5$, $a/D=0.08$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	244
Şekil 4.64. $a/c=1.5$, $a/D=0.3$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).....	245

Şekil 4.65. $a/c=1.6$, $a/D=0.35$, $\alpha=66^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).	245
Şekil 5.1. ANSYS Mechanical APDL (Parametrik Tasarım Dili) kullanıcı arayüzü.....	247
Şekil 5.2. Makroların görülebildiği komutlar.	247
Şekil 5.3. Derinlik, uzunluk, tüp kesiti, ölçek ve daire çizgilerinin belirlendiği noktaların tanımı.	248
Şekil 5.4. Çatlak elipsi için daire çizgilerinin tanımlanması.....	248
Şekil 5.5. Dairesel çizgileri elipse dönüştürme ve elipsleri çoğaltmak için çizgilerin tanımı.....	249
Şekil 5.6. Elipsin çizgilerinin kesişiminden alan tanımları.....	249
Şekil 5.7. Çatlak disk hacminin oluşturulması.....	250
Şekil 5.8. Eksenel gerilme ve burulma yükü için modellemenin ilk adımları.	250
Şekil 5.9. Eğilme yükü için modellemenin ilk adımları.	251
Şekil 5.10. Silindir orta hacim yüzey alanlarının kopyalanması ve kopyalanan alanların silindirin dışındaki çatlak hacmini kesmesini sağlaması.....	251
Şekil 5.11. Silindirin dışında kalan çatlak hacimlerini temizleme işlemi.	252
Şekil 5.12. Silindir içine yerleştirilen çatlak hacimlerini boşaltma işlemi.....	252
Şekil 5.13. Çatlağın başlayacağı noktalar haricindeki noktaları tek noktaya birleştirme işlemi.	253
Şekil 5.14. Analiz sonuçlarına önemli etkisi bulunan kesize ve lesize değerlerinin girilmesi.....	253
Şekil 5.15. Çatlak tünel hacmini oluşturmak için ağ oluşturulan alan.....	254
Şekil 5.16. Çatlak tünel hacminin oluşturulması.	254
Şekil 5.17. Tünel hacmi ile önündeki hacim arasında kullanılan piramit elemanların kapatılması.	255
Şekil 5.18. Tünel hacminin önündeki hacimlere ağ oluşturma işlemi.	255
Şekil 5.19. Çatlağın yerleştirildiği orta kısımda yer alan hacime ağ oluşturma işlemi.	256
Şekil 5.20. Ağ oluşturma işlemlerinin tamamlanması.	256
Şekil 5.21. Eksenel gerilme yükünün tanımlanması.	256
Şekil 5.22. Eğilme yükü için silindirin tüm hacim kısımlarına ağ oluşturma işlemi.	257
Şekil 5.23. Eğilme yükünde ağ oluşturma işleminin bitirilmesi ve doğrusal yayılı basınç yükü komutları.	257
Şekil 5.24. Eksenel gerilme yükü altında rijit cisim hareketini kısıtlamak için kullanılan komutlar.	258
Şekil 5.25. Çatlak ucu çizgilerinin tanımlanması.	258
Şekil 5.26. Çatlak çizgisi önündeki hacimlerin seçimi.	258
Şekil 5.27. Burulma yükü için rijit cisim hareketinin kısıtlanması, kuvvet tanımının yapılacağı düğümlerin seçimi.....	259
Şekil 5.28. Burulma yükü için düğümlerden kuvvet tanımlanması.	259

EKSENEL GERİLME, EĞİLME VE BURULMA YÜKLERİNE MARUZ KATI SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ

ÖZET

Mekanik tasarımı yapılan makine ve yapısal parçalarda imalat hataları nedeniyle başlangıç kusur veya çatlakları ve/veya yorulma yükleri altında çatlak başlangıcı ve ilerlemesi meydana gelebilmektedir. Bu parçaların güvenli bir şekilde işlevlerini sürdürebilmeleri için mukavemet ve kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak emniyet ve ömür hesaplarının yapılması gerekmektedir. Dairesel kesite sahip çubuk, kiriş ve miller de, pratikte oldukça yaygın olarak kullanılan mekanik parçalardandır. Dolayısıyla, bu tür yüklere maruz silindirik parçalarda oluşabilecek bir başlangıç yüzey çatlağının kırılma analizlerinin gerçekleştirilebilmesi, emniyet ve ömür değerlendirmelerinin yapılabilmesi oldukça önemlidir.

Sonlu elemanlar yöntemi, özellikle bu çalışmada analitik çözüm elde etmenin zor olduğu yapısal mekanik problemlerine kesin çözümler sunmak için kullanılmıştır. Karmaşık sınır koşullarına sahip diferansiyel denklemleri çözebilmek için problemin olduğu bölge bir dizi küçük alt ögelere ve düğümlere bölünmektedir. Bu bağlamda gerekli katı silindir modellemeleri, ANSYS Mechanical APDL arayüzünde gerçekleştirilirken daha ince sonlu eleman ağ yapısı elde edebilmek için silindirler kısımlara bölünmüştür. Zenginleştirilmiş sonlu eleman çözücüsü FRAC3D'yi barındıran FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System) yazılımına, gerekli sonlu eleman (öge) modeli bilgileri aktarılarak kırılma analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda gerilme şiddet faktörü değerleri boyutsuz duruma getirilerek grafiklerde sunulmuştur. Çatlak derinliği/silindir çapı (a/D), çatlak derinliği/çatlak genişliği (a/c), dönmüş yüzey çatlağının yatay eksenle konumlandırıldığı açı (α) gibi parametrelerdeki değişimlerin gerilme şiddet faktörleri üzerine etkileri açıklanmıştır.

Katı silindirlerin alt ve üst yüzeylerine doğrusal yayılı basınç yükü tanımlanarak eksenel üniform gerilme yükü oluşturulmuştur. Silindir merkezinde sıfır olmak koşuluyla doğrusal yayılı eğimli basınç yükü tanımlanarak da eğilme momenti oluşturulmuştur. Her iki yük türünde yatay eksenle açının sıfır olduğu yüzey çatlağı problemlerinde sadece açılma modunu oluşturan boyutsuz K_I değerleri hesaplanmaktadır. Dönmüş çatlak problemlerinde yatay eksenle açının sıfırdan farklı olduğu durumlarda açılma moduna ek olarak kayma ve yırtılma modları da aktif olmaktadır. Kayma modu için hesaplanan boyutsuz K_{II} değerleri genellikle negatiftir. Yırtılma modu için derinlik noktasına göre grafiklerde genellikle bir bölge pozitif ve bir bölge negatiftir.

Katı silindirlerin alt ve üst dairesele alanını çevreleyen çizgilerinde bulunan düğüm noktalarından kuvvet tanımı yapılarak burulma momenti oluşturulmuştur. Yüzey çatlağının yatay eksenle sıfır derece açılı olduğu durumlarda açılma modu oluşmazken kayma ve yırtılma modları aktif olmaktadır. Yatay eksenle açının sıfırdan farklı olduğu durumlarda açılma modu da aktif hale gelmektedir. Açılma modu sonuçlarında, temas

mekaniği modellemesi yapılmadığı için çatlak önü boyunca bazı bölgelerde negatif değerler hesaplanmıştır. Problemin fiziğini daha net gözlemleyebilmek adına ANSYS yazılımında yapısal analizler yapılmıştır ve sonuçlar kontur resimler şeklinde paylaşılmıştır. Negatif değerler olarak hesaplanan bölgelerde çatlak yüzeyleri kapanması olduğu görülmüştür.

Elde edilen çözümlerin pratikte kullanılabilmesi amacıyla, karışık mod gerilme şiddet faktörü çözümlerindeki derinlik ve serbest yüzey noktaları için, ilgili parametrelerin tanımlanan aralıklarında geçerli olan empirik denklemler oluşturulmuştur. Empirik denklemler, Minitab yazılımı yardımıyla geliştirilmiştir. Eksenel gerilme ve eğilme yükleri için elde edilen serbest yüzey ve derinlik noktalarındaki boyutsuz gerilme şiddet faktörü değerleri kullanılarak denklem oluşturma işlemleri tamamlanmıştır. Burulma yükü için açılma modu durumlarında temas mekaniği modellenmediğinden dolayı denklem oluşturulmamıştır.

Son olarak analiz kütüphanesinde yer almayan ve problemi tanımlayan parametrelerin ara değerlerini içeren birçok farklı problem için empirik denklemlerin doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Derinlik bölgesinde hesaplanan boyutsuz K_I ve K_{II} değerleri ile empirik denklem sonuçlarının oldukça tutarlı olduğu görülmüştür. Serbest yüzey bölgesinde boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonuçlarının oldukça tutarlı olduğu, boyutsuz K_{II} ve K_{III} değerlerinde ise empirik denklemler tarafından yaklaşık değer tahmininin yapılamayacağı tespit edilmiştir.

MIXED MODE FRACTURE ANALYSES OF DEFLECTED SURFACE CRACKS IN SOLID CYLINDRICAL STRUCTURES UNDER TENSION, BENDING AND TORSION LOADS

SUMMARY

Initial defects or cracks and/or crack initiation and propagation under fatigue loads may occur in mechanically designed machine and structural parts due to manufacturing defects. Fracture occurs as a result of damage to a certain part of the structure. Fracture occurs in two parts as crack formation and crack propagation. Ductile fracture and brittle fracture occur in materials. While plastic deformation consists a remarkable amount in ductile fracture, sudden breaking is formed in brittle fracture without high deformation. In order for structural parts to maintain its function safely, safety and life calculations need to be done using the principles of strength of materials and fracture mechanics. Bars, beams and shafts with circular cross-section are also quite widely used mechanical parts in practice. Therefore, it is fairly important to perform fracture analysis of an initial surface crack that may occur in cylindrical parts subjected to such loads, and to make safety and life evaluations.

The finite element method is used to present numerical solutions to structural mechanics, heat transfer, electromagnetic and computational fluid dynamics problems. Because engineering problems involve mathematical models of their physical states, most of them have differential equations with boundary and/or initial conditions. Practical engineering problems for which exact solutions are difficult to obtain consist of differential equations to have complex boundary or initial conditions. One of the ways to be able to solve these equations goes through the implementation the numerical methods called the finite element method. On the contrary to analytical solutions, numerical solutions converge to exact solutions at nodes. The region of the problem is divided into a series of small sub-items and nodes.

ANSYS Parametric Design Language (APDL) is one of the most powerful features of ANSYS. It ensures to be able to define a part or all of the model (geometry, material properties, loads, boundary conditions, etc.) parametrically. It's pretty easy to create and solve a new variable of a parametric model, by changing a few parameter values, and rerun the model. This makes ANSYS a powerful tool for engineering analysis, optimization, root cause analysis, and design of new systems and technologies. APDL also allows to build and execute macros, run macros as ANSYS commands, operate on parameter arrays, and do simple logic.

FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System) software makes calculation of the stress intensity factor in geometric structures containing two and three dimensional cracks. There is no modelling interface in FCPAS software. The information in the finite element model is element, node, load and boundary conditions. The necessary finite element model information was transferred to the FCPAS software, which contains the enriched finite element solver FRAC3D, and fracture analyses were performed. Among the parameters needing attention is the number of elements, the number of nodes and the processing power of the computer.

While the solid cylinder modellings are carried out in the ANSYS Mechanical APDL interface, the cylinders are divided into sections in order to be able to obtain finer finite element mesh structure. As a result of the analyses, the stress intensity factor values are presented in graphs as non-dimensional distributions. The effects of variations in parameters such as crack depth/cylinder diameter (a/D), crack depth/crack width (a/c), the angle (α) at which the deflected surface crack is positioned with respect to the horizontal axis, on stress intensity factors were explained.

The uniform axial tensile load was created by defining constant distributed pressure load on the lower and upper surfaces of the solid cylinders. The bending moment was created by defining the linear surface load gradient, provided that it is zero at the center of the cylinder. In surface crack problems where the angle with respect to the horizontal axis is zero in both load types, only the dimensionless K_I values that constitute the opening mode are calculated. In deflected crack problems, in cases where the angle with respect to the horizontal axis is different from zero, in addition to the opening mode, the sliding (in plane shear) and tearing (out of plane shear) modes also become active. The dimensionless K_I values obtained for the tensile load increase as the diameter decreases (the depth of the dimensionless crack increases) and decreases as the angle of deflection between the crack and the horizontal axis increases. The dimensionless K_{II} values calculated for the sliding (in plane shear) mode are usually negative. In the sliding (in plane shear) mode analysis, the highest dimensionless K_{II} values are in the plane with the maximum shear stress for tensile and bending loads. For the tensile load, the dimensionless K_{II} values are close to each other at angles that usually complement each other to 90 degrees (15° - 75° and 30° - 60°). In graphs with respect to the depth point for tearing (out of plane shear) mode, usually one region is positive and one region is negative.

The torsional moment was created by defining the force from the nodal points on the lines surrounding the lower and upper circular area of the solid cylinders. In cases where the surface crack is angled at zero degree with respect to the horizontal axis, while the opening mode does not occur, the sliding (in plane shear) and tearing (out of plane shear) modes are active. In cases, where the angle with respect to the horizontal axis is different from zero, the opening mode is also activated. As expected, the dimensionless K_I values at the depth point are zero. The distributions seen in the positive regions in the graphs represent the opening of the crack, and the distributions in the negative regions represent the closure of the crack. Since the contact mechanics is not modeled in FCPAS analyses, the values given in the graphs do not represent the real physical conditions. In order to observe the physics of the problem more clearly, structural analyses were made in ANSYS software and the results were shared as contour pictures. It has been seen that closure of crack surfaces occurred in the regions with negative K_I values. It is also seen that the dimensionless K_I distributions obtained for the torsional load are similar to the dimensionless K_{III} distributions obtained for the tensile and bending loads.

In order for the obtained solutions to be used in practice, mixed mode stress intensity factor empirical equations of the depth and free surface points, which are valid in the defined ranges of the relevant parameters, are also generated. Different sets of equations have been developed for the crack aspect ratios between 0.25 and 2.0 in order to increase the accuracy levels of the empirical equations. Empirical equations were developed with the help of Minitab software. While making the equation solution, insignificant coefficients were eliminated in order to make a more practical solution instead of developing solutions with too many coefficients. By looking at the

T-values of the coefficients and generally containing a large number of terms, the coefficients were included in the scope of elimination. Equation creation processes were completed by using the dimensionless stress intensity factor values at the free surface and depth points obtained for tension and bending loads. Because the contact mechanics is not modelled in the opening mode cases for the torsional load, the equations were not created for the torsional load cases.

Finally, validation studies of empirical equations have been carried out for many different problems that are not included in the analysis library, by including many different combinations of intermediate values of the parameters defining the problem. It has been observed that the dimensionless K_I and K_{II} values calculated in the depth region and the empirical equation results are quite consistent. It has been also detected that the results of the empirical equations with the dimensionless K_I values in the free surface region are also quite consistent, while for the dimensionless K_{II} and K_{III} values, the approximate value predictions cannot be done by empirical equations with as much accuracy as the above cases.





1. GİRİŞ

1.1. Kırılma Mekaniki ve Tarihçesi

Kırılma, sabit ve tekrarlı yükler altında makina parçaları, mimari yapılar ve kişisel eşyalarda meydana gelen malzeme bütünlüğü bozulması olarak tanımlanabilir. Uygulanan bir gerilme altında oluşan kırılma olayı, çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi olarak iki safhada gerçekleşir. Malzemelerde sünek kırılma ve gevrek kırılma meydana gelmektedir. Sünek kırılmada kayda değer miktarda plastik deformasyon oluşurken, gevrek kırılmada yüksek deformasyon oluşmadan ani kırılma oluşur.

Griffith 1920’de yayınlanan çalışmasında Inglis’in 1913 yılında gerçekleştirdiği eliptik bir deliğin gerilme analizini bir çatlağın kararsız ilerlemesine uygulamıştır. Basit bir enerji dengesine dayalı bir kırılma teorisi oluşturarak çatlak büyümesinin artışından kaynaklanan gerinim enerjisi değişiminin malzemenin yüzey enerjisinin üstesinden gelmesi için yeterli olması durumunu ispatlamıştır. Özellikle cam numunelerin dayanıklılığı ve kusur boyutunu arasındaki ilişkiyi tahmin eden Griffith’in modeli metaller için beklentileri karşılayamamış olup yalnızca gevrek katılar için geçerlidir [1].

Bir mühendislik disiplini olarak ele alınan kırılma mekaniki alanı, en önemli gelişmelerini ikinci dünya savaşı sonrasında yaşamıştır. Savaş sırasında ABD’den İngiltere’ye malzeme göndermek için “Liberty Ship” adı verilen özgürlük gemilerini üreten Amerikan donanması beklenmedik durumlarla karşılaşmıştı. Hiçbir belirti göstermeden ortadan ikiye ayrılarak batan bu gemiler daha sonra Irwin’in yapacağı kırılma mekaniki çalışmalarına ilham kaynağı olmuştur. İkinci dünya savaşı sırasında özgürlük gemilerinde yaşanan hadiselerin ardından Deniz Araştırma Laboratuvarı’nda Dr. George Rankine Irwin tarafından Griffith yaklaşımı metallere uygulanmak üzere bir araştırma grubu kuruldu. 1956 yılında Irwin, Griffith teorisinden türettiği ve 1938 yılında Westergaard tarafından geliştirilen keskin bir çatlağın önündeki gerilmeleri ve yer değiştirmeleri analiz eden yarı ters bir yaklaşımı kullanarak oluşturduğu enerji salınım oranı kavramını geliştirmiştir. Bu kavram çatlak ucu yakınındaki gerilmelerin

ve yer deşiştirmelerin, enerji salınım hızıyla ilgili tek bir sabitle tanımlandığını göstermektedir. Bu sabit parametre “Gerilme Şiddet Faktörü” olarak adlandırılmıştır [1].

1960’larda araştırmacıların dikkatlerini çatlak ucu plastisitesine çevirmesi ile doğrusal olmayan elastik kırılma mekaniğinin temelleri oluşturulmuştur. Irwin ve Wells çatlak ucundaki akmayı düzeltmek için analizler geliştirmişlerdir. Wells doğrusal elastik kırılma mekaniğini düşük ve orta dayanımlı yapısal çeliklere uygulamaya çalışmıştır. Bu malzemeler yumuşak olduğu için Wells, çatlak yüzlerinin plastik deformasyonla birbirinden ayrıldığını farkederek çatlak ucu açma yer deşiştirmesi adı verilen parametrenin geliştirilmesini sağladı. 1968’de Rice, doğrusal olmayan malzeme davranışını inceleyerek enerji salınım oranını J integrali adını verdiği bir çizgi integrali parametresiyle açıklamıştır. 1970’lerin başında ABD’deki nükleer enerji endüstrisi santrallerin tasarımı ve inşasında kullanılan basınçlı kap çeliğinin kırılma tokluğunu J integrali parametresiyle belirleyerek kırılma mekaniği teknolojisinden faydalanmıştır. İngiltere’de Wells’in çatlak ucu yer deşiştirme parametresi 1960’ların sonlarından itibaren kaynaklı yapıların kırılma analizleri için kullanılmıştır. Dinamik kırılma mekaniğinin teorik temellerinin çoğu 1980’e kadar atılmıştır [1].

1980’den itibaren bir mühendislik disiplini olarak gelişen kırılma mekaniği, bilgisayar teknolojisinin ilerlemeye başlamasıyla birlikte yapısal parçaların üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesiyle ve analizleriyle uygulanmaktadır.

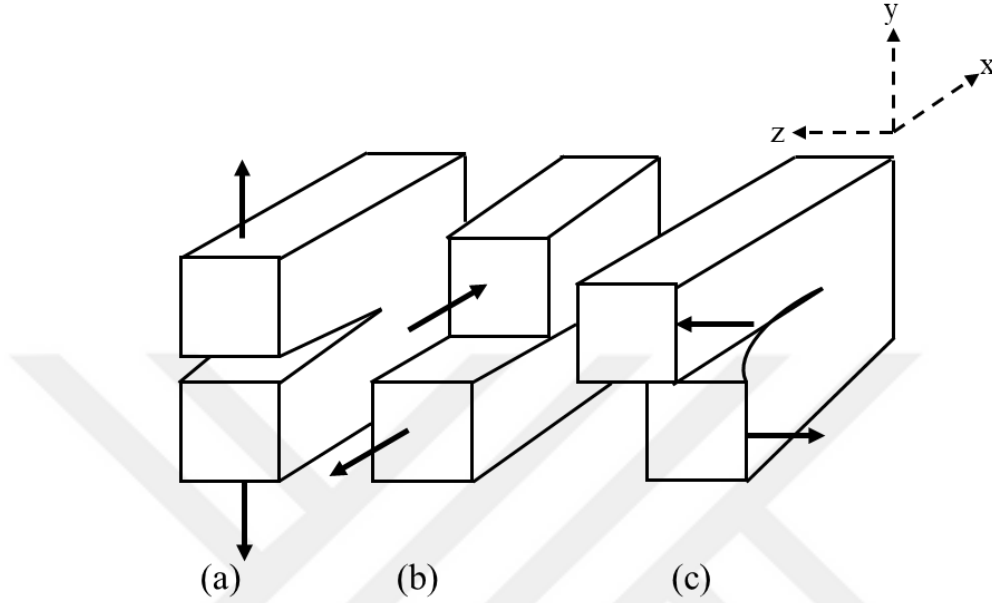
1.2. Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniğinin alt bir dalı olan doğrusal elastik kırılma mekaniğinde en yüksek gerilmeler çatlak ucu ve çevresinde görölmektedir. Gerilmeleri sayısal olarak ifade etmek için “Gerilme Şiddet Faktörü” parametresi kullanılır ve K sembolü ile gösterilir. Çatlak ucundaki K değerı, kırılma tokluğu olarak simgelenen kritik K_c değerine ulaştığında kararsız çatlak ilerlemesi gerçekteşir. K_c malzemenin gevrek kırılmaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür.

1.2.1. Kırılma modları

Gerilme şiddet faktörü (K) parametresinin, çatlak ucundaki deformasyon türlerini temsil eden üç farklı modu vardır. Açılma modu K_I , kayma modu K_{II} ve yırtılma modu K_{III} durumları Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Açılma modu için çatlak yüzeylerinde x-

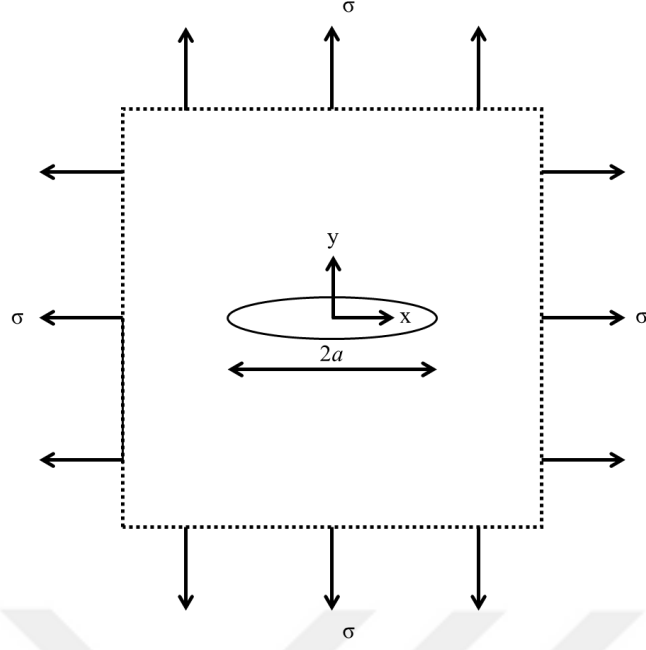
z düzlemine göre simetrik ve dik yönde deformasyon, düzlem içi kayma modu için çatlak yüzeylerinin karşılıklı x yönünde ters deformasyonu, düzlem dışı kayma ve yırtılma modunda ise çatlak yüzeylerinin karşılıklı z yönünde ters deformasyonu oluşmaktadır [1].



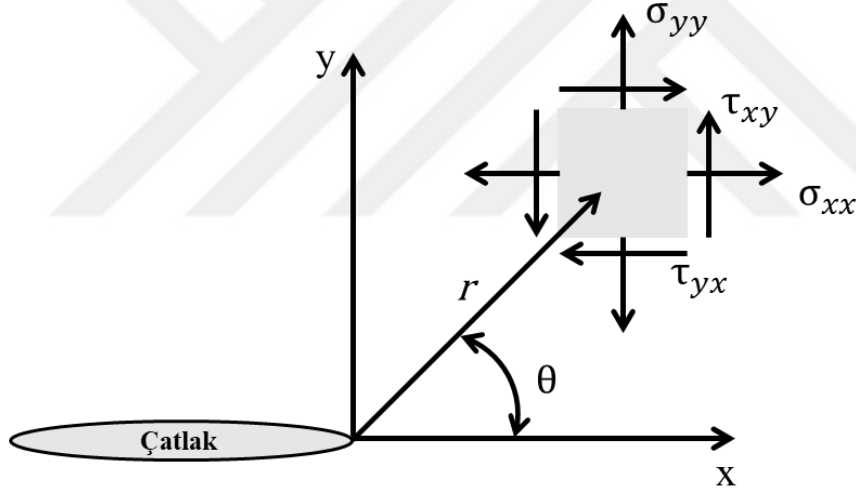
Şekil 1.1. Çatlak deformasyon modları, (a) açılma, (b) düzlem içi kayma ve (c) yırtılma modu.

1.2.2. Karışık mod yük altında gerilme şiddet faktörleri

Sonsuz bir levha içerisinde bulunan $2a$ uzunluğundaki çatlak Şekil 1.2’de gösterilmektedir. Şekil 1.3’te çatlak ucunda oluşan gerilmeler levhaya aksenal ve kayma gerilmeleri uygulanarak analitik olarak hesaplanabilmektedir [1]. Bu tez çalışmasında üç boyutlu kırılma problemleri analiz edilmiştir. Üç boyutlu bir çatlak ucu önünde Şekil 1.4’te gösterildiği gibi konumlanmış bir koordinat sistemine göre üç boyutlu bir eleman üzerindeki gerilme hali, düzlem şekil değişimi (plane strain şartları) ve yukarıda verilen mod-I, mod-II, mod-III yükleme hallerinin süperpozisyonu eklenmesi haliyle bulunabilmektedir. Bu bölümde sunulan denklem 1.1-1.13 ifadeleri için K_I , K_{II} , K_{III} gerilme şiddet faktörleri, σ aksenal gerilme, τ kayma gerilmesi, r çatlak ucundan ölçülen radial mesafe, θ yatay eksenle yapılan açı, μ kayma modülü ve κ ise hacimsel modüldür (bulk modülü). Denklem [1] 1.1-1.3, mod-I durumu için temel gerilme bileşenlerini barındırmaktadır (Şekil 1.3-1.4).



Şekil 1.2. Çatlak uzunluğu $2a$ olan çift-eksenli çekme gerilmesine maruz bir sonsuz levha [1].

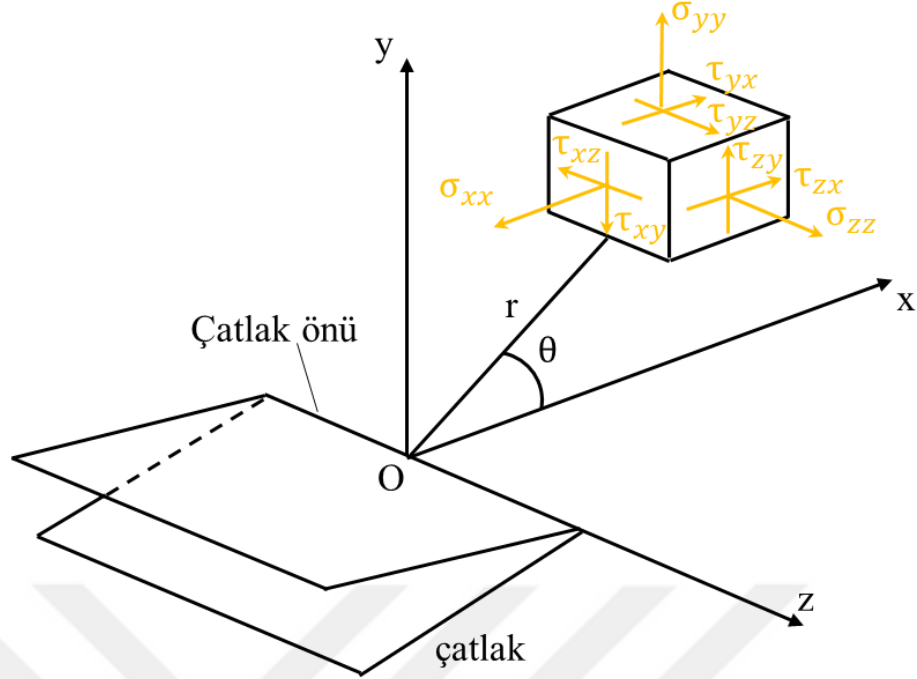


Şekil 1.3. Çatlak ucunun koordinat eksenleri önünün tanımı ve gerilme bileşenleri [1].

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (1.1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (1.2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (1.3)$$



Şekil 1.4. Üç boyutlu bir çatlak ucu (crack front) üzerinde yerleştirilmiş r , θ , z koordinat sistemi ile gerilme elemanı ve bileşenlerinin gösterimi [2].

Düzlem içi kayma gerilmesi (τ) durumu (mod-II) için temel gerilme bileşenleri denklem [1] 1.4 ile 1.6'da sunulmaktadır (Şekil 1.3-1.4).

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (1.4)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (1.5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (1.6)$$

Yırtılma modu durumu (mod-III) için uygulanan düzlem dışı kayma gerilmesinin (τ) çatlak önü bölgesindeki temel gerilme bileşenleri denklem [1] 1.7 ile 1.8'de verilmektedir (Şekil 1.4).

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.7)$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.8)$$

Denklem 1.9 ile 1.10 mod-I durumu, denklem 1.11 ile 1.12 mod-II durumu ve denklem 1.13 ise mod-III durumu için yer değiştirme dağılımlarıdır [1].

$$u_x = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 + 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (1.9)$$

$$u_y = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 - 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (1.10)$$

$$u_x = \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 + 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (1.11)$$

$$u_y = -\frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 - 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (1.12)$$

$$u_z = \frac{2K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.13)$$

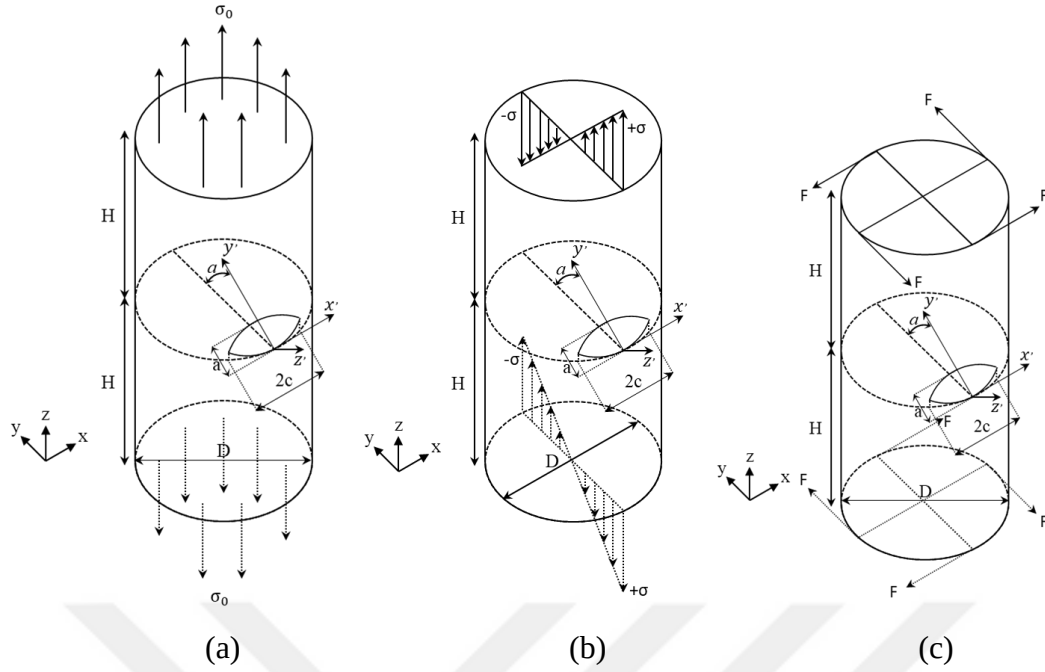
2. KATI SİLİNDİRLERDE KARIŞIK MOD YÜZEY ÇATLAKLARI

2.1. Problem Tanımı

Taşıtlarda ve enerji üretim türbinleri gibi makinelerde, değişik yüklere maruz pim ve şaft gibi dairesel kesitli parçalar bulunmaktadır. Bu parçalar, basma, çekme, eğilme ve burulma yüklerine maruz kalmaktadırlar. Bu yükler altında, parça üzerinde mevcut bulunan bir yüzey çatlağının kırılma analizinin yapılarak emniyetli olup olmadığının değerlendirilmesi yüksek önem taşımaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında doğrusal elastik kırılma mekaniği yöntemleri kullanılarak değişik yüklere maruz katı silindirik parçalarda bulunan dönmüş yüzey çatlakları için çözümler geliştirilmiştir.

Şekil 2.1’de gösterildiği üzere, çekme ve eğilme yüküne maruz silindirik yapılarda yüzey çatlak düzleminin dairesel kesit üzerinde olması ($\alpha = 0^\circ$) durumunda sadece açılma modu (mod-I) meydana gelir. Dönme açısının var olması durumunda ($\alpha > 0^\circ$) ise, yüzey çatlağının açılma moduna ek olarak kayma ve yırtılma modları da aktif hale gelir. Bu durum, ilgili problemin karışık mod kırılma analizinin yapılmasını gerektirmektedir.

Bu tez çalışmasında, eksenel gerilme, eğilme ve burulma yüklerine maruz katı silindirler üzerinde bulunan karışık mod dönmüş yüzey çatlaklarının gerilme şiddet faktörü dağılımları hesaplanmıştır. Eksenel gerilme durumunda silindirin rijit cisim hareketini sabitlemek için alt taban yüzeyinden gerekli sınır şartları tanımlanmıştır. Çekme yükü için alt ve üst dairesel yüzeylere basınç yükü uygulanmıştır. Eğilmede de çap yönünde silindir merkezinde sıfır olmak koşuluyla doğrusal yayılı basınç yükü alt ve üst dairesel yüzeylere uygulanarak eğilme momenti oluşturulmuştur. Burulma yüklemesi durumunda da üst dairesel yüzeyden silindirin rijit cisim hareketi sabitlenerek üst ve alt dairesel yüzey sınırı üzerinde tanımlanan düğüm noktalarından burulma momenti oluşturacak şekilde kuvvet uygulaması yapılmıştır.



Şekil 2.1. Dönmüş eliptik yüzey çatlaklı içeren silindir; (a) Eksenel üniform gerilme yüklemesi, (b) Eğilme yüklemesi, (c) Burulma yüklemesi.

2.2. Katı Silindirlerdeki Eliptik Çatlaklarla İlgili Literatürde Bulunan Çalışmalar

I. S. Raju ve J. C. Newman [3] boru ve çubuk yapılarında yarı eliptik yüzey çatlaklarıyla ilgili çalışma yapmışlardır. 6500 serbestlik derecesine sahip modellere eksenel gerilme ve eğilme yükü uygulayıp 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle serbest yüzey ve derinlik noktaları için boyutsuz K_I GŞF hesabı yapmışlardır. Sonlu elemanlar yönteminde ise düğüm kuvvetinden faydalanmışlardır. Sonuçları sayısal ve deneysel veriler arasında kıyaslayarak %10 içinde olacak şekilde açıklamışlardır. Elde edilen gerilme şiddet faktörlerinin silindir ve borulardaki yüzey çatlakları ve yorulma çatlak ilerlemesinin tahmininde faydalı olduğunu belirtmişlerdir.

Andrea Carpinteri [4] eksenel gerilme ve eğilme yüküne maruz katı yuvarlak çubuklarda yarı dairesel, yarı eliptik yüzey çatlakları için çatlak önü boyunca mod-I gerilme şiddet faktörü (GŞF) hesabı yapmıştır. Modellerde simetri şartı vermiştir. Bilgisayar ortamında 210 eleman ve 1175 düğümü modellere atayarak ağ oluşturma işlemini gerçekleştirmiştir. Çatlak şekil oranı (a/c) ve çatlak derinlik oranı (a/D) parametrelerini baz alarak mukayese grafikleri göstermiştir. Derinlik noktası ve serbest yüzeyler için yaptığı hesaplamaları da literatür sonuçlarıyla kıyaslamıştır.

Anh Le Van ve Jean Royer [5] aksenel gerilme, eğilme ve burulmaya maruz yuvarlak çubuklarda yarı eliptik ve yarı dairesel yüzey çatlaklarının çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörlerini incelemişlerdir. Sekiz düğümlü veya altı düğümlü izoparametrik iki boyutlu elemanları yapı boyunca kullanmışlardır. Özellikle atlak önü boyunca çeyrek nokta elemanlarını kullanmışlardır. Çatlak önü boyunca aksenel gerilme ve eğilme yükü için mod-I, burulma yükü için de mod-II ve mod-III sonuçları elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçların çeşitli yüklere maruz dairesel çatlağın mekanik davranışını tahmin etmeye olanak sağladığı belirtilmiştir [6]. Çatlak derinliği/yarıçap oranı (a/R) artırılarak derinlik noktası için gerilme şiddet faktörlerindeki değişimler gösterilmiştir. Sonuçları literatürdeki verilerle kıyaslamışlardır.

Manuel de Fonte ve ark. [7] eğilme, burulma ve hem eğilme hem de burulmaya maruz yuvarlak çubuklarda yarı eliptik yüzey çatlaklarının karışık mod gerilme şiddet faktörü hesabıyla ilgilenmişlerdir. Üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri kullanarak yaptıkları çözümleri her bir yük türü için ayrı ayrı grafiklere yerleştirmişlerdir. Daha sonra yük altında bulunmuş modellerdeki çatlak şekil deformasyonlarını kontür resimler şeklinde paylaşmışlardır. Mod-I durumu için serbest yüzey ve derinlik noktalarında gerilme şiddet faktörü değerlerinin birbirinden farklı olduğunu belirtmişlerdir.

Manuel da Fonte ve Manuel de Freitas [8] üç boyutlu sonlu elemanlar modelini kullanarak eğilme ve burulma yüküne maruz yuvarlak çubuklarda yarı eliptik yüzey çatlakları için gerilme şiddet faktörü hesapları yapmışlardır. özümelerde önce literatür verileriyle kıyaslama ardından çatlak önü boyunca eğilme yükü için boyutsuz K_I , burulma yükü için boyutsuz K_{II} ve K_{III} dağılımlarını sunmuşlardır. Bunların yanına yük altında bulunmuş çatlak şekil deformasyonu kontür resimlerini eklemişlerdir.

Yan Shin Shih ve Jien Jong Chen [9] aksenel gerilme ve eğilme yüküne maruz yuvarlak bir çubukta yarı eliptik yüzey çatlağının serbest yüzey ve derinlik noktası için gerilme şiddet faktörü hesabını yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yaptıkları çalışmada 20 düğümlü düzenli ve daraltılmış tekil eleman kullanmışlardır. Literatürdeki verilerle doğrulama çalışması da yapmışlardır. Çeşitli atlak şekil oranı parametrelerini baz alarak artan çatlak derinlik oranları ile geniş bir mod-I alışması sunmuşlardır.

C.S. Shin ve C. Q. Cai [10] aksenel gerilme ve eğilme y¼k¼ne maruz silindirik ¼ubuklarda yarı eliptik y¼zey ¼atlakları i¼in boyutsuz K_I GŞF ¼öz¼m¼ sunmuşlardır. Sonlu eleman modellerinde simetrik model kullanarak yaptıkları ¼öz¼mlerde ¼atlak derinlik oranlarını baz alarak ¼eşitli ¼atlak şekil oranı durumlarını grafikler halinde sunmuşlardır. Grafiklerde aynı zamanda kapalı form ¼öz¼m¼n¼ geometrik simgeler halinde belirtmişlerdir. Ayrıca literat¼rdeki verilerle doğrulama ¼alışması da yapmışlardır.

A.Ayhan [11] aksenel gerilme y¼k¼ne maruz katı bir silindir modeline g¼m¼l¼ eğik dairesel ¼atlak yerleştirerek karışık mod gerilme şiddet fakt¼r¼ analizi yapmıştır. Tetrahedral zenginleştirilmiş sonlu elemanlar kullanarak hazırladığı katı silindiri simetri şartı vererek yarım modelle analize hazırlamıştır. Sonuçları analitik ¼öz¼mlle kıyaslayarak doğrulamıştır.

Al Emran Ismail ve ark. [12] burulma y¼k¼ne maruz yuvarlak ¼ubuklarda y¼zey ¼atlaklarının gerilme şiddet fakt¼rlerinin ¼öz¼m¼n¼ sunmuşlardır. Literat¼r doğrulasası i¼in önce eğilme y¼k¼ altındaki yuvarlak ¼ubuklardaki y¼zey ¼atlaklarının mod-I gerilme şiddet fakt¼r¼n¼ incelemişlerdir. Daha sonra ise ¼atlak şekil oranı parametresini baz alarak artan ¼atlak derinlik oranlarıyla ¼atlak ucu boyunca mod-II ve mod-III gerilme şiddet fakt¼r¼ değişimlerini sunmuşlardır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yaptıkları ¼alışmada modellerde 20 d¼ę¼ml¼ izoparametrik ikinci dereceden elemanlar kullanmışlardır. Tekil ve birleşmiş y¼kler i¼in de gerilme şiddet fakt¼r¼ hesaplamaları sunmuşlardır [13]. Farklı ¼atlak şekil oranı değerleri ve farklı ¼atlak derinlik oranı değerlerini kullanarak aksenel gerilme, eğilme ve burulma y¼k¼ altında ¼atlak ucu boyunca gerilme şiddet fakt¼r¼ değişimlerini incelemişlerdir. Ayrıca y¼k¼ altında deformasyon g¼r¼nt¼lerini de paylaşmışlardır. Aynı zamanda birleşmiş eğilme ve burulma momenti i¼in ¼atlak ucu boyunca boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} dağılımlarını sunmuşlardır [14].

Al Emran İsmail ve ark. [15] aksenel gerilmeye maruz yuvarlak ¼ubukta eğik yarı eliptik y¼zey ¼atlaklarının mod-I gerilme şiddet fakt¼r¼n¼n sayısal bir ¼öz¼m¼n¼ sunmuşlardır. ANSYS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak yaptıkları modellemelerde farklı eğik ¼atlak açıları i¼in y¼zey ¼atlaklarının deformasyon g¼r¼nt¼lerini sunmuşlardır.

J. Isidoro ve Rui F. Martins [16] eğilme ve burulmaya maruz silindirik şaftlardaki yarı eliptik yüzey çatlaklarının serbest yüzey ve derinlik noktaları için karışık mod gerilme şiddet faktörlerini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yaptıkları çalışmalarda çatlak derinlik oranını baz alarak gerilme şiddet faktörlerini hesaplamışlardır.

M. K. Ramezani ve ark. [17] çift sınır eleman yöntemini kullanan Beasy yazılımında, burulma yüküne maruz yuvarlak çubuklarda yarı eliptik yüzey çatlaklarının çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörlerini analiz etmişlerdir. Analizlerde farklı çatlak şekil oranı ve eğik açılı durumların sonuçlarını sunmuşlardır. Ayrıca elde ettikleri kapalı form çözümleri ile analiz sonuçlarını mukayese etmişlerdir. Sonuç olarak, K_{III} değerlerinin çatlak büyüklüğü ve şekli tarafından fazlasıyla etkilendiğini, kırılma modlarına bakılmaksızın çatlak şekil oranının gerilme şiddet faktörleri üzerine en büyük etkiye sahip olduğunu açıklamışlardır. Benzer bir çalışmayı da elde ettikleri empirik çözümler ile çatlak önü boyunca karışık mod gerilme şiddet faktörü analiz sonuçlarını mukayese ederek sunmuşlardır [18]. Mukayeseler arasındaki farkın %7 içinde olduğunu belirtmişlerdir.

S. Teh ve ark. [19] aksenal gerilme yükü altında bir katı silindirde eğik yarı eliptik yüzey çatlağı için karışık mod gerilme şiddet faktörü analizleri yapmışlardır. Ansys sonlu elemanlar modelinde 10 düğümlü dört yüzlü ikinci dereceden eleman ağı, Beasy yazılımında çift sınır eleman metodu kullanmışlardır. Sınır integral denklemiyle çift sınır eleman metodunu kullandıklarını belirtmişlerdir.

J. M. Alegre ve ark. [20] aksenal gerilme yükü altında bir yuvarlak çubukta gömülü eliptik çatlak için gerilme şiddet faktörü çözümleri sunmuşlardır. Sonlu elemanlar modellemesinde Abaqus yazılımını kullanmışlardır. Sayısal modeli, azaltılmış birleşme ile 20 düğümlü quadratik elemanlar kullanarak gerilme şiddet faktörü çözümleri için oluşturmuşlardır. Simetrik model kullanarak literatürdeki çözümlerle kıyaslama yapmışlardır.

Muhammad Akbar Barrinayaa ve ark. [21] burulma yüküne maruz yuvarlak çubuklarda normal ve eğik yüzey çatlaklarının karışık mod gerilme şiddet faktörü analizlerini Beasy yazılımını kullanarak yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ve çift sınır eleman metodunu kullanarak gerçekleştirdikleri analizlerde tetrahedral ve hekzahedral elemanlar kullanmışlardır. Nispeten küçük yüzey çatlaklarını

modellemede tetrahedral eleman açının hekzahedral eleman ağından daha uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Literatür çalışmalarındaki bilgilerden yola çıkarak, karışık mod gerilme şiddet faktörleri çözümleri yalnızca eğik yüzey çatlakları için mevcuttur. Dönmüş yüzey çatlakları için, empirik denklemleri de içerecek şekilde geniş kapsamlı karışık mod gerilme şiddet faktörü çözümleri literatürde bulunmamakta olup, bu tez çalışması kapsamında verilmektedir.



3. KATI SİLİNDİRİK YAPILARDA ÜÇ BOYUTLU DÖNMÜŞ YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD ANALİZLERİ

Bu çalışmada, eksenel üniform gerilme, eğilme ve burulma yükleri altında katı bir silindirde dönmüş yüzey çatlakları için, problemi tanımlayan parametrelerden yararlanılarak gerilme şiddet faktörü (GŞF) hesabı yapılmaktadır. Katı silindirdeki temel parametrelerin değerleri, pratikte görülmesi mümkün geniş bir aralıkta seçilmiştir. Tüm parametreleri bütün kombinasyonları oluşturularak geniş bir çözüm kütüphanesi oluşturulması hedeflenmiştir. Seçilen bu parametreler Şekil 3.1’de gösterilmiş, değerleri ise Tablo 3.1’de verilmiştir. Çatlak derinliğini tanımlamak için kullanılan a parametresi, tüm modellemelerde 1 birim olarak seçilmiştir. Çatlak derinliği/çatlak uzunluğu (a/c) oranı sırasıyla 0.25, 0.5, 1.0, 2.0; çatlak derinliği/katı silindir çapı (a/D) oranları sırasıyla 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8 seçilmiştir. Silindir yükseklikleri ise çapın katlarına göre belirlenmiş olup $a/D=0.05$ için 3 kat, $a/D=0.1$ için 4 kat, $a/D=0.25$, 0.5 ve 0.8 için de 5 kat yarım boy yükseklik belirlenmiştir. Belirlenen çatlak ve katı silindir boyutları Tablo 3.2’de verilmiştir. Açılma modu (mod-I) problemi, yarı eliptik çatlağın yatay ekseninin Şekil 3.1’de görülen xy düzlemine göre paralel olması durumunda geçerlidir. Kayma modu (mod-II) ve yırtılma modu (mod-III) problemlerinde ise xy düzlemine göre paralel olma durumu olmamakla birlikte aynı zamanda açılma modu da oluşmaktadır. XY düzlemine göre paralel olma durumunun ortadan kaldırıldığı dönmüş çatlak problemini oluşturmak için yatay eksenle konumlandırılan açı $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ seçilmiştir. Çatlak başlangıç konumu sağ taraftaki serbest yüzeydedir ve sol taraftaki serbest yüzeyde çatlak önü tanımı sona ermektedir. Bir başka deyişle, GŞF dağılımları sağ serbest yüzey noktasından, derinlik noktasına ve sol serbest yüzey noktasına doğru olan yönde verilmektedir. Katı silindirin dış yüzeyinde yer alan simetrik olarak konumlandırılan tüm eliptik dönmüş yüzey çatlakları için toplam 360 adet boyutsuz K dağılımı hesabı yapılmıştır. İlk olarak eksenel gerilme yükü altında katı bir silindire yerleştirilen eliptik yüzey çatlağı için analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir yükleme durumu için toplam analiz sayısı Tablo 3.3’te sunulmuştur.

Tablo 3.1. Problemi tanımlayan parametreler.

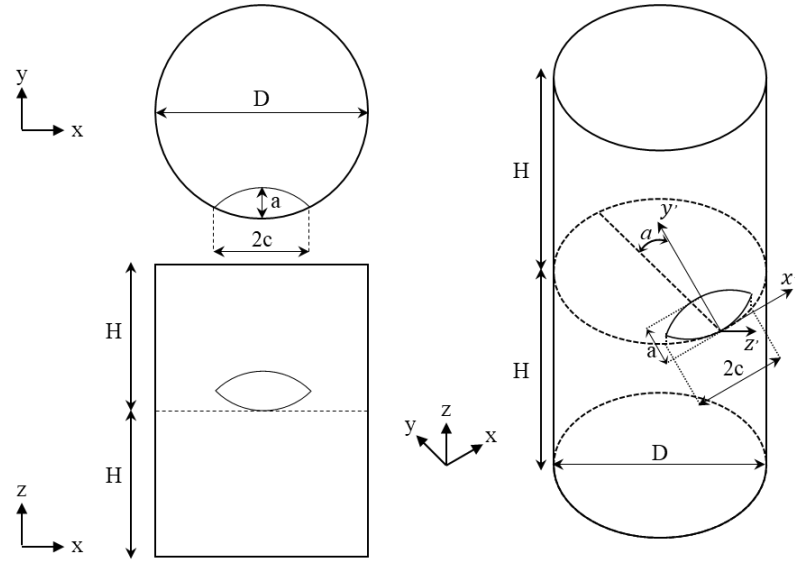
a/c	0.25	0.5	1.00	2.00		
a/D	0.05	0.1	0.25	0.5	0.8	
α	0	15	30	45	60	75

Tablo 3.2. Analizler için belirlenen eliptik yüzey çatlağı ve silindir ölçüleri.

a/c	a/D	a	c	D	H
0.25	0.05	1	4	20	60
0.25	0.1	1	4	10	40
0.25	0.25	1	4	4	20
0.25	0.5	1	4	2	10
0.25	0.8	1	4	1.25	6.25
a/c	a/D	a	c	D	H
0.5	0.05	1	2	20	60
0.5	0.1	1	2	10	40
0.5	0.25	1	2	4	20
0.5	0.5	1	2	2	10
0.5	0.8	1	2	1.25	6.25
a/c	a/D	a	c	D	H
1.00	0.05	1	1	20	60
1.00	0.1	1	1	10	40
1.00	0.25	1	1	4	20
1.00	0.5	1	1	2	10
1.00	0.8	1	1	1.25	6.25
a/c	a/D	a	c	D	H
2.00	0.05	1	0.5	20	60
2.00	0.1	1	0.5	10	40
2.00	0.25	1	0.5	4	20
2.00	0.5	1	0.5	2	10
2.00	0.8	1	0.5	1.25	6.25

Tablo 3.3. Her bir yükleme durumu için toplam analiz sayısı.

Çekme Yüğü	4x5x6 = 120 adet
Eğilme Yüğü	4x5x6 = 120 adet
Burulma Yüğü	4x5x6 = 120 adet
Toplam	360 adet



Şekil 3.1. Silindir üst görünüş, ön görünüş, silindir yüzeyine konumlandırılan eliptik dönmüş yüzey çatlak ve problemi tanımlayan parametreler.

3.1. Sonlu Elemanlar (Ögeler) Yöntemi, ANSYS Tarihi ve FCPAS Yazılımının Tanıtımı

Sonlu elemanlar (ögeler) yöntemi yapısal mekanik, ısı transferi, elektromanyetik ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerine sayısal çözümler sunmak için kullanılmaktadır. Mühendislik problemleri fiziksel durumların matematiksel modelleri olduğu için sınır veya başlangıç koşullarına sahip diferansiyel denklemlerdir. Kesin çözüm elde etmenin zor olduğu pratik mühendislik problemleri karmaşık sınır veya başlangıç koşullarına sahip diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır. Bu denklemleri çözebilmenin yollarından biri de sonlu elemanlar (ögeler) yöntemi adı verilen sayısal yöntemleri uygulamaktan geçer. Analitik çözümlerin aksine sayısal çözümler düğüm noktalarında kesin çözümlere yakınsar. Problemin olduğu bölge bir dizi küçük alt öğelere ve düğümlere bölünür [22].

İlk sonlu eleman programları, belirli bir sorunu çözmek için geliştirilen özel kodlardı. Genellikle tek bir eleman türü olarak kirişleri, eksenel simetrik kabukları veya düzlem gerilmeli katıları içerirler aynı zamanda tek bir fizik türü olarak yapısal ve termal yükleri içerirlerdi. Bu parametreler standart analiz araçları olmadığı için programların çözebileceği problem türlerini sınırlardı. Çoğu durumda her mühendis grubu kendi sonlu eleman kodunu geliştirip kullandığı için farklı programlardan elde edilen sonuçların uyumluluğu, bu sonuçların genel kalitesi ve mühendislerin zamanlarını ne kadar verimli kullandığı konusunda endişeler yaratmıştır. 1970 yılında John Swanson, NASA'ya uzay itiş ve geleneksel olmayan enerji üretimi için nükleer reaktörler

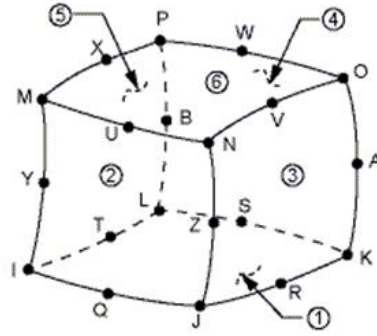
geliştiren “Westinghouse Electric Corporation” şirketinden ayrılarak ANSYS adını verdiği ticari bir genel amaçlı sonlu elemanlar programı geliştirmeye devam ettiği “Swanson Analysis System,Inc.” ‘i (SASI) kurdu. ANSYS’nin orjinal versiyonu, termal serbestlik derecesine sahip birkaç eleman dahil olmak üzere çeşitli tiplerde (yaylar, sönümleyiciler, kirişler, tuğlalar vb.) eleman içermektedir. Program, diğer şirketler tarafından hızla benimsenerek enerji endüstrisinin çoğu için varsayılan sonlu eleman programı haline gelmiştir. Günümüzde ANSYS ürünleri, havacılık, otomotiv, kimyasal işleme, inşaat, tüketim malları, elektronik, enerji, sağlık, açık deniz, denizcilik ve malzeme endüstrileri dahil olmak üzere tüm büyük mühendislik alanlarında kullanılmaktadır [23].

ANSYS Parametrik Tasarım Dili (APDL), ANSYS’in en güçlü özelliklerinden biridir. Modelin bir kısmının veya tamamının (geometri, malzeme özellikleri,yükler, sınır koşulları vb.) parametrik olarak tanımlanmasını sağlar. Parametrik bir modelin yeni bir değişkenini oluşturmak ve çözmek, birkaç parametre değerini değiştirmek ve modeli yeniden çalıştırmak oldukça kolaydır. Bu ANSYS’i mühendislik analizi, optimizasyon, kök neden analizi ve yeni sistem ve teknolojilerin tasarımı için güçlü bir araç yapar. APDL ayrıca makrolar oluşturmaya ve yürütmeye, makroları ANSYS komutları olarak çalıştırmaya, parametre dizileri üzerinde işlem yapmaya ve basit mantık kurmaya olanak sağlar [23].

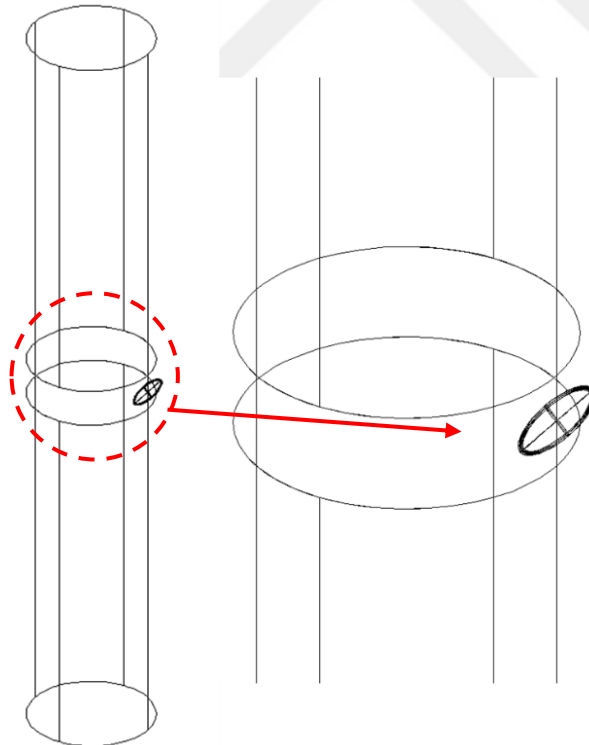
FCPAS [24] yazılımı iki ve üç boyutlu çatlaklar içeren geometrik yapılarda gerilme şiddet faktörü hesaplamasını yapar. Program içerisinde barındırdığı dönüştürücü sayesinde ANSYS Mechanical APDL [25] yazılımından alınan sonlu eleman (öge) modeli bilgilerini kullanarak, bağımsız sonlu eleman bazlı çözüm ve kırılma analizleri gerçekleştirmektedir. Dikkat edilmesi gereken parametreler arasında eleman sayıları, düğüm noktası sayıları ve bilgisayarın işlem gücü vardır.

Katı silindir modelleri ANSYS APDL [25] yardımıyla oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellerinde kullanılan eleman tipi, 20 düğüm noktalı ikinci dereceden altıyüzlü “Solid-95” seçilmiştir. Bu eleman tipi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Yüzey çatlağını oluşturmak için silindirin dış yüzey merkezine yerel koordinat tanımlanır. Ardından hazır çatlak hacmi makrosu programa girildikten sonra silindir yüzeyinde Şekil 3.3’te görüldüğü gibi çatlaklı yüzey oluşmaktadır. Fazlalık hacimler açılı durumuna göre ANSYS arayüz programında sol sekmedeki komutlar yardımıyla silinerek bu işlemleri gerçekleştiren komutlar log file kısmından alınmış ve makro dosyasında kullanılmıştır.

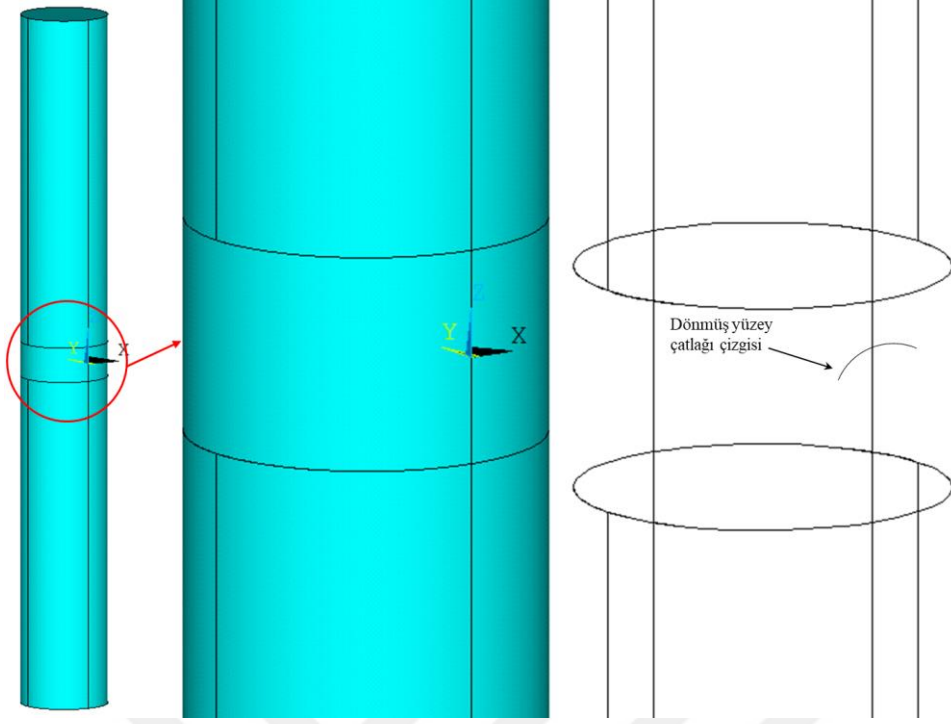
Geliştirilen makrolar tüm işlemlerde kolaylık sağlamıştır. Örnek makrolar Bölüm 5.'te anlatılmıştır. Ağ bölüntüleme işleminde ise daha sıkı mesh yapısı sağlamak için yükleme türüne göre silindir kısımlara bölünmüştür. Çekme ve burulmada genelde aynı modeller üzerinde çalışılmış olup Şekil 3.4'te görüldüğü gibi silindirler üç kısımlıdır. Orta hacim ile alt ve üst hacimlerin aynı eleman boyutlarıyla ağ örülmesine dikkat edilmiştir. Eğilmede ise FCPAS yazılımının çözüm yapabilmesi için Şekil 3.5'te görüldüğü gibi silindirin alt ve üst kısımlarından ufak bir hacim ayrılarak toplamda 5 bölüme ayrılmıştır.



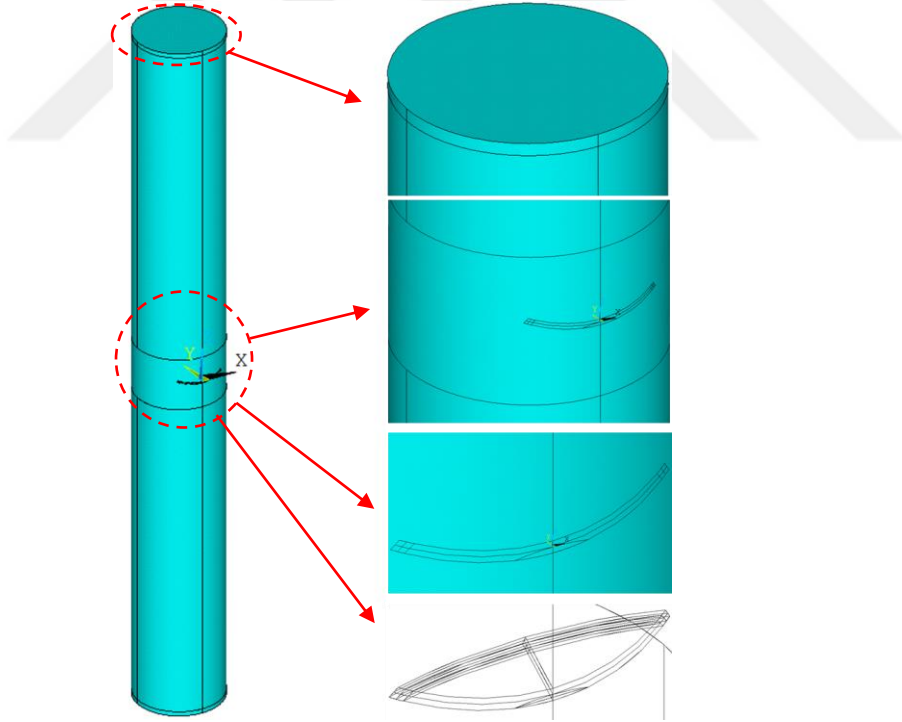
Şekil 3.2. 20 düğüm noktalı ANSYS Solid-95 Elemanı [25].



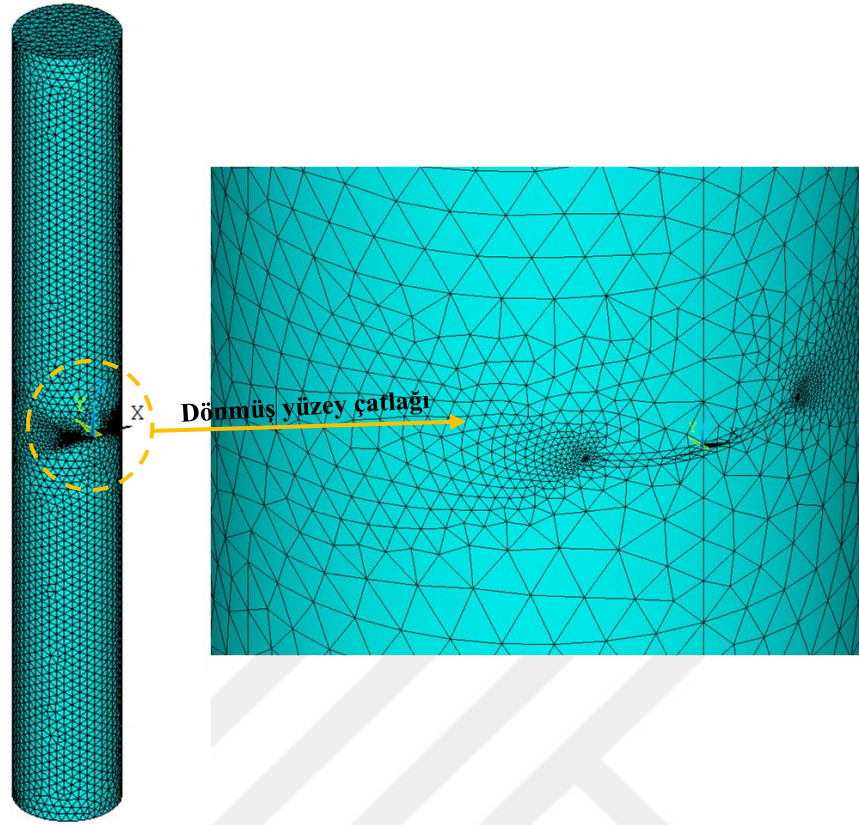
Şekil 3.3. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$, $\alpha=45^\circ$ değerlerine sahip silindirde çatlak yerleştirme işlemi.



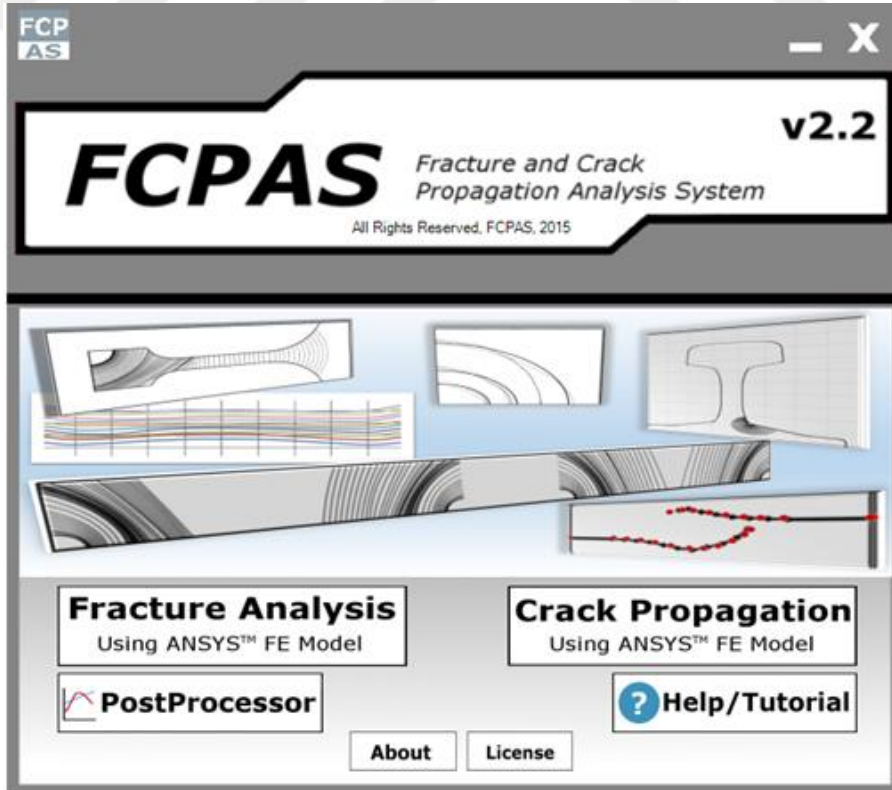
Şekil 3.4. Normal silindir tasarımı (başta) ve yüzey merkezine yerleştirilen dönmüş çatlak önü çizgisinin gösterimi (sonda).



Şekil 3.5.Eğilme yükü için oluşturulan silindir tasarımı ve çatlak tünel hacmi modeli.

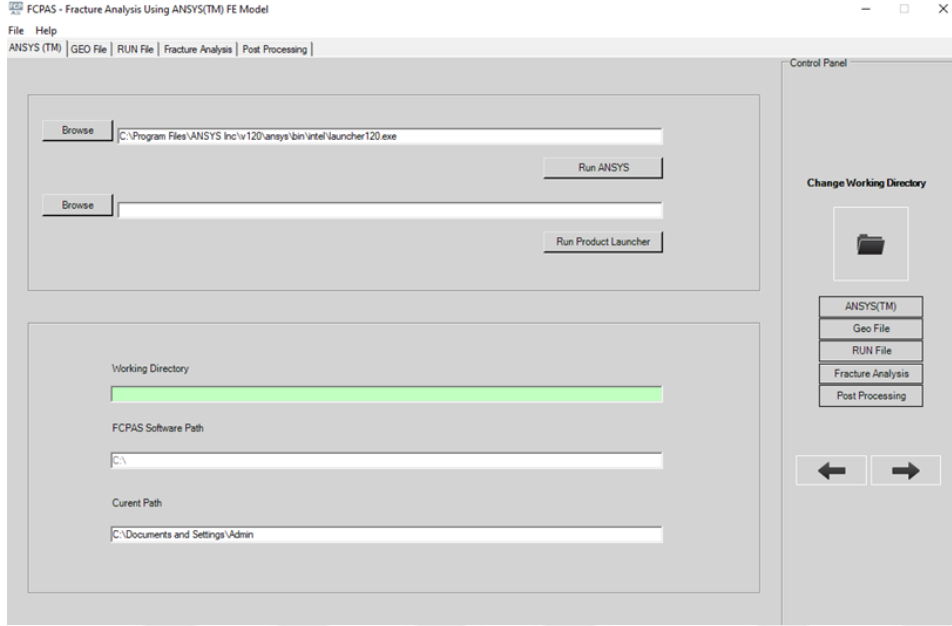


Şekil 3.6. Dönmüş yüzey çatlğına sahip katı bir silindirin bölüntülenmiş modeli ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.



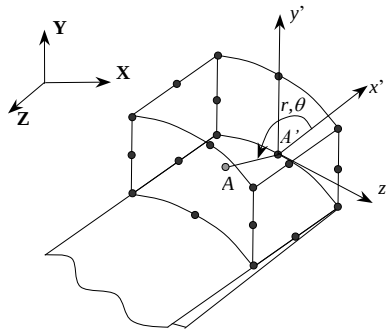
Şekil 3.7. FCPAS V2.2 Arayüz Görüntüsü [26].

Şekil 3.7’de FCPAS v2.2 açılış ekranı ve Şekil 3.8’de kırılma analizi penceresi görülmektedir. Eleman ve düğüm noktası sayıları ile yük ve sınır şartları sayesinde *.geo dosyası, malzeme bilgileri ve analiz parametreleri için de *.run dosyası oluşturulmaktadır. Bu iki dosya FRAC3D analizinde kullanılarak çatlak önü boyunca karışık mod gerilme şiddet faktörleri hesaplanmaktadır (Şekil 3.10).

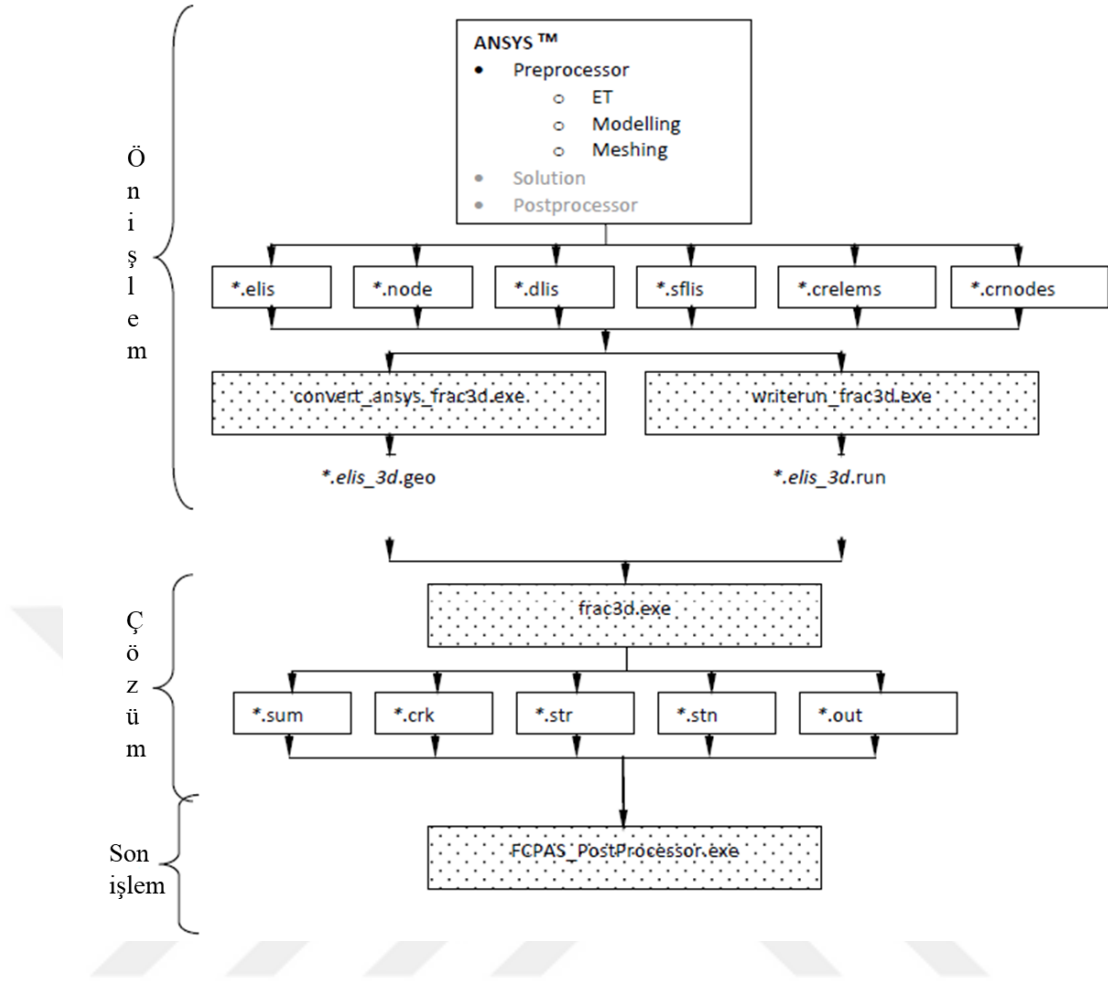


Şekil 3.8. ANSYSTM Sonlu Ögeler Modeli Kullanarak Kırılma Analizi Gerçekleştirebilme Sekmeleri [26].

FCPAS yazılımı zenginleştirilmiş sonlu ögeler kullanan FRAC3D çözücüsüyle çalışmaktadır. Zenginleştirilmiş sonlu ögeler yönteminde, sonlu ögeler çözümündeki konum değiştirme fonksiyonuna çatlak ucundaki ögeler için gerilme şiddet faktörü fonksiyonları eklenmiştir [27]. Tüm modelin sonlu öge analizi sonucu, hem düğüm noktası yer değişimleri, hem de çatlak önü boyunca tüm GŞF değerleri, doğrudan ve aynı anda çözülmektedir. Denklem 3.1’de zenginleştirilmiş ögeler konum değiştirme fonksiyonu belirtilmektedir.



Şekil 3.9. Üç boyutlu bir çatlak ucundaki temsili bir ikinci dereceden eleman [27].

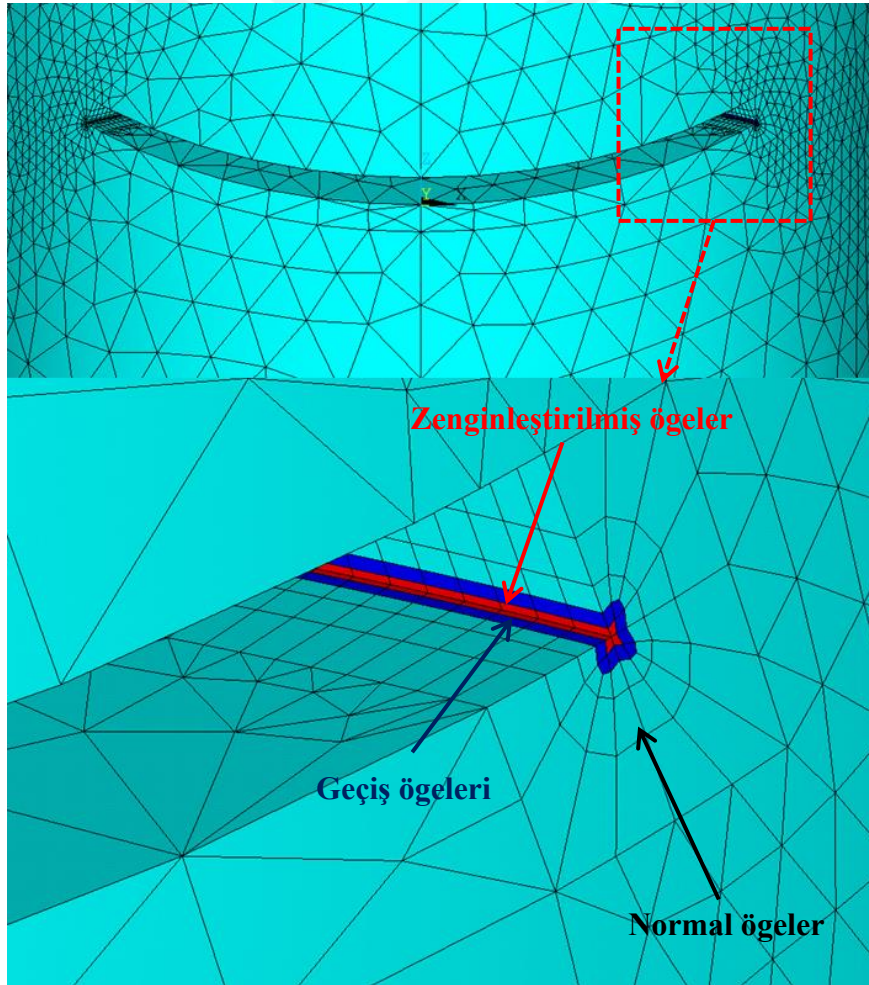


Şekil 3.10. FCPAS ile kırılma analizi basamakları [26].

$$\begin{aligned}
 u^k(\xi, \eta, \rho) &= \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) u_j^k \\
 &+ Z_0(\xi, \eta, \rho) \left(f^k(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) f_j^k \right) \left(\sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_I^i \right) \\
 &+ Z_0(\xi, \eta, \rho) \left(g^k(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) g_j^k \right) \left(\sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{II}^i \right) \\
 &+ Z_0(\xi, \eta, \rho) \left(h^k(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) h_j^k \right) \left(\sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{III}^i \right)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Denklem 3.1’de yer alan ilk toplam sembolünün üst indisindeki m ifadesi, Şekil 3.9’da gösterilen çatlak ucu elemanının toplam düğüm sayısı olan 20 değerini almaktadır. $N_j(\xi, \eta, \rho)$ elemanın yerel koordinatlara göre geleneksel eleman şekil fonksiyonunu tanımlamaktadır. u_j^k m bilinmeyen düğüm yer değiştirmelerini vermektedir. $Z_0(\xi, \eta, \rho)$, Şekil 3.11’de görüldüğü gibi zenginleştirilmiş çatlak ucu öğelerinde bir,

geçiş ögeleri için zenginleştirilmiş ögelere temas eden düğüm noktalarında bir, normal ögelere temas eden düğüm noktalarında ise sıfır değerlerini alan sıfırlama fonksiyonudur. Asimptotik yer değiştirme fonksiyonlarını içeren f^k, g^k, h^k ifadeleri, evrensel koordinat sistemine dönüştürülen açılma, kayma ve yırtılma modu GŞF katsayılarıdır. f_j^k, g_j^k, h_j^k ifadeleri de elemandaki j'nci düğümde değerlendirilen f^k, g^k, h^k fonksiyonlarından hesaplanan basit sabitlerdir. Şekil 3.9'da görülen çatlak ucu elemanın herhangi bir kenarında, iki adet köşe ve bir adet kenar ortası düğümü yer aldığından denklem 3.1'deki ntip ifadesi 3 değerini almaktadır. $N_i(\Gamma)$ interpolasyon fonksiyonunu temsil etmektedir. $K_I^i, K_{II}^i, K_{III}^i$ ise interpolasyon fonksiyonu tarafından tanımlanan çatlak önü boyunca değişen sırasıyla mod-I, mod-II, mod-III gerilme şiddet faktörlerini temsil etmektedir. $K_I^i, K_{II}^i, K_{III}^i$ zenginleştirilmiş ögelerde i'nci çatlak ucu düğümünde bilinmeyen GŞF'dir. Γ parametresi, -1 ile 1 arasında değişen izoparametrik koordinattır [27].



Şekil 3.11. Serbest yüzey bölgesinde çatlak ucu boyunca zenginleştirilmiş, geçiş ve normal ögeler.

Bu tez çalışmasında, dönmüş yüzey çatlağı içeren katı silindirik yapılar ANSYS Mechanical APDL programında modellenerek alınan veriler FCPAS yazılımına aktarılmıştır. FRAC3D çözücüsü ile analizler gerçekleştirilerek karışık mod gerilme şiddet faktörleri hesaplanmıştır. Elde edilen gerilme şiddet faktörleri K_r referans değeri ile boyutsuz duruma getirilmiştir [4]. K_r gerilme türüne ve çatlak derinliğine bağlı bir parametredir. Eksenel gerilme ve eğilme yükleri için aynı değerler kullanılırken (eğilme durumunda maksimum eğilme gerilmesi değeri), burulma yükü için Şekil 3.12’de görülen maksimum kayma gerilmesi hesabı yapılarak K_r [5] değerleri güncellenmiştir.

$$K_r = \sigma_0 \sqrt{(\pi a)} \quad (3.2)$$

$$K_r = \tau_{max} \sqrt{(\pi a)} \quad (3.3)$$

Burulma yükü, katı silindirik yapının üst ve alt yüzeylerinde dairesel sınır çizgileri üzerinde düğüm noktalarından teğet kuvvet çiftleri tanımlanarak oluşturulmuştur. Kuvvet çiftleri tork üretmektedir. Denklem 3.6’da hesaplanan tork miktarı ve denklem 3.5’te hesaplanan polar atalet momentiyile denklem 3.4’te maksimum kayma gerilmesi hesaplanmaktadır (Tablo 3.4). Daha sonra denklem 3.3 kullanılarak burulma yükü için normalize değerleri bulunmuştur [28].

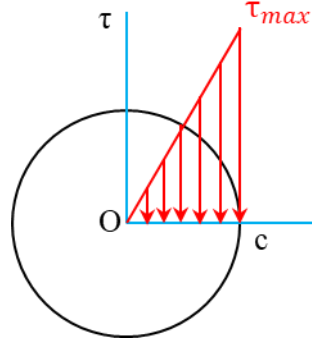
Tablo 3.4. Burulma yükü için normalize formülü parametreleri.

τ_{max}	: maksimum kayma gerilmesi	n	: kuvvet çifti sayısı
T	: üretilen tork miktarı	F	: kuvvet
c	: yarıçap	d	: yarıçap
J	: polar atalet momenti		

$$\tau_{max} = \frac{Tc}{J} \quad (3.4)$$

$$J = \frac{\pi}{2} c^4 \quad (3.5)$$

$$T = nFd \quad (3.6)$$

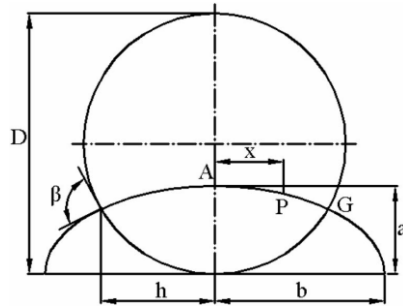


Şekil 3.12. Burulma yükü için maksimum kayma gerilmelerinin dağılımı [28].

3.1.1. Mod-I gerilme şiddet faktörlerinin doğrulanması

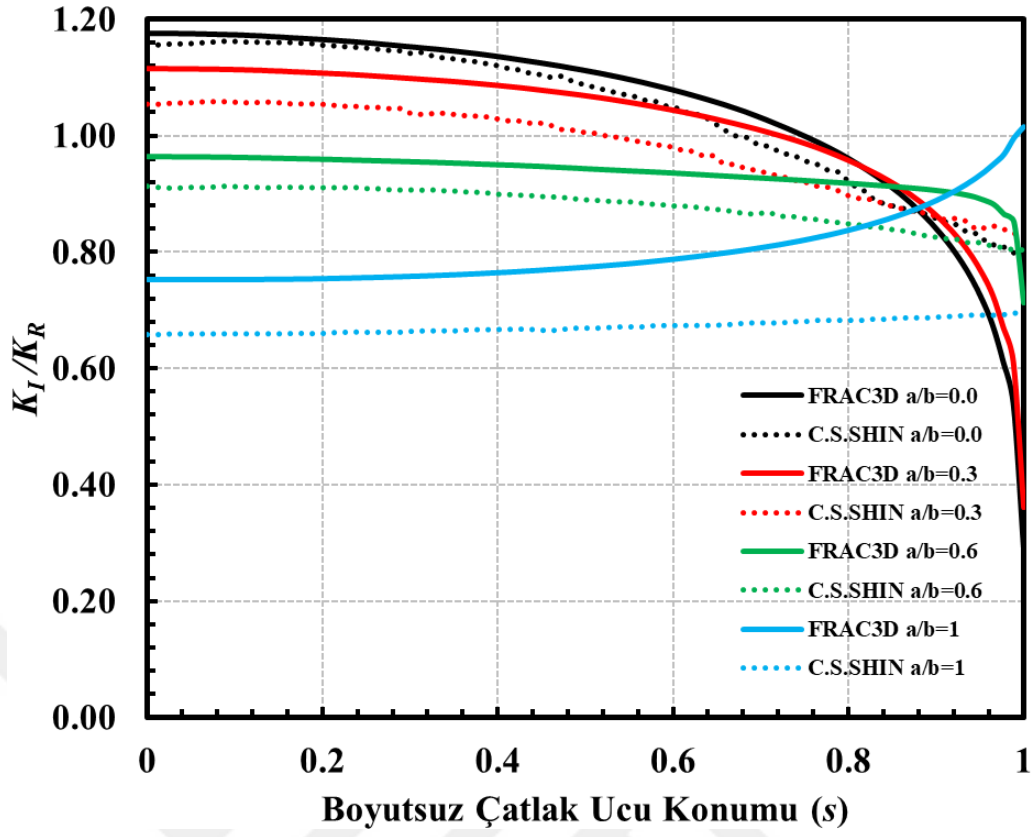
Analiz kütüphanesinde yer alan değerleri çözmeye başlamadan önce literatürde mevcut olan eliptik yüzey çatlakları ile ilgili silindir problemleri incelenmiş ve bu problemler FCPAS yardımıyla çözülerek literatür sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Önce silindirin yüzey merkezine yerleştirilen ve sadece açılma modu olan mod-I verilerini oluşturan $\alpha=0$ derece açılı eliptik yüzey çatlakları incelenmiştir.

C.S. Shin ve C.Q.Cai [10] eksenel gerilme ve eğilme yüküne maruz bir dairesel şafttaki değişik çatlak şekil oranlarına sahip çözümleri ortaya koymuşlardır. Zenginleştirilmiş sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan eliptik çatlak içeren silindirdeki çözümlerle kıyaslama yapılmıştır. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi çatlak derinliği oranı a , çatlak uzunluğu b , silindir çapı D seçilmiştir.

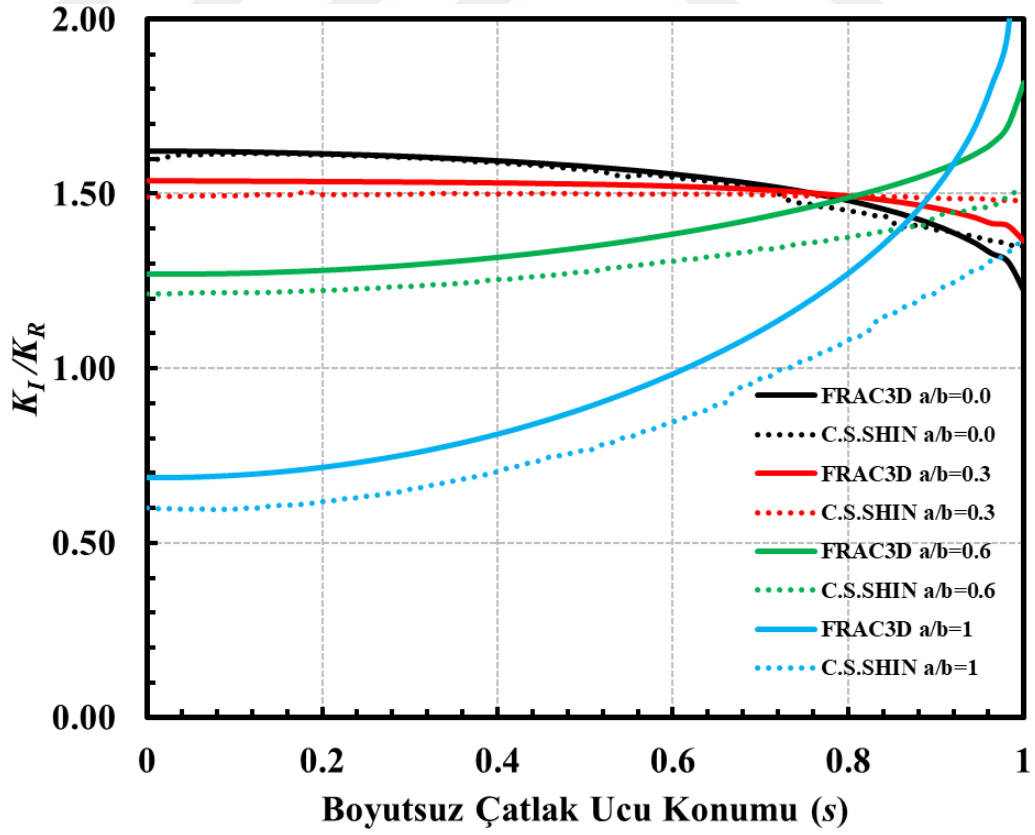


Şekil 3.13. Çatlak şeklinin parametreleri[10].

Şekil 3.14-3.15'te literatürde simetrik olarak modellenen dairesel şaft için elde edilmiş sonuçlar ile FRAC3D çözümleri mukayese edilmiştir. Çatlak ucu konumu $s=0$ derinlik noktasını, $s=1$ ise serbest yüzey noktasını temsil etmektedir. Dağılımlara bakıldığında genelde yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Yarı dairesel çatlakı temsil eden $a/b=1$ değeri için $s=0$ konumunda sonuçlar arasındaki fark %13'ün altındadır. Ayrıca modelleme çalışmalarında silindir yarım boy yükseklikleri çapın 5 katı olarak alınmış ve FCPAS'ın izin verdiği 189.000 eleman sayısı sınırıyla analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. $a/D=0.2$ çatlak derinlik oranına sahip aksenal gerilmeye maruz katı silindirde değişik çatlak şekil oranları sonuçlarının kıyaslaması.

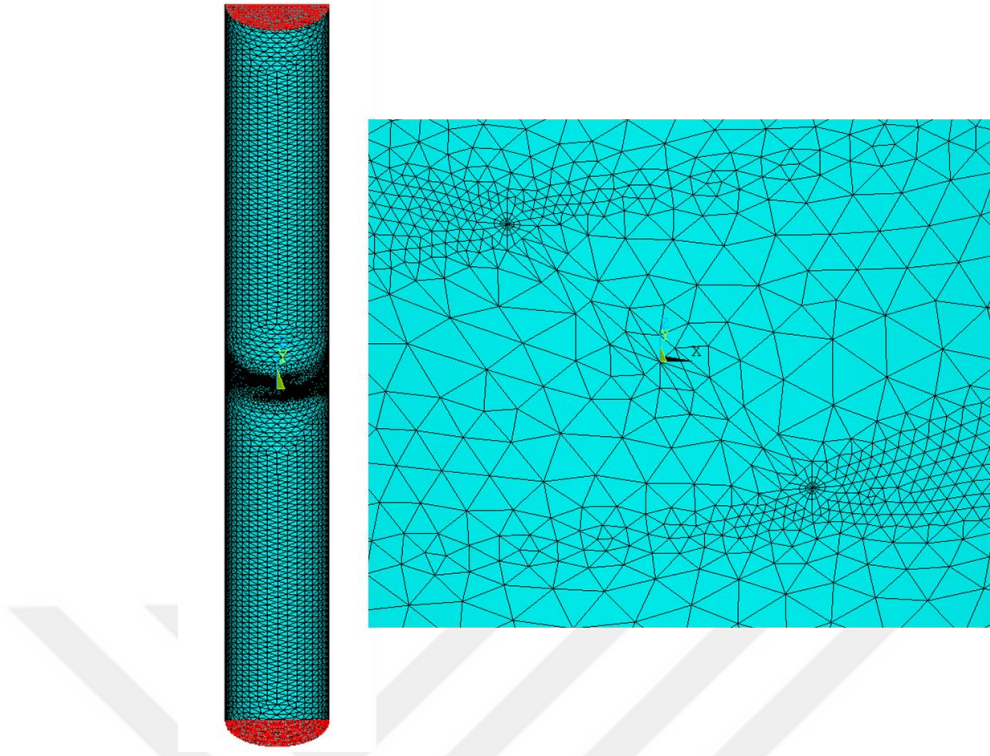


Şekil 3.15. $a/D=0.6$ çatlak derinlik oranına sahip eğilme yüküne maruz katı silindirde değişik çatlak şekil oranları sonuçlarının kıyaslaması.

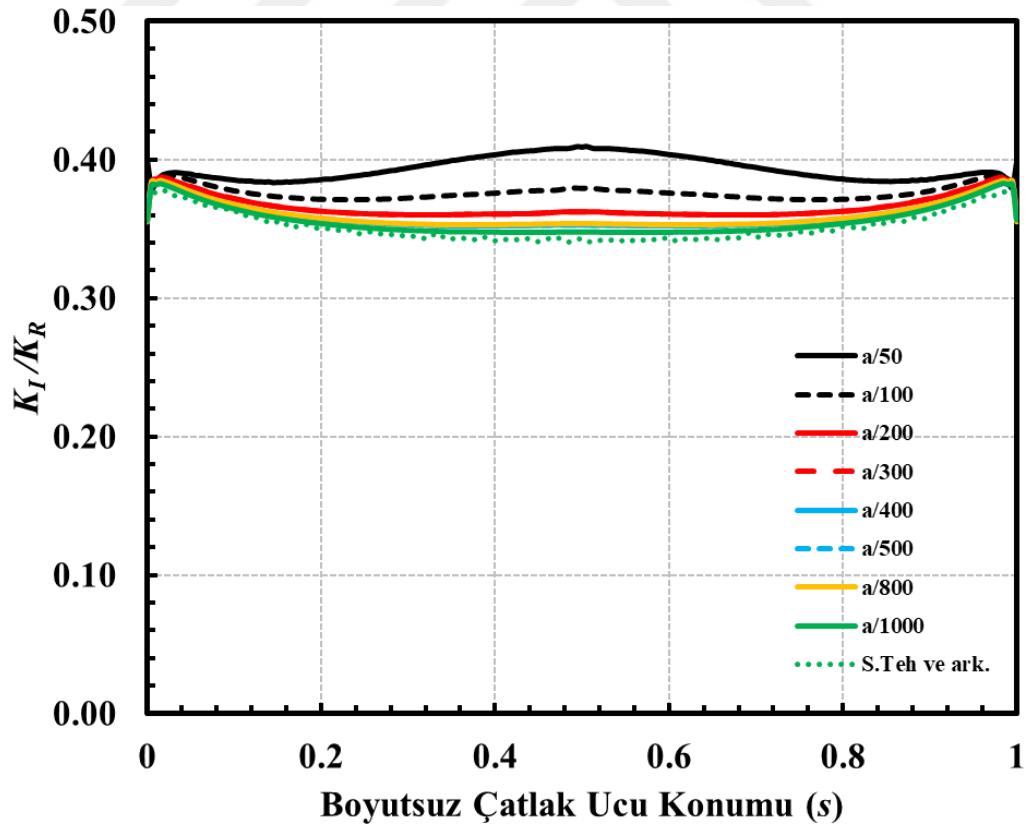
3.1.2. Sonlu eleman ağ duyarlılık analizi

Bu bölümde karışık mod gerilme şiddet faktörü oluşturan eğik dairesel yüzey çatlağı içeren katı silindir ele alınmıştır. Geometrik boyutları $a/c=1$, $a/D=0.1$, $\beta=45^\circ$ olan bir silindir için çatlak önü bölgesinde farklı eleman boyutları kullanılarak S.Teh ve ark. [19] ile mukayeseler yapılmıştır. Şekil 3.16'da görülen sonlu eleman modeli simetrik olarak oluşturuldu ve çatlak önü çizgisi boyunca 200 eleman kullanıldı. FCPAS'ın izin verdiği 189.000 eleman sayısı sınırı ile çözümler gerçekleştirildi. Şekil 3.17'de görüldüğü gibi mukayeseler sonucunda derinlik noktası için $a/200$ ile $a/300$ değerinin sonuçları ile literatür sonucu arasındaki fark %5.45 çıkmıştır. Daha düşük oranlarda da yakın sonuç verdiği için dolayı yapılan analizlerin tümünde $a/200$ çatlak ucu eleman boyut değeri kullanılmıştır.

Çatlak ucu çizgisi boyunca kullanılan elemanlar en büyük farkı büyük çaplarda oluşturmaktadır. $a/D=0.05$ ve 0.1 değerlerinde toplamda 170 ile 210 arasında değişen sayıda elemanlar kullanılmıştır. Bu durumun grafik dağılımlarını daha net duruma getirdiği gözlenmiştir. Daha küçük çap boyutlarını oluşturan $a/D=0.5$ ve 0.8 değerlerinde ise toplamda 60 ile 120 arasında değişen sayıda çatlak ucu çizgisi boyunca elemanlar kullanılmıştır. Bu durumun özellikle çatlak tüneli hacmi ile silindir arasında yer alan elemanlarda oluşması muhtemel hataları ortadan kaldırdığı tespit edilmiştir. $\alpha=75^\circ$ problemlerinde eleman şekil uyarılarını düşürmek için ise daha az sayıda eleman kullanılmıştır.



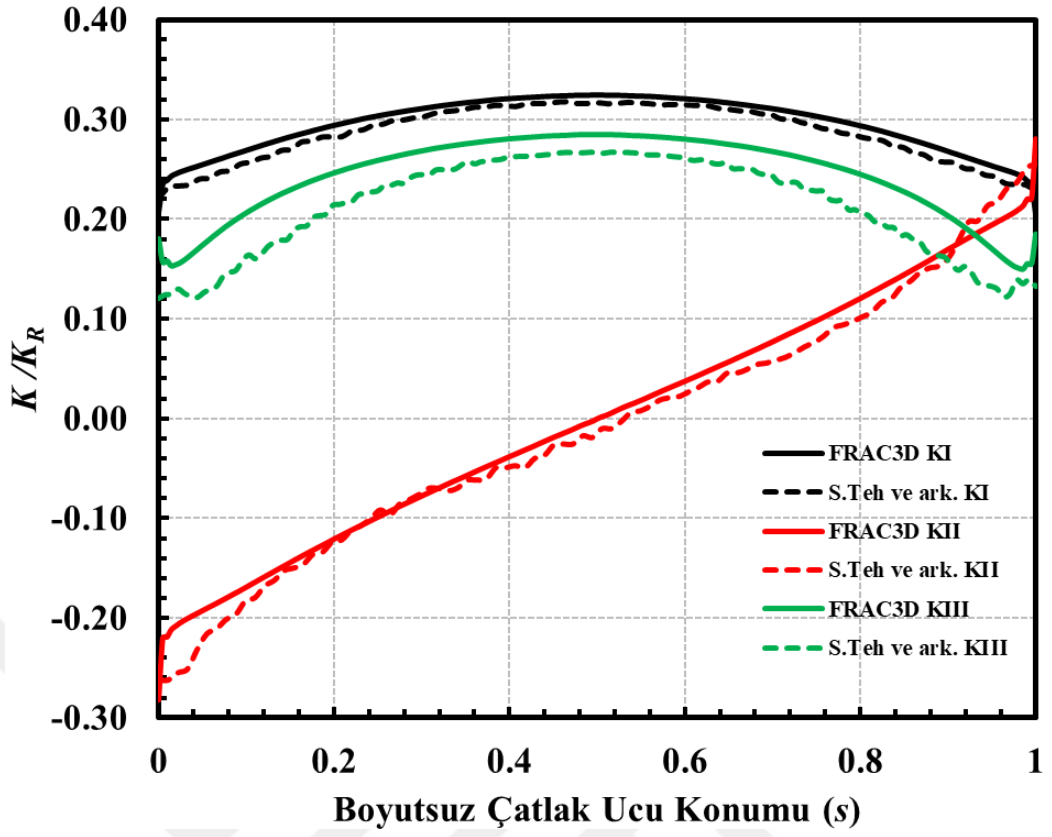
Şekil 3.16. $a/c=1$, $a/D=0.1$, $\beta=45^\circ$ boyutlarına sahip eğik dairesel yüzey çatlaklı içeren katı silindirin simetrik sonlu eleman modeli ve çatlak önü yakın görüntüsü.



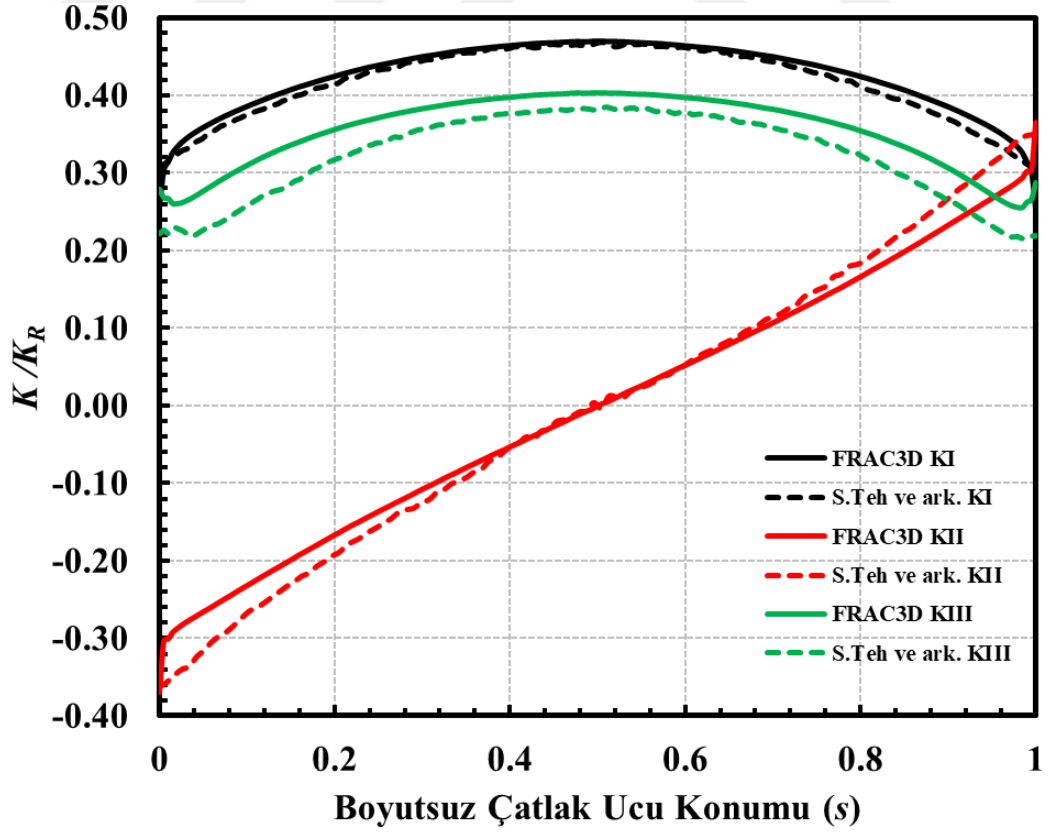
Şekil 3.17. $a/c=1$, $a/D=0.1$, $\beta=45^\circ$ boyutlarına sahip eğik dairesel yüzey çatlaklı için çatlak ucundaki eleman boyutunun farklı değerlerinde çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları.

3.1.3. Karışık mod gerilme şiddet faktörlerinin doğrulanması

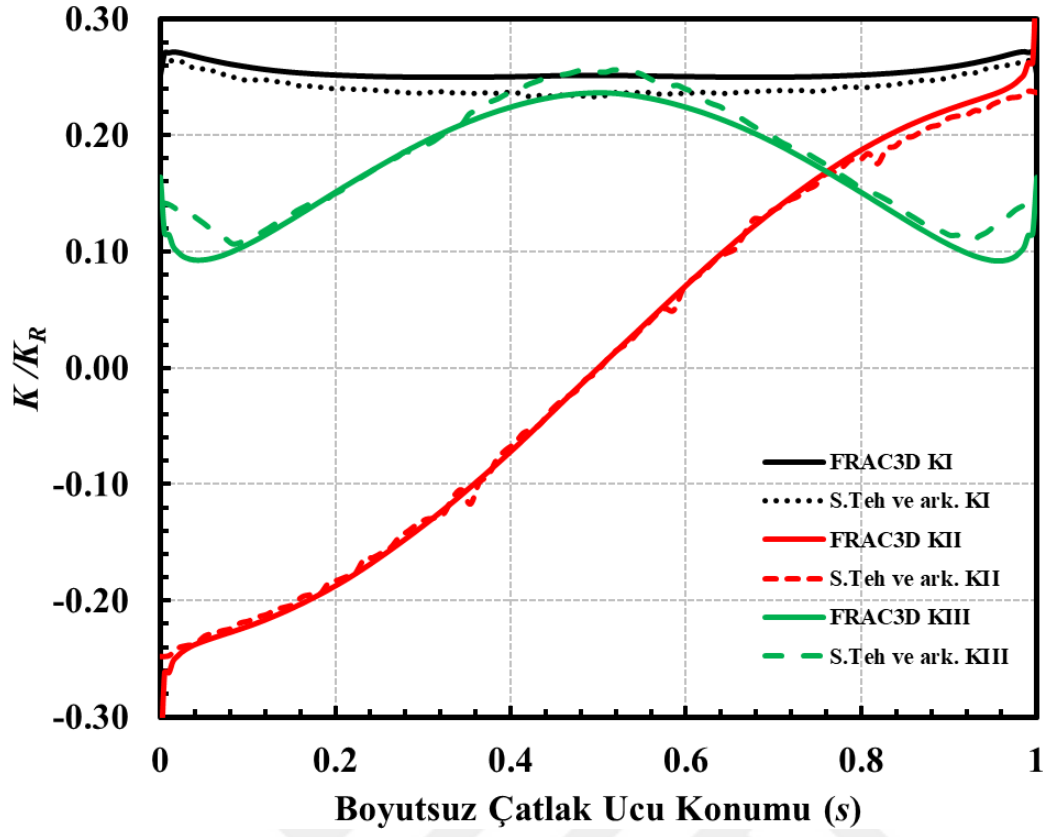
Eksenel gerilme ve burulma yükü problemleri için literatürde bulunan karışık mod gerilme şiddet faktörü çözümleri incelenmiş ve FRAC3D ile çözümlere mukayeseler yapılmıştır. Eksenel gerilme yükü karşılaştırma sonuçları (S.Teh ve ark., [19]) Şekil 3.18-3.21'de görülmektedir. Elde edilen boyutsuz K_I ve K_{II} dağılımları literatür sonuçlarına oldukça yakın görülürken, boyutsuz K_{III} dağılımlarında da sonuçların paralel olduğu görülmektedir. Burulma yükü için Muhammad Akbar Barrinaya ve ark. [21] yapmış olduğu çözümler ile FRAC3D çözümlerinin karşılaştırmaları Şekil 3.22'de görülmektedir. Elde edilen boyutsuz K_I ve K_{II} dağılımları literatür sonuçlarına oldukça yakın görülürken, boyutsuz K_{III} dağılımlarında da çatlak önü derinlik bölgesinde ($s=0.5$) %16'ya yakın fark görülmektedir. Burulma yükü için M.K. Ramezani ve ark. [17] $\beta = 45^\circ$ için değişik çatlak şekil oranlarında boyutsuz K_I karşılaştırmaları Şekil 3.23'te görülmektedir. Çatlak önü derinlik bölgesinde sonuçlar yakın elde edilirken serbest yüzey bölgelerinde de sonuçlar birbirine paraleldir. Burulma yükünde $\beta = 0^\circ$ için açılma modu aktif olmadığından dolayı kayma ve yırtılma modu kıyaslamaları elde edilmiştir. M.K. Ramezani ve ark. [18] boyutsuz K_{II} ve K_{III} dağılımları ile FRAC3D çözümlerinin karşılaştırılması Şekil 3.24-3.25'te verilmiştir. Şekil 3.24'te boyutsuz K_{II} dağılımlarında farklılık gözlenmiştir. Boyutsuz K_{III} için serbest yüzeylerde sonuçların yakın olduğu, derinlik bölgesinde ise sonuçların oldukça uzak olduğu görülmüştür.



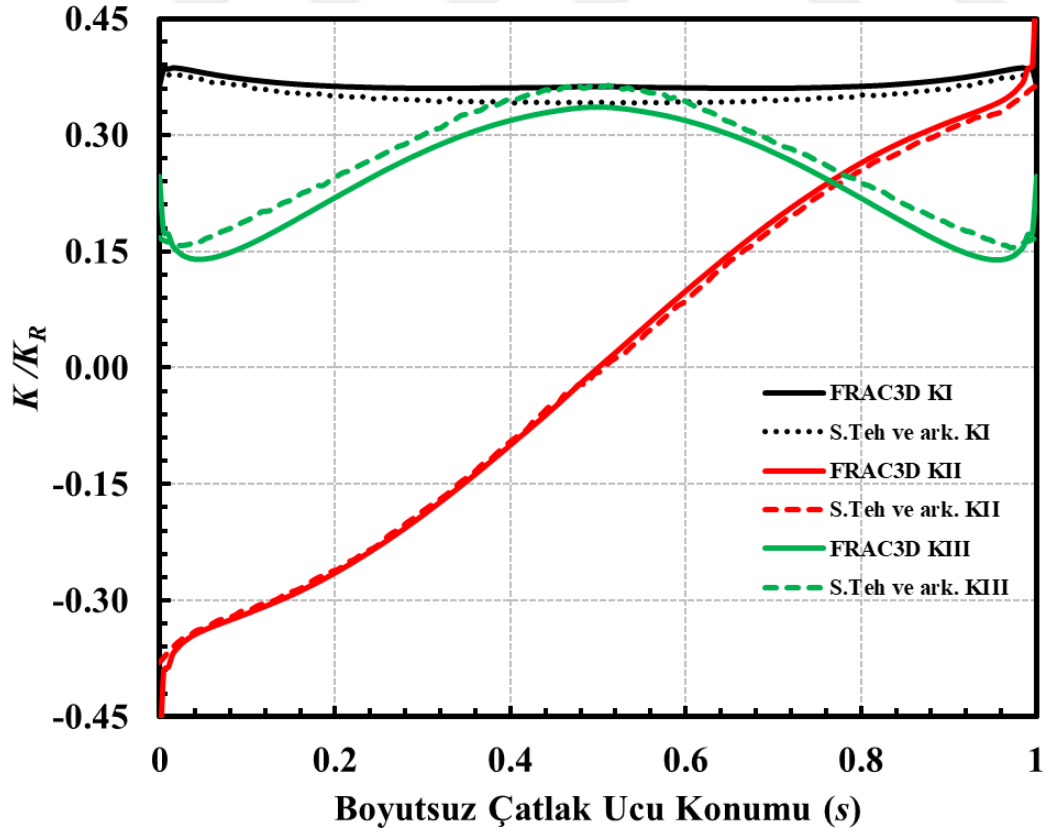
Şekil 3.18. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$, $\beta =45^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Eksenel gerilme, [19]).



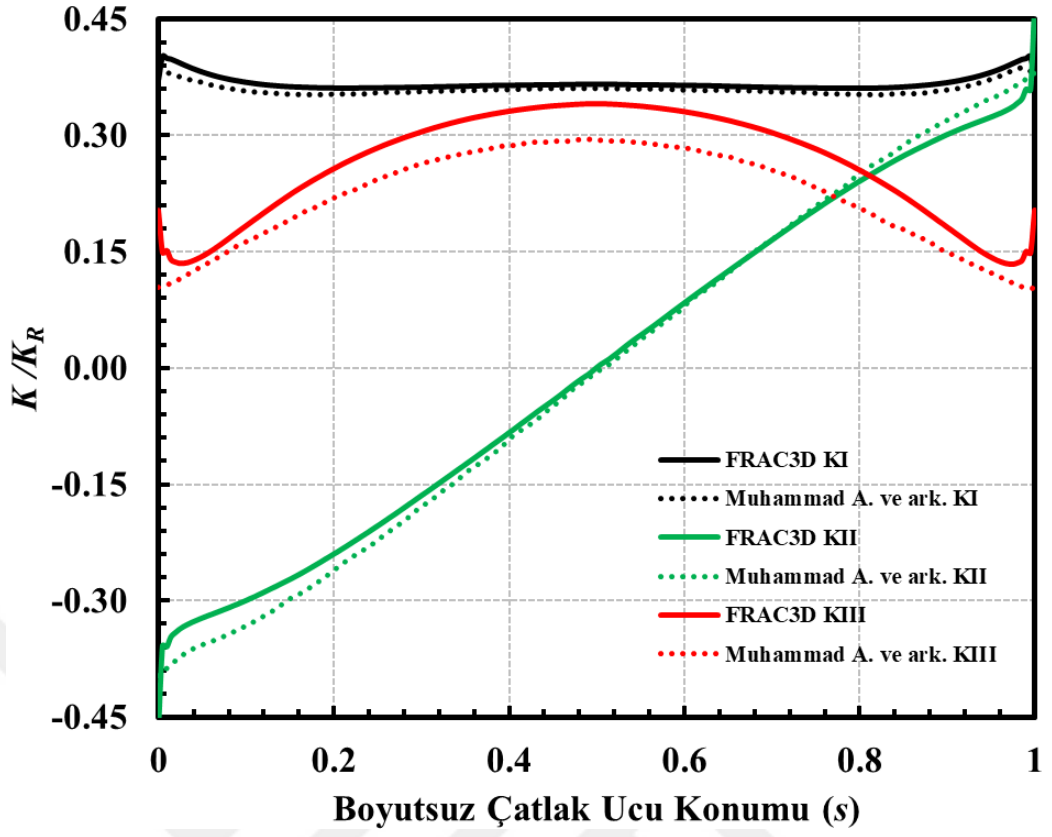
Şekil 3.19. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$, $\beta =45^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Eksenel gerilme, [19]).



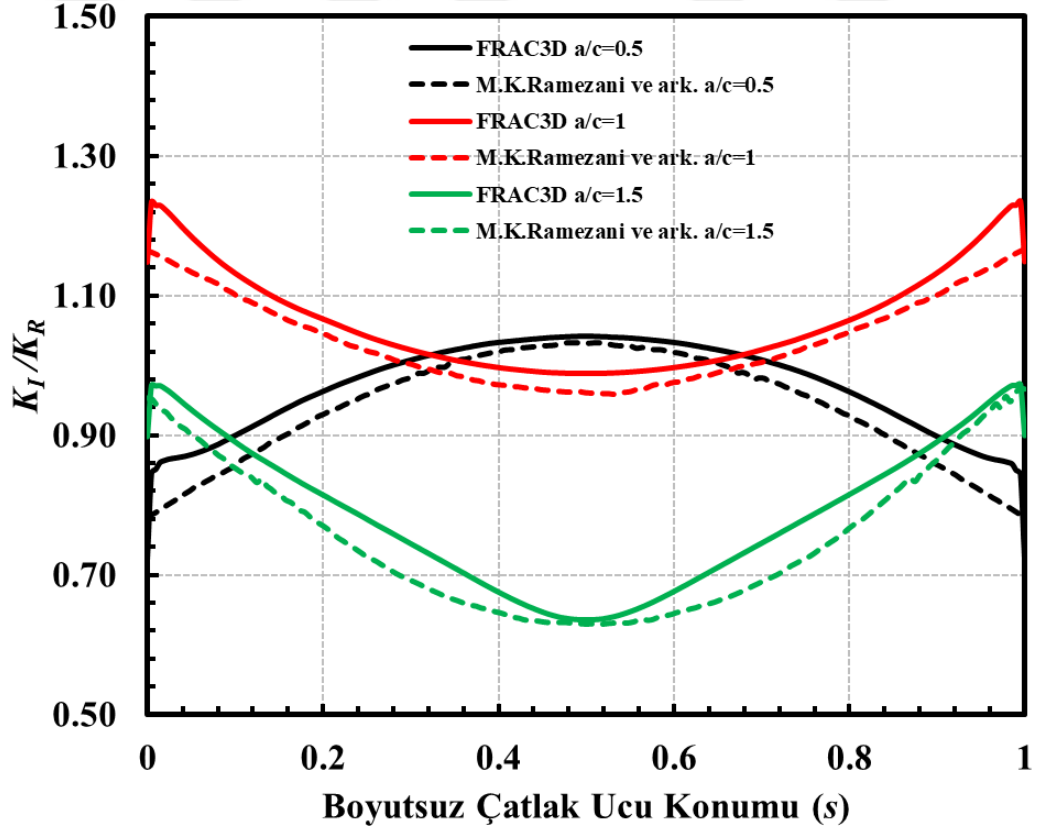
Şekil 3.20. $a/c=1$, $a/D=0.05$, $\beta =45^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Eksenel gerilme, [19]).



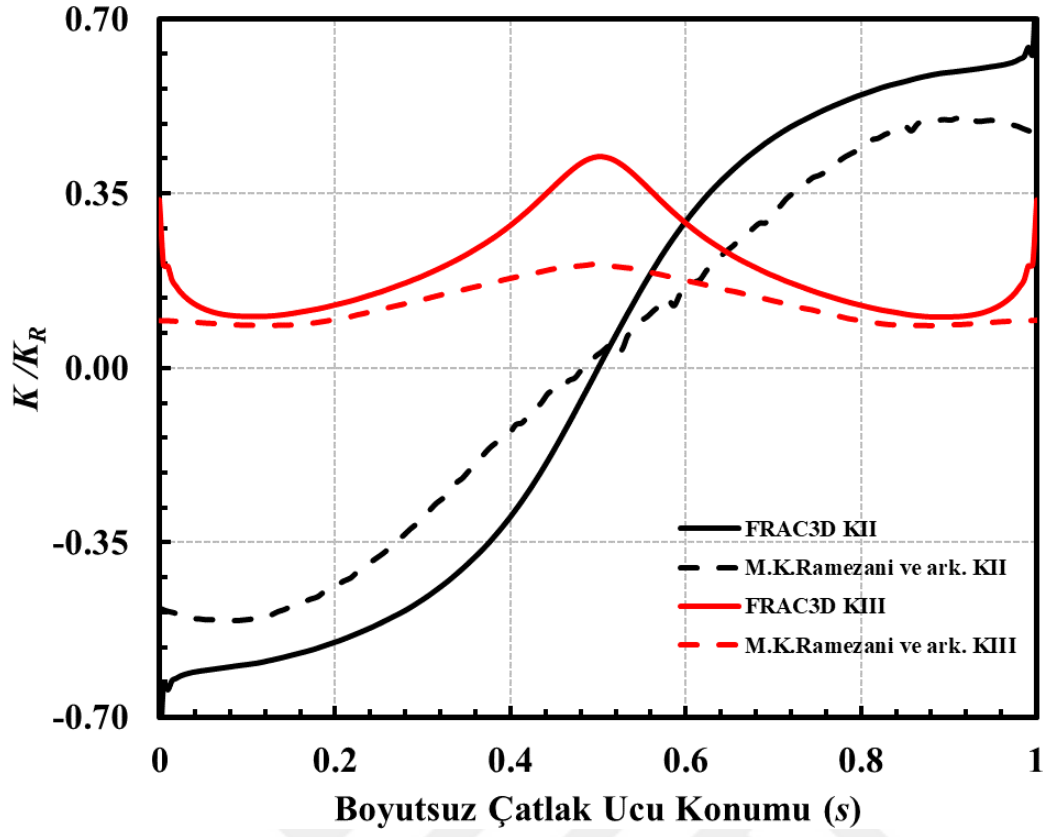
Şekil 3.21. $a/c=1$, $a/D=0.1$, $\beta =45^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Eksenel gerilme, [19]).



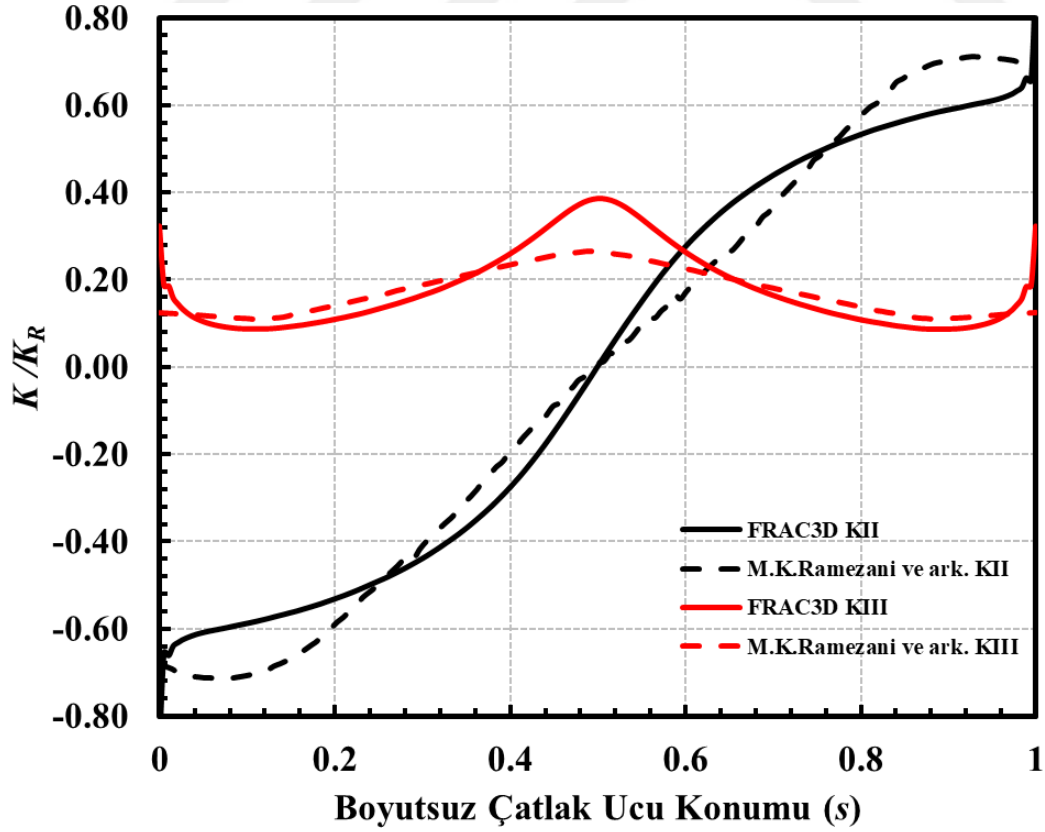
Şekil 3.22. $a/c=0.75$, $a/D=0.05$, $\beta=22.5^\circ$ için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Burulma yükü, [21]).



Şekil 3.23. $a/D=0.05$, $\beta=45^\circ$ değişik çatlak şekil oranları için boyutsuz K_I sonuçlarının kıyaslanması (Burulma yükü, [17]).



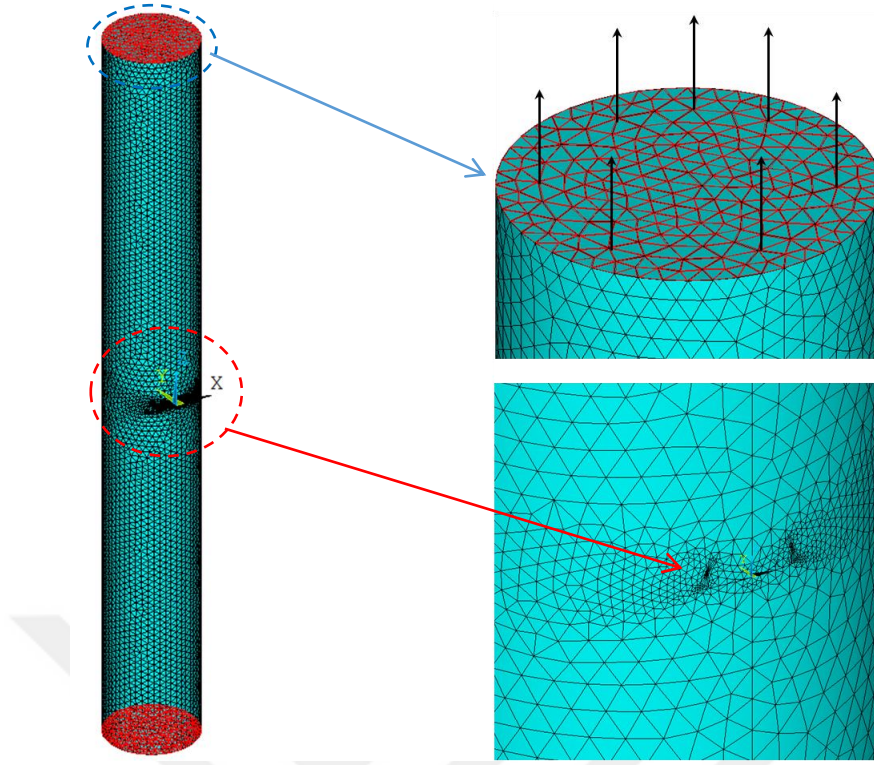
Şekil 3.24. $a/c=2$, $a/D=0.05$, $\beta=0^\circ$ için boyutsuz K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Burulma yükü, [18]).



Şekil 3.25. $a/c=2$, $a/D=0.1$, $\beta=0^\circ$ için boyutsuz K_{II} ve K_{III} sonuçlarının kıyaslanması (Burulma yükü, [18]).

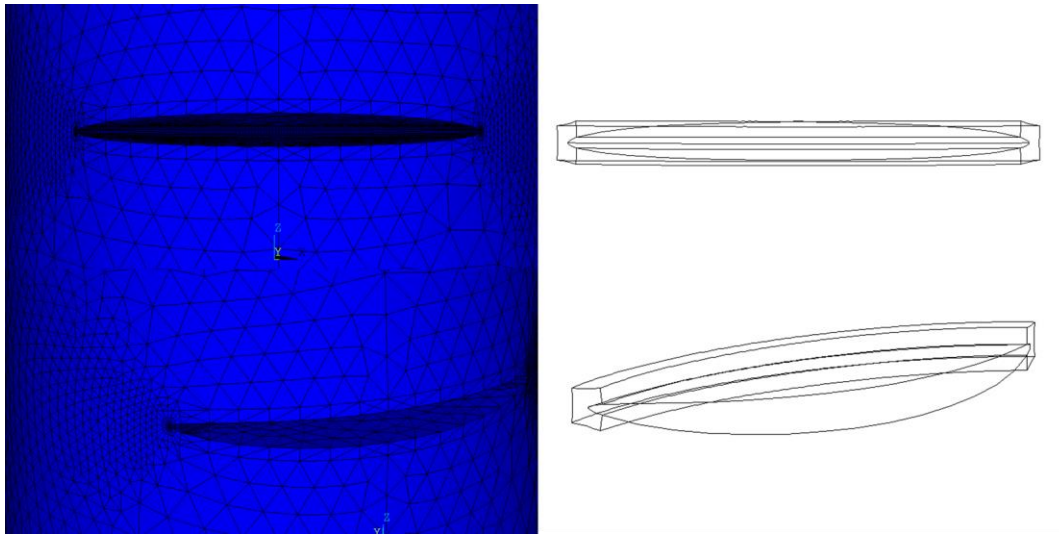
3.2. Eksenel Üniform Gerilmeye Maruz Katı Silindirik Yapıda Bulunan Dönmüş Çatlak Analizleri

Bu bölümde eksenel üniform gerilmeye maruz katı bir silindirdeki dönmüş yarı eliptik bir yüzey çatlağı için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} dağılımları verilmektedir. Çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı olan a/c değerleri 0.25, 0.5, 1.0, 2.0; çatlak derinliği/katı silindir çapı oranı olan a/D değerleri sırasıyla 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8; çatlak ile yatay eksen arasındaki açı parametresi olan α değerleri sırasıyla 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° seçilmiştir. Boyutsuz çatlak ucu konumu, her iki serbest yüzey noktası arasında çatlak önü boyunca 0 ve 1 aralığında değişmektedir. Gerilme şiddet faktörlerinin her bir değeri elde edilen değerin karşılığı olarak grafiklerde yerini almıştır. Çatlak derinliğini tanımlamak için kullanılan a parametresi, tüm modellemelerde 1 birim olarak seçilmiştir. Katı silindirin yarım boy yüksekliği çapın katları şeklinde ayarlanmıştır. $a/D=0.05$ için 3, $a/D=0.1$ için 4 ve diğerleri için de 5 katı olacak şekilde sonlu eleman (öge) modelleri oluşturulmuştur. Modellerde daha iyi mesh kalitesi elde edebilmek için silindirler üç kısma bölünmüştür. ANSYS Mechanical APDL [25] arayüzünde modeller oluşturularak yapılan tüm işlem adımlarında kolaylık sağlaması açısından programın ürettiği kodlar File=>Log File komutu kullanılarak not defterine kaydedilmiştir. Sınır şartları tanımlanıp katı silindirin alt ve üst kısmına eksenel gerilme yükü verilmiştir. Katı silindirin hareketini kısıtlamak için farklı noktalardan sabitleme yapılmıştır. Alt tabanda çeyrek daire dilimlerine karşılık gelen 4 adet anahtar noktası bulunmaktadır. Bu noktalardan birinden üç eksenle, karşısında bulunan noktadan iki eksenle ve başka bir noktadan tek eksenle sabitlenmiştir. Sonraki aşamada FCPAS verileri yardımıyla gerekli *.geo ve *.run dosyaları oluşturularak kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. FRAC3D kullanılarak hesaplanan K_I , K_{II} ve K_{III} değerleri uygulanan yüke bağlı bir referans K_R değeri ile denklem 3.2'deki denklem yardımıyla normalize edilmiştir. Şekil 3.26'da eksenel gerilme yüküne maruz katı silindirin sonlu ögeler modeli sunulmaktadır.



Şekil 3.26. $a/c=1$, $a/D=0.1$, $\alpha =75^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlağına sahip bir katı silindirin global sonlu elemanlar modeli, eksenel gerilme yüklemesi ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.

Çatlak ile yatay eksen arasındaki açının sıfır olduğu durum sadece K_I değerlerini üretir ve dönme açısı arttıkça K_{II} ve K_{III} değerleri de oluşur. Grafiklerin daha iyi anlaşılabilmesi için kesikli ve noktalı çizgilerden de faydalanılmıştır. Şekil 3.27’de yüzey çatlağının açılma deformasyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.27. Eksenel gerilme yükü altında yatay düzlem ile 0° açı yapan yüzey çatlağının açılma durumu[25].

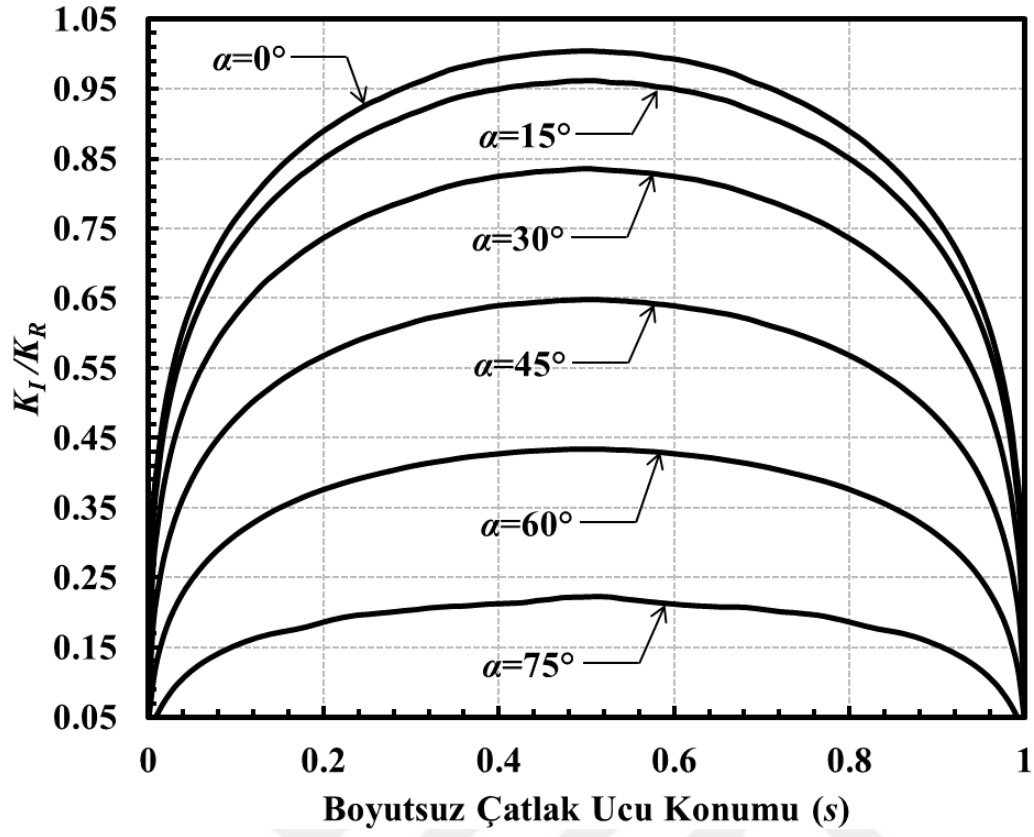
Bu bölümde yapılan analizler sonucu hesaplanan boyutsuz gerilme şiddet faktörlerinin çatlak önü boyunca dağılımları, verilen bir a/c ve a/D değeri için ayrı grafik içerisinde ve her grafik farklı dönme açılarını kapsayacak şekilde, Şekil 3.28-3.87’de verilmektedir. Analiz edilen ilk durum problem olan, $a/c=0.25$ ve $a/D=0.05$ için mod-I, mod-II ve mod-III boyutsuz GŞF dağılımları, sırasıyla, Şekil 3.28, 3.29 ve 3.30’da verilmektedir.

Açılma modu analizlerinde boyutsuz K_I değerleri çatlak önü boyunca çatlağın yatay ile 0 derece açı yaptığı durumlarda en yüksek değeri almaktadır. Boyutsuz K_I değerleri, çap küçüldükçe (boyutsuz çatlak derinliği arttıkça) artmakta, çatlak ile yatay eksen arasındaki dönme açısı arttıkça azalmaktadır. Verilen problem, derinlik noktasından geçen dikey düzleme göre simetrik olduğundan, boyutsuz K_I dağılımları da, derinlik noktasına göre serbest yüzeyden diğer serbest yüzeye doğru simetriktir (Şekil 3.28).

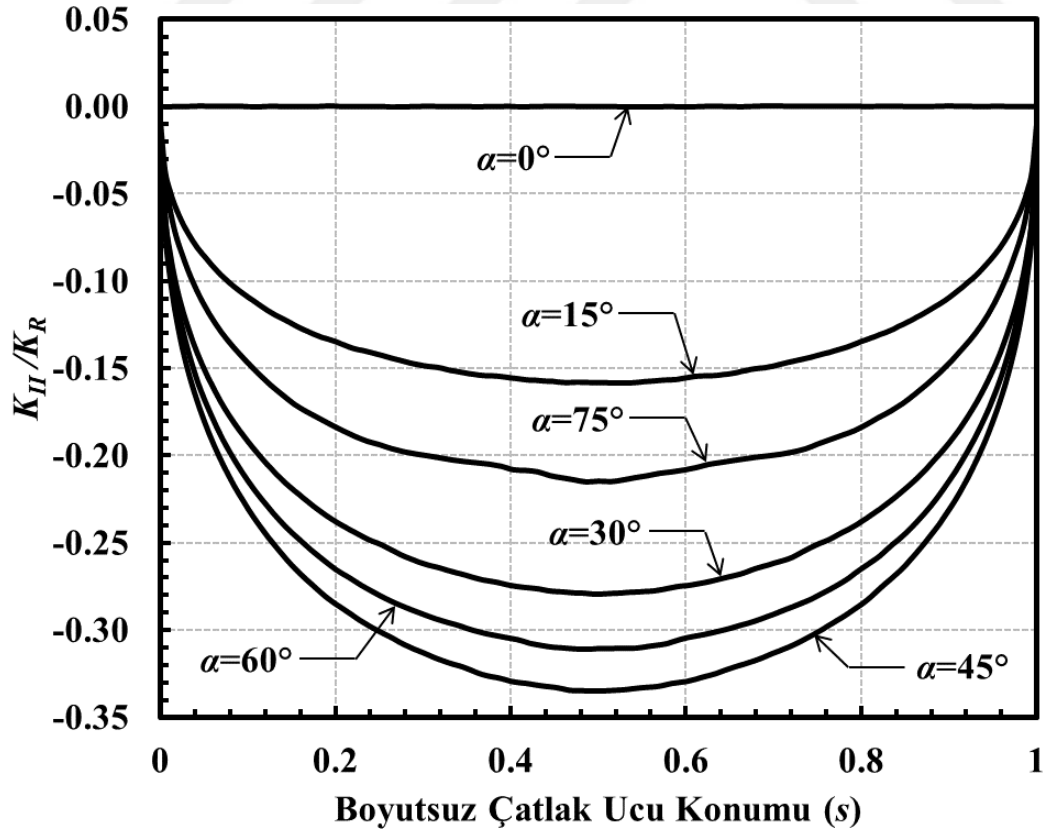
Kayma modu analizlerinde en yüksek boyutsuz K_{II} değerleri, maksimum kayma gerilmesinin olduğu düzlemedir. Çatlak ile yatay eksen arasında açının olmadığı durumlarda boyutsuz K_{II} değeri 0’dır. Genelde birbirini 90 dereceye tamamlayan (15-75 ve 30-60 derece) açılarda boyutsuz K_{II} değerleri birbirine yakındır. Boyutsuz K_{II} dağılımları da, serbest yüzeyden diğer serbest yüzeye doğru simetriktir (Şekil 3.29).

Yırtılma modu analizlerinde boyutsuz K_{III} dağılımları Şekil 3.30’da verilmiştir. Dönme açısı 0 derece olduğu durumlarda boyutsuz K_{III} değerleri 0’dır. Boyutsuz K_{III} dağılımları serbest yüzeyden diğer serbest yüzeye doğru anti-simetriktir.

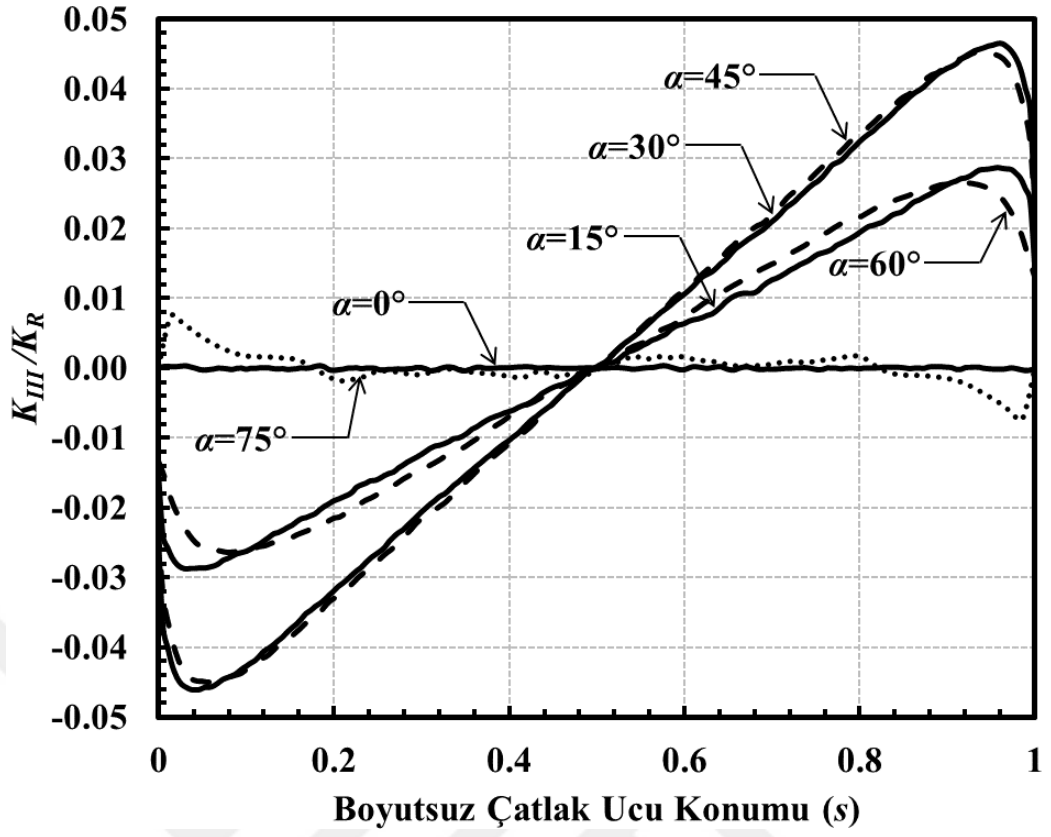
Eksenel üniform yükleme altındaki diğer tüm çatlak şekil oranı (a/c) ve boyut (a/D) durumlarında her üç mod için gerilme şiddet faktörlerinin grafikleri Şekil 3.28-3.99’da görülmektedir. Modellerde ele alınan silindir yüksekliğinin yeterli olduğunun kontrol edilmesi amacıyla, $a/D=0.05$ için $a/c=0.5$ ve 2 oranlarında silindir yükseklikleri iki katına çıkarılmıştır. Buna bağlı olarak eleman ve düğüm noktası sayılarındaki artış nedeniyle analizlerin çözüm süreleri de artmıştır. Şekil 3.88-3.99’da görüldüğü gibi karışık mod GŞF dağılımlarında kayda değer bir değişim görülmemiştir.



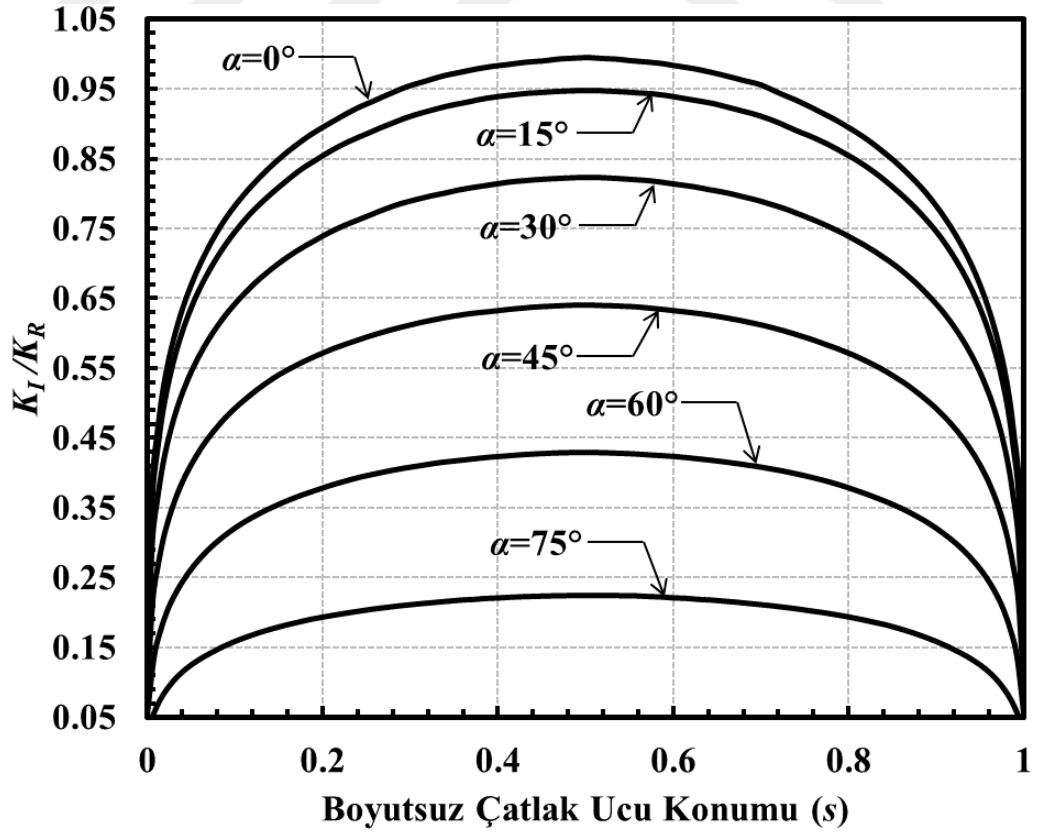
Şekil 3.28. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



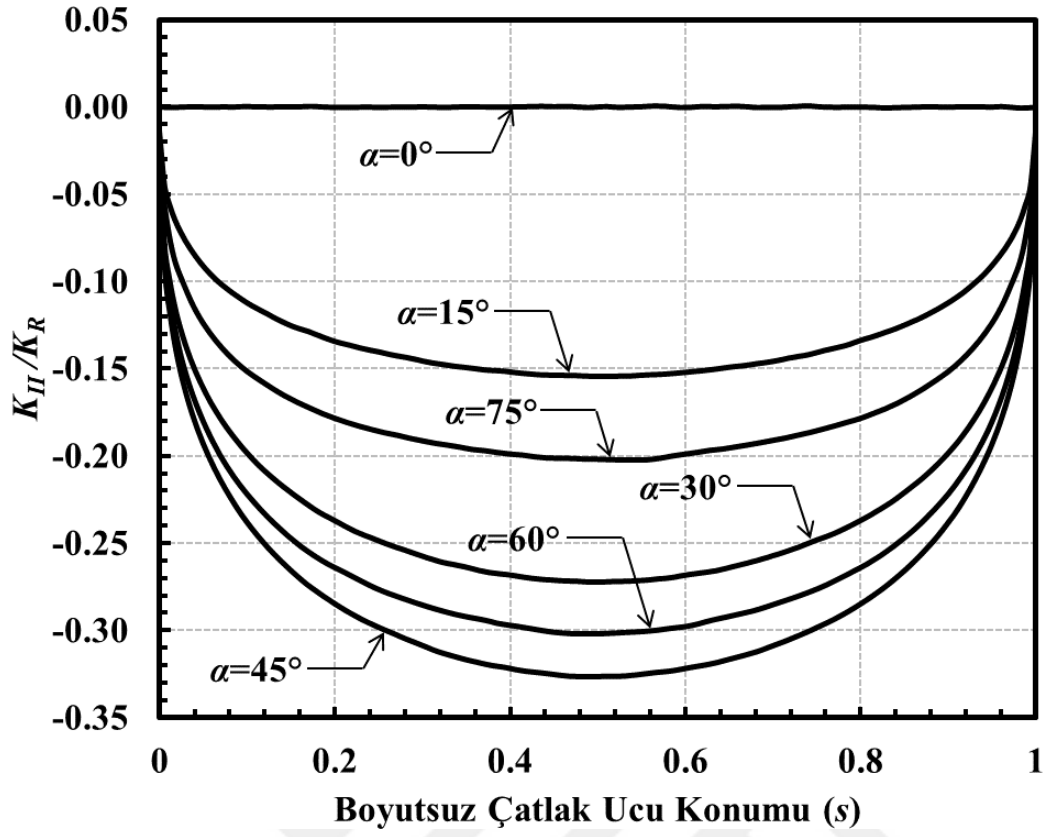
Şekil 3.29. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



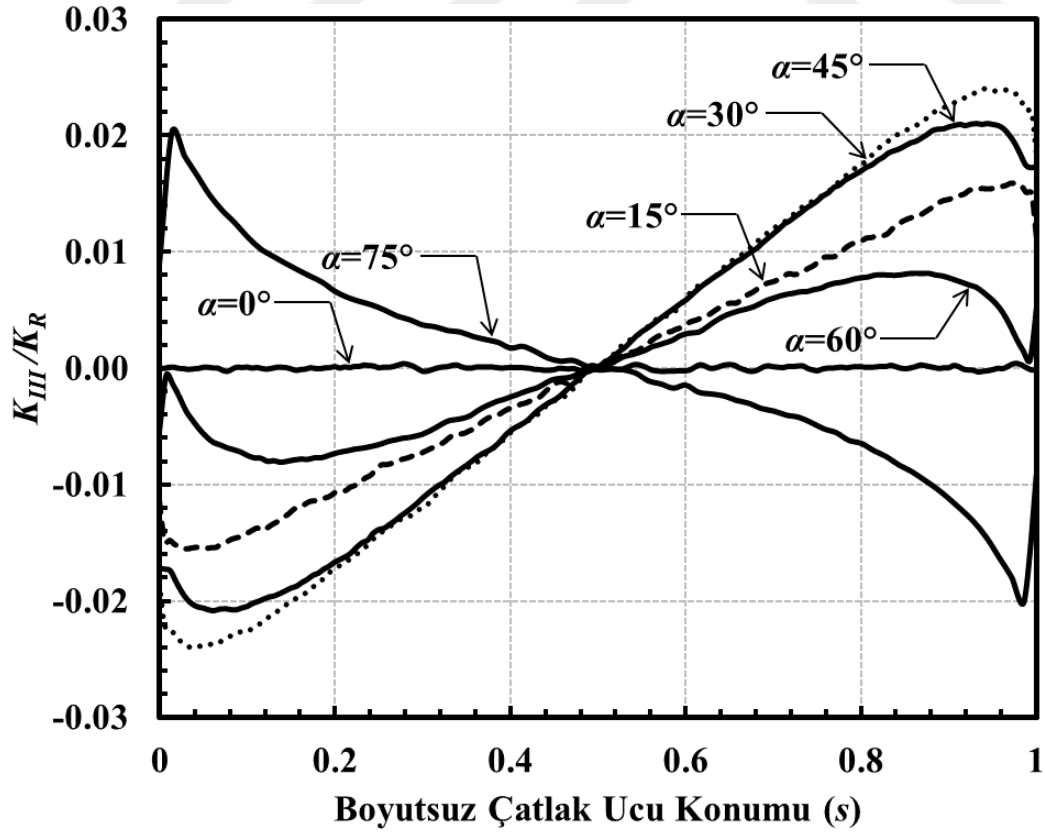
Şekil 3.30. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



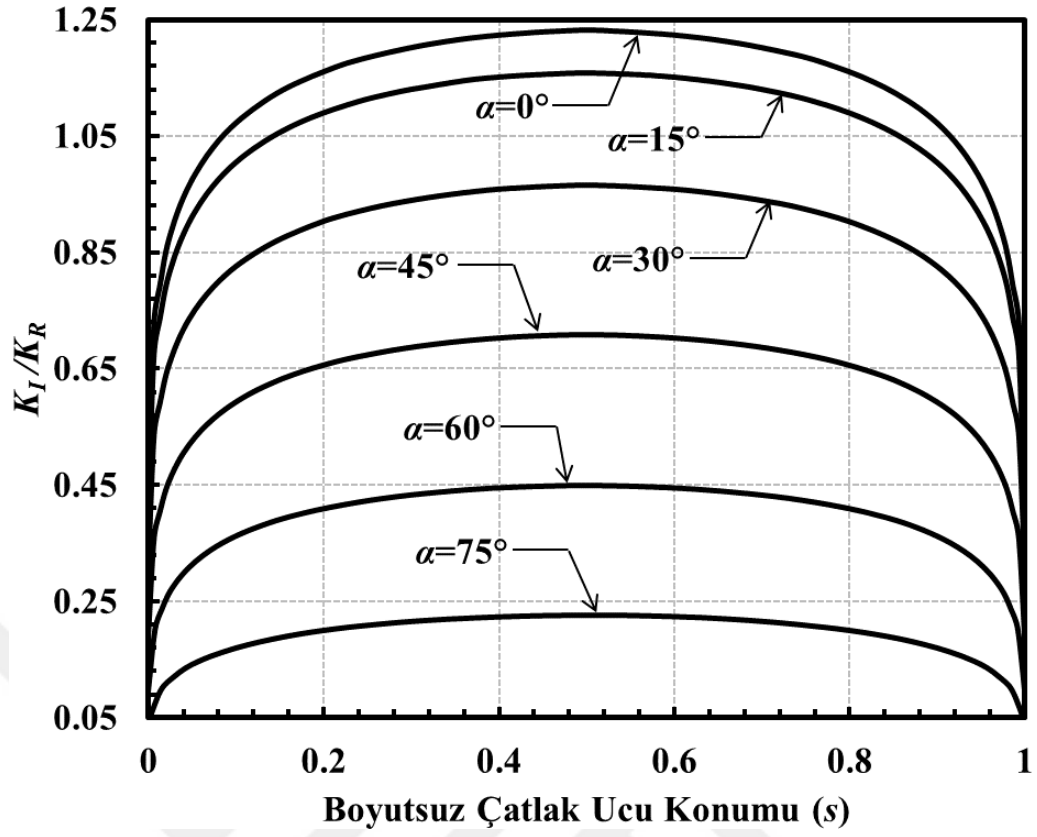
Şekil 3.31. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



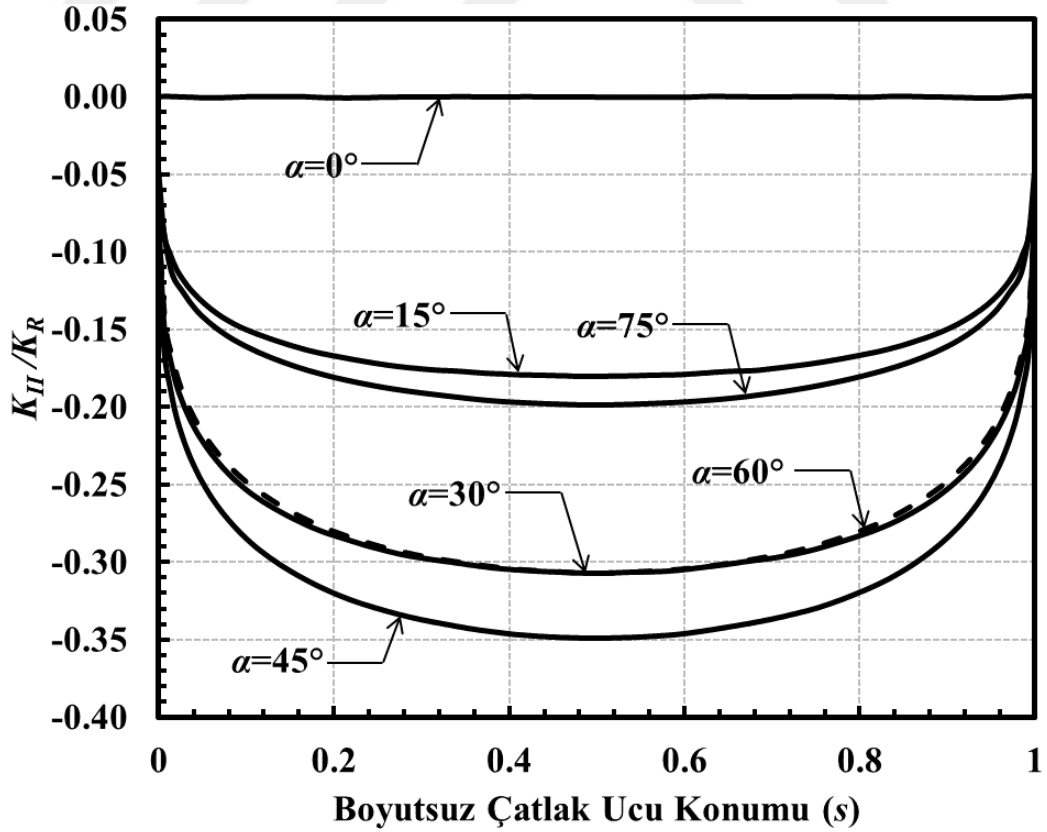
Şekil 3.32. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



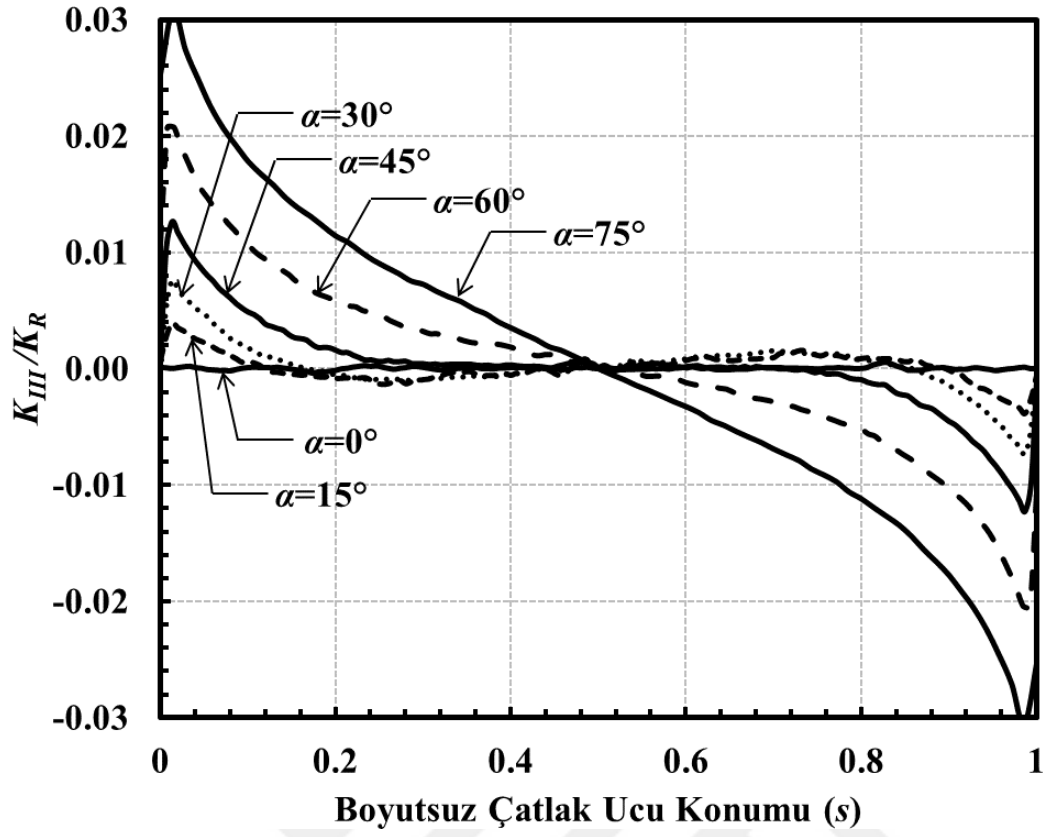
Şekil 3.33. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



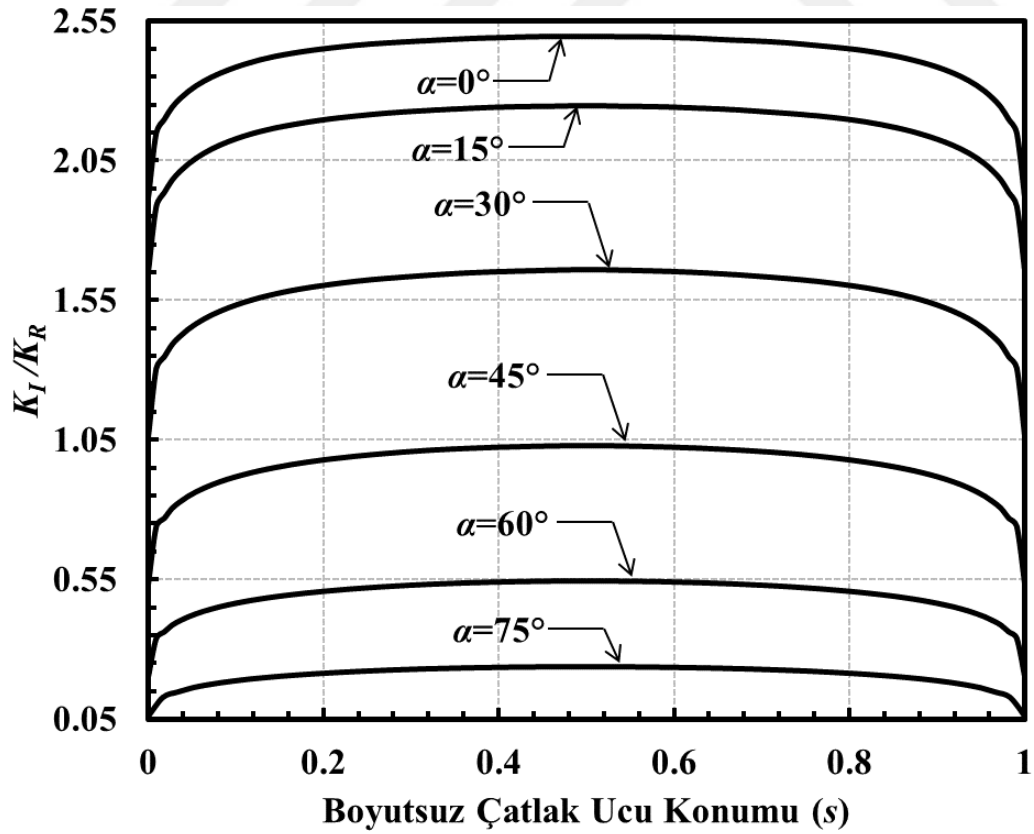
Şekil 3.34. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



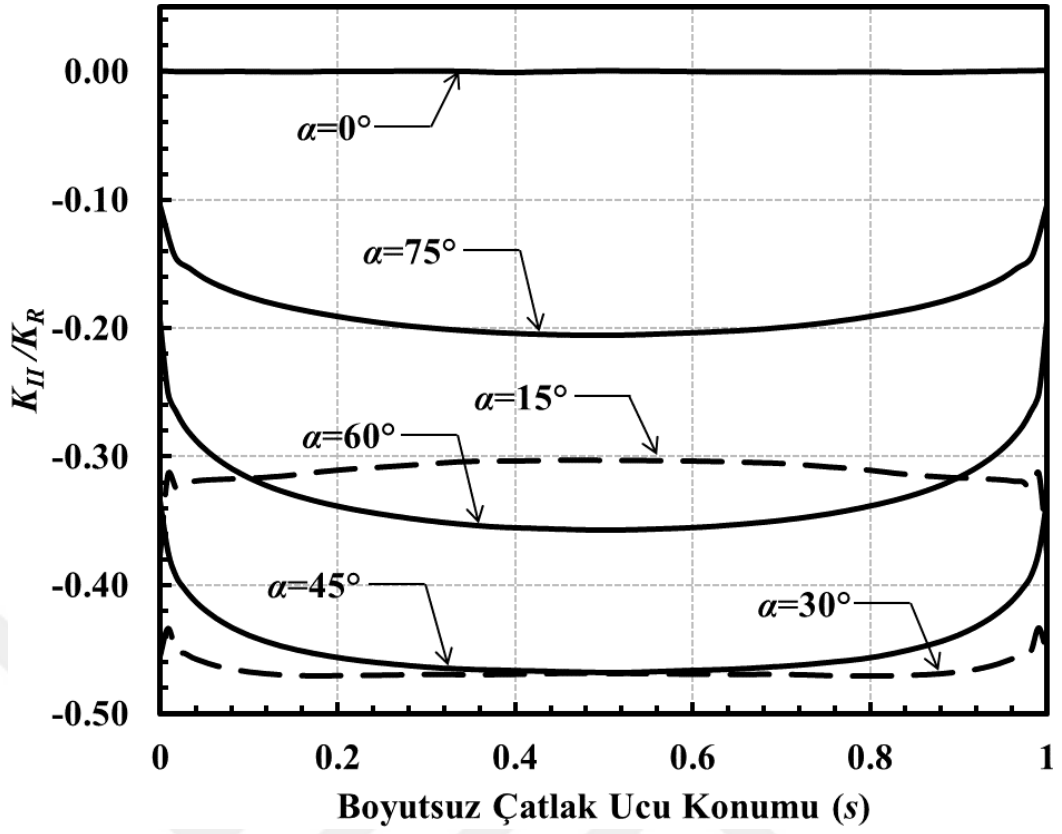
Şekil 3.35. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



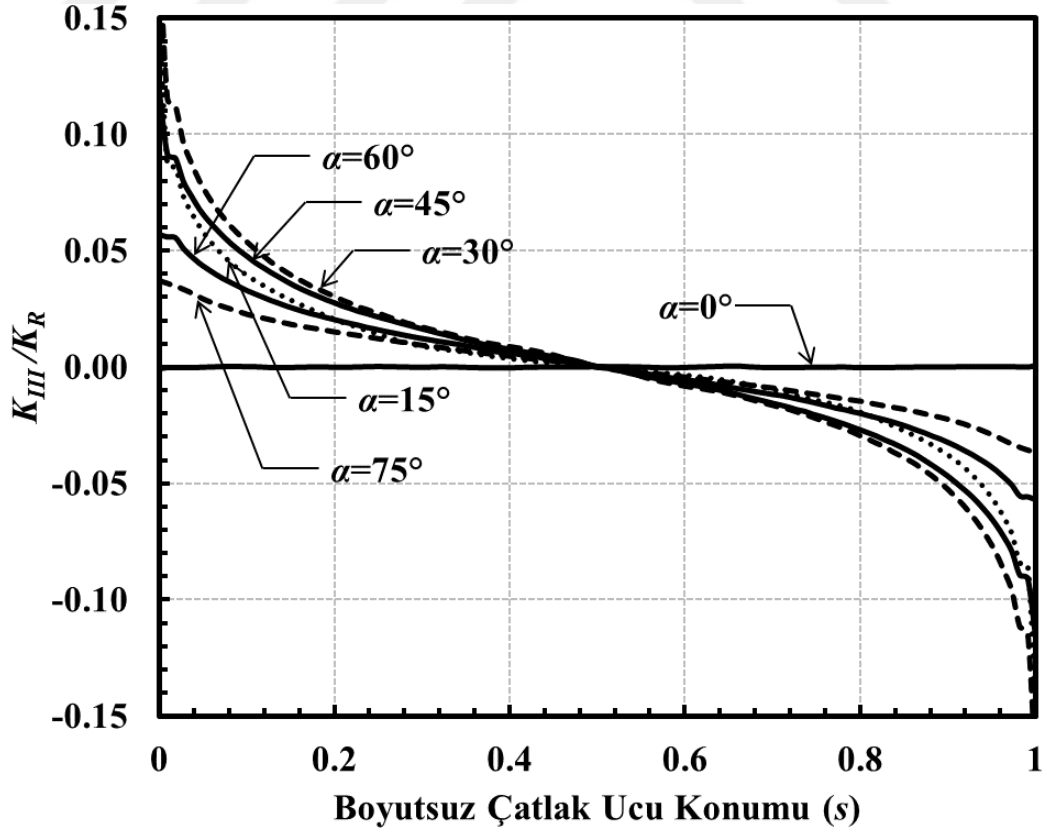
Şekil 3.36. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



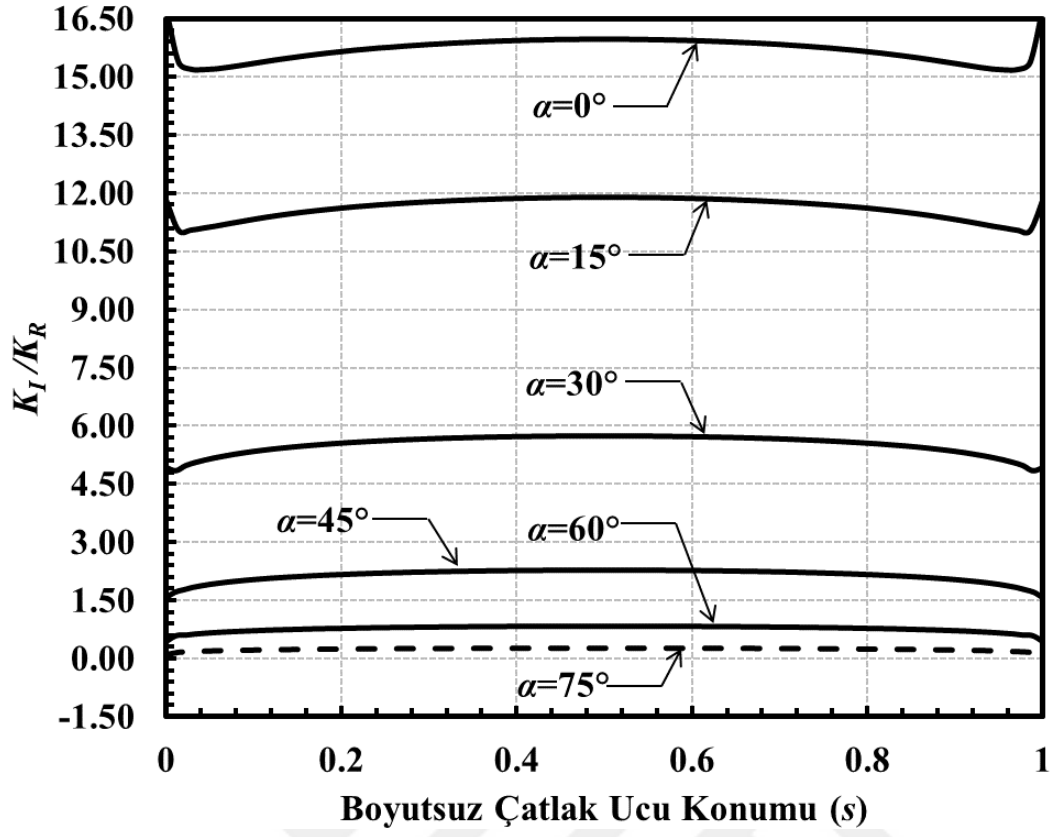
Şekil 3.37. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



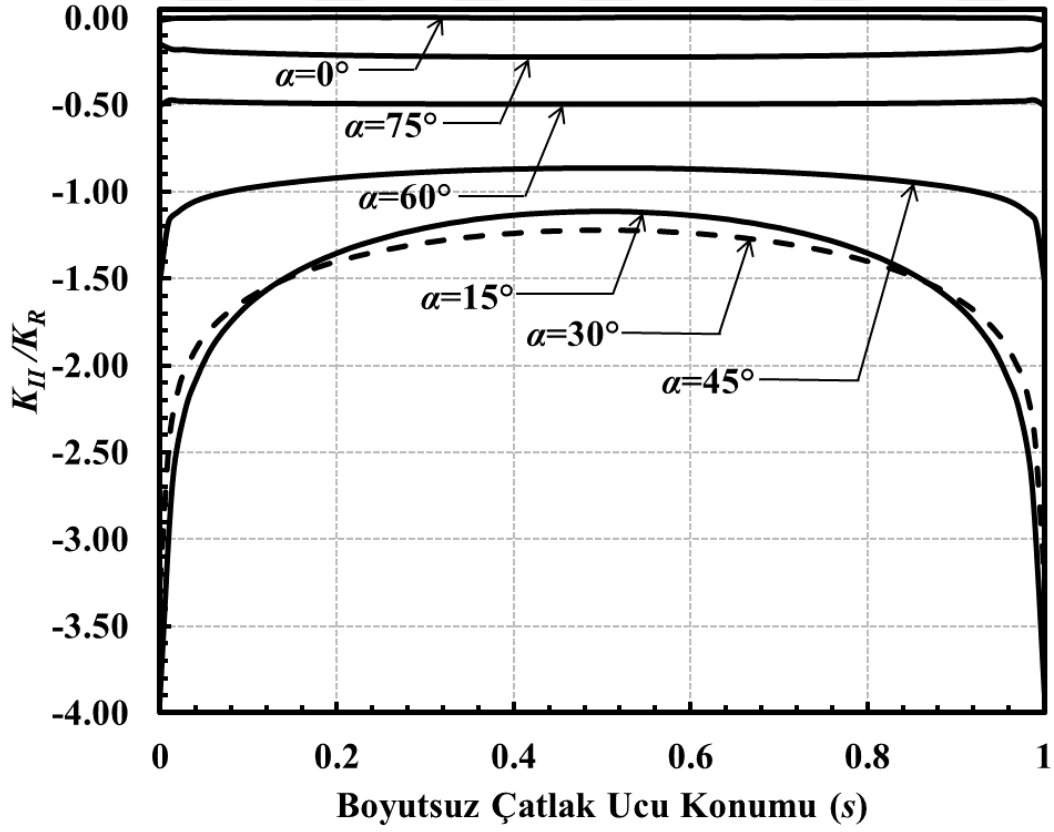
Şekil 3.38. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



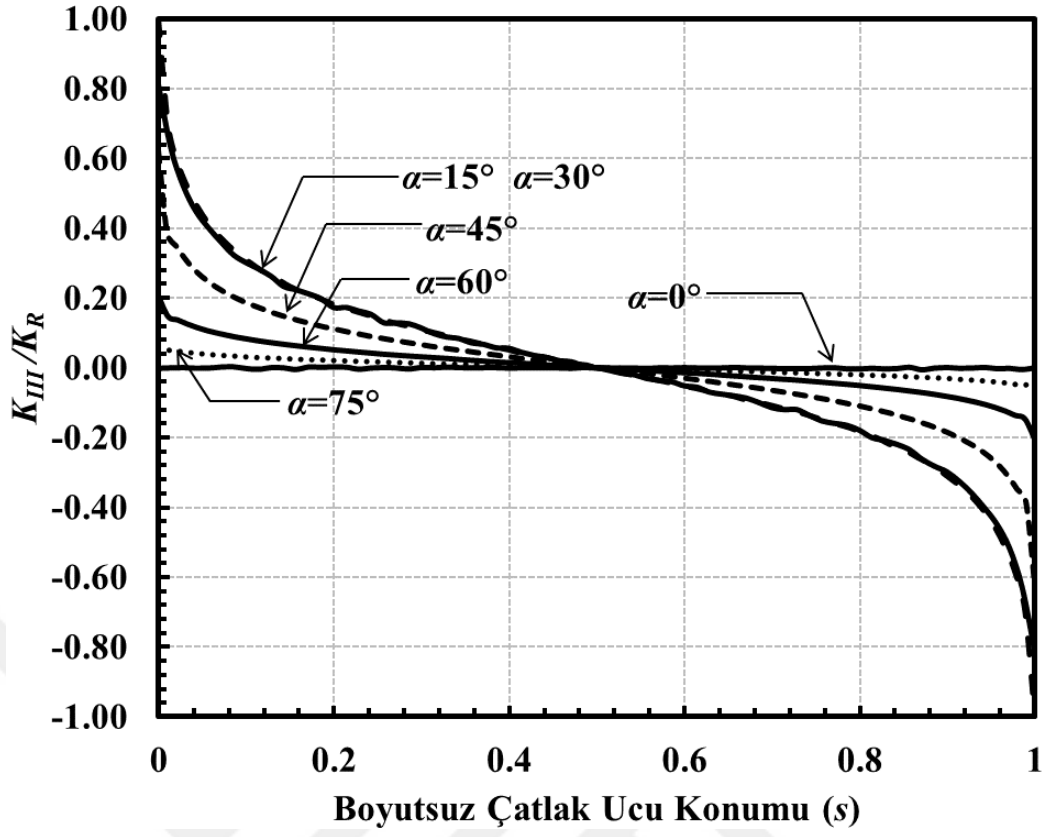
Şekil 3.39. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



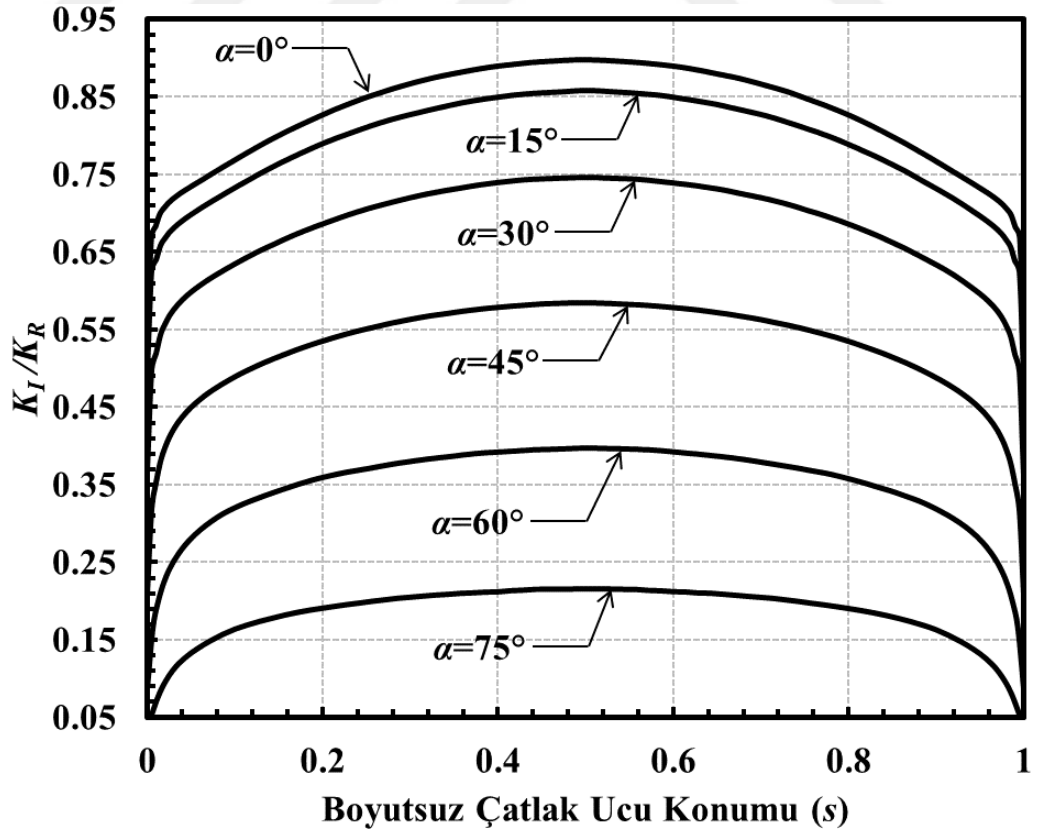
Şekil 3.40. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



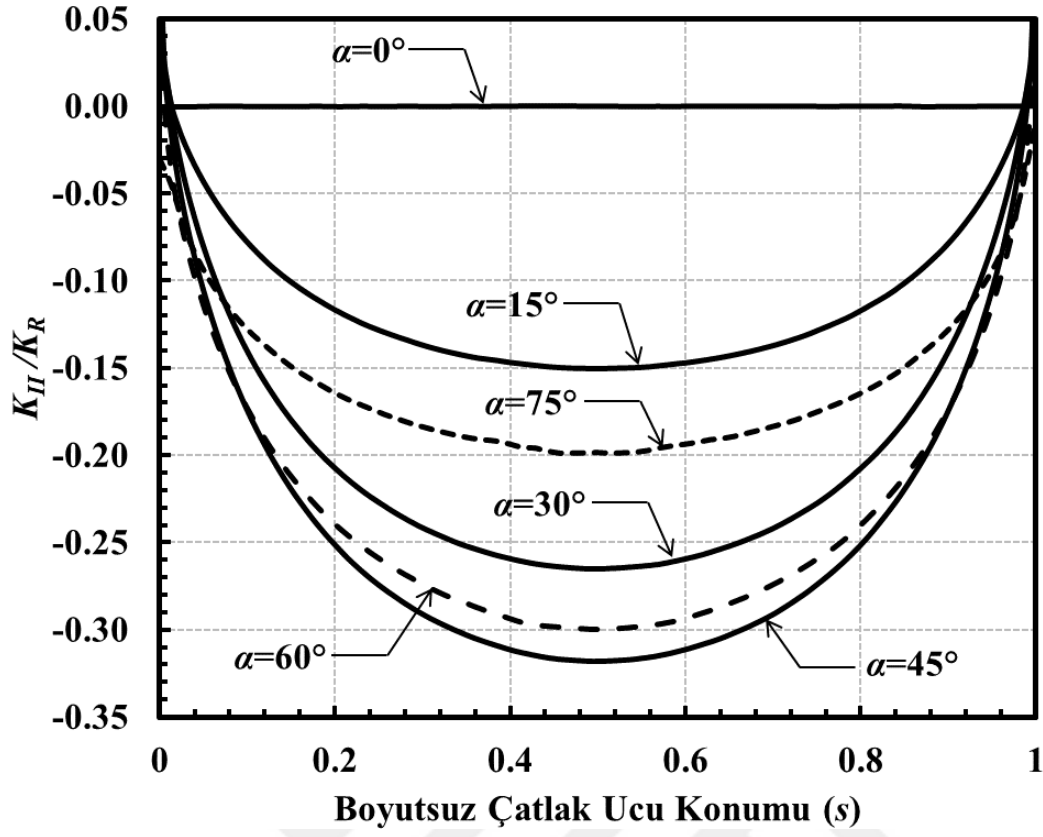
Şekil 3.41. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



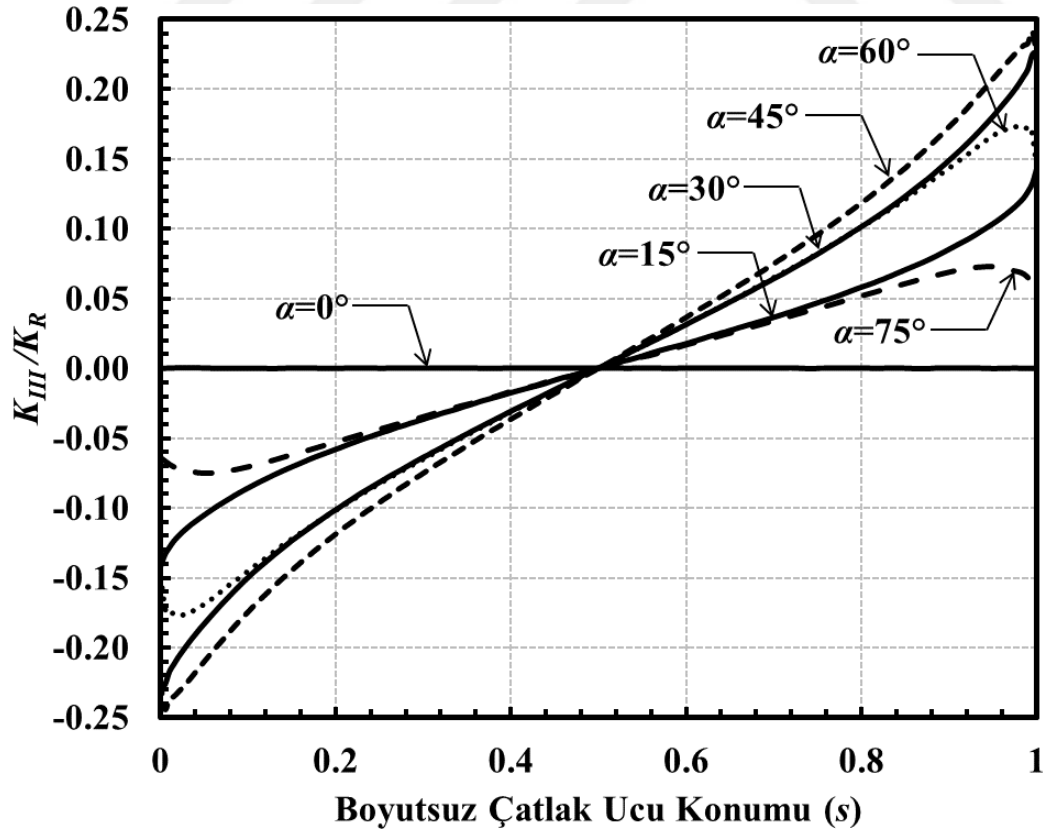
Şekil 3.42. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



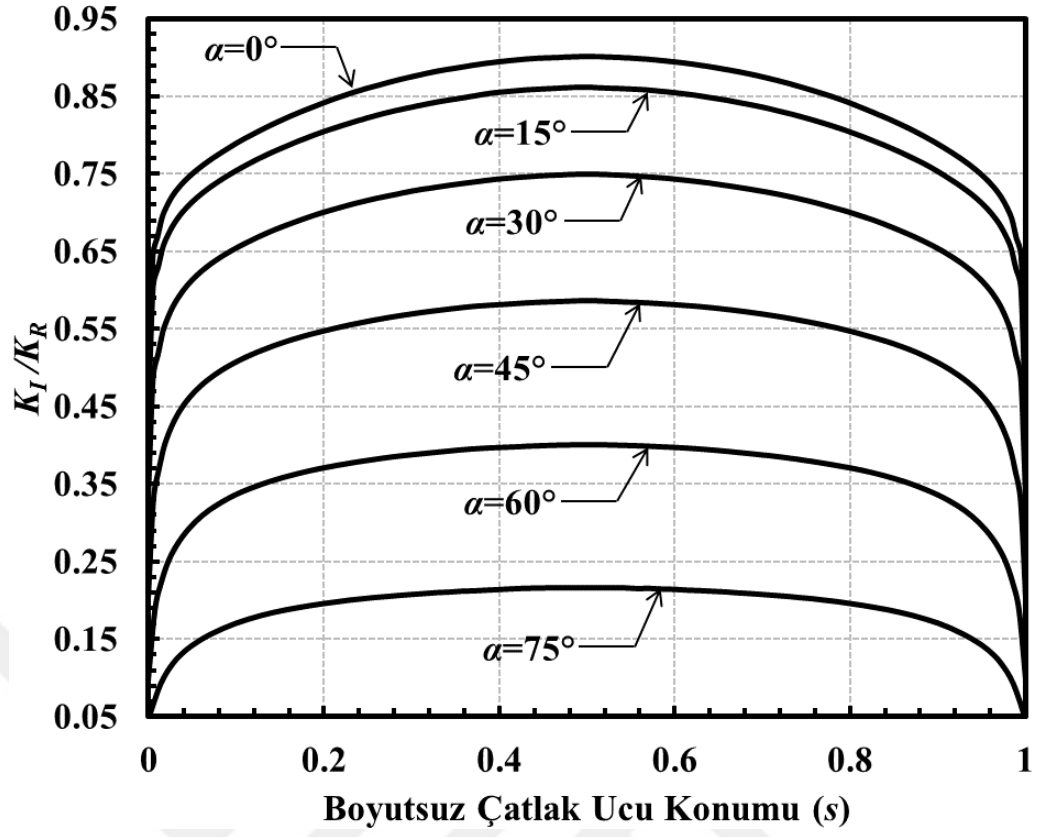
Şekil 3.43. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



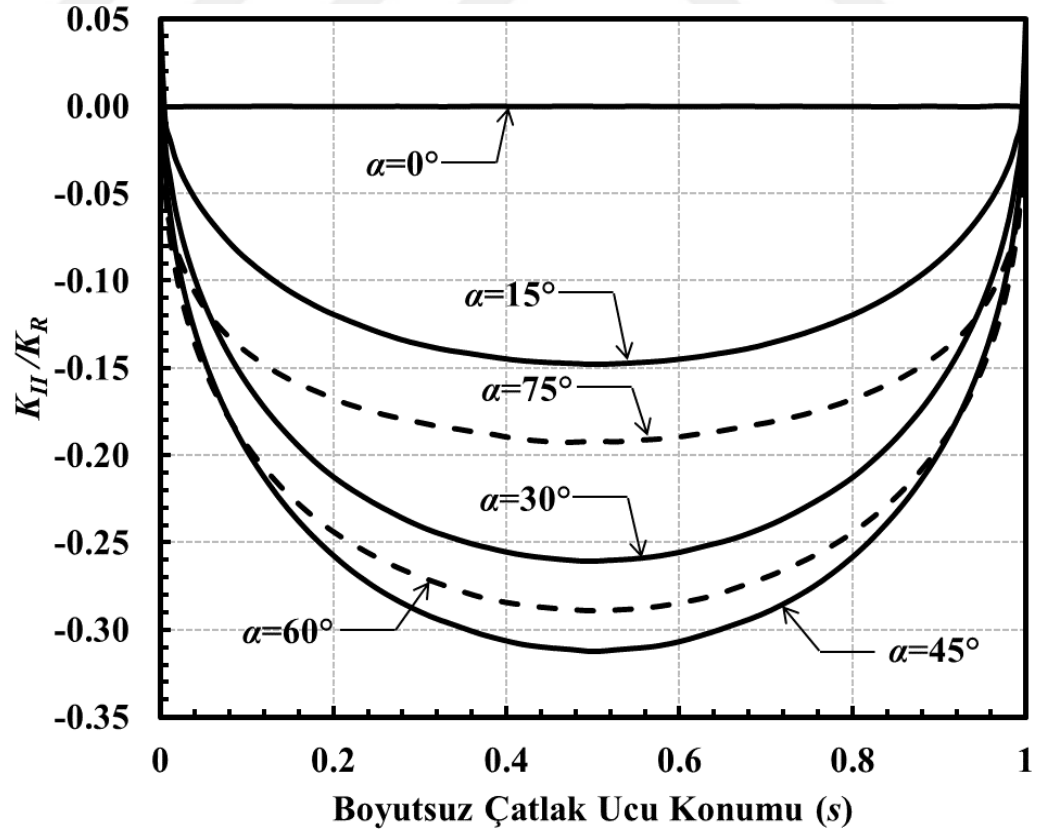
Şekil 3.44. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



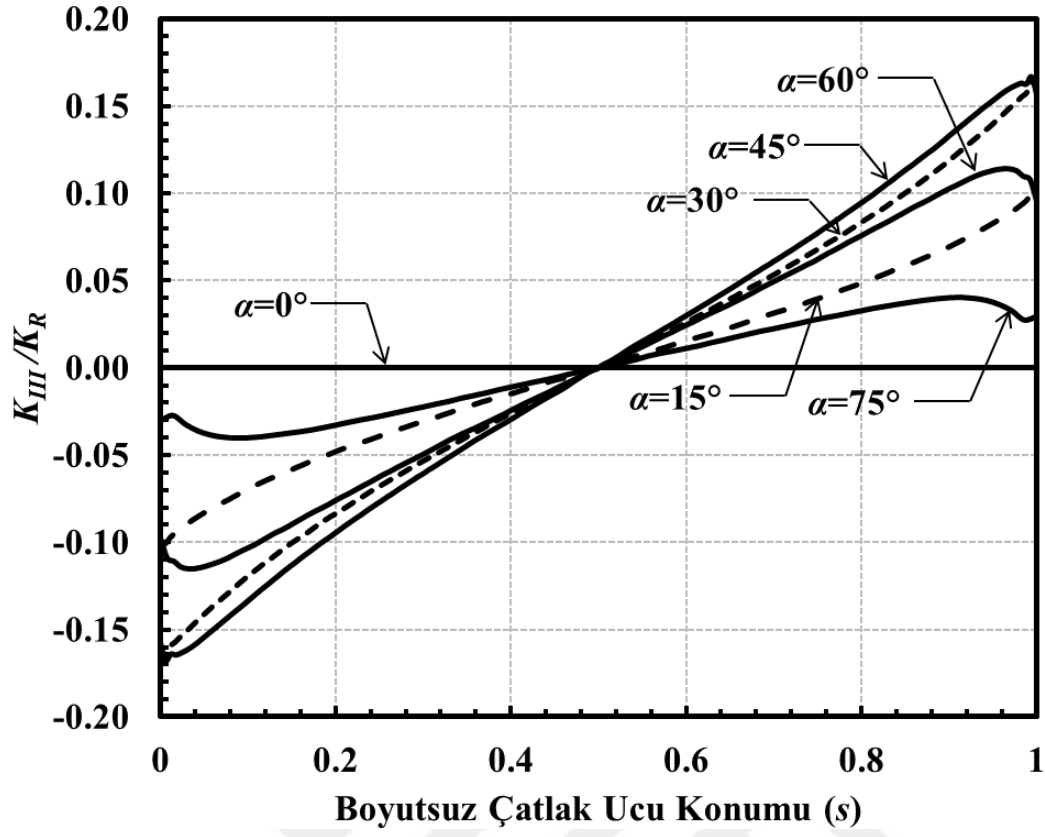
Şekil 3.45. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



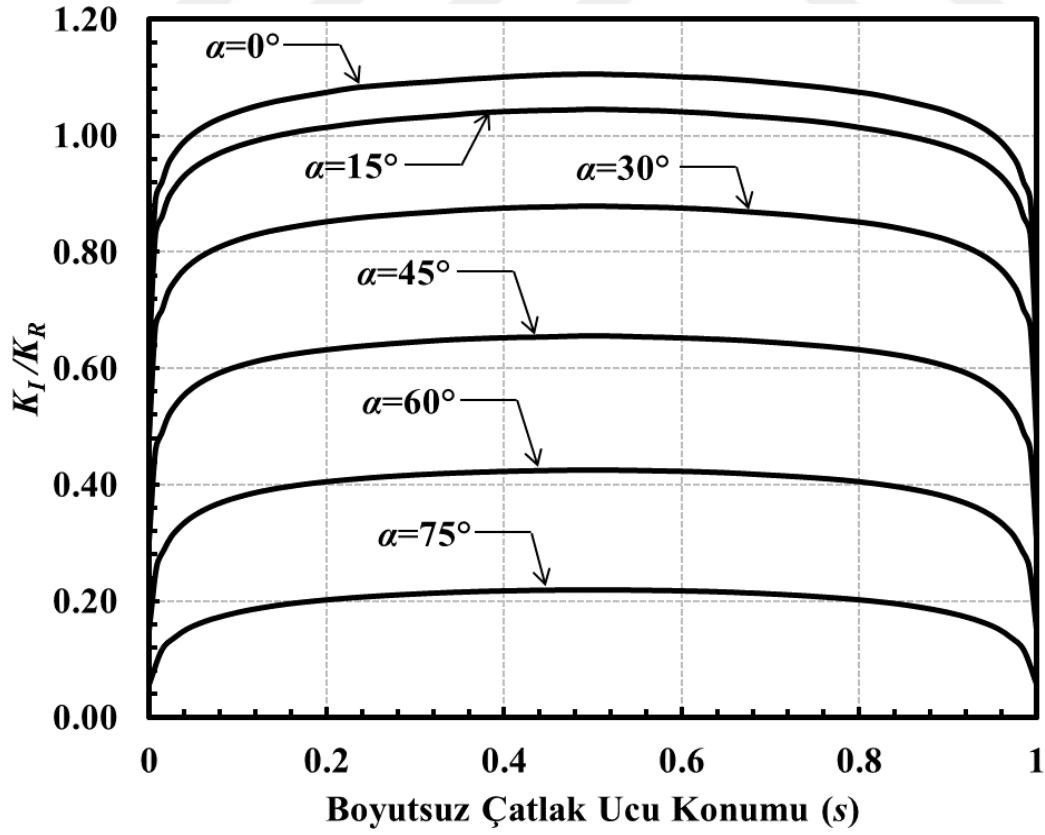
Şekil 3.46. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



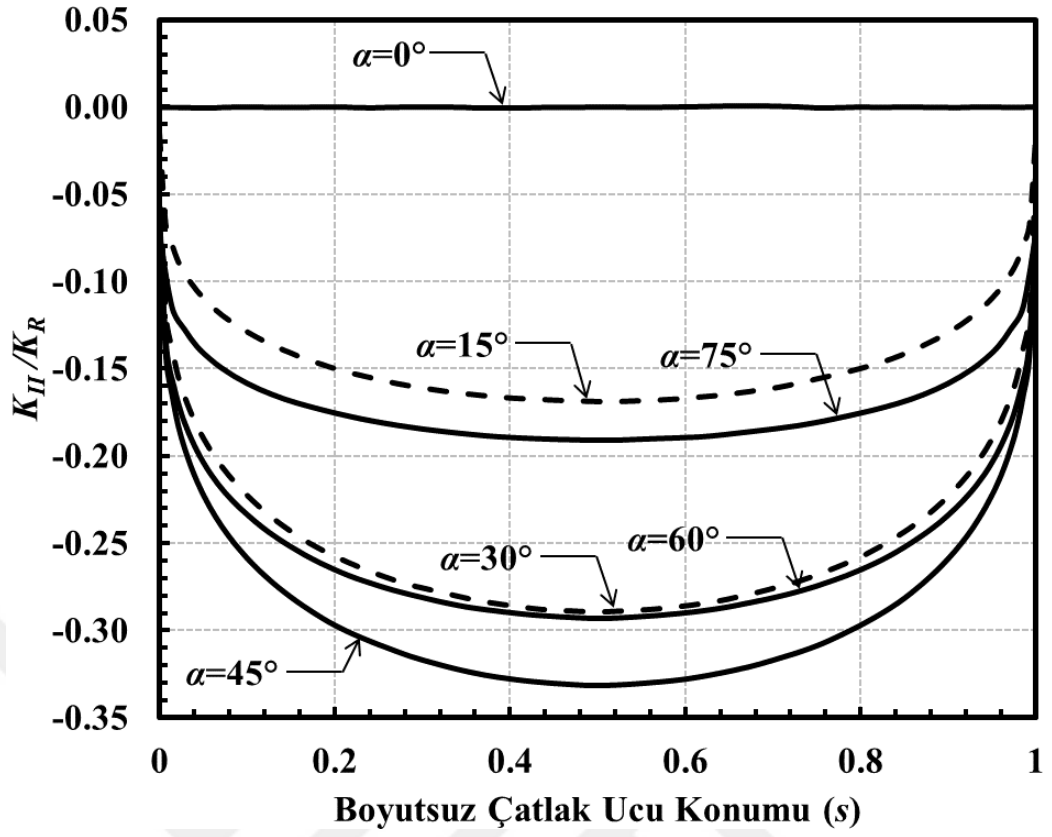
Şekil 3.47. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



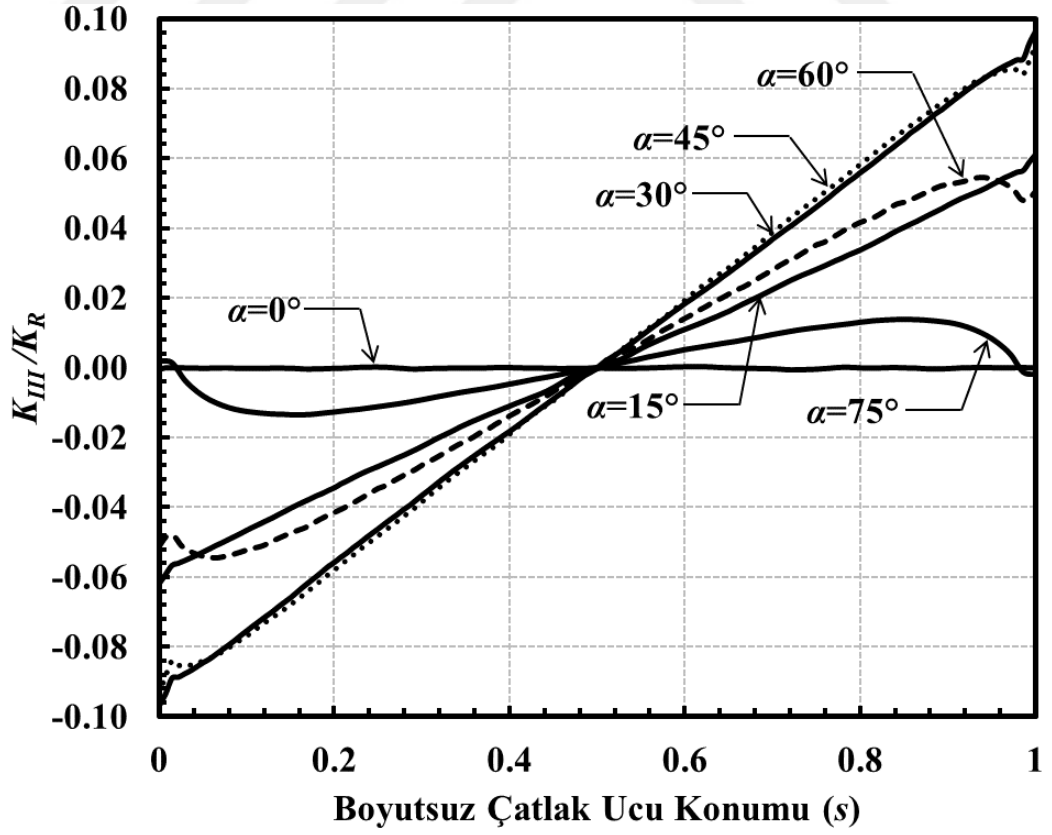
Şekil 3.48. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



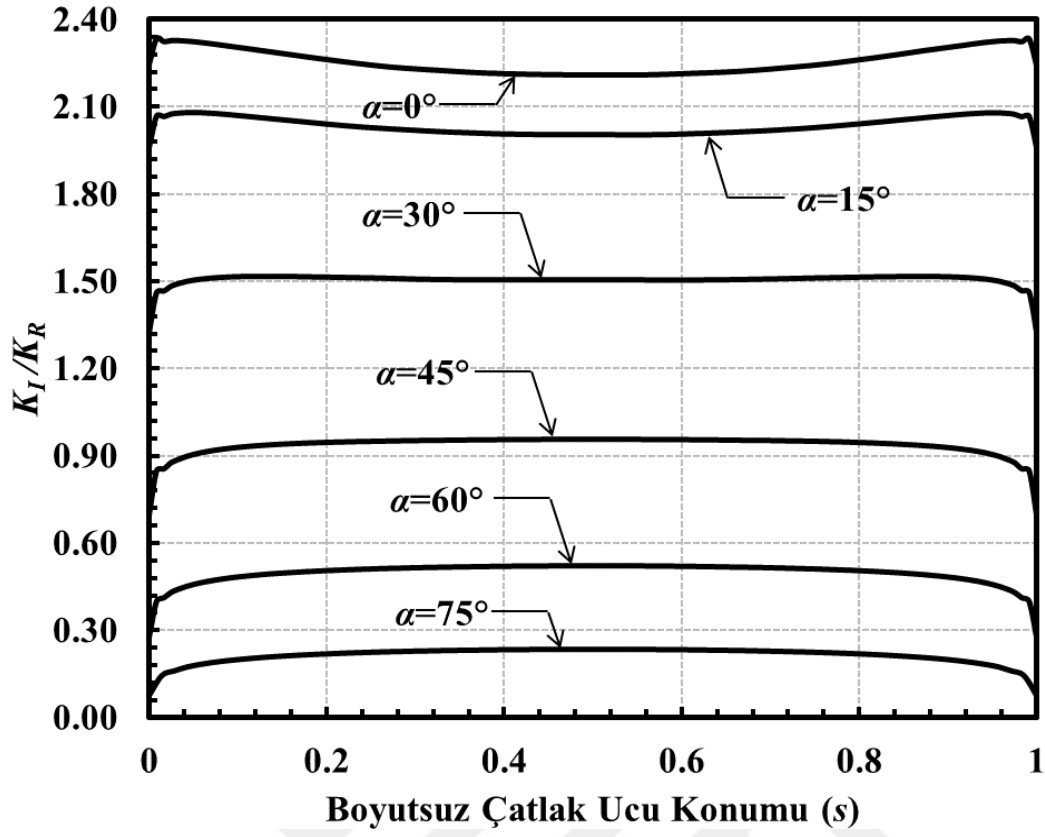
Şekil 3.49. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



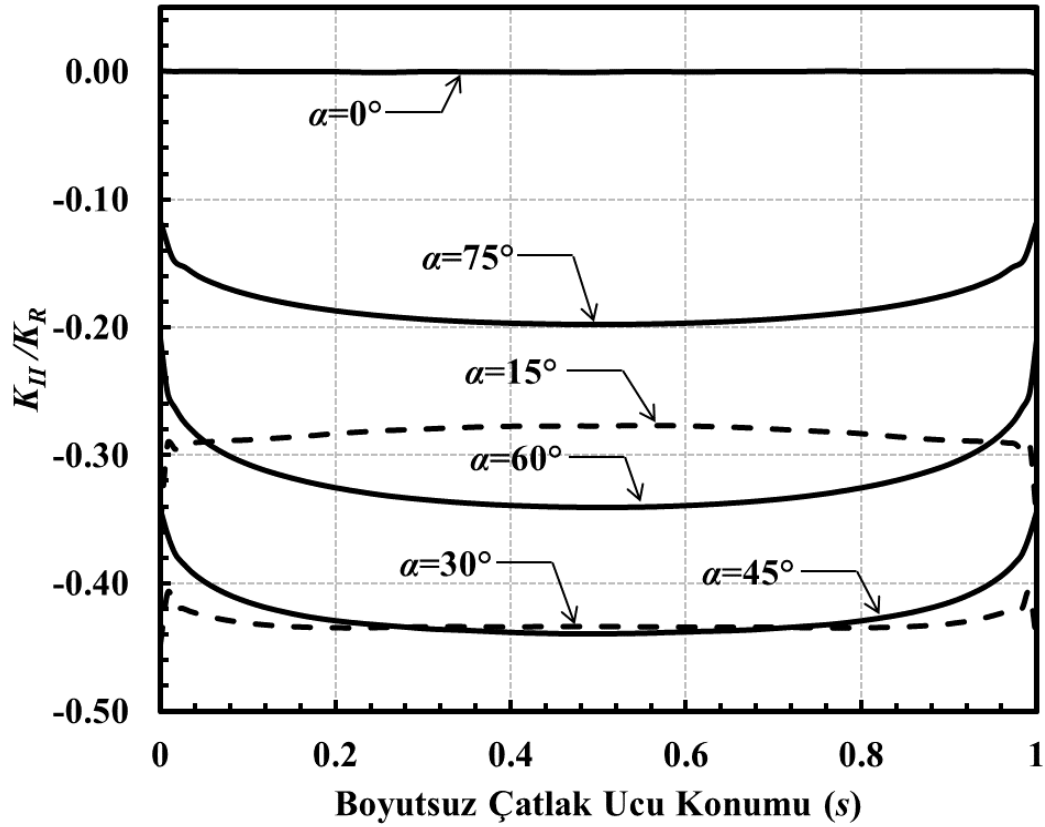
Şekil 3.50. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



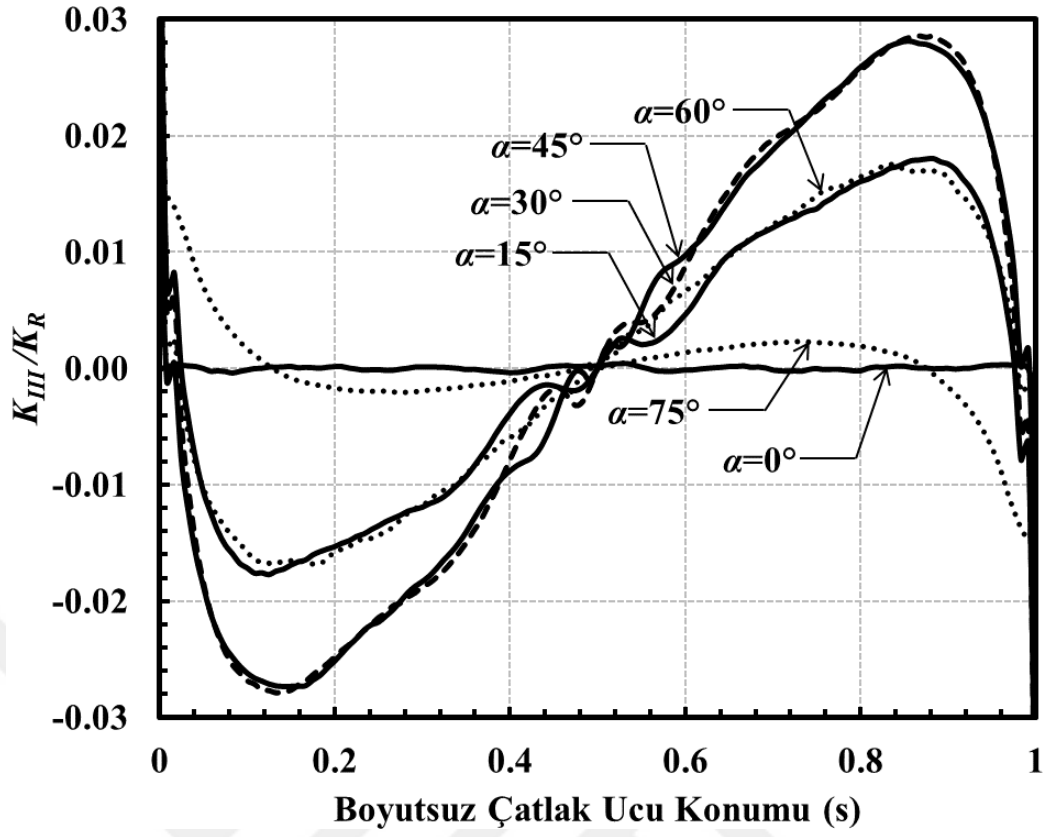
Şekil 3.51. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



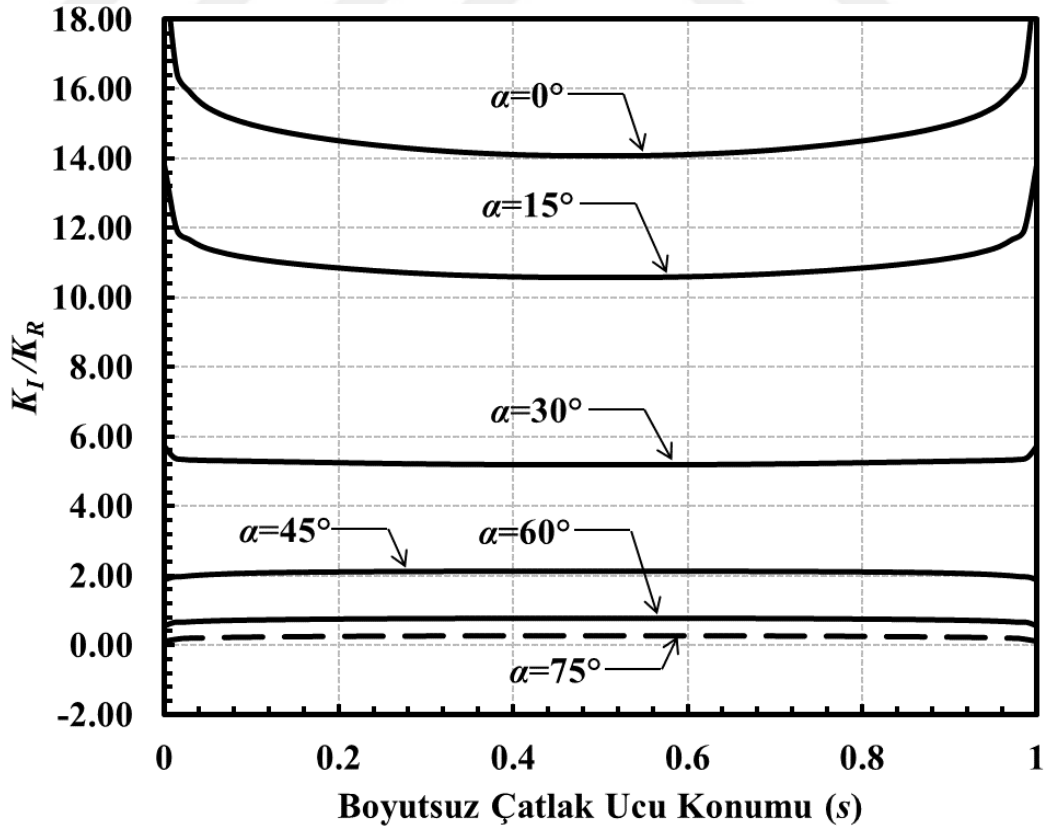
Şekil 3.52. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



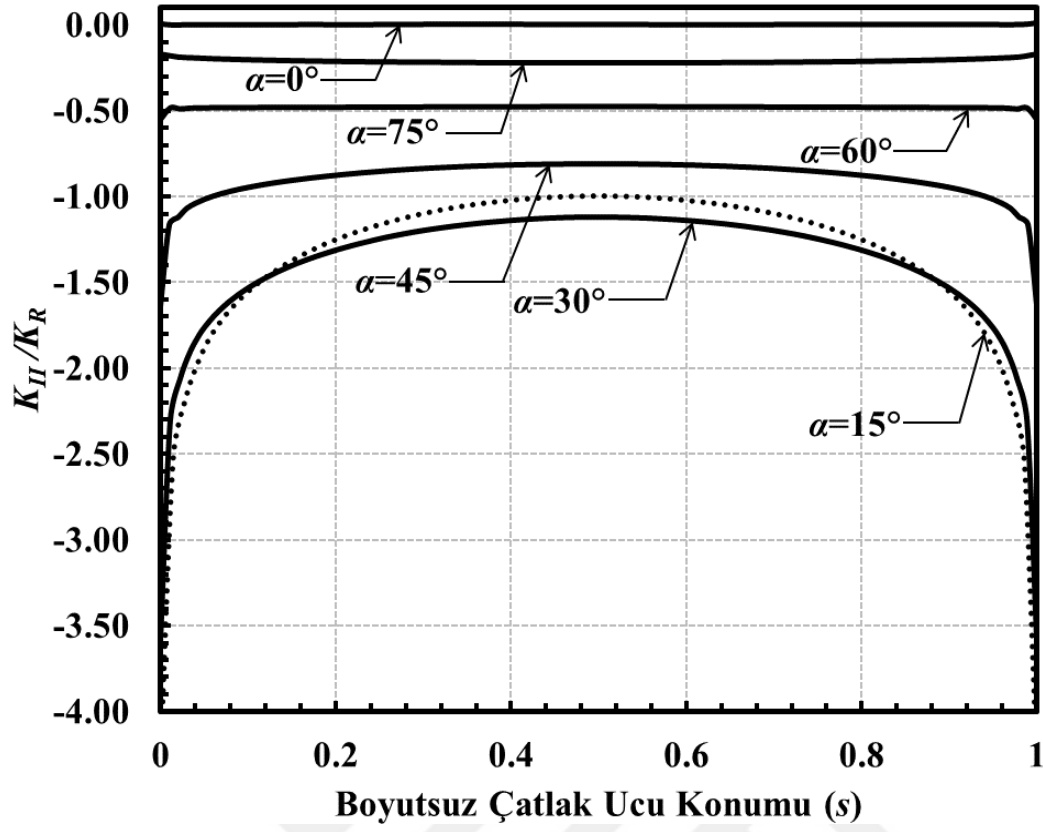
Şekil 3.53. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



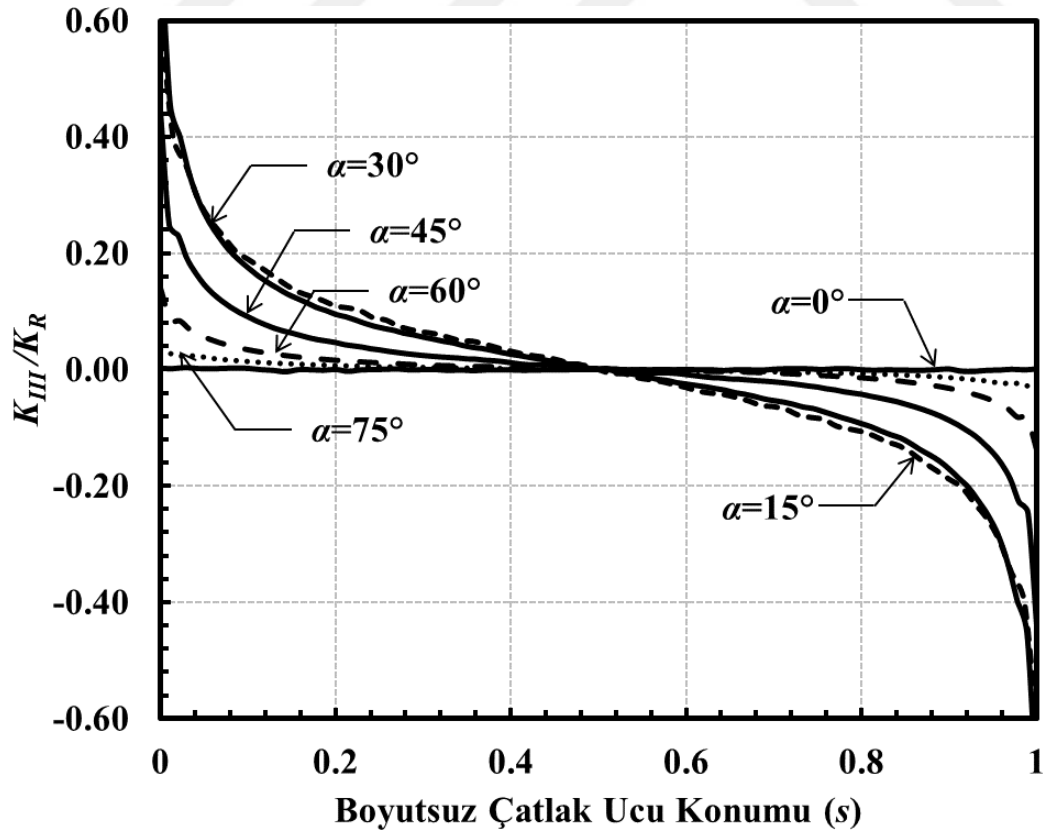
Şekil 3.54. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



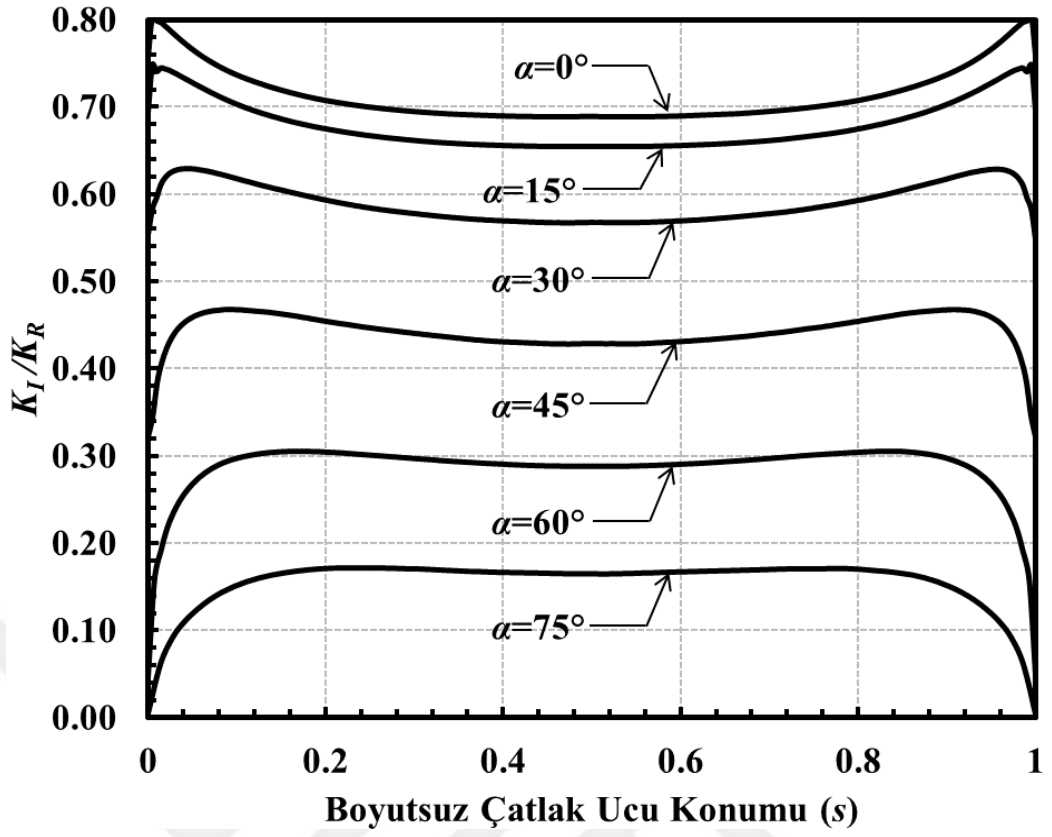
Şekil 3.55. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



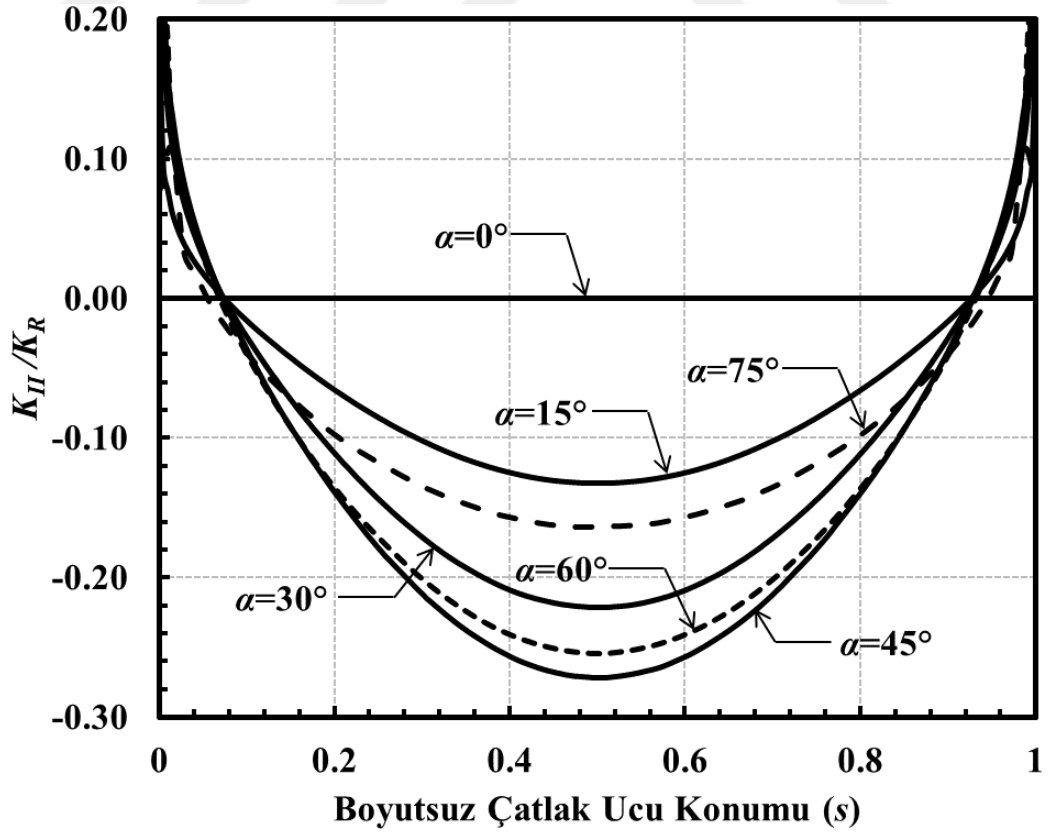
Şekil 3.56. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



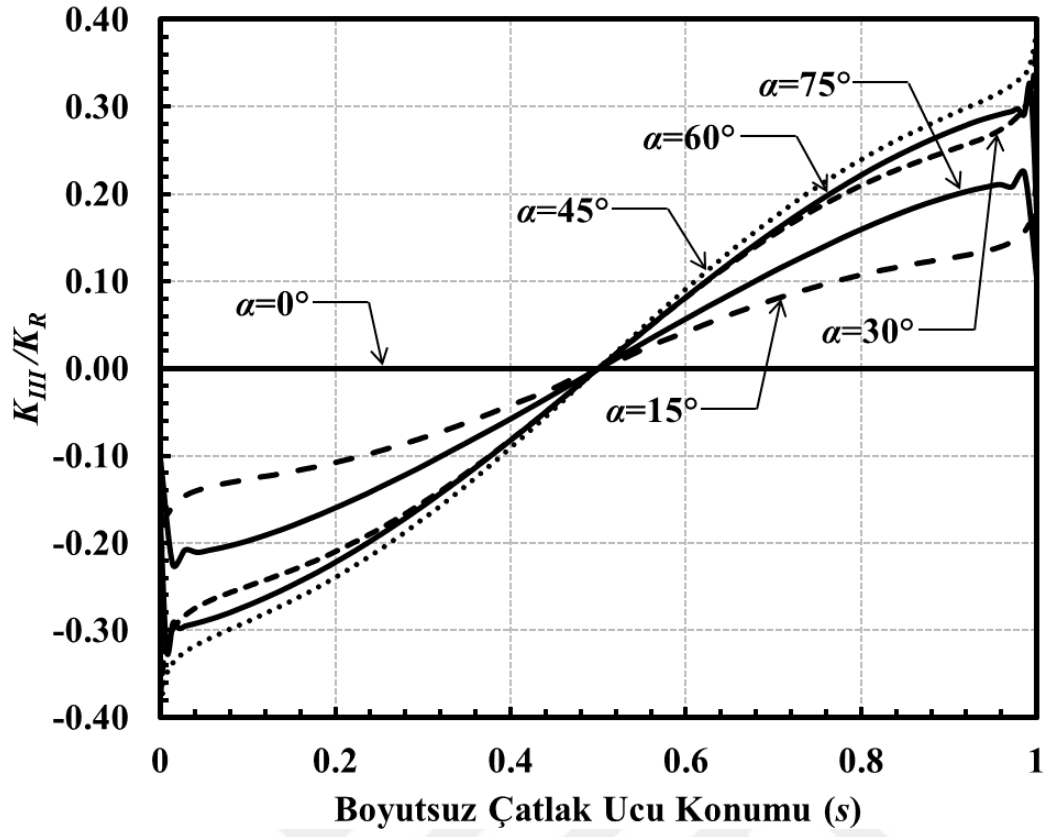
Şekil 3.57. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



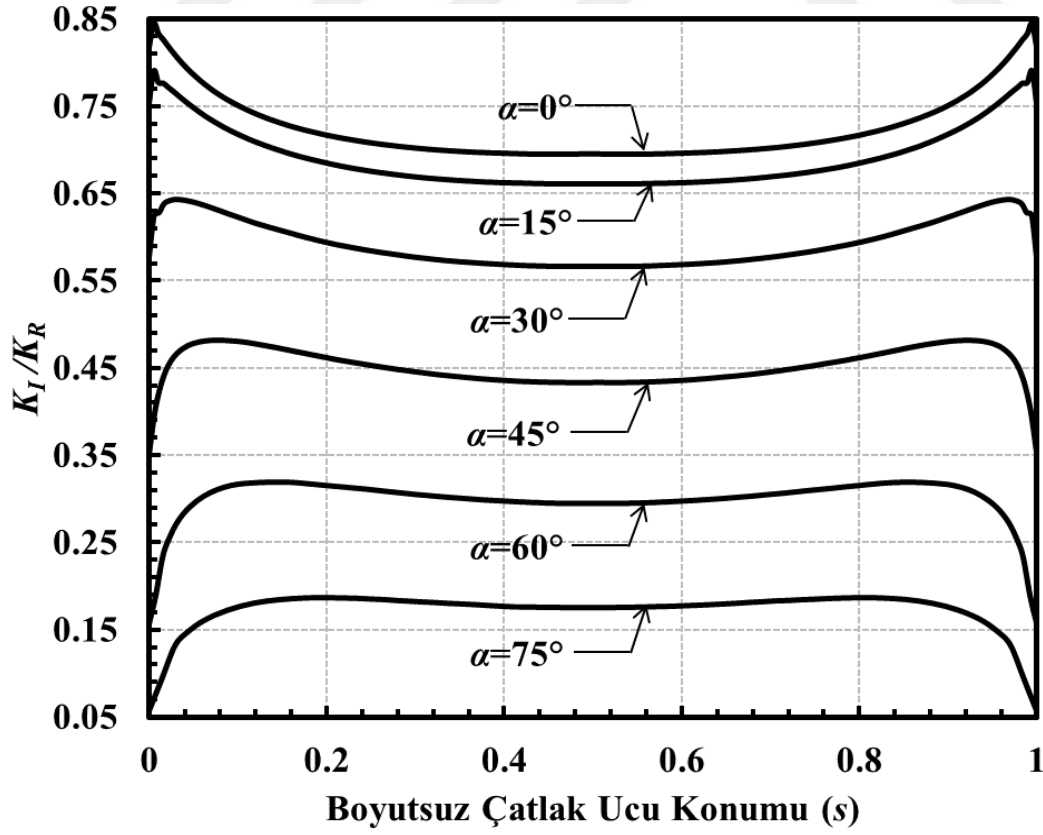
Şekil 3.58. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



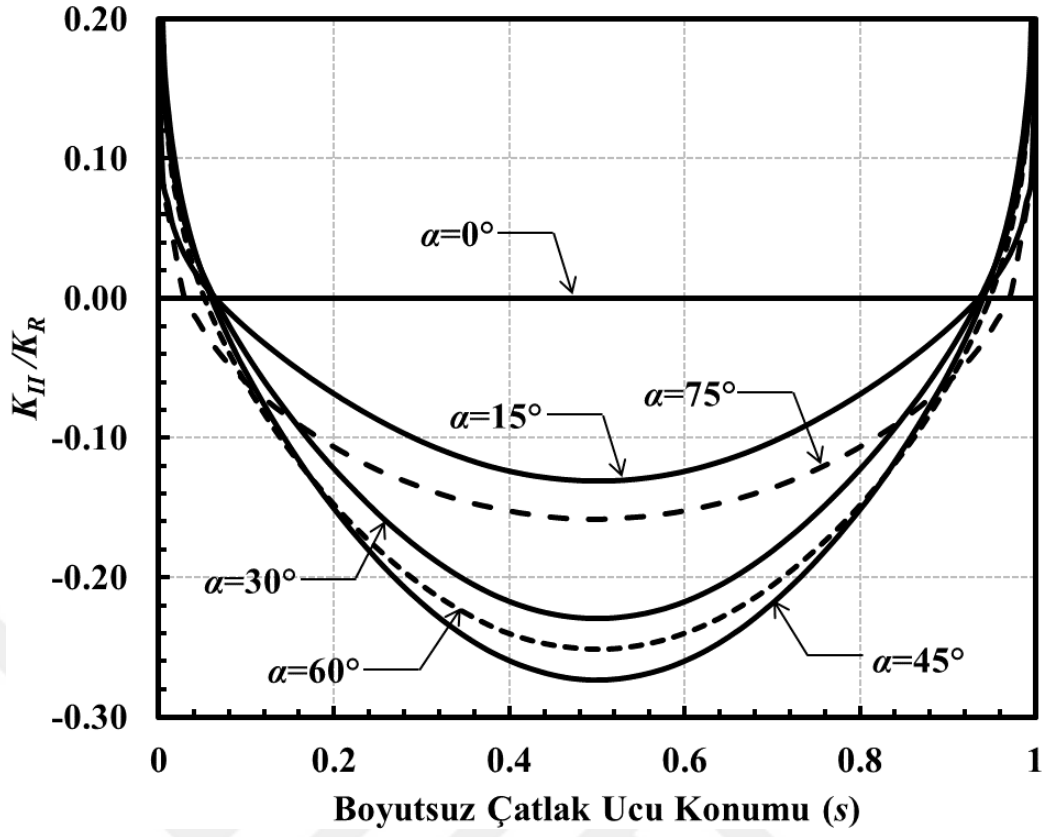
Şekil 3.59. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



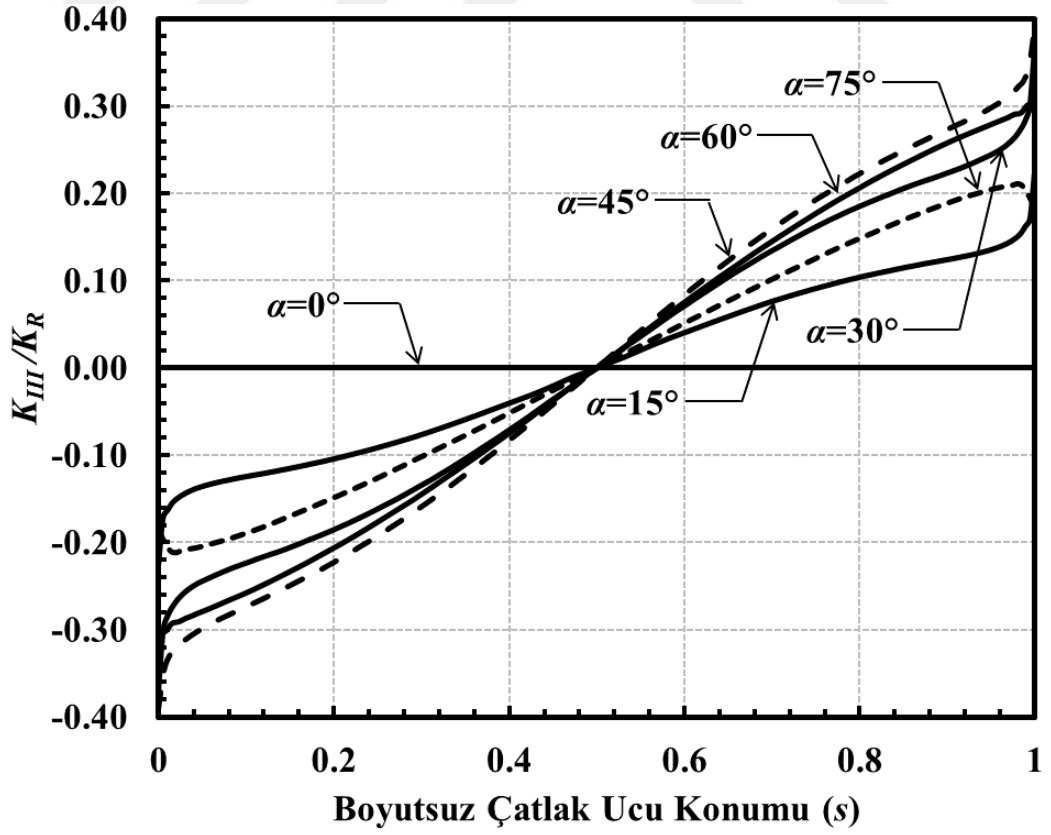
Şekil 3.60. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



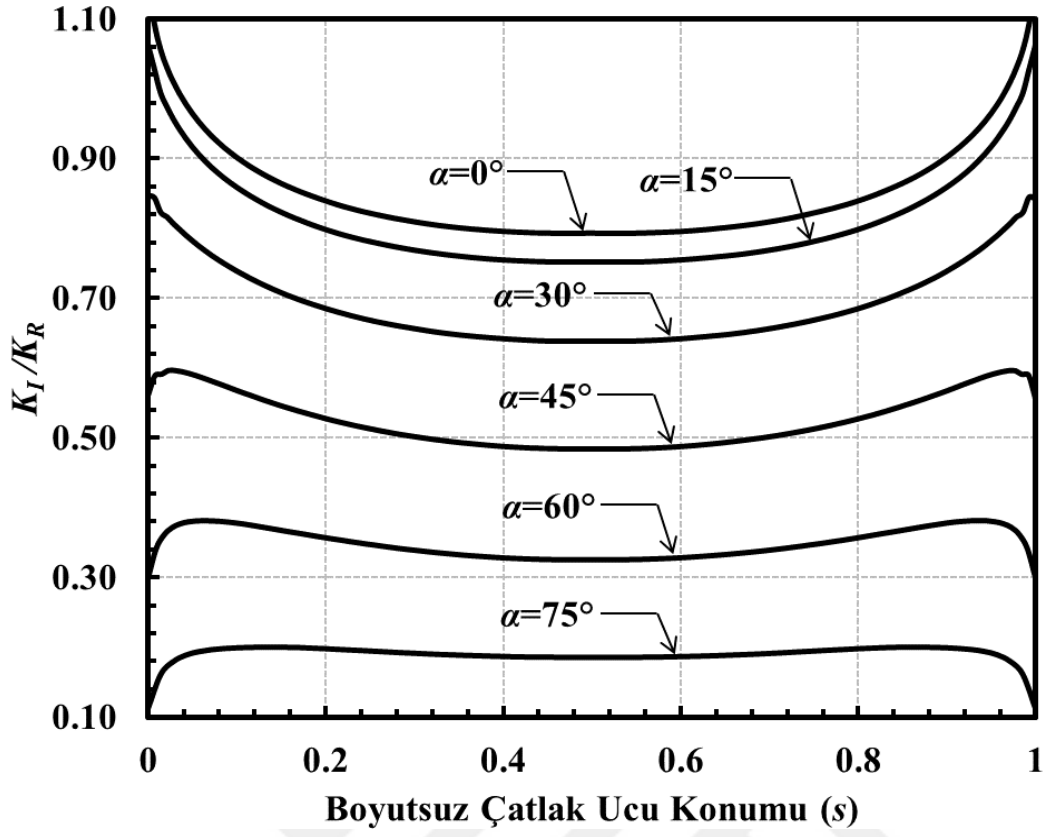
Şekil 3.61. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



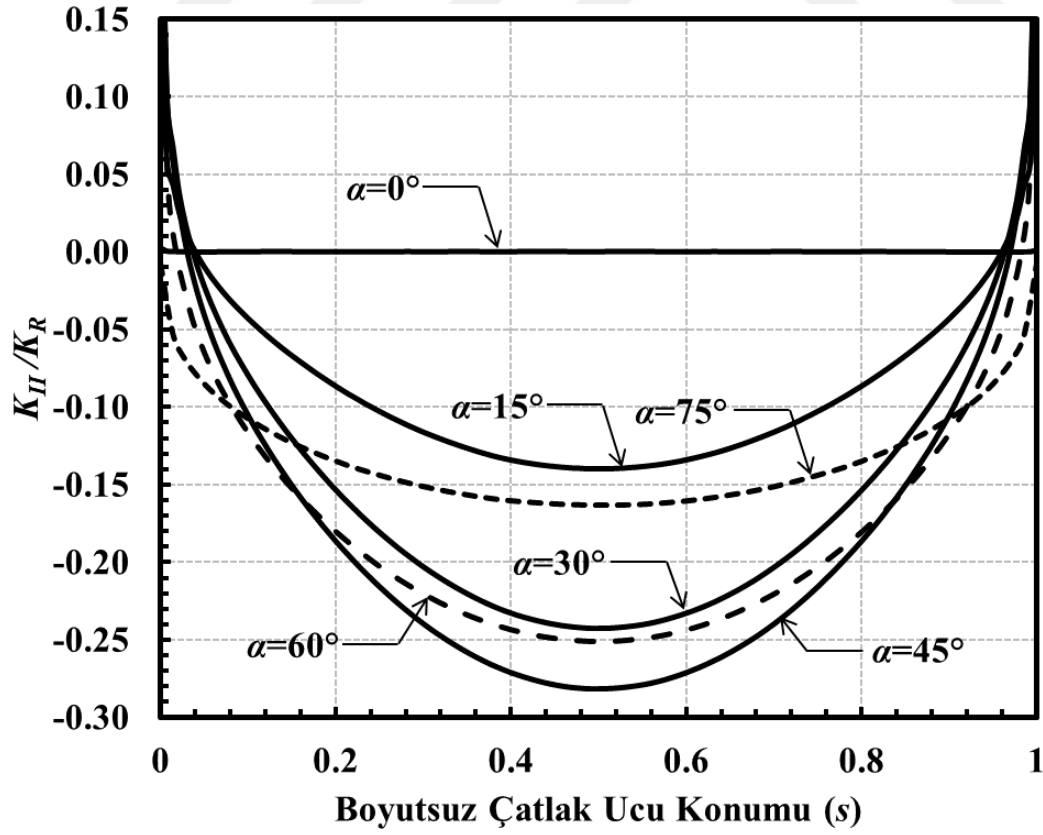
Şekil 3.62. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



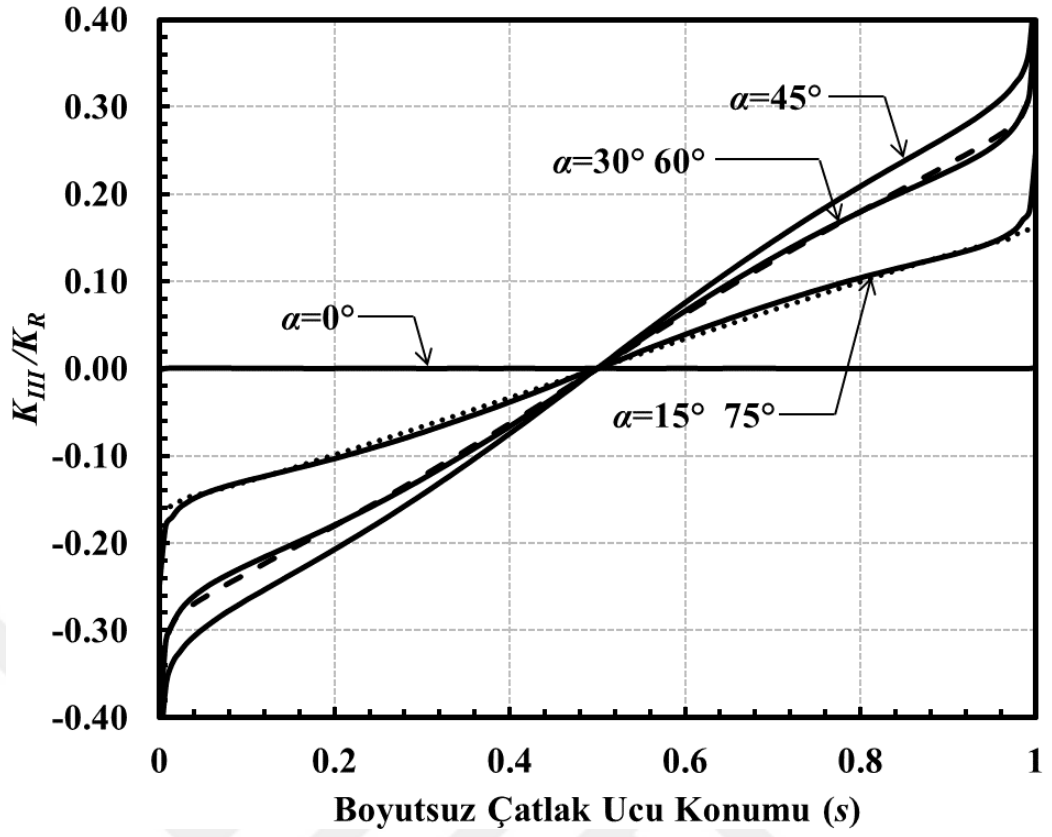
Şekil 3.63. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



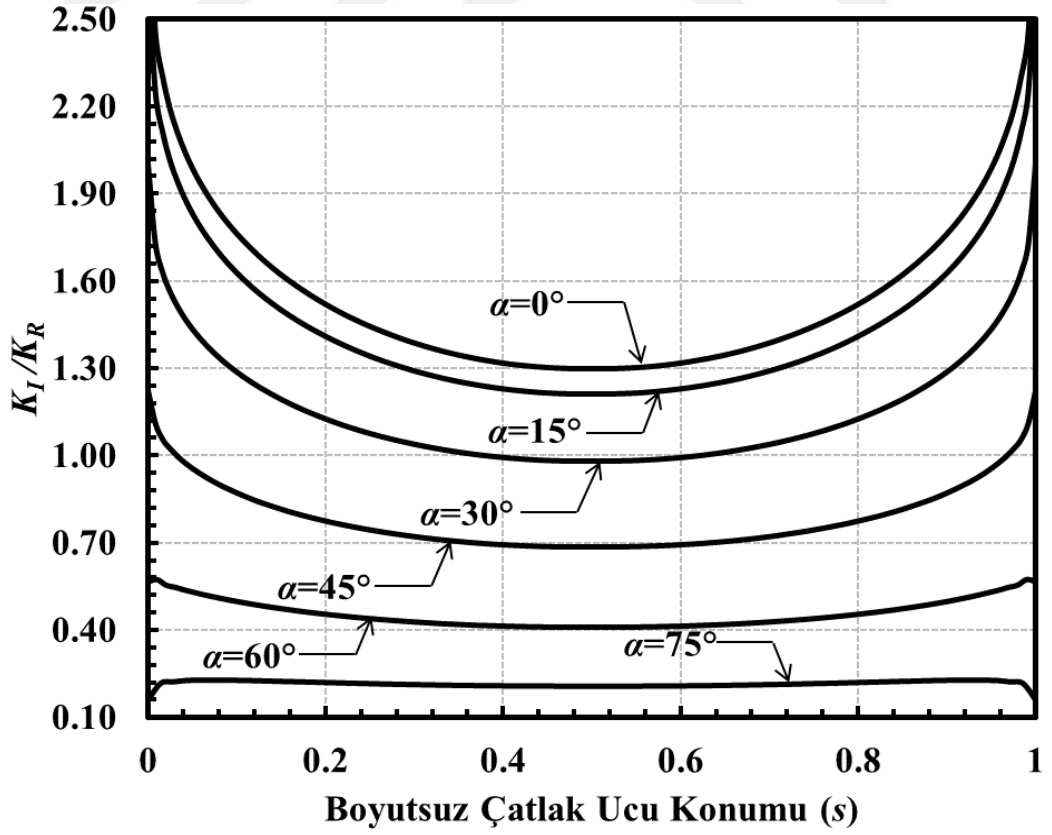
Şekil 3.64. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



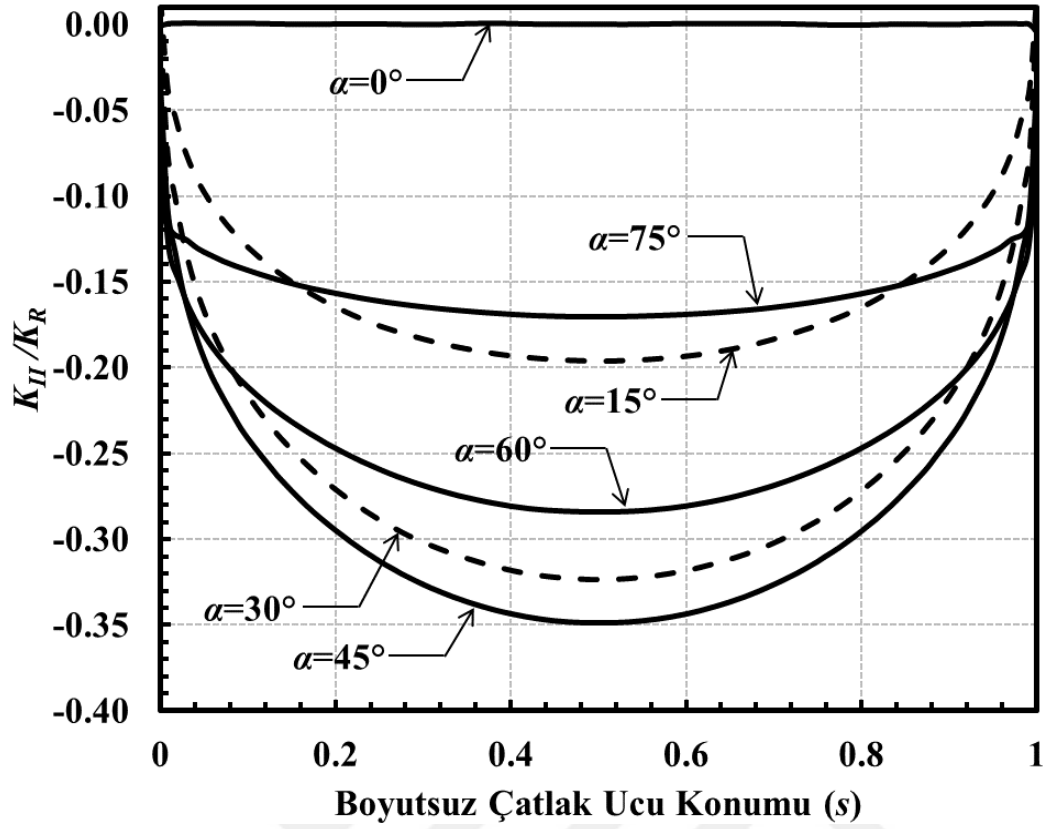
Şekil 3.65. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



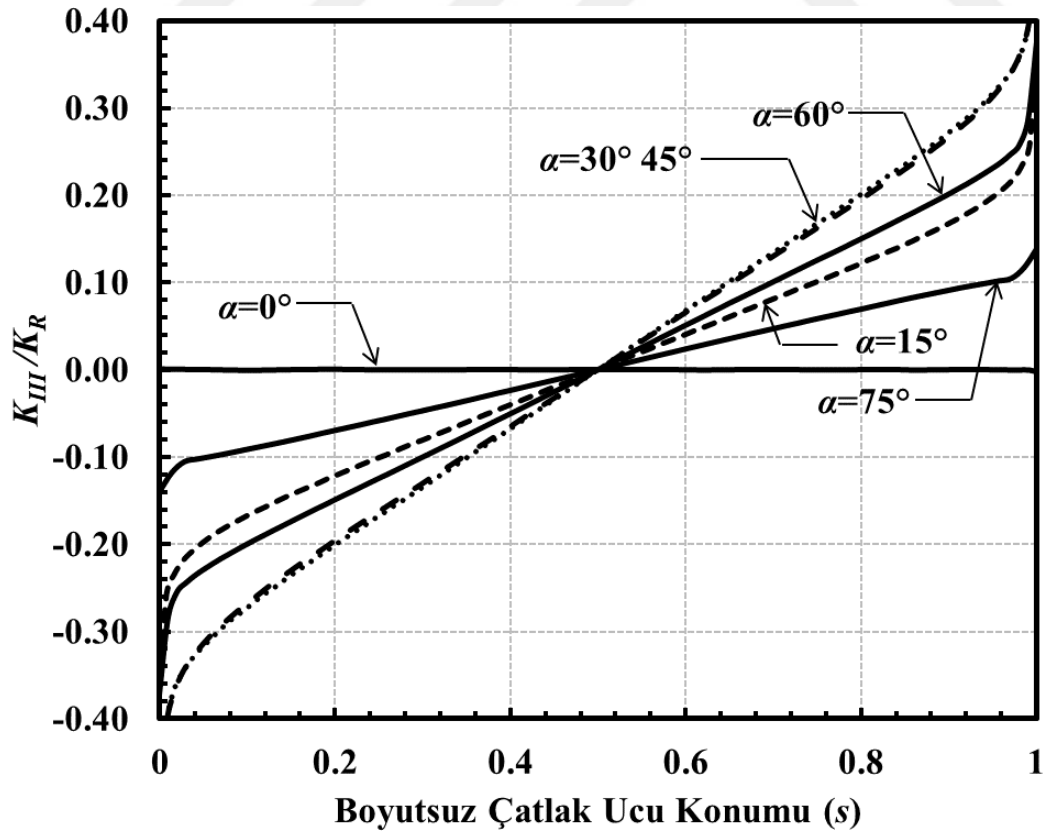
Şekil 3.66. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



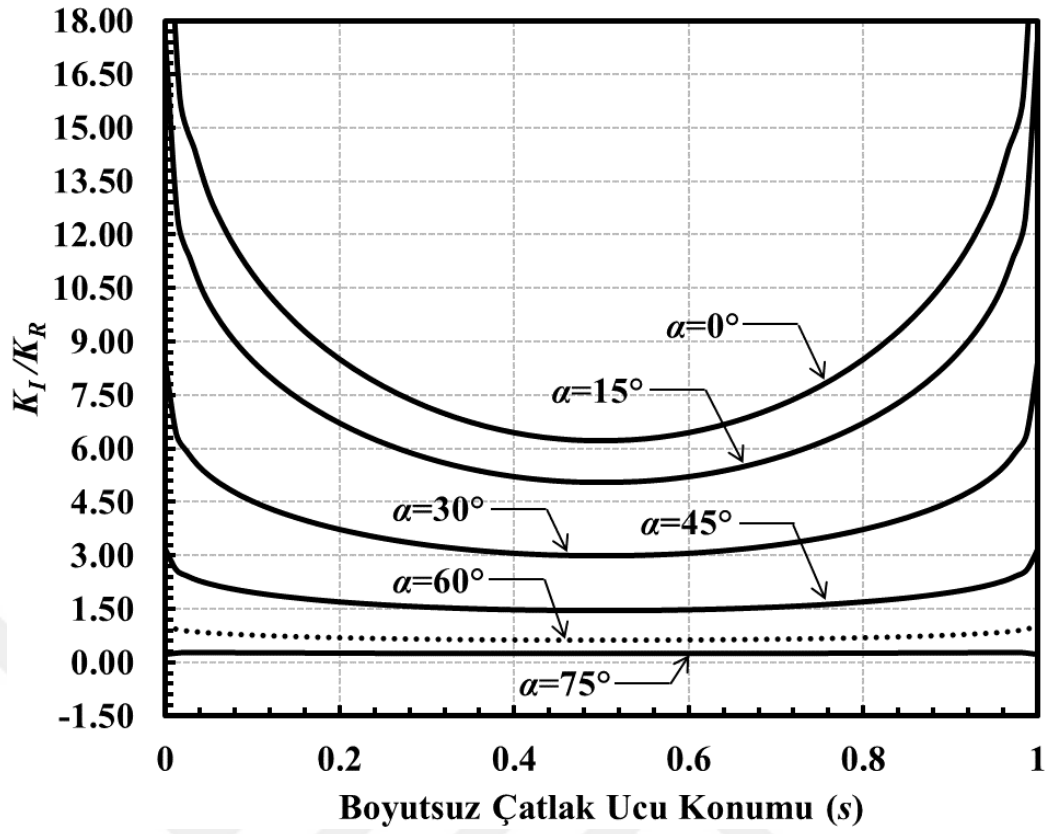
Şekil 3.67. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



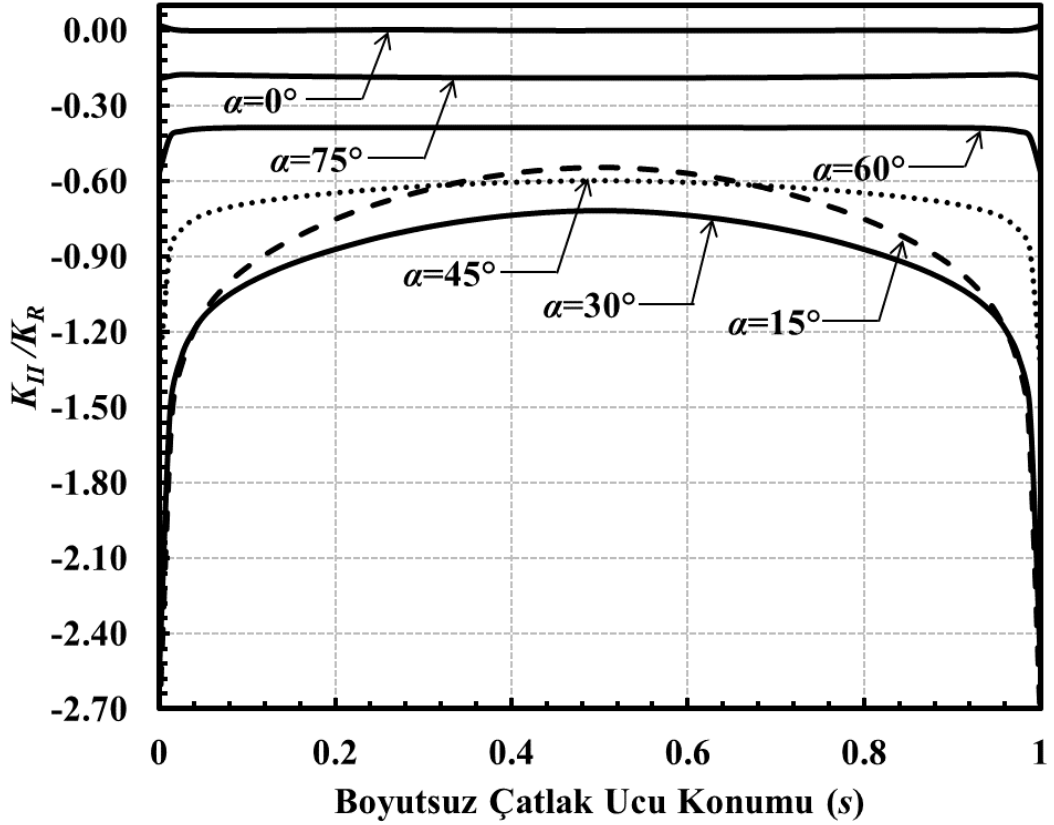
Şekil 3.68. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



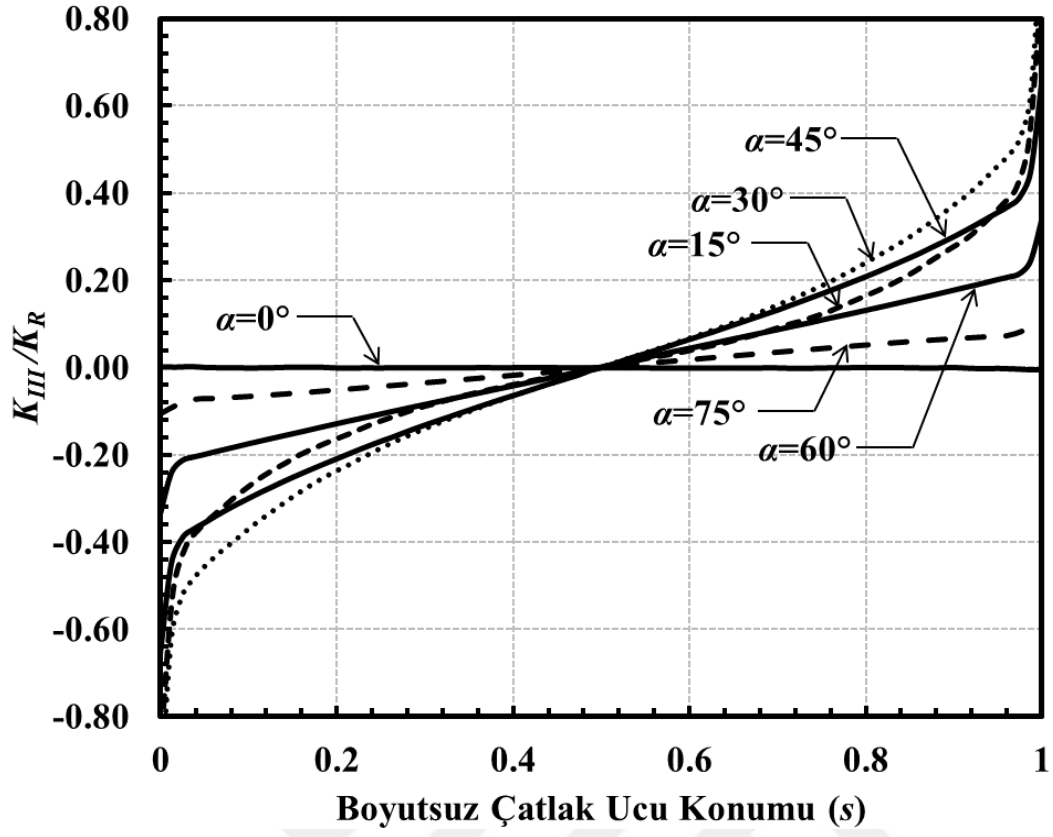
Şekil 3.69. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



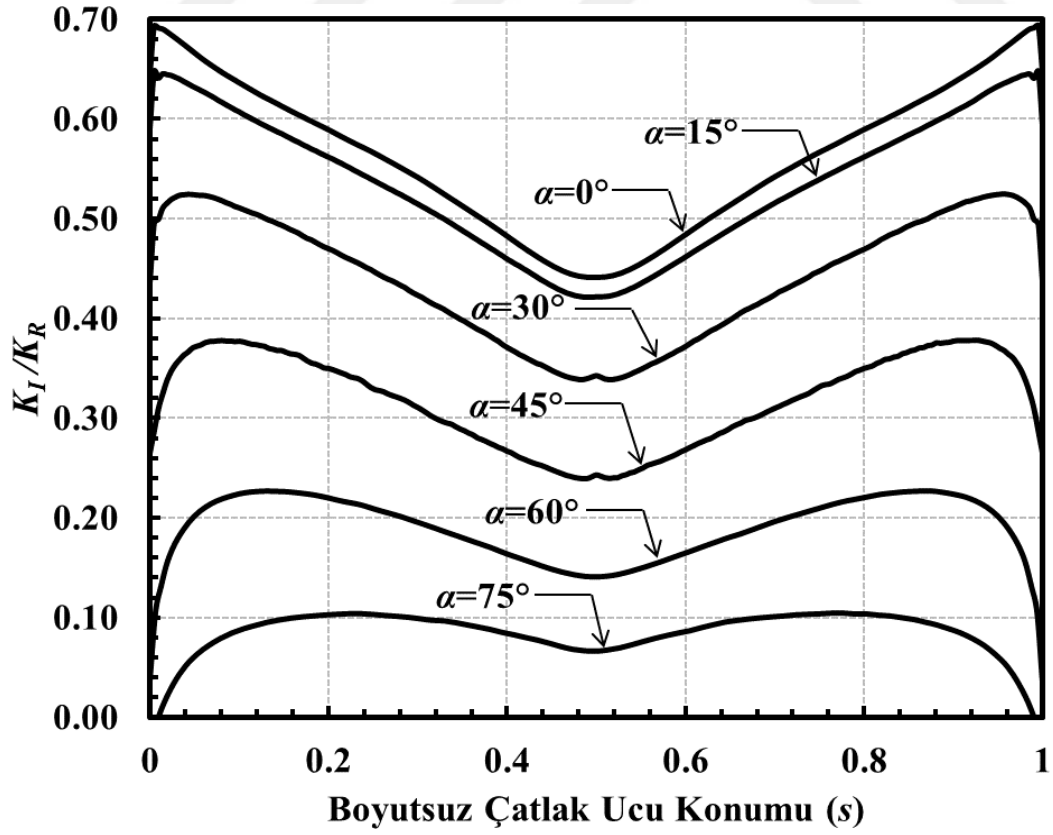
Şekil 3.70. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



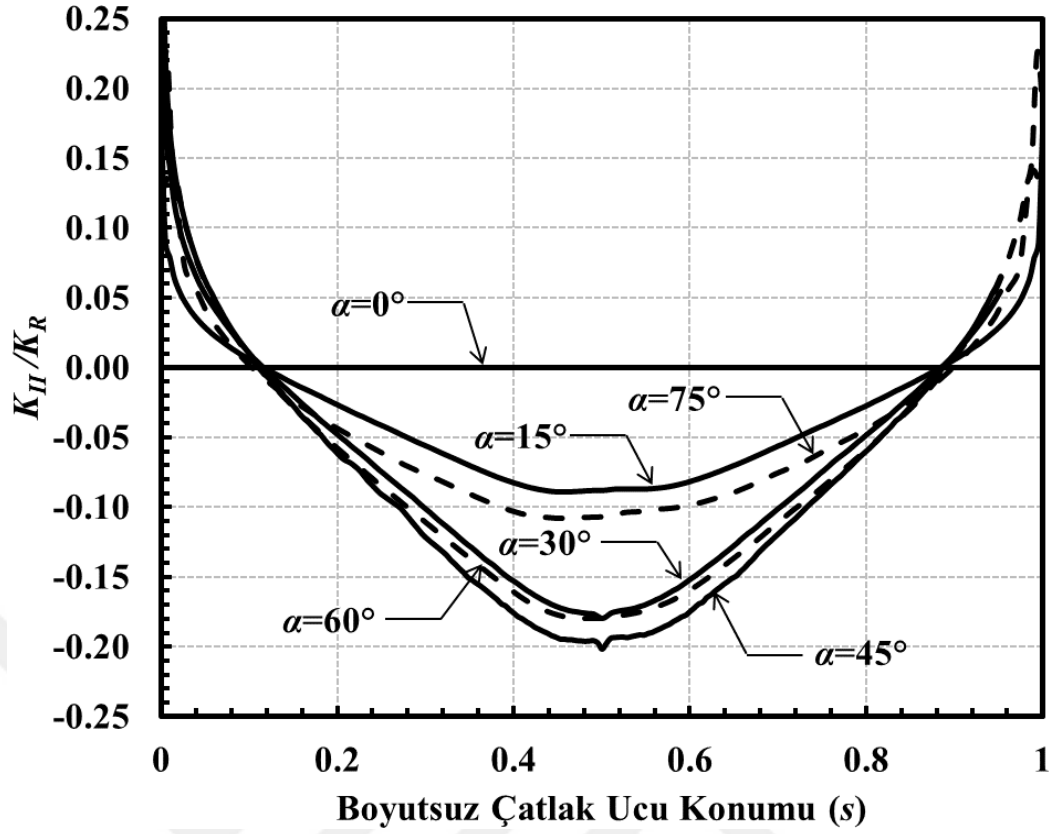
Şekil 3.71. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



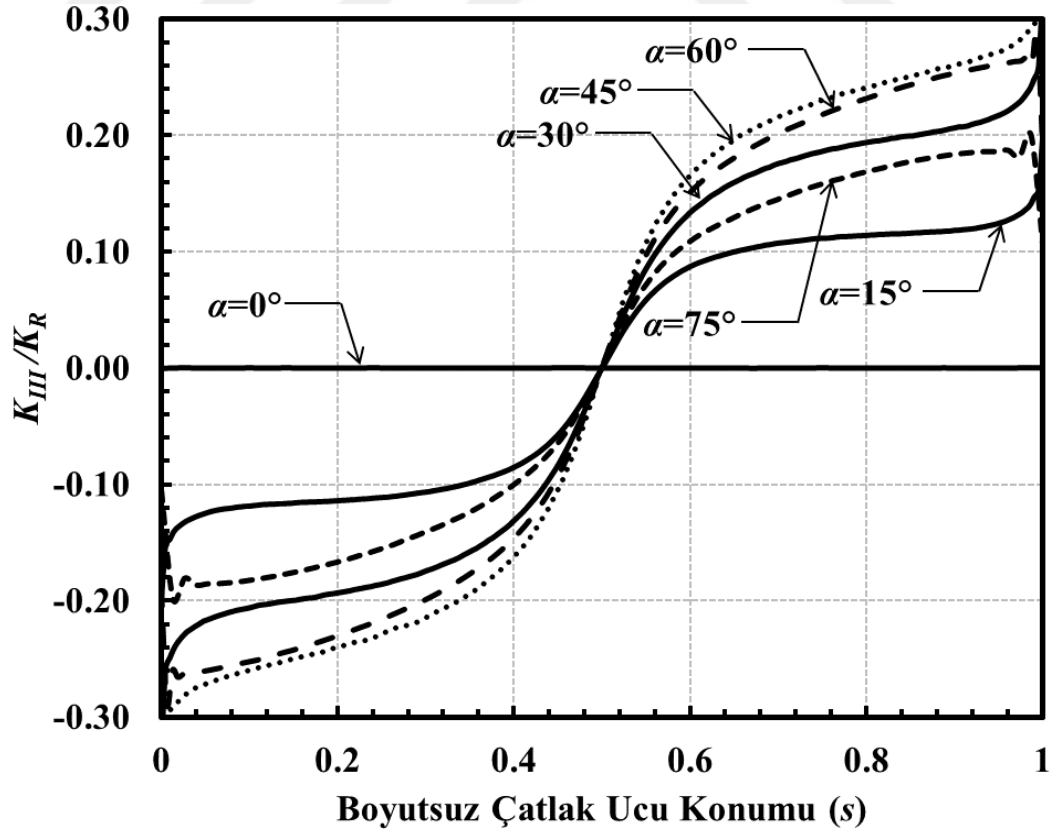
Şekil 3.72. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



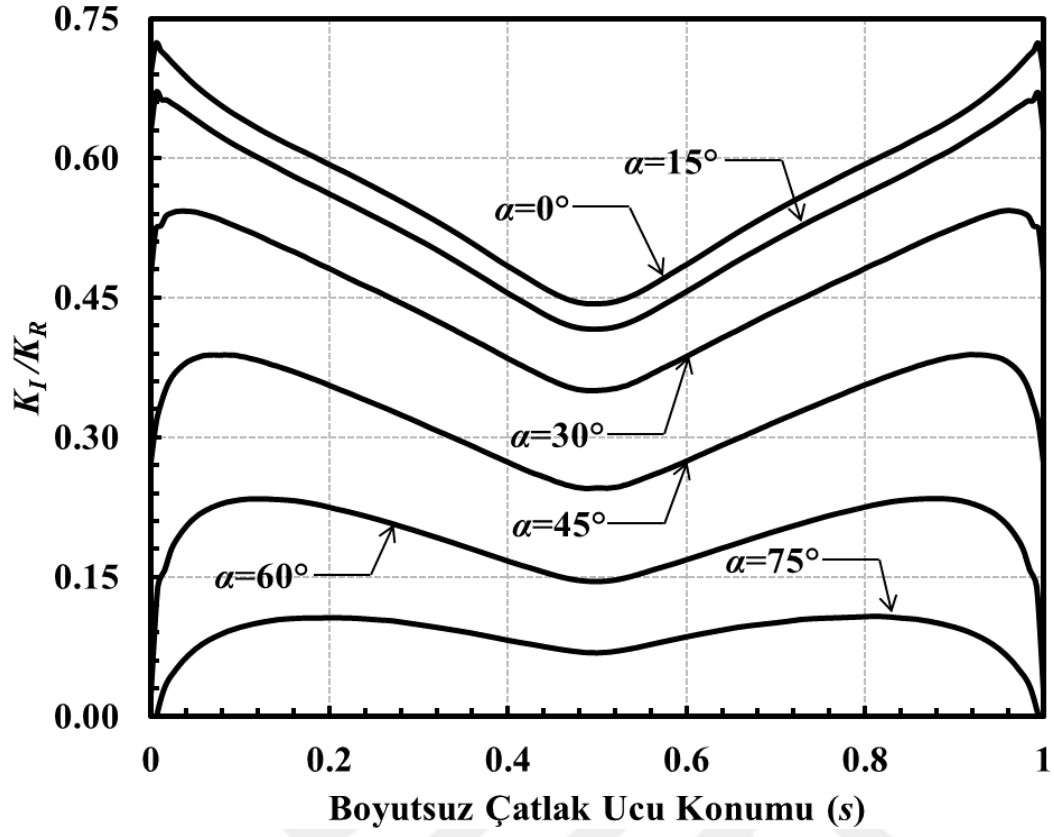
Şekil 3.73. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



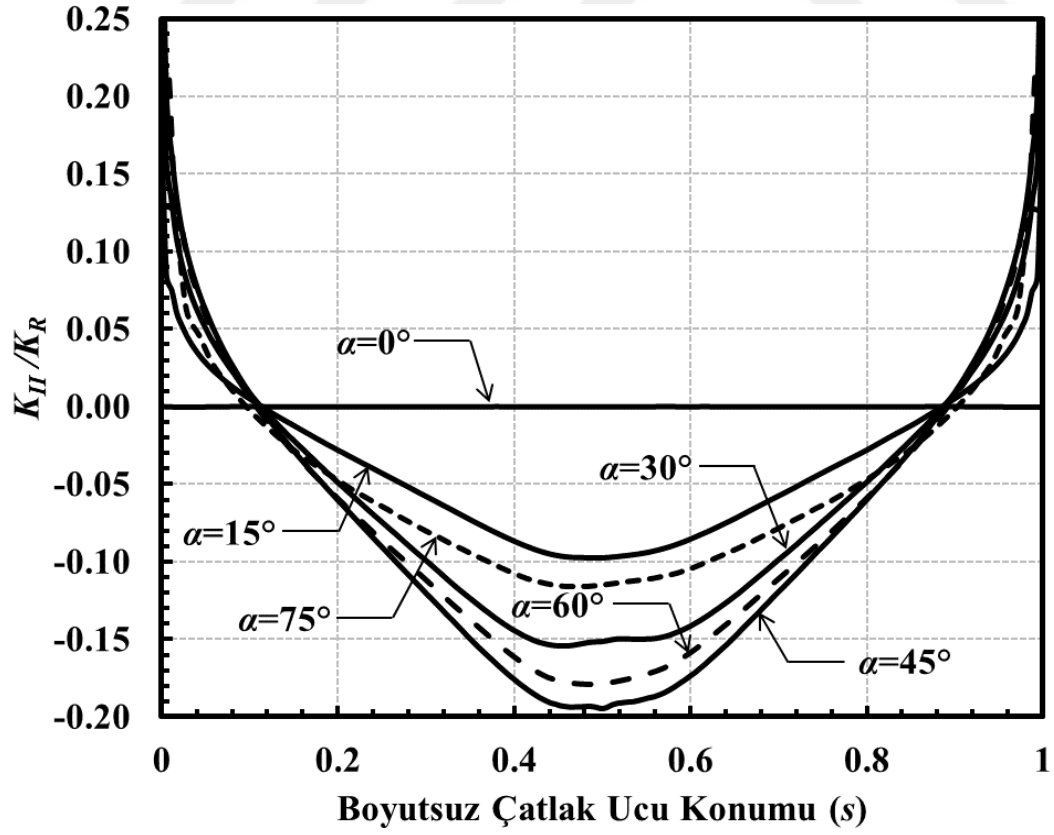
Şekil 3.74. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



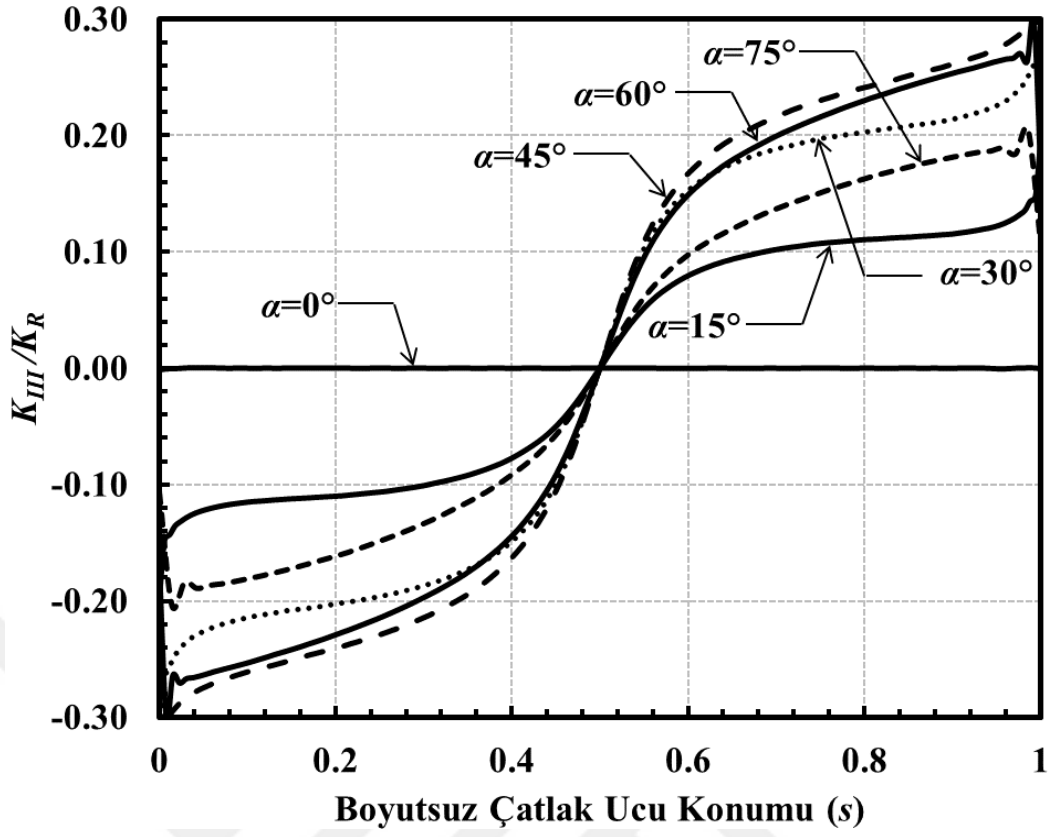
Şekil 3.75. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



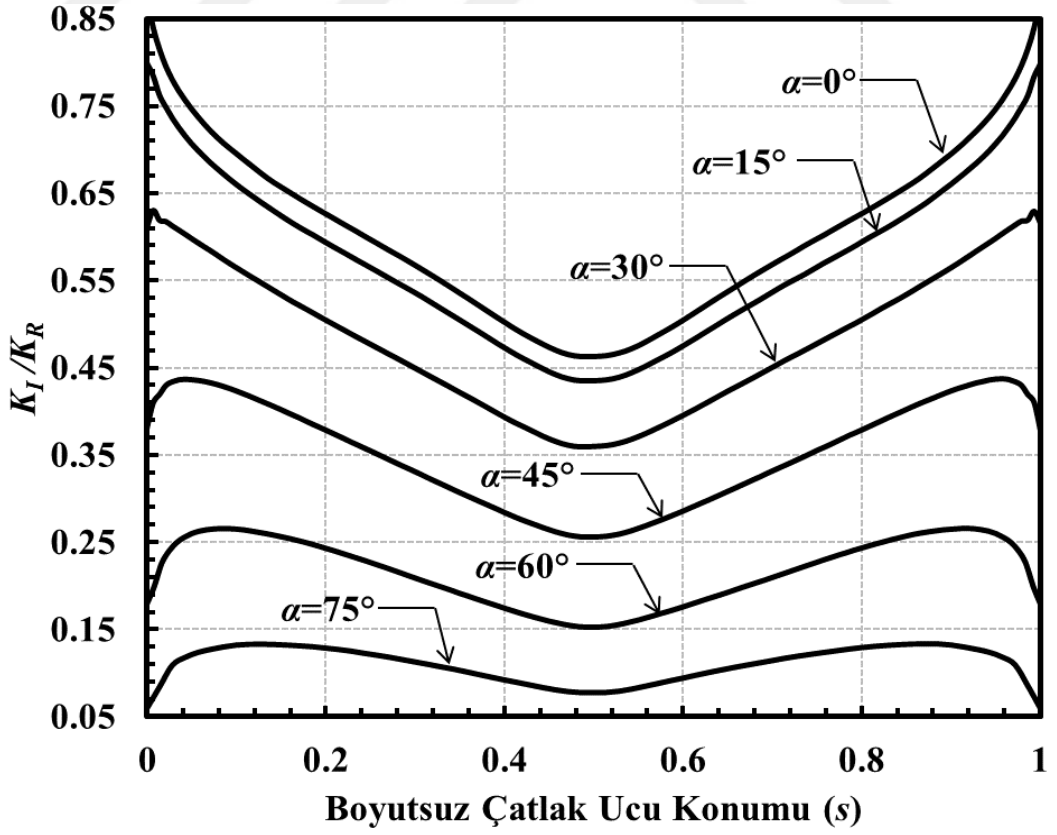
Şekil 3.76. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



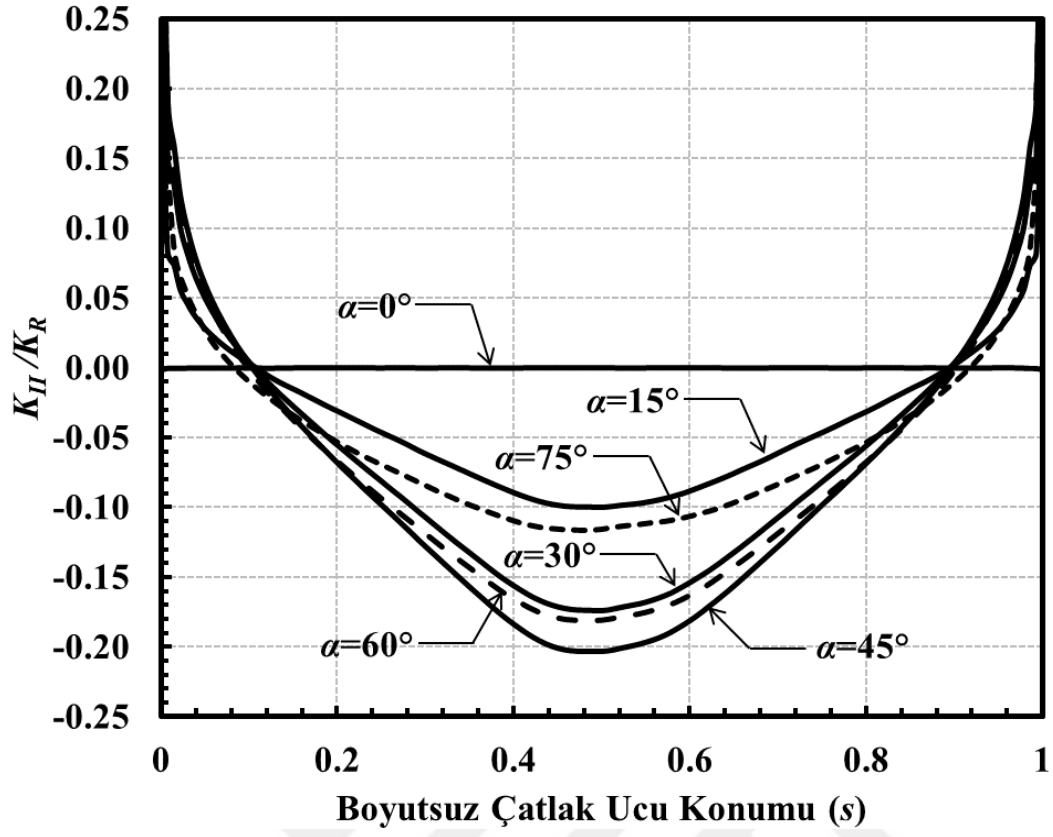
Şekil 3.77. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



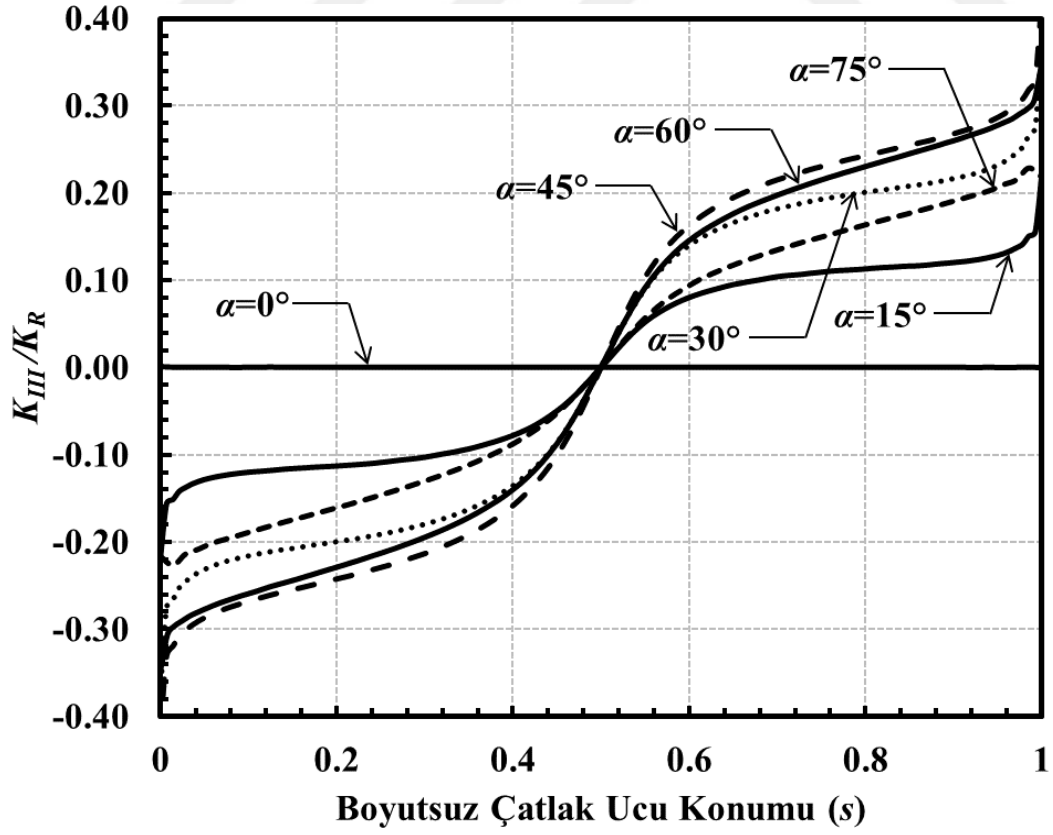
Şekil 3.78. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



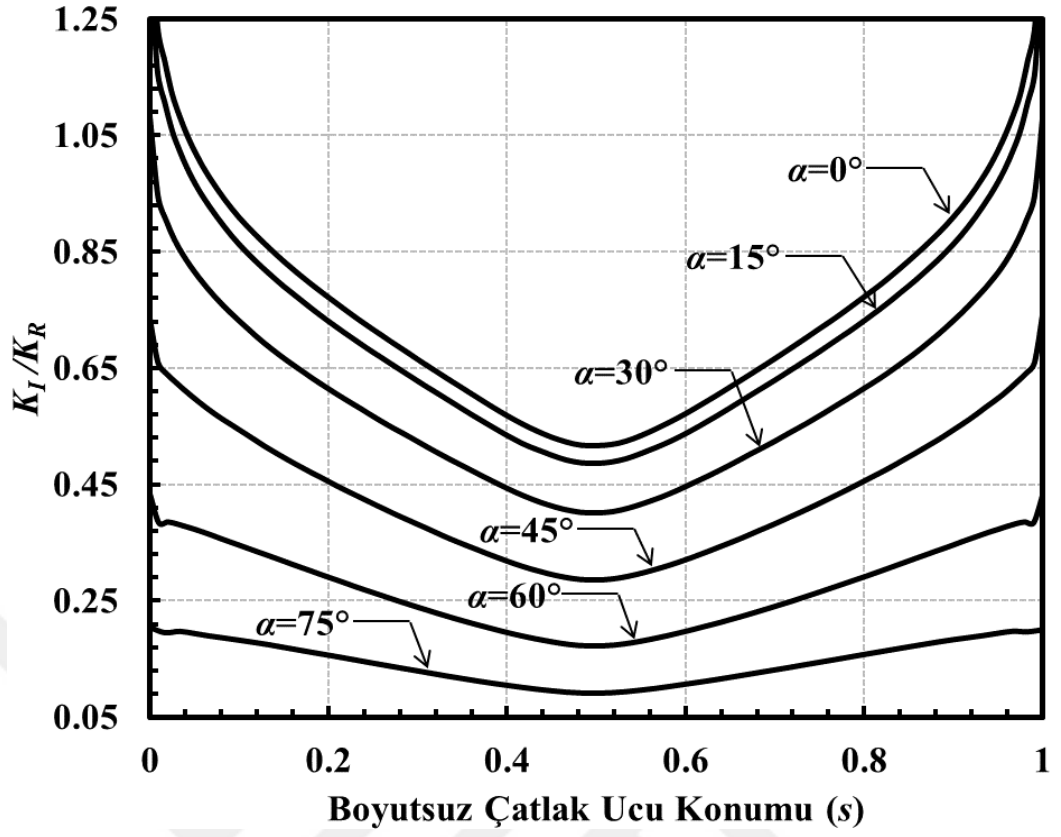
Şekil 3.79. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



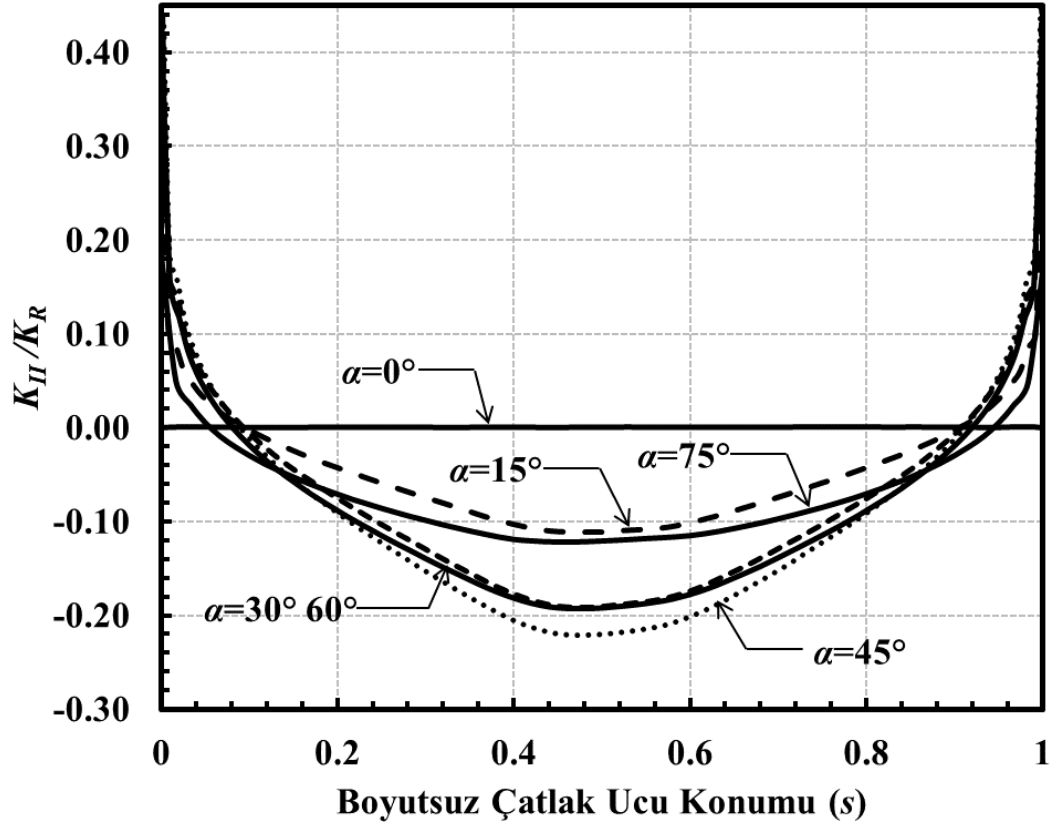
Şekil 3.80. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



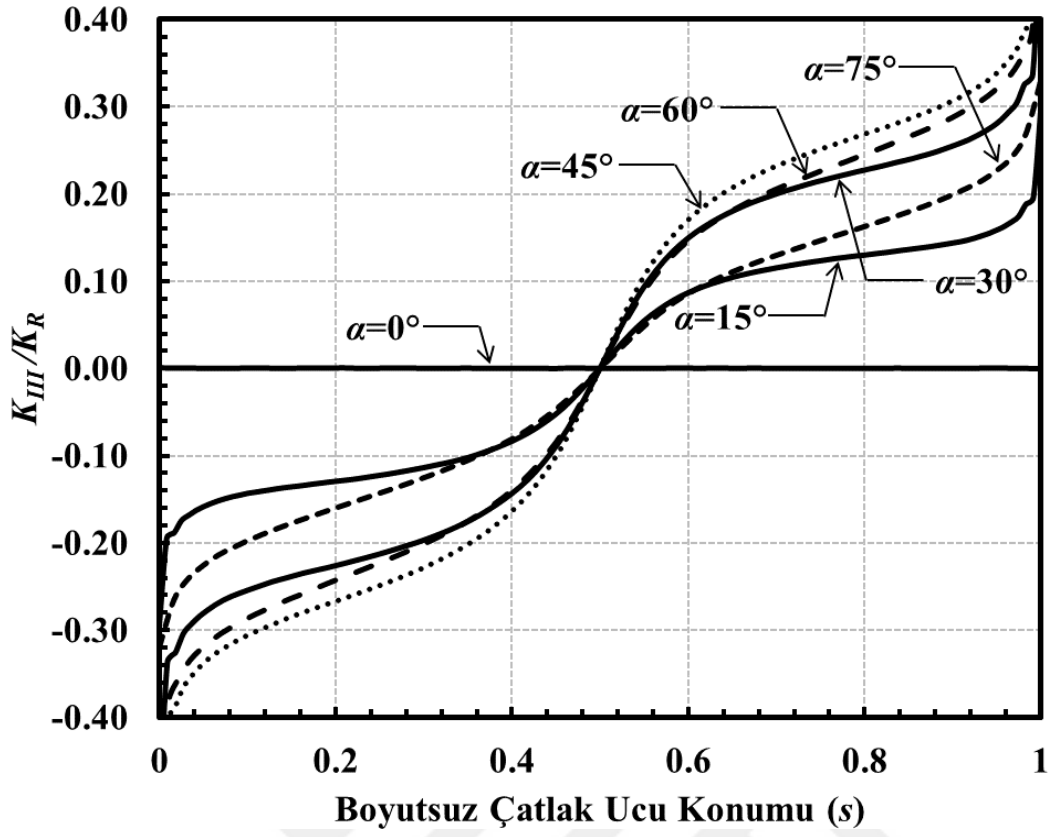
Şekil 3.81. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



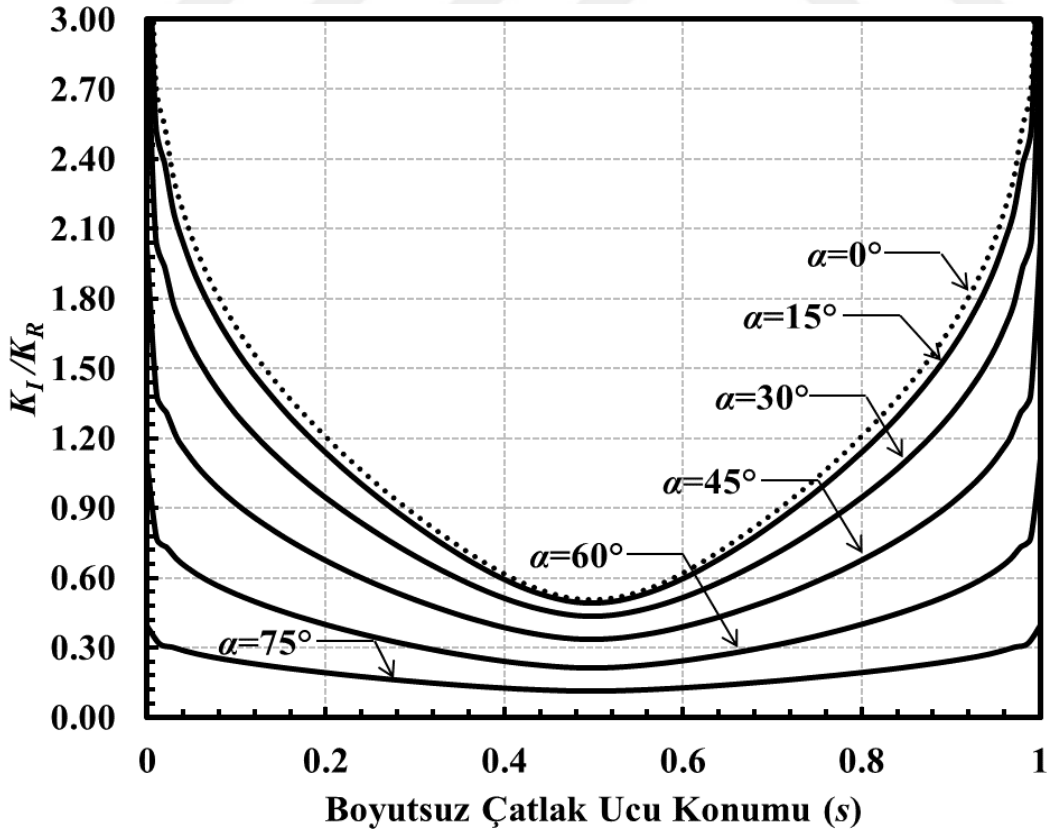
Şekil 3.82. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



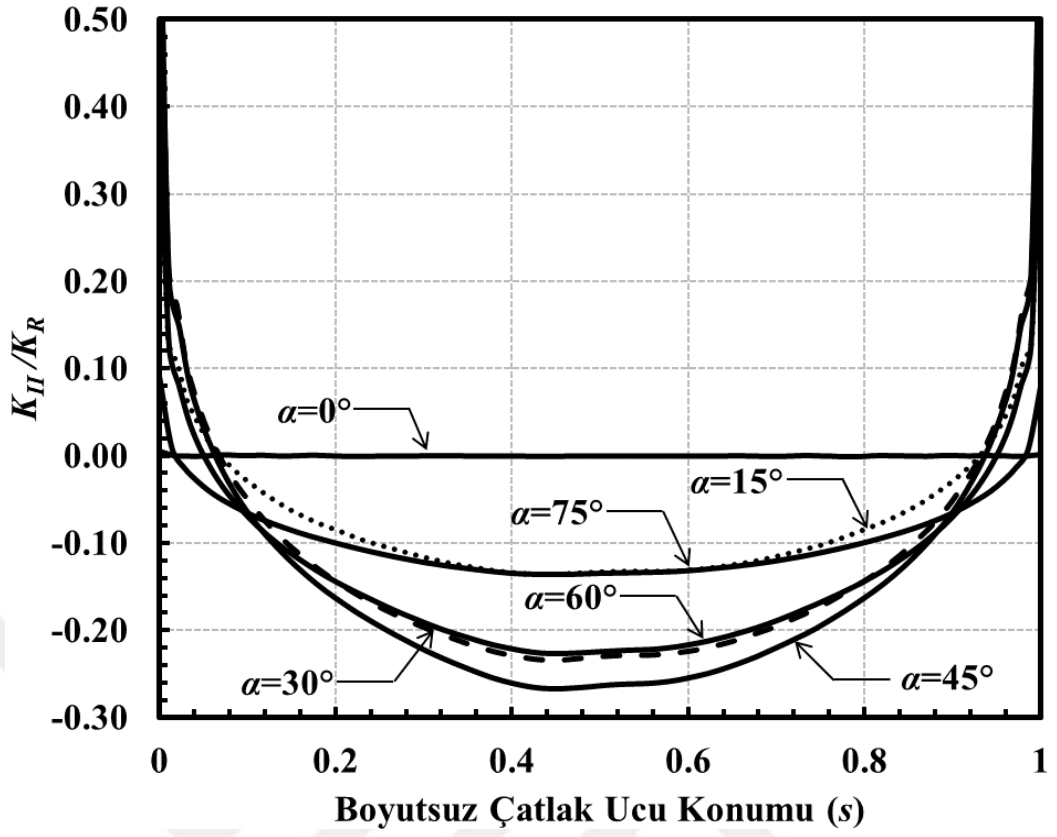
Şekil 3.83. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



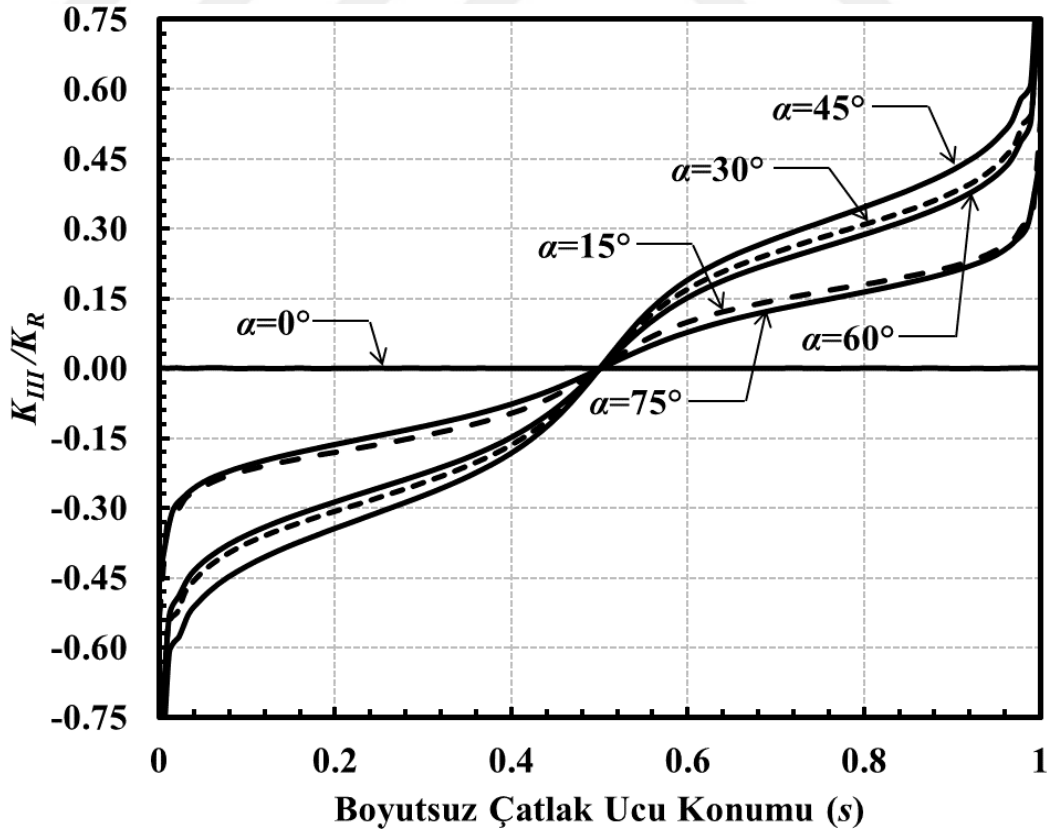
Şekil 3.84. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



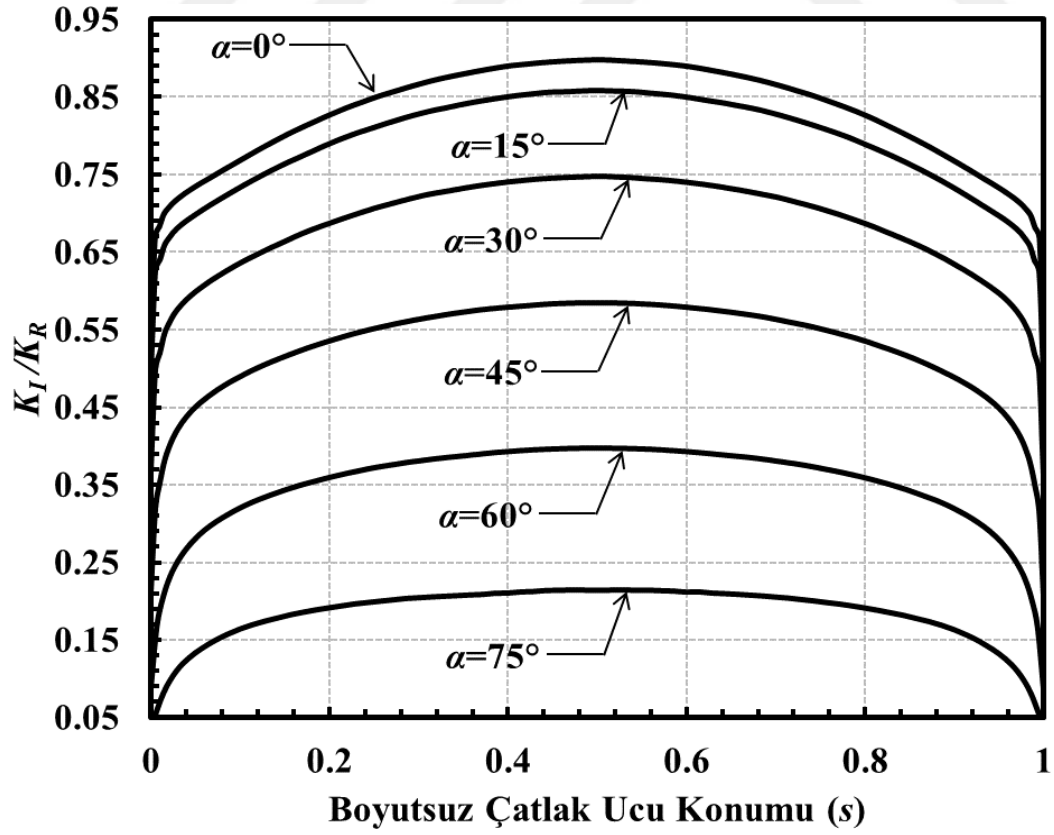
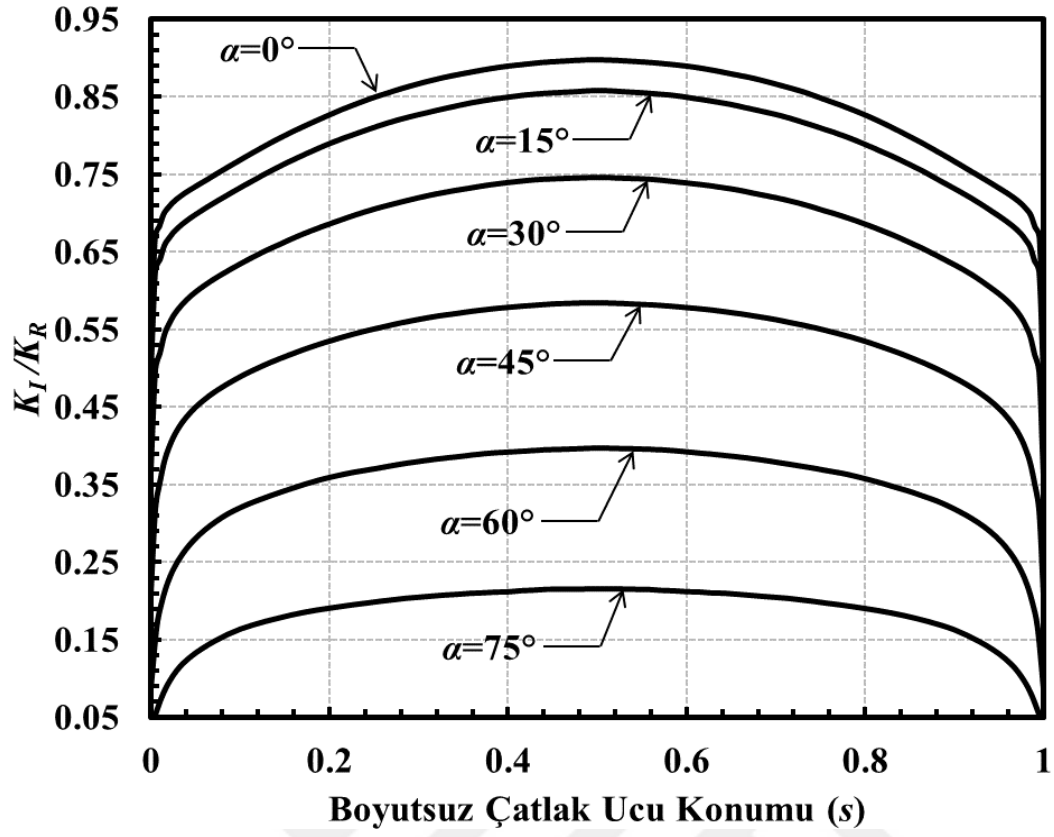
Şekil 3.85. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).

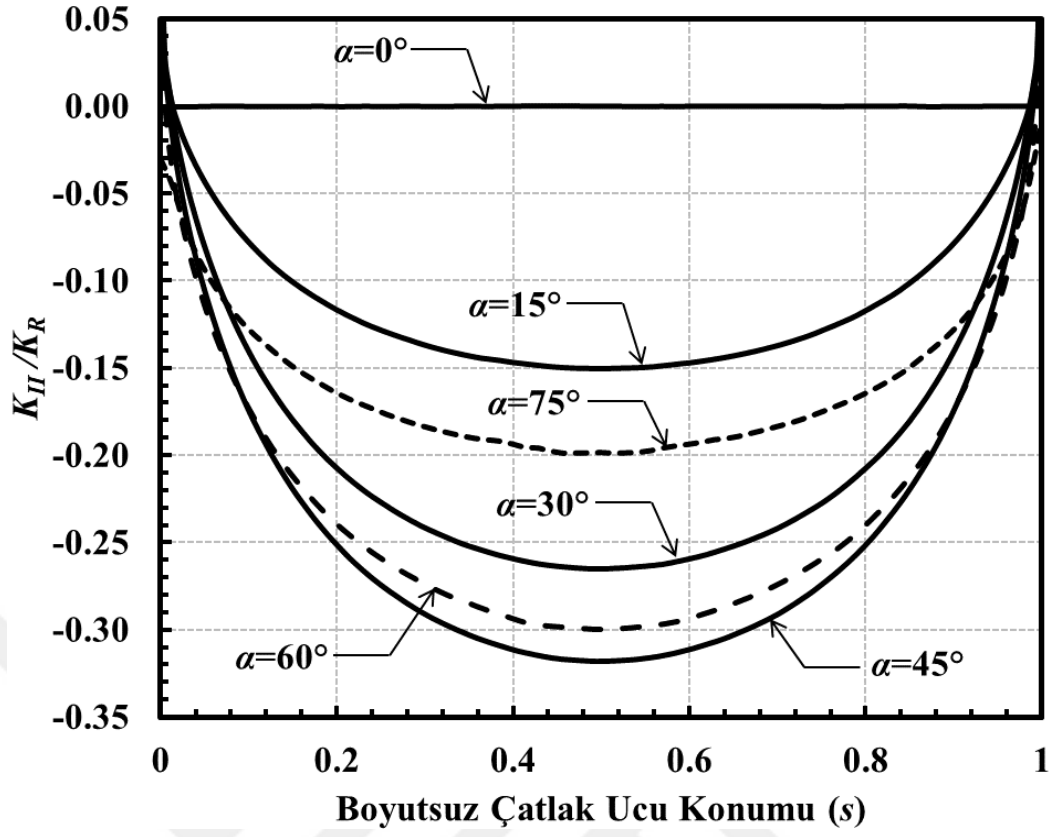


Şekil 3.86. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).

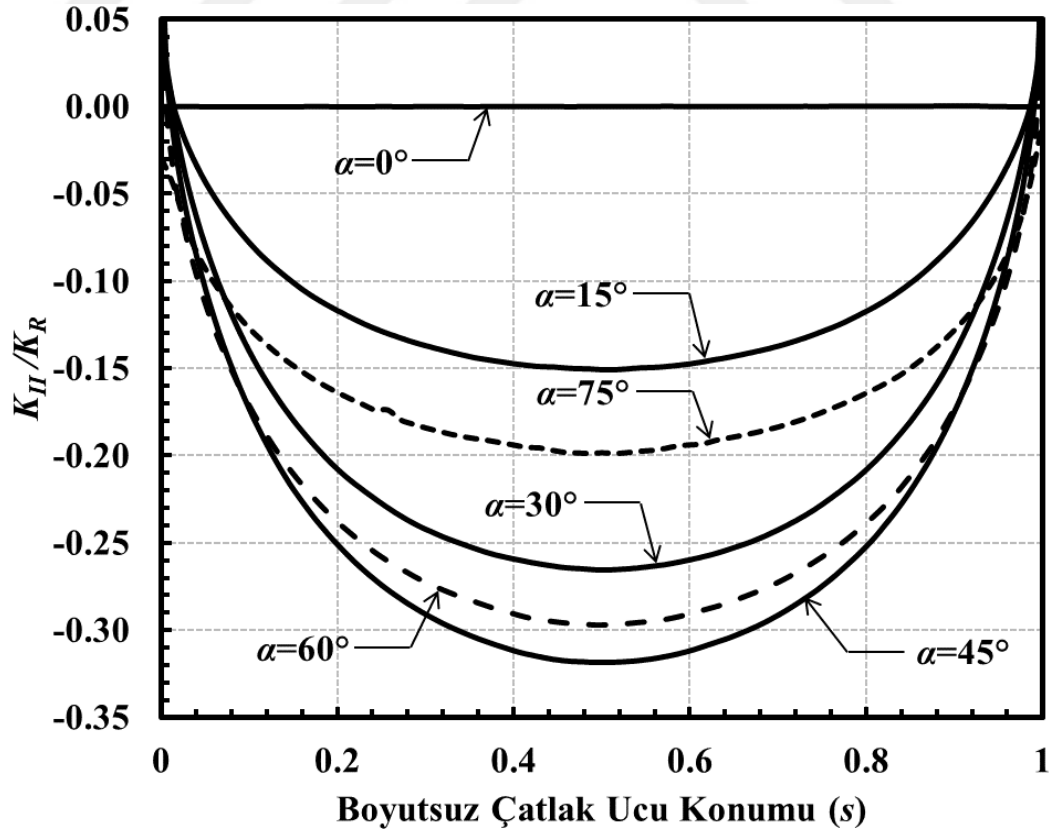


Şekil 3.87. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).

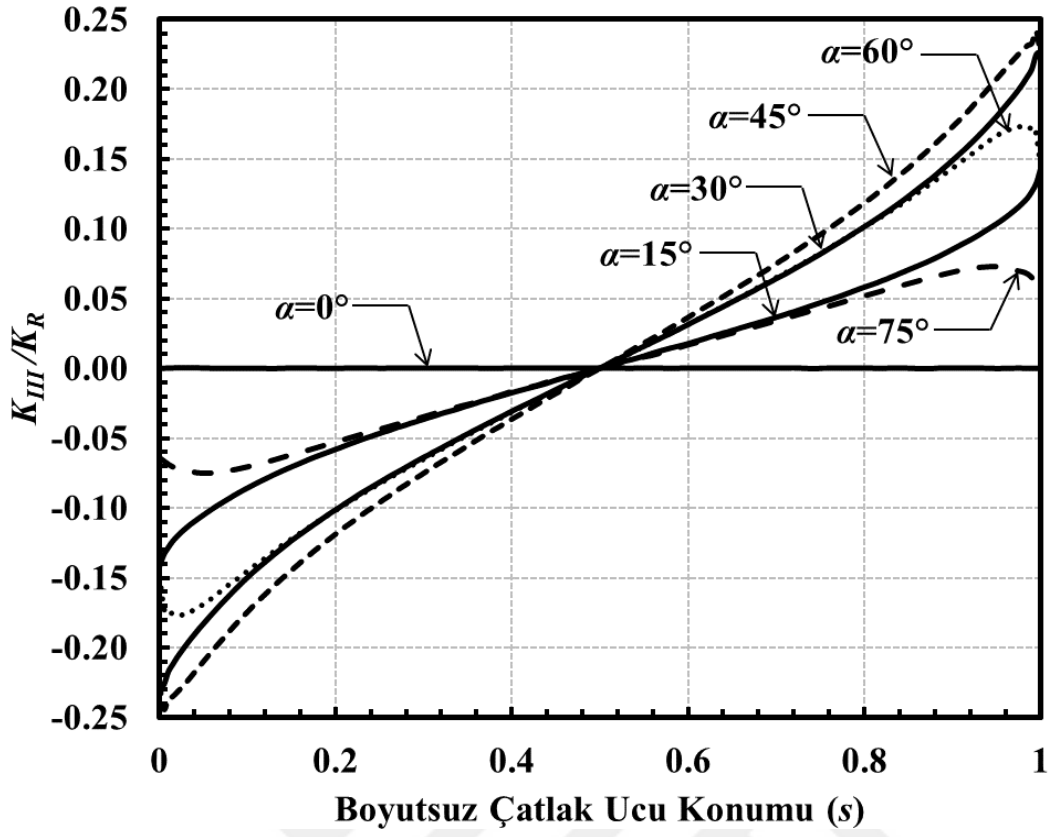




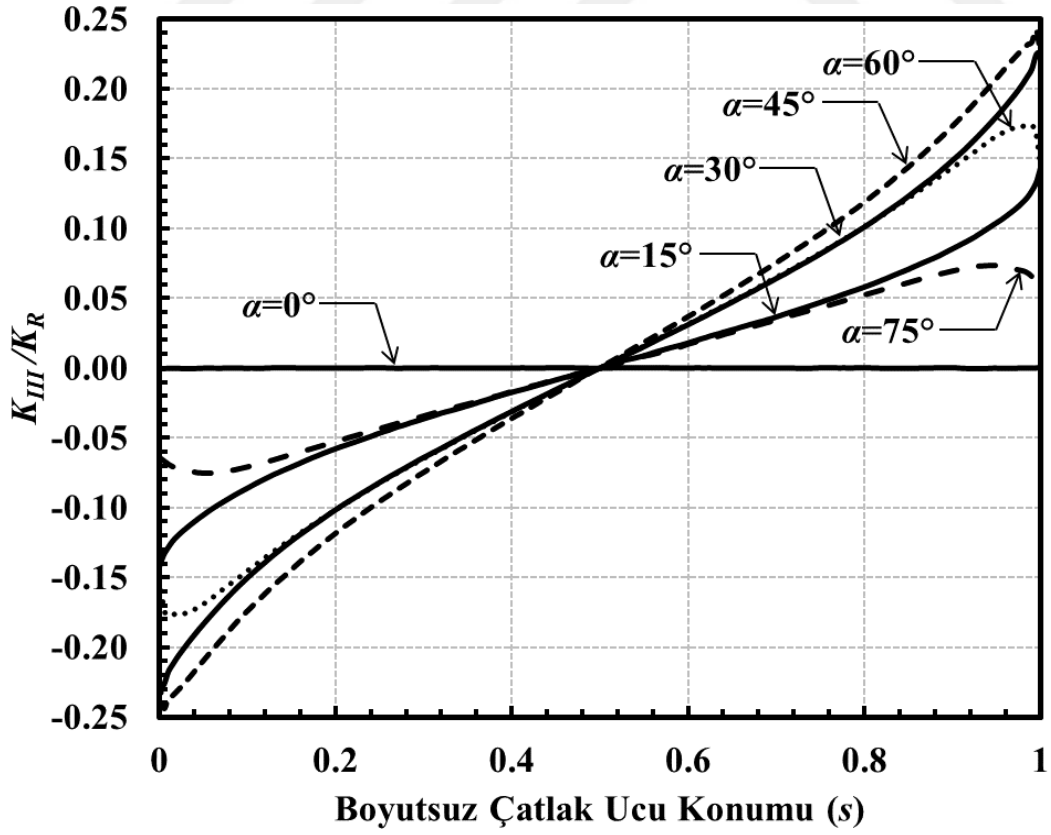
Şekil 3.90. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



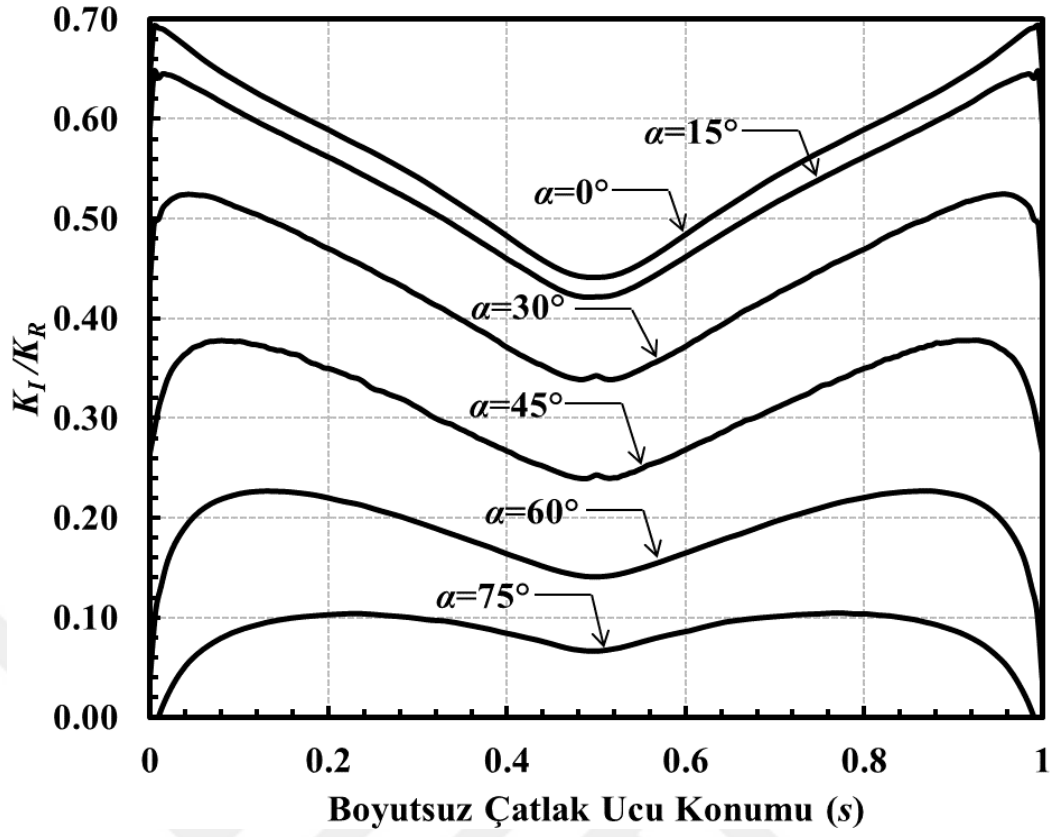
Şekil 3.91. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



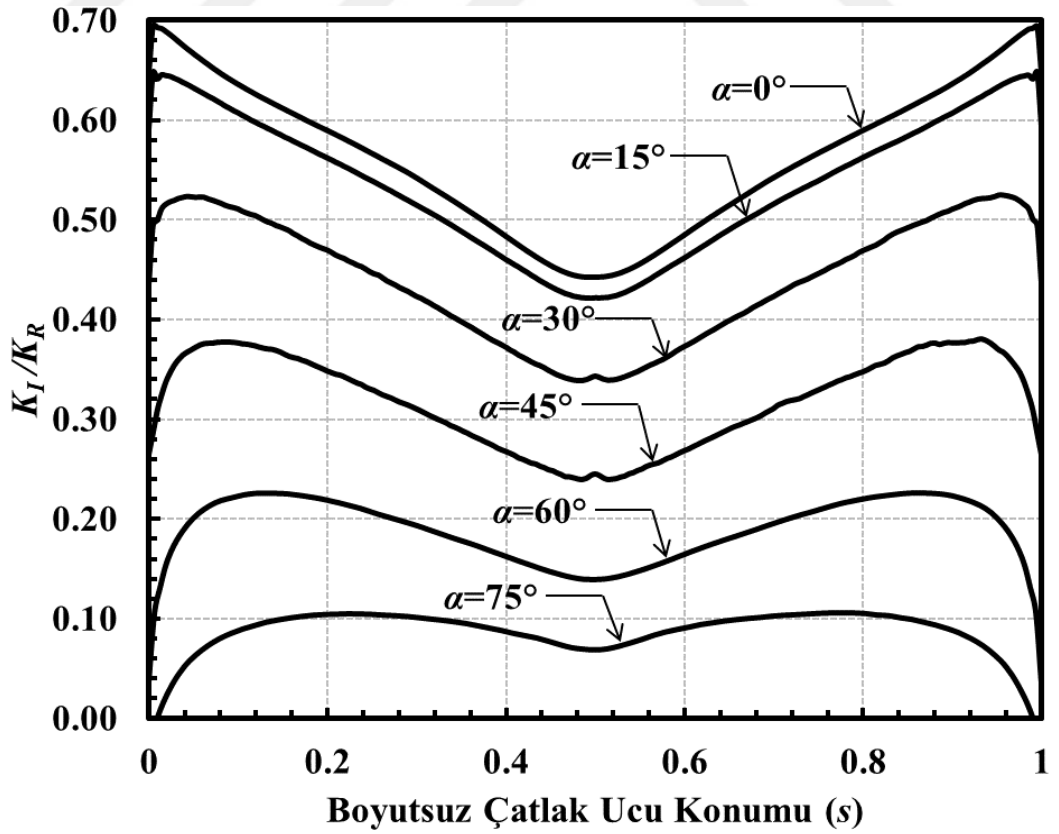
Şekil 3.92. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



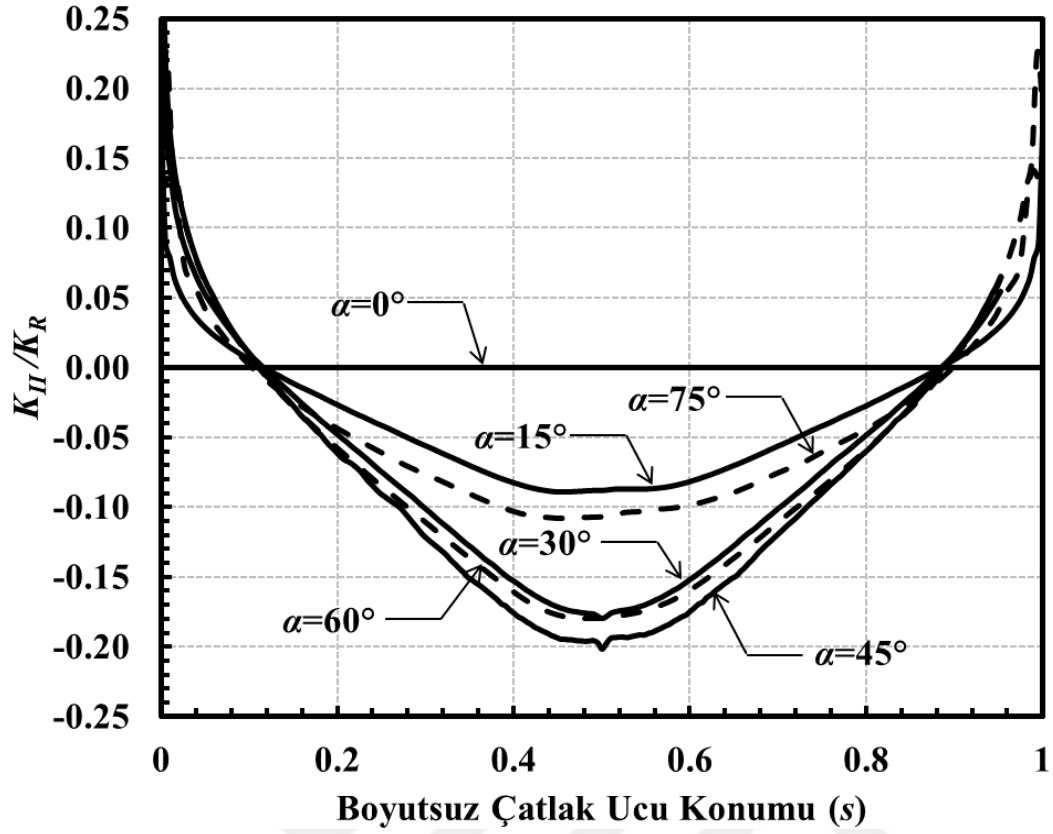
Şekil 3.93. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme).



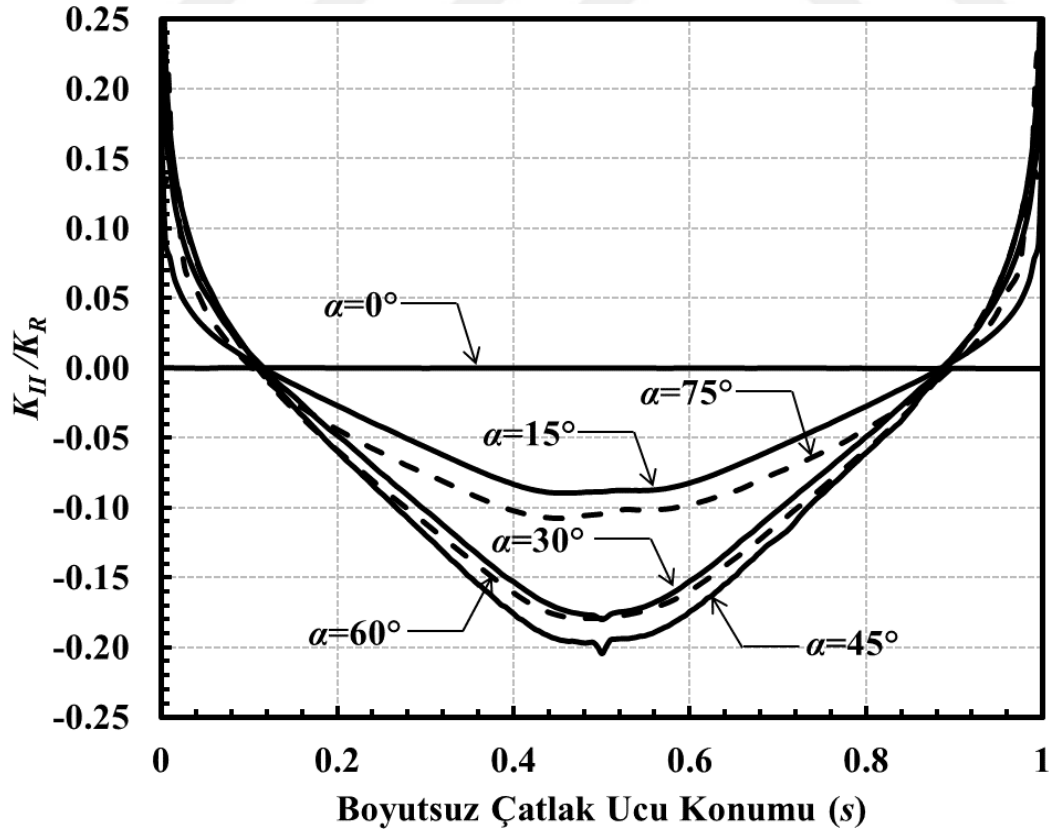
Şekil 3.94. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



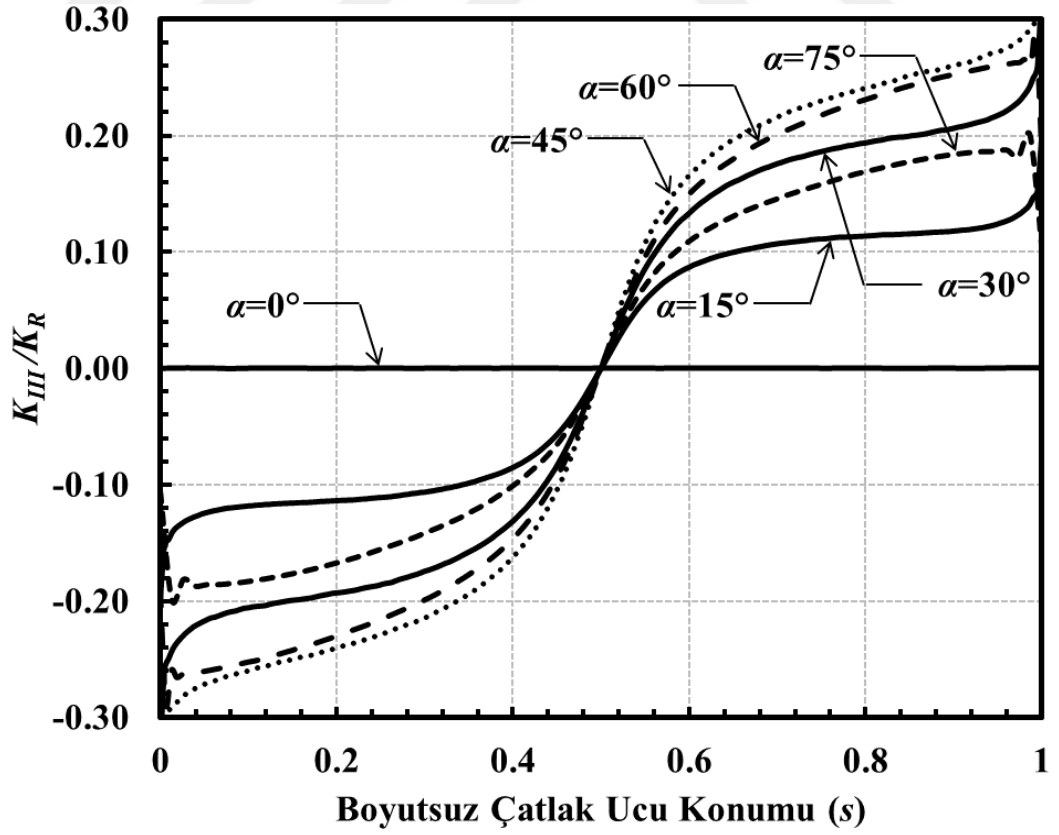
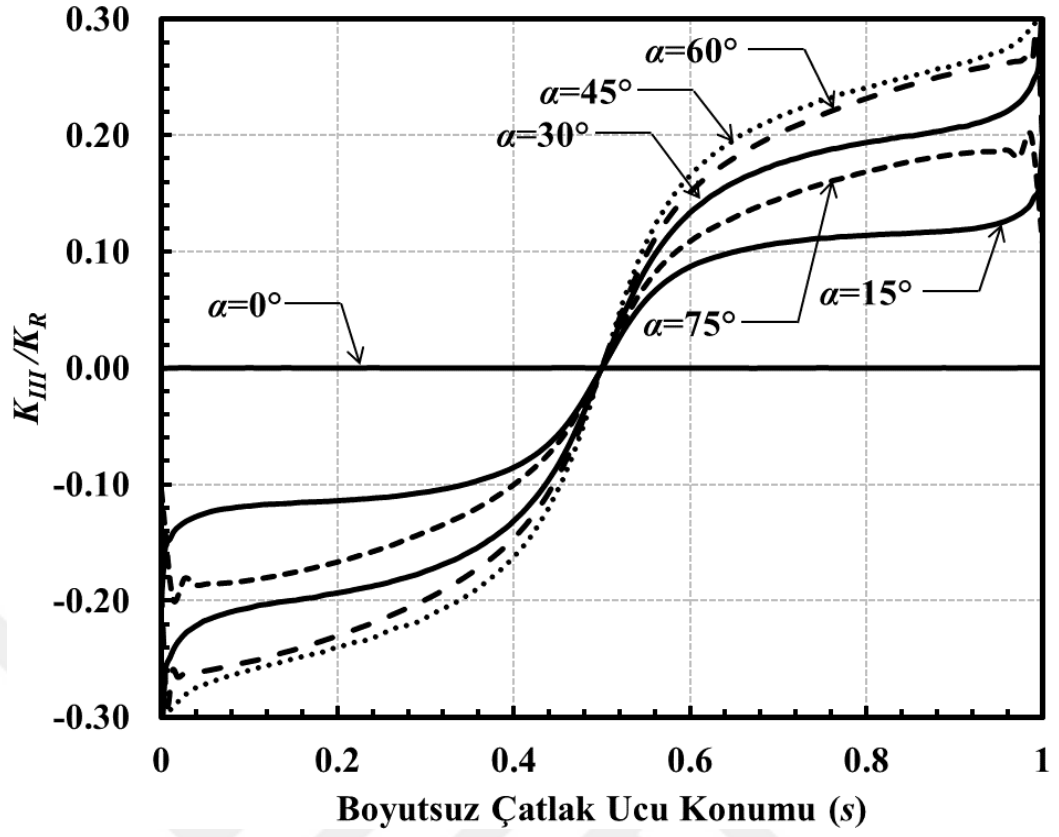
Şekil 3.95. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme).



Şekil 3.96. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).

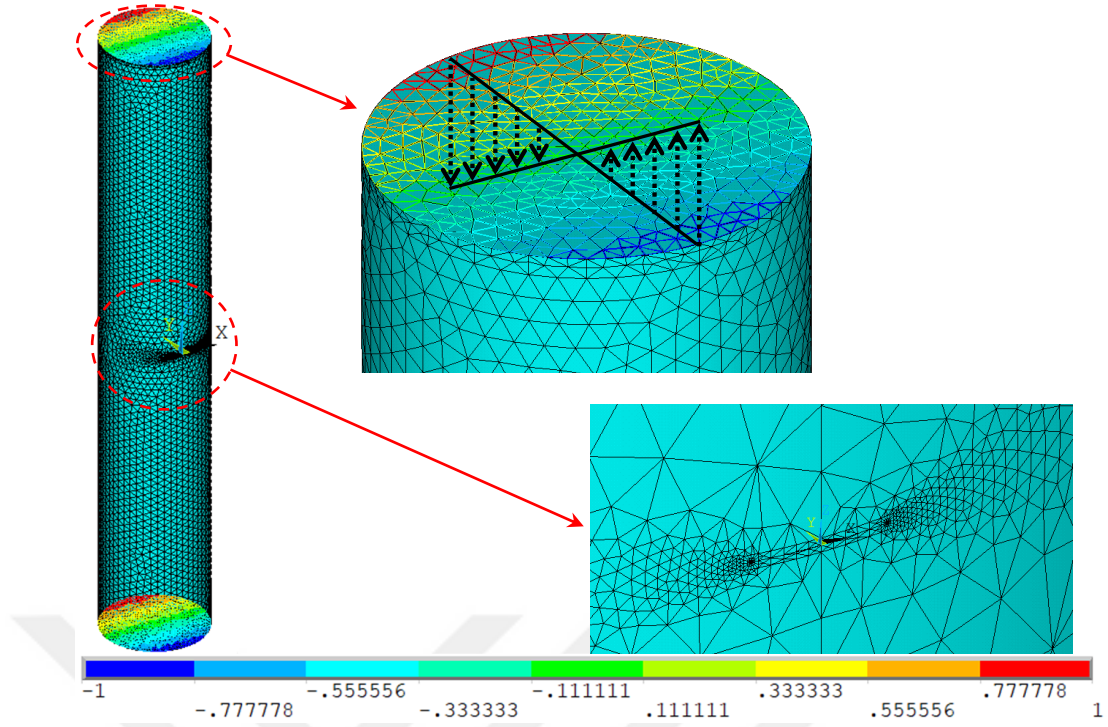


Şekil 3.97. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme).



3.3. Eğilme Gerilmesine Maruz Katı Silindirik Yapıda Bulunan Dönmüş Çatlak Analizleri

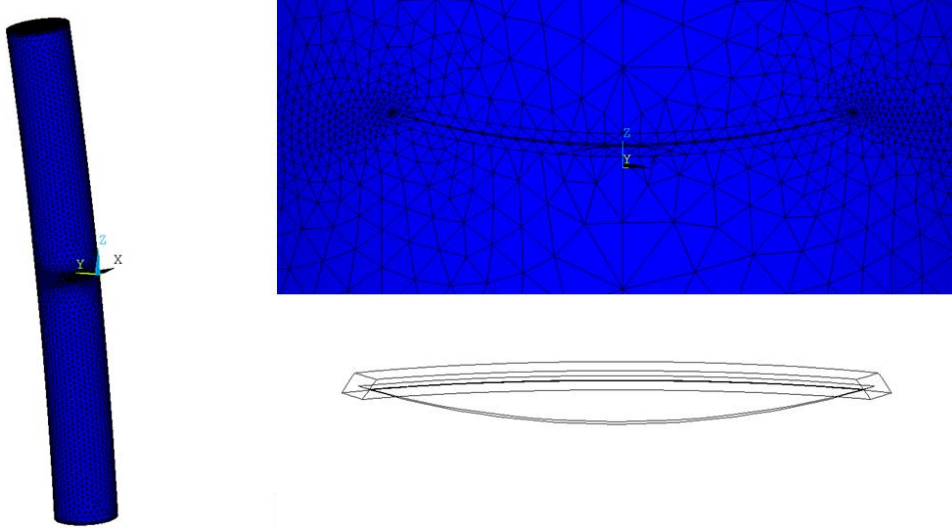
Bu bölümde eğilme gerilmesine maruz katı bir silindirdeki dönmüş çatlak için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} dağılımları verilmektedir. Çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı olan a/c değerleri 0.25, 0.5, 1.0, 2.0; çatlak derinliği/katı silindir çapı oranı olan a/D değerleri sırasıyla 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8; çatlak ile yatay eksen arasındaki açı parametresi olan α değerleri sırasıyla 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° seçilmiştir. Boyutsuz çatlak ucu konumu iki serbest yüzey noktası arasında 0 ve 1 aralığında değişmektedir. Eksenel üniform gerilme durumunda olduğu gibi, her bir geometrik durum için ilgili analizler yapılmış ve tüm farklı dönme açıları için çözümler aynı grafikte olacak şekilde farklı mod GŞF dağılımları sunulmuştur. Çatlak derinliğini tanımlamak için kullanılan a parametresi, tüm modellemelerde 1 birim olarak seçilmiştir. Katı silindirin yarım boy yüksekliği çapın katları şeklinde alınmıştır. $a/D=0.05$ için 3, $a/D=0.1$ için 4 ve diğerleri için de 5 katı olacak şekilde modeller oluşturulmuştur. Modellerde daha iyi mesh kalitesi elde edebilmek için silindirler beş kısıma bölünmüştür. FRAC3D'nin çözüm yapabilmesi için silindirin alt ve üst dairesel alanlarından kısa hacim ekstrüzyonları verilmiştir. Bu işlem tüm detayları ile Bölüm 5.'te anlatılmıştır. ANSYS Mechanical APDL [25] arayüzünde modeller oluşturularak yapılan tüm işlem adımlarında kolaylık sağlaması açısından programın ürettiği kodlar File=>Log File komutu kullanılarak not defterine kaydedilmiştir. Sınır şartlarını tanımlamak için önce kısa hacim ekstrüzyonlarının olduğu bölgelere daha fazla sıklık verilmiştir. Sonra doğrusal yayılı basınç yükü, çap yönünde katı silindirin merkezinde sıfır olması koşuluyla alt ve üst taban alanlara uygulanmıştır. Böylece eğilme yükü tanımlanmaktadır. Katı silindirin rijit cisim hareketini kısıtlamak için farklı noktalardan sabitleme yapılmıştır. Alt tabanda çeyrek daire dilimlerine karşılık gelen 4 adet anahtar noktası bulunmaktadır. Bu noktalardan birinden üç eksen, karşısında bulunan noktadan iki eksen ve başka bir noktadan tek eksen sabitlenmiştir. Sonraki aşamada FCPAS verileri yardımıyla gerekli *.geo ve *.run dosyaları oluşturularak kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. FRAC3D kullanılarak hesaplanan K_I , K_{II} ve K_{III} değerleri uygulanan yüke bağlı bir referans K_R değeri ile denklem 3.2'deki denklem yardımıyla normalize edilmiştir. Şekil 3.100'de eğilme yüküne maruz katı silindirin sonlu ögeler modeli sunulmaktadır.



Şekil 3.100. $a/c=1$, $a/D=0.05$, $\alpha =15^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlakına sahip katı bir silindirin global sonlu elemanlar modeli, eğilme gerilme yüklemesi ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.

Şekil 3.101’de katı silindire uygulanan eğilme yükü sonucu oluşan deformasyon ve çatlak bölgesinin görünümü verilmiştir. Eğilme yükü altındaki silindirde bulunan yüzey çatlaklarının tüm kombinasyon durumları ve tüm kırılma modları için normalize edilmiş GŞF çözümleri Şekil 3.102-3.173’te verilmektedir. Çatlak ile yatay eksen arasında açının sıfır olduğu durum sadece K_I değerlerini üretir ve dönme açısı arttıkça K_{II} ve K_{III} değerleri de oluşturulur.

Açılma modu analizlerinde en yüksek boyutsuz K_I dağılımı çatlakın yatay eksen ile 0 derece açı yaptığı durumda oluşmaktadır. Dönme açısı arttıkça boyutsuz K_I dağılımlarının büyüklüğü azalmaktadır. Boyutsuz K_I dağılımları, bir serbest yüzey noktasından diğer serbest yüzey noktasına doğru simetriktir. Şekil 3.159’da $\alpha =0^\circ$ ve 15° dönme açısı durumları için derinlik bölgesinde çatlak yüzeyleri teması oluşmakta ve gerçekleştirilen analizlerde temas mekaniği modellenmediği için boyutsuz K_I değerleri negatif olarak hesaplanmıştır.

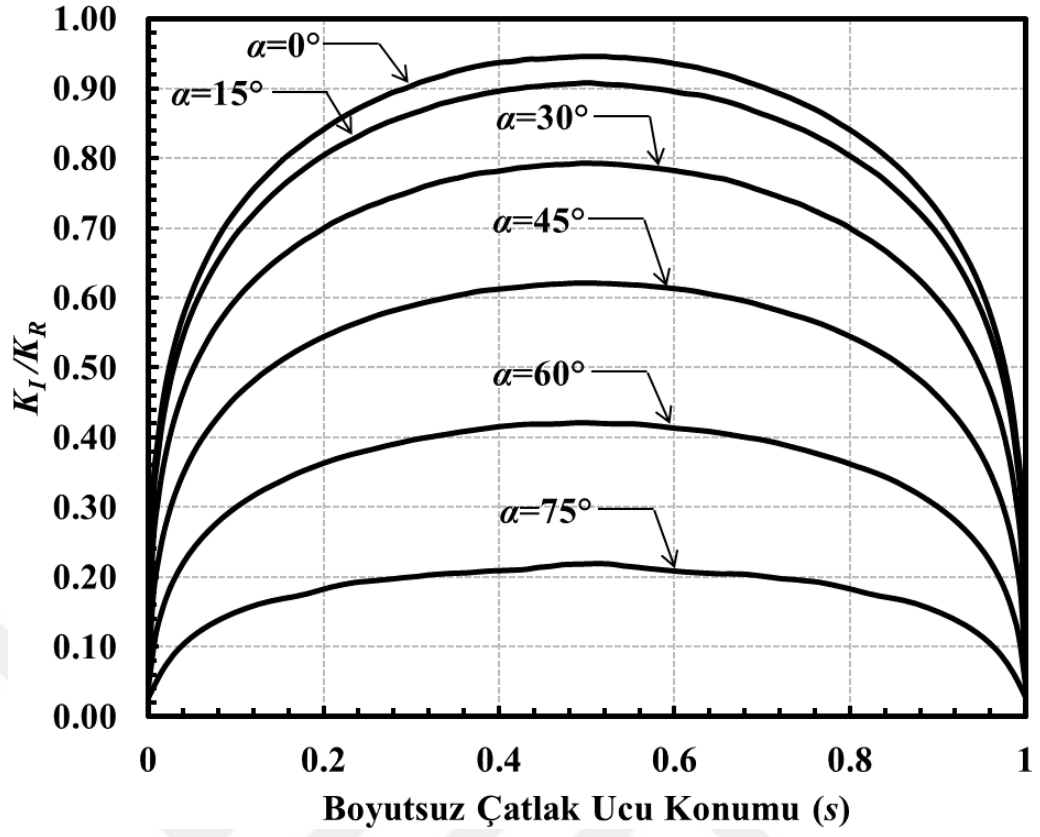


Şekil 3.101. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ ve 30 derece dönmüş çatlak içeren katı silindire uygulanan eğilme yükü sonrasında meydana gelen deformasyon ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.

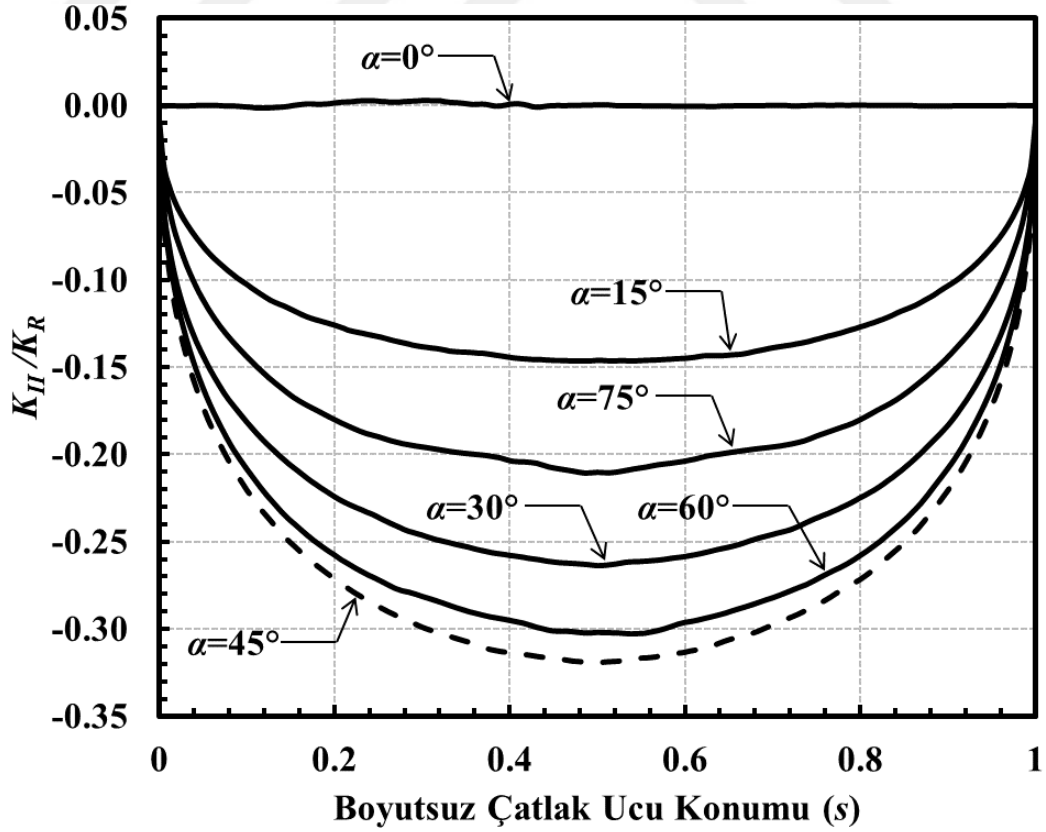
Kayma modu analizlerinde en yüksek boyutsuz K_{II} değerleri, maksimum kayma gerilmesinin olduğu düzlemdedir. Çatlak ile yatay eksen arasında açının olmadığı durumlarda boyutsuz K_{II} değerleri 0'dır. Boyutsuz K_{II} dağılımları da, derinlik noktasına göre serbest yüzey noktaları arasında simetrik dağılıma sahiptir.

Yırtılma modu analizlerinde boyutsuz K_{III} dağılımları Şekil 3.104'te ve diğer ilgili grafiklerde verilmiştir. Dönme açısı 0 derece olduğu durumlarda boyutsuz K_{III} değerleri 0'dır. Boyutsuz K_{III} dağılımları serbest yüzey noktasından diğer serbest yüzey noktasına doğru anti-simetriktir. Boyutsuz K_{III} dağılımları, çatlak yüzeyi ve yüzeye yakın kısımlarda sonuçlarda dalgalı bir biçimde görülmektedir. Serbest yüzey etkisinden dolayı ani GŞF değişimleri meydana gelmektedir ve bu oldukça dar serbest yüzey bölgesi için özel bir ağ modellemesi ve analiz gerçekleştirilmemiştir.

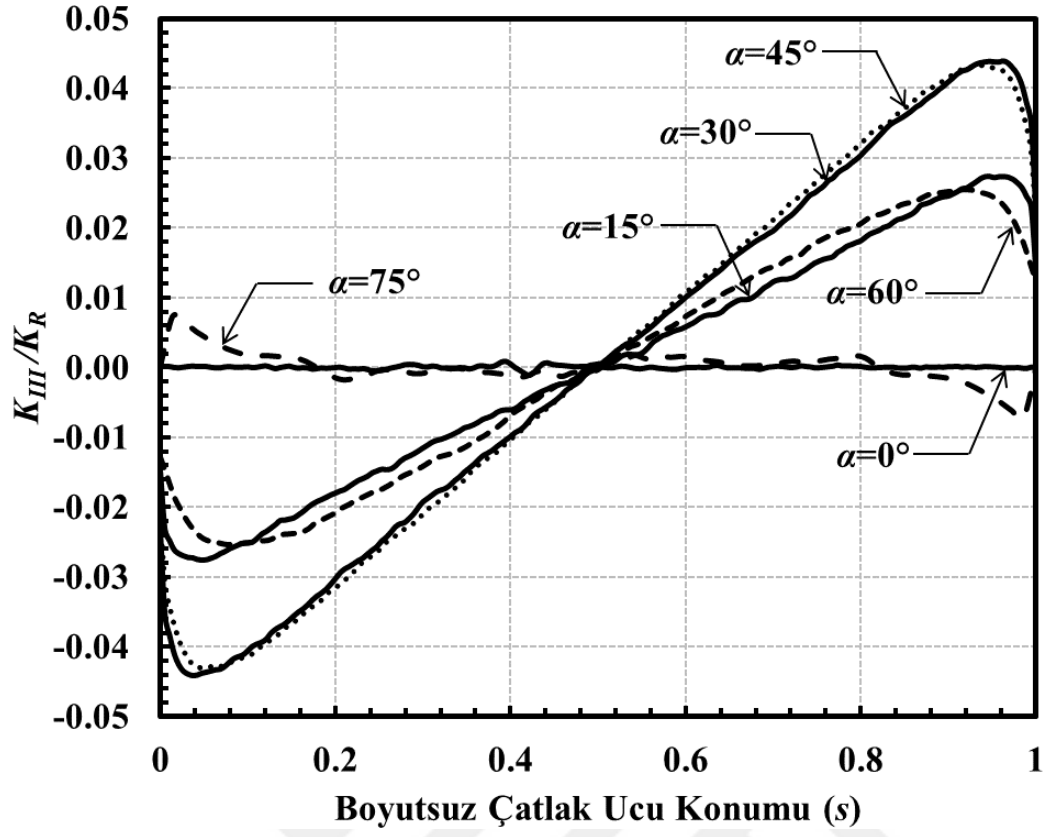
Tüm modlar için gerilme şiddet faktörü grafikleri Şekil 3.102-3.173'te görülmektedir. $a/D=0.05$ için $a/c=0.5$ ve 2 oranlarında silindir yüksekliklerinin iki katına çıkarılması ile model eleman ve düğüm noktası sayılarının artmasına bağlı olarak analizlerin çözüm süreleri de artmıştır. Şekil 3.162-3.173'te görüldüğü gibi, yükseklik artırımı sonrası grafik dağılımlarında kaydadeğer bir değişim görülmemiştir.



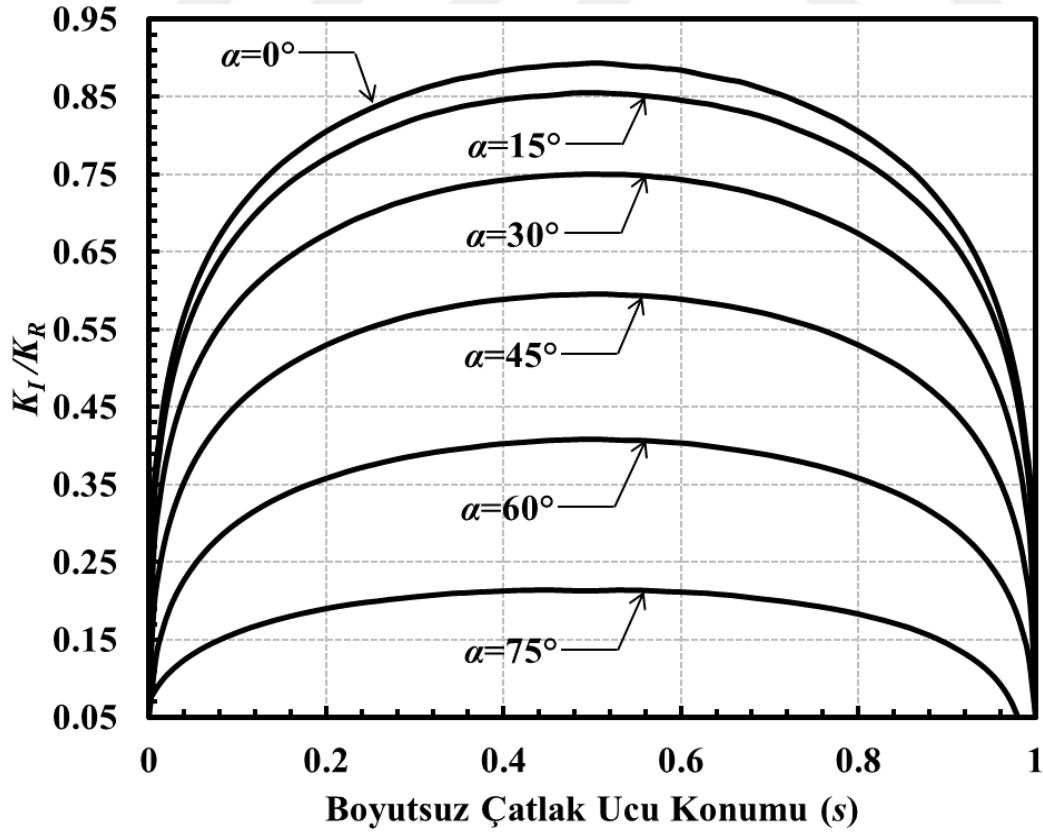
Şekil 3.102. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



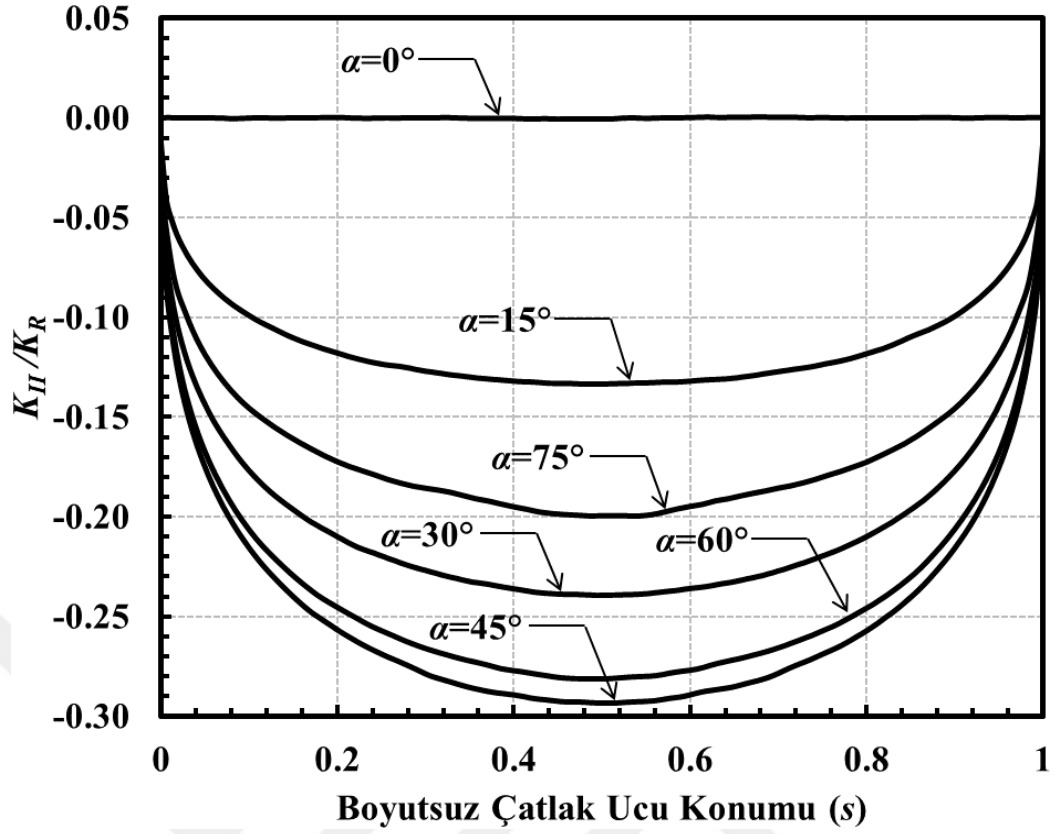
Şekil 3.103. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



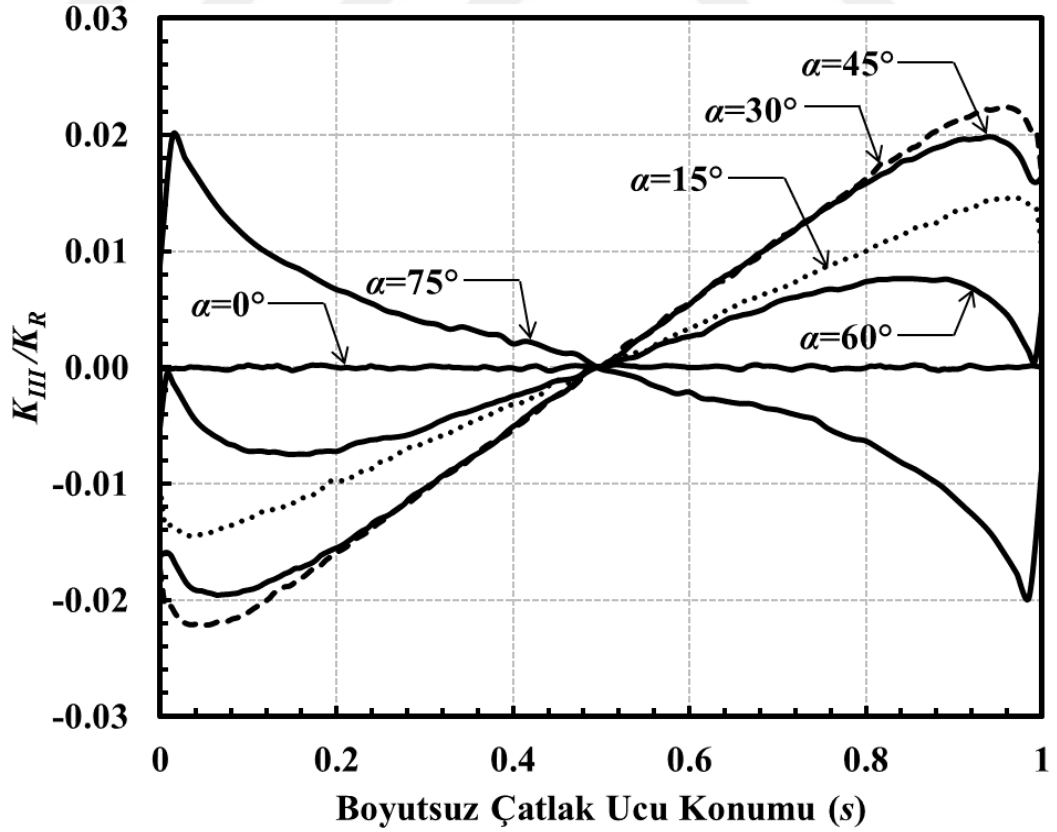
Şekil 3.104. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



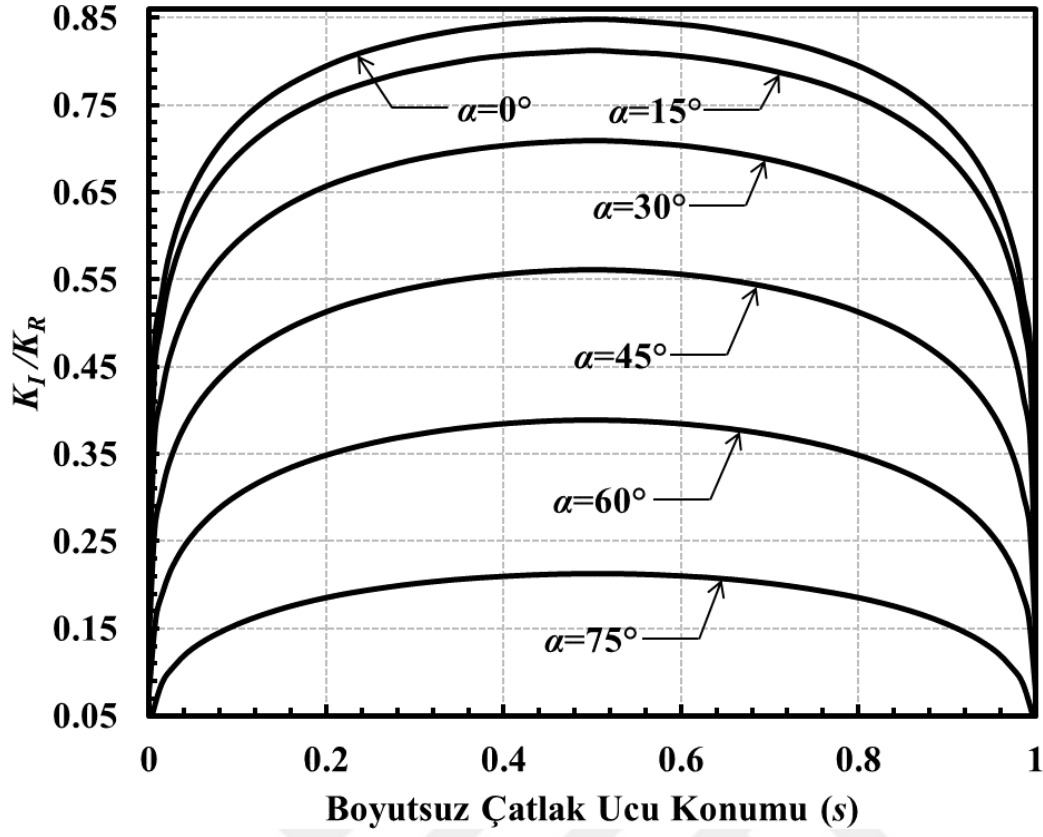
Şekil 3.105. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



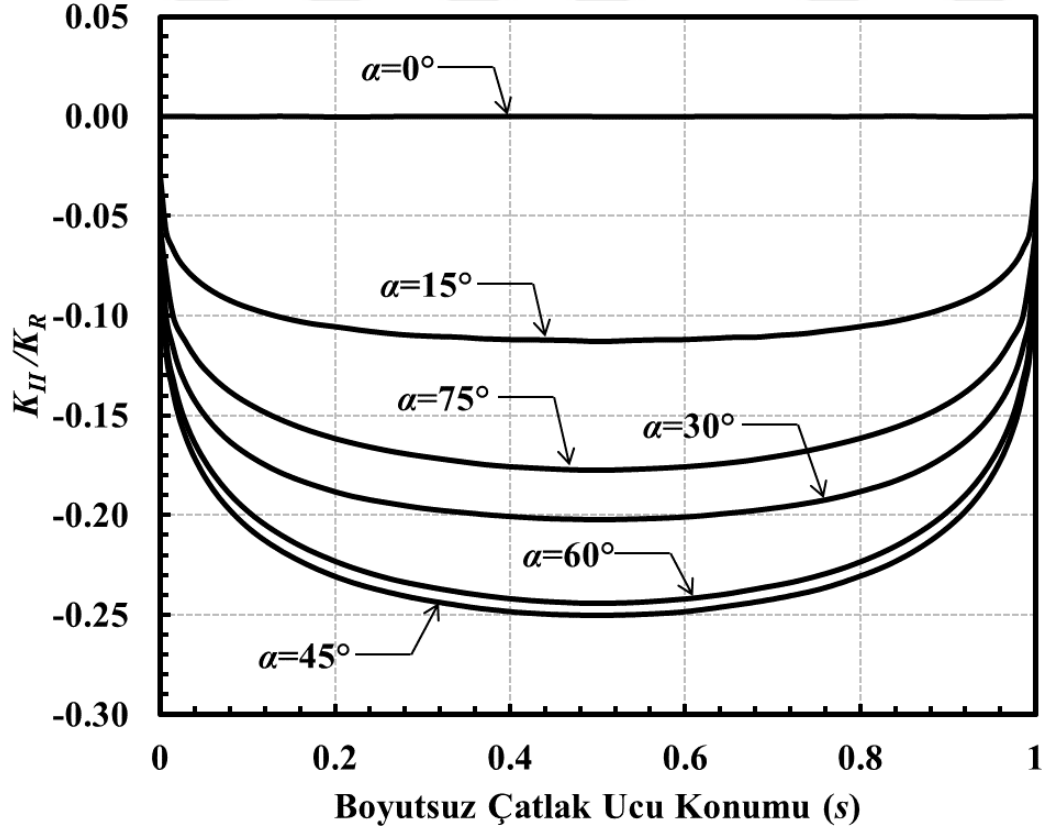
Şekil 3.106. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



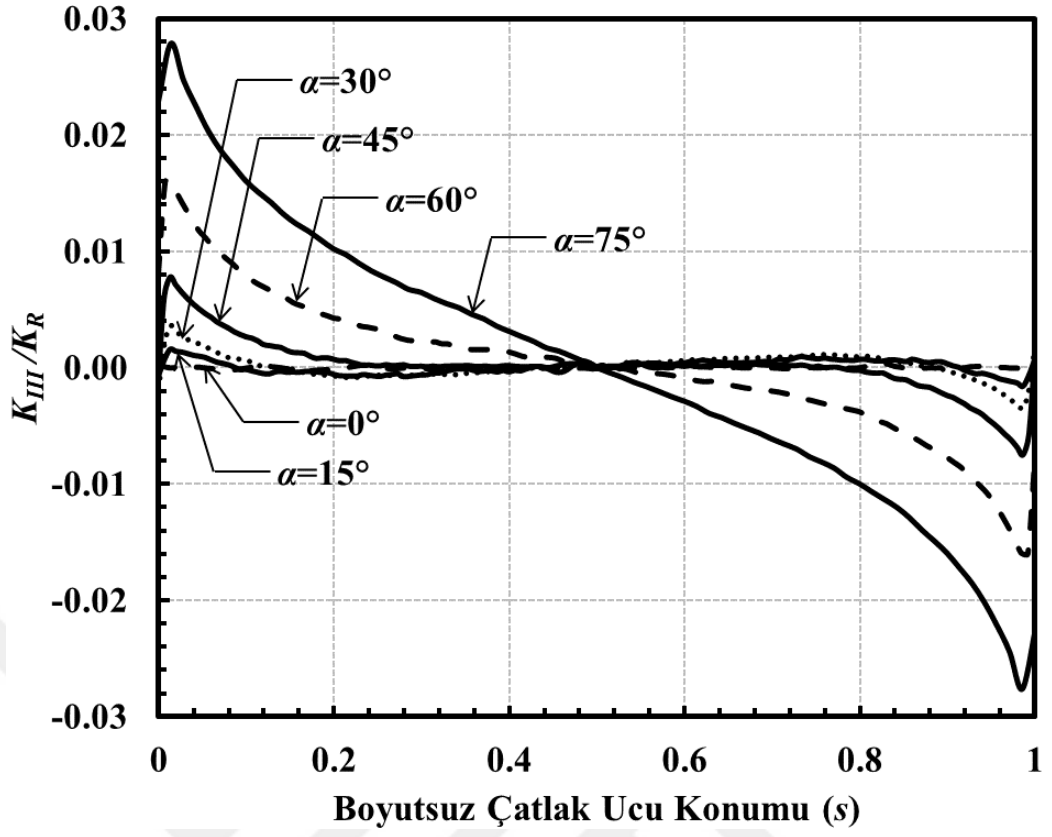
Şekil 3.107. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



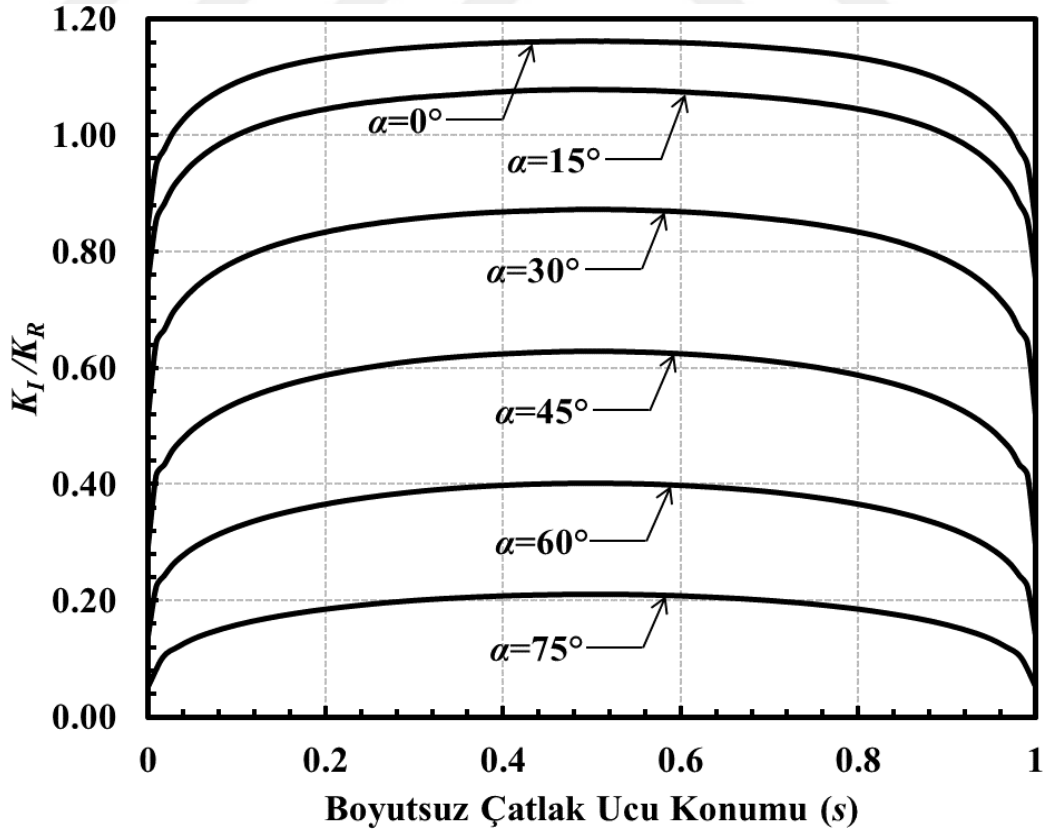
Şekil 3.108. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



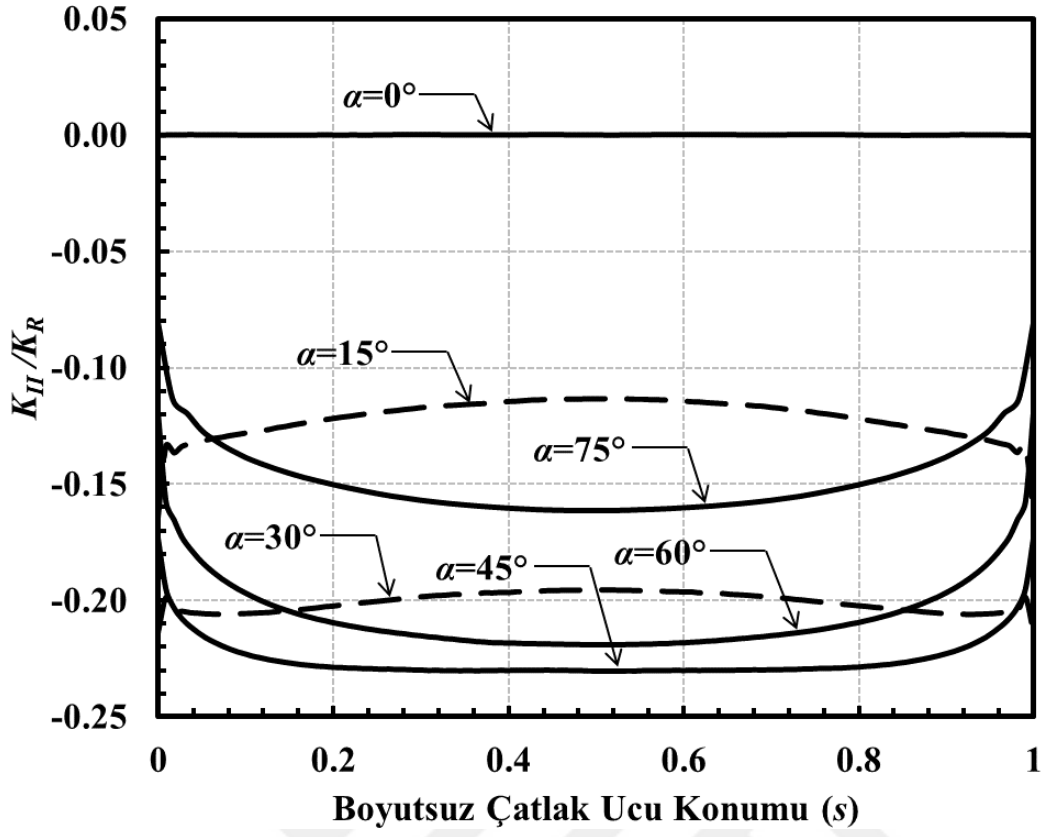
Şekil 3.109. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



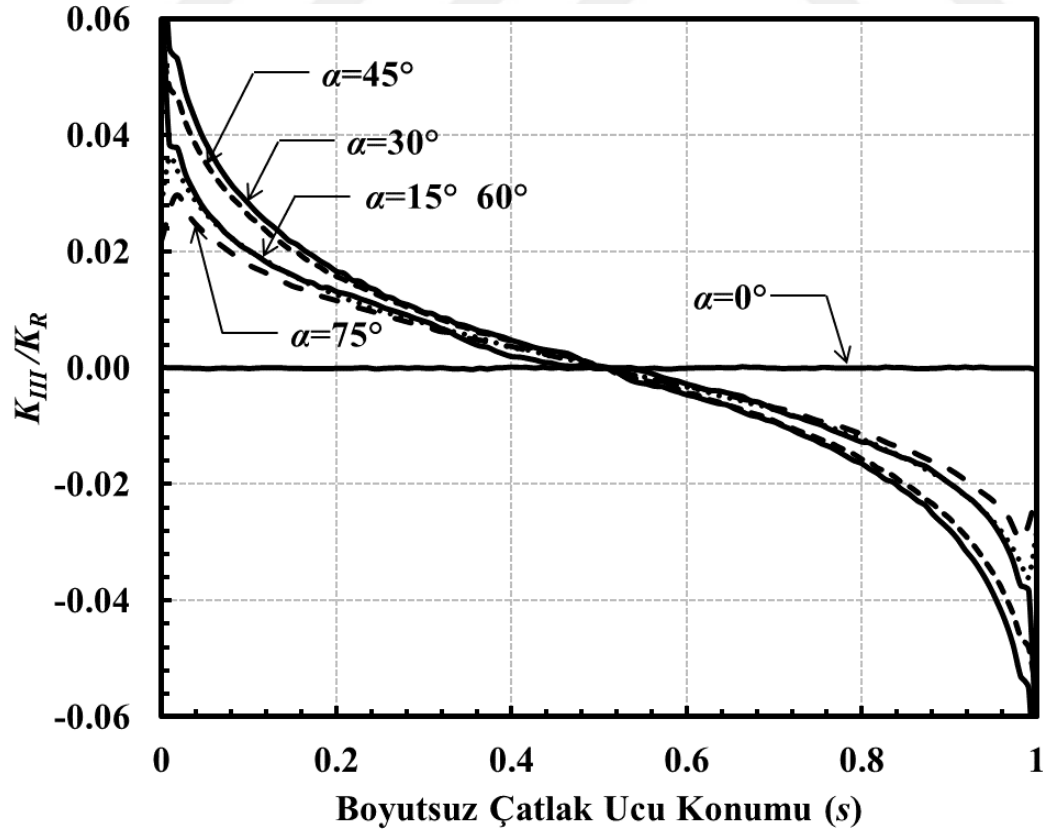
Şekil 3.110. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



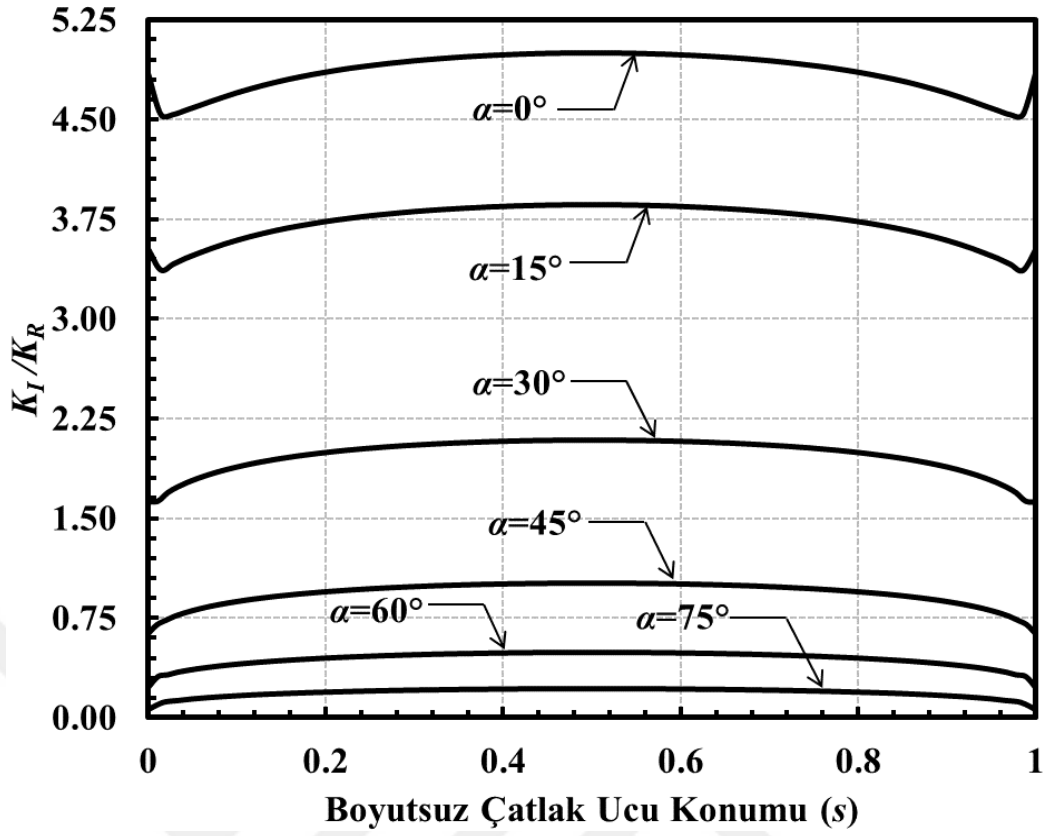
Şekil 3.111. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



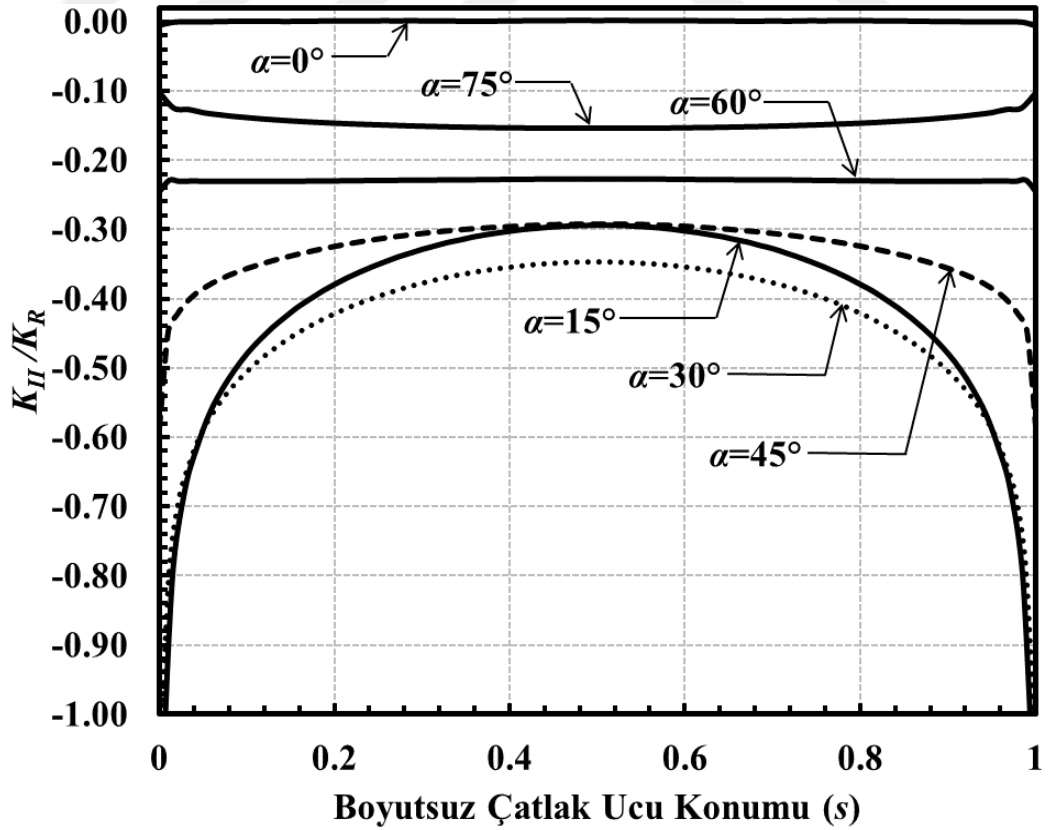
Şekil 3.112. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



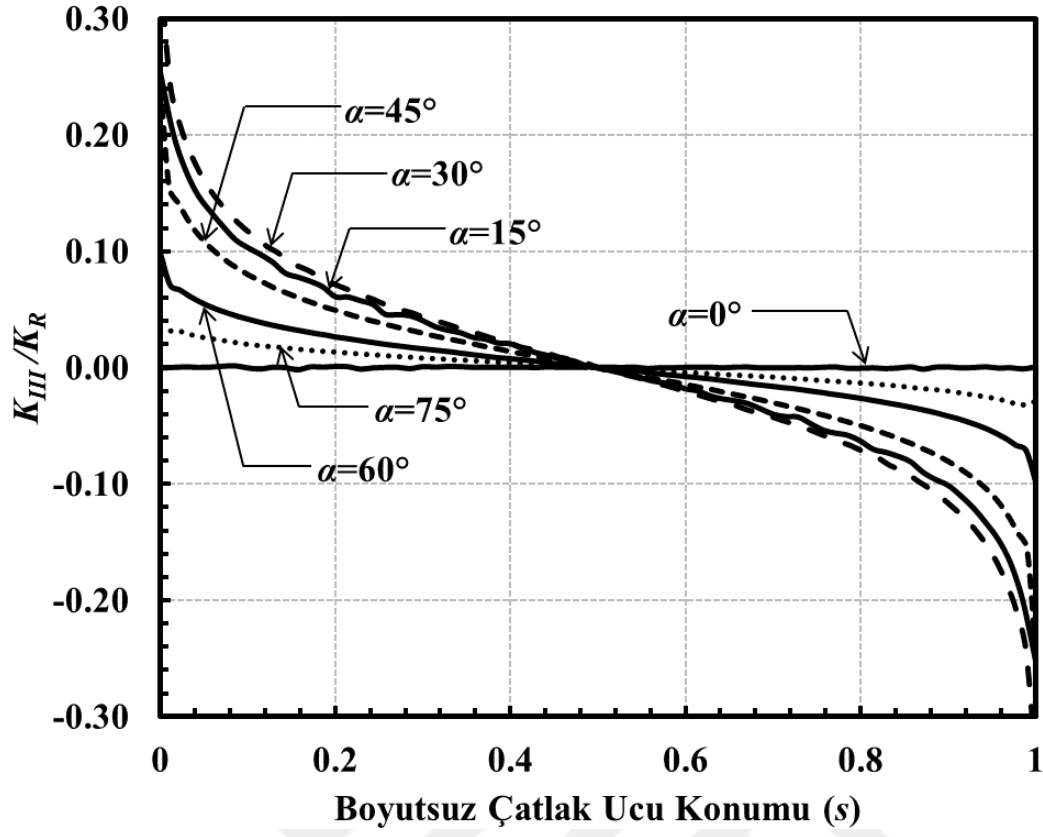
Şekil 3.113. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



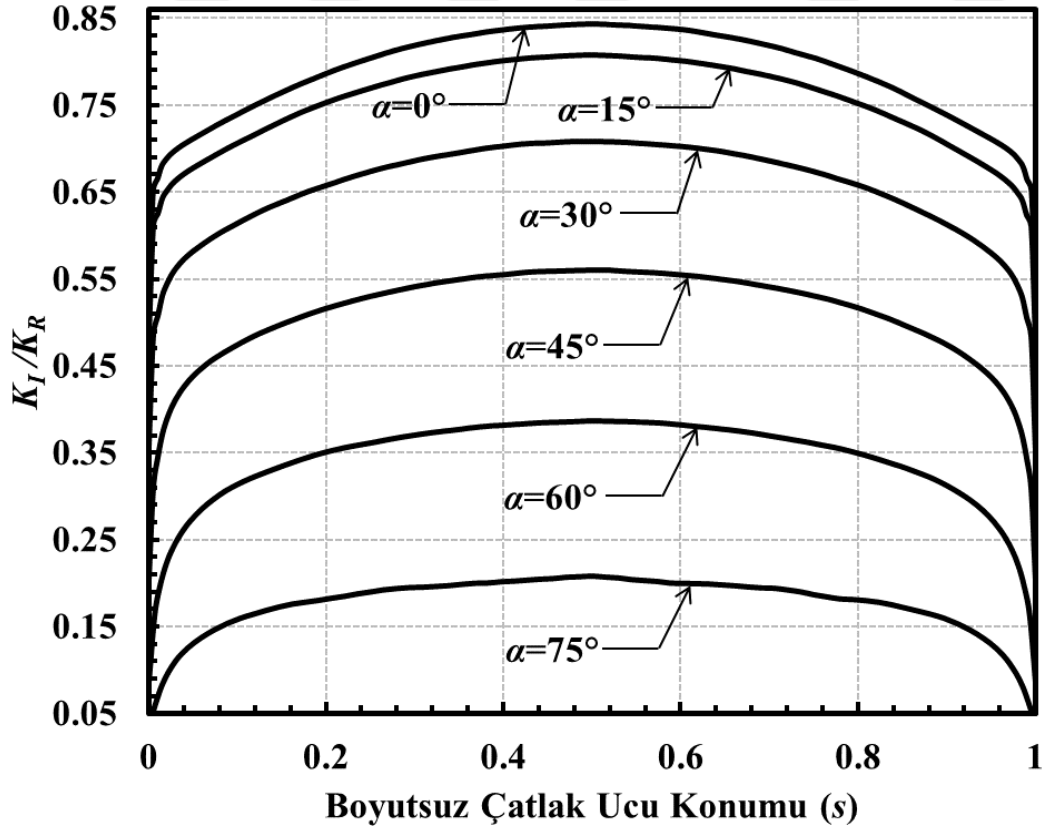
Şekil 3.114. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



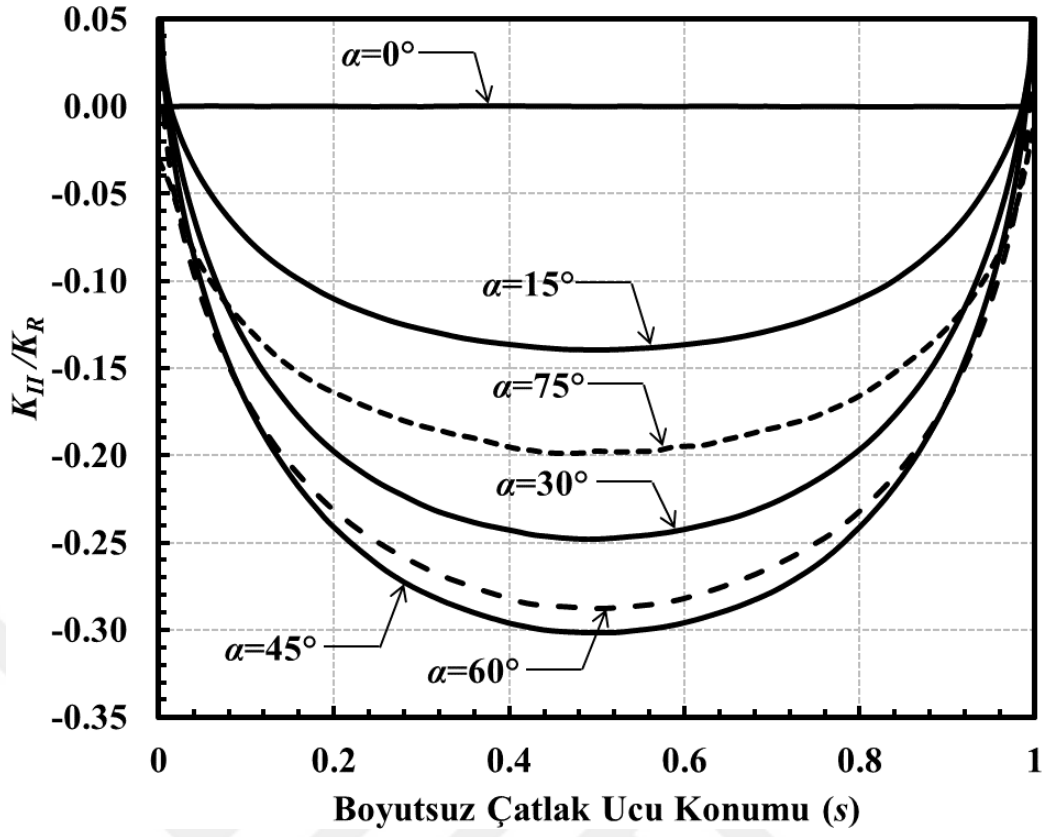
Şekil 3.115. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



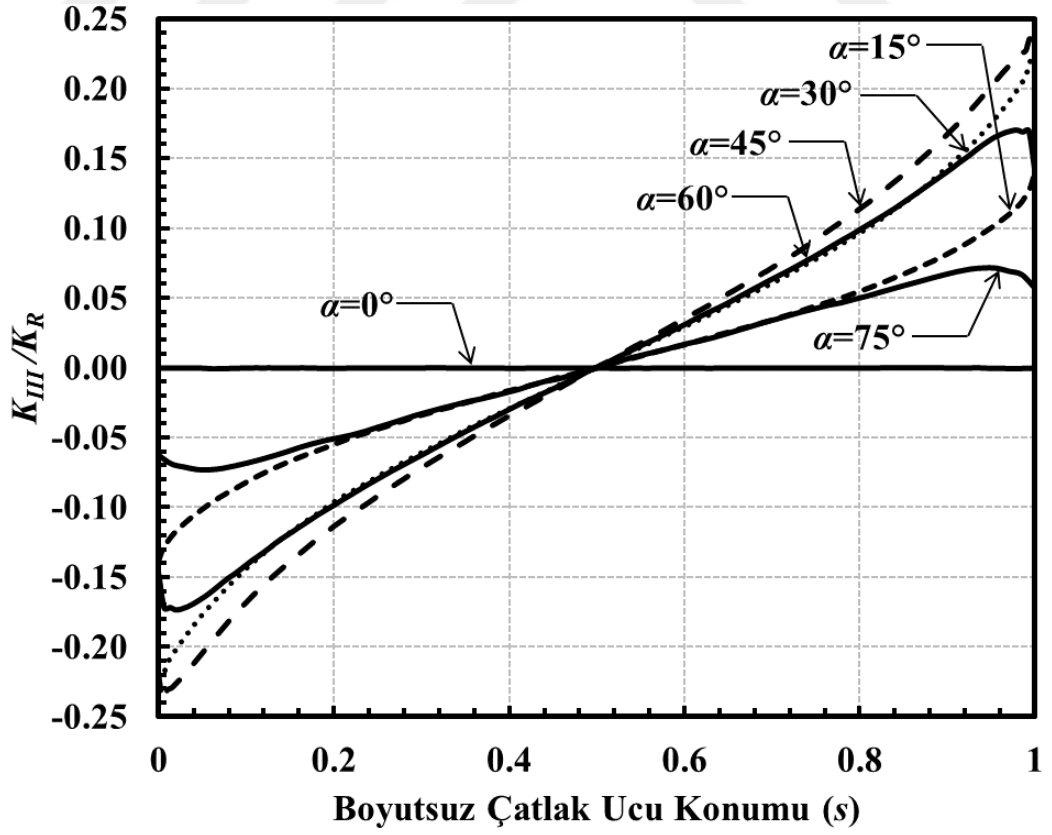
Şekil 3.116. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



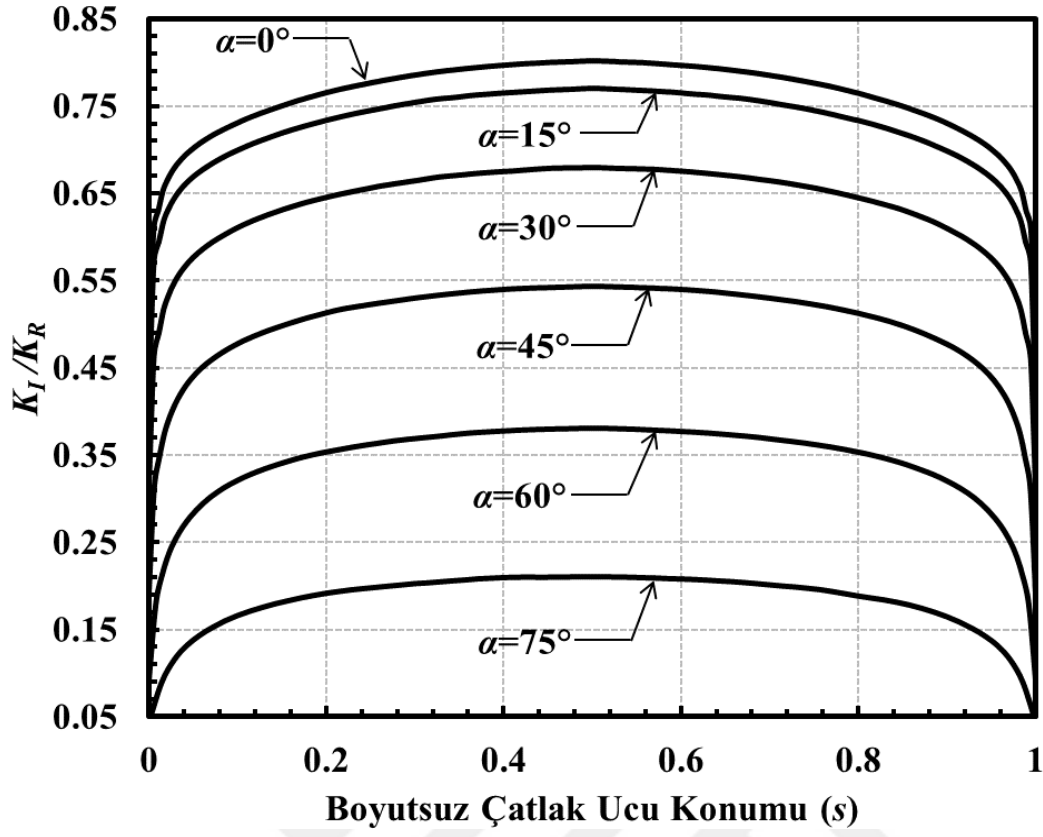
Şekil 3.117. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



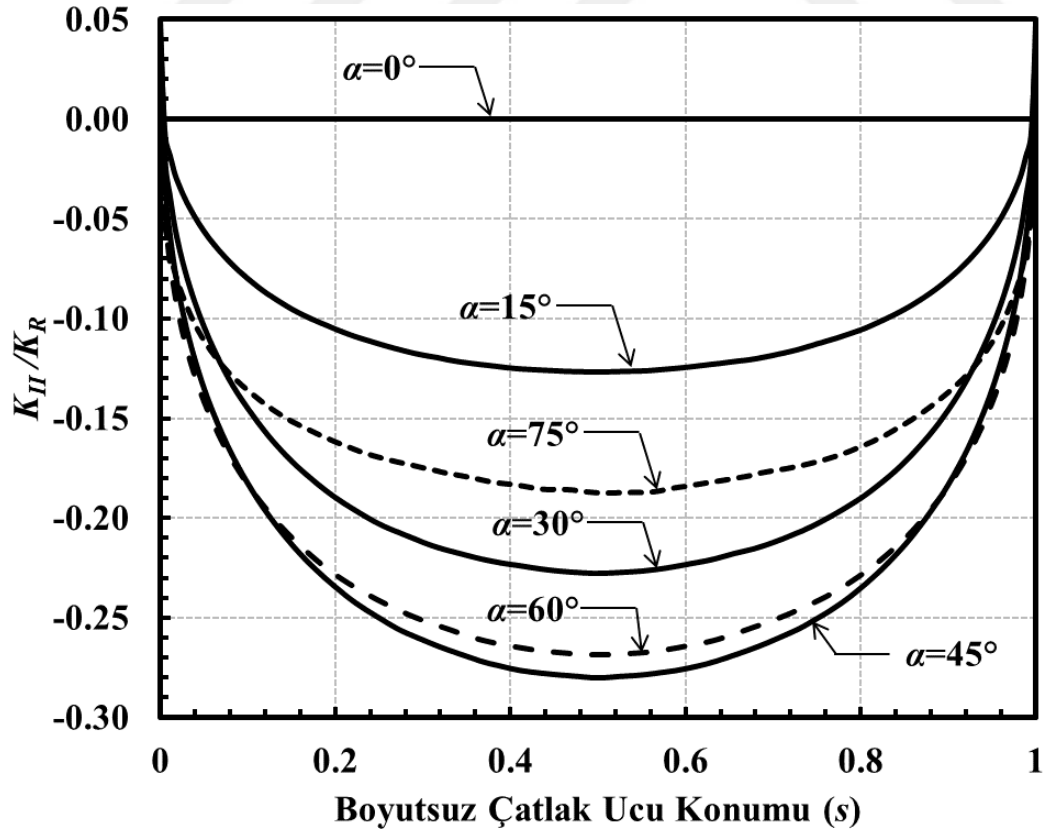
Şekil 3.118. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



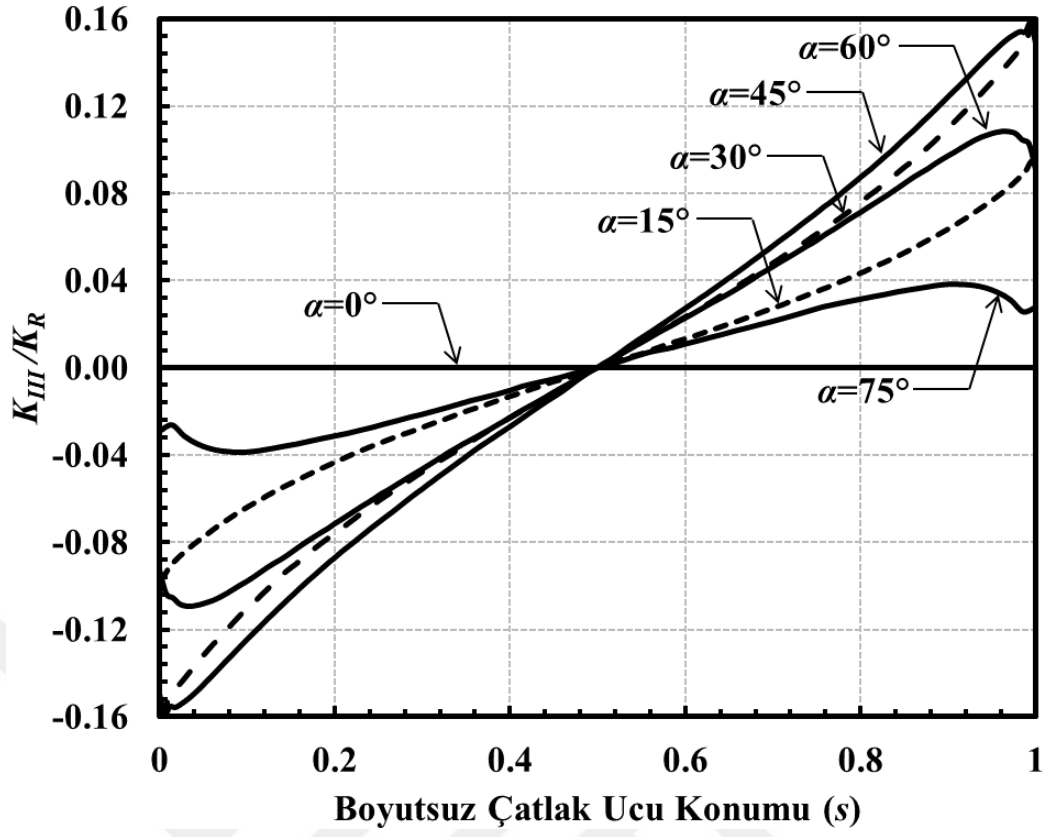
Şekil 3.119. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



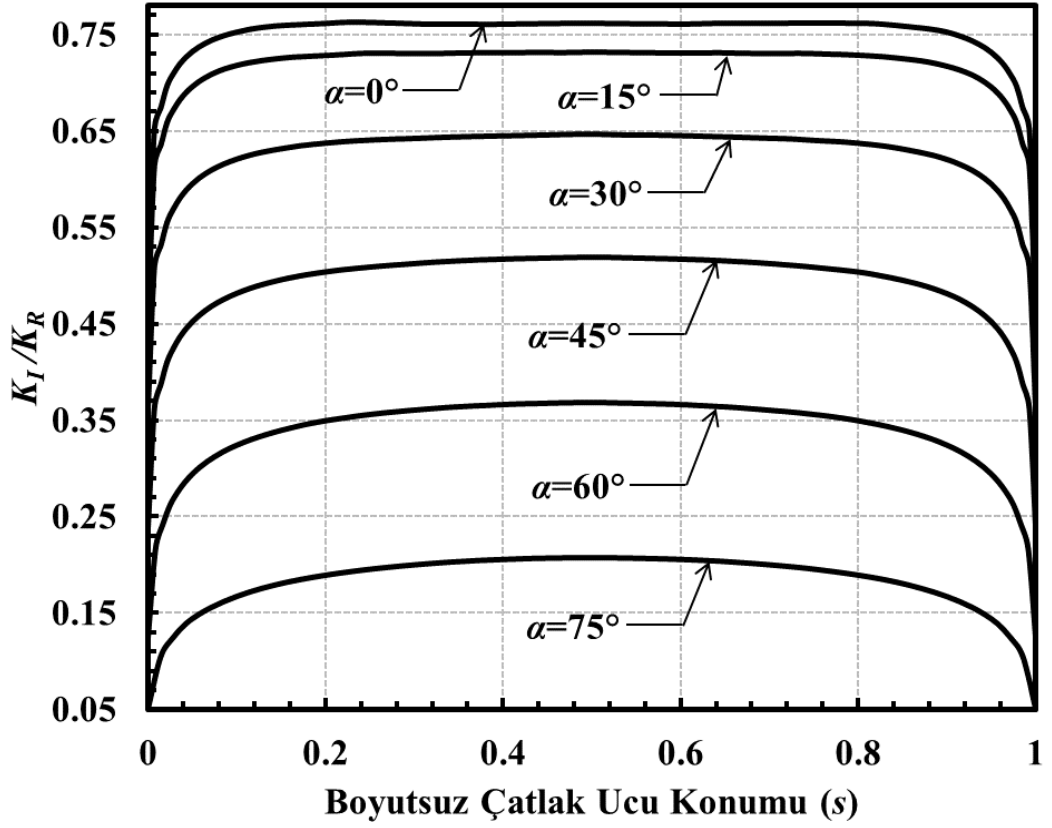
Şekil 3.120. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



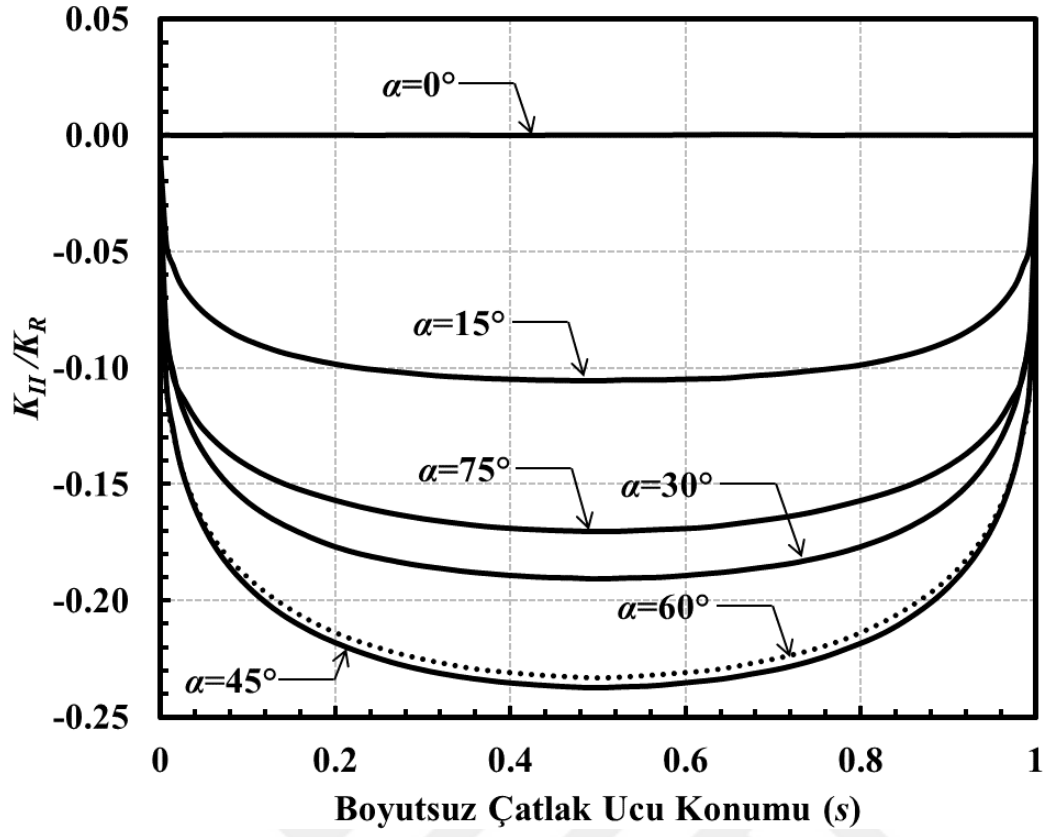
Şekil 3.121. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



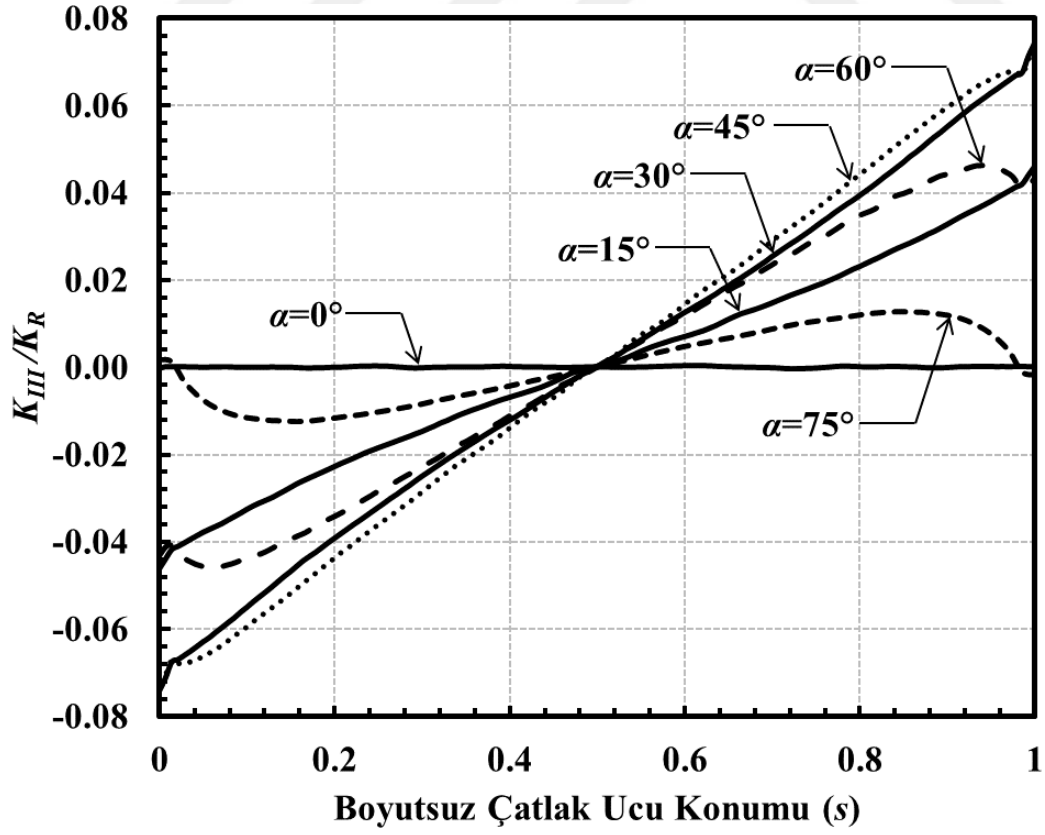
Şekil 3.122. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



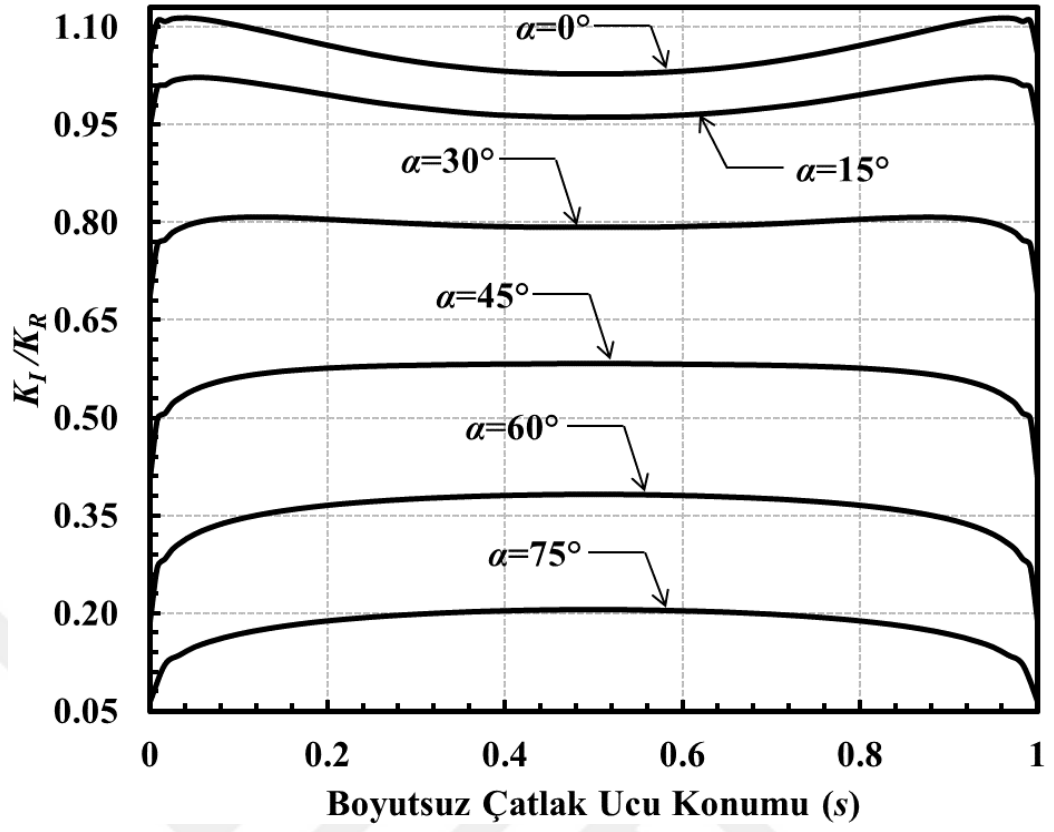
Şekil 3.123. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



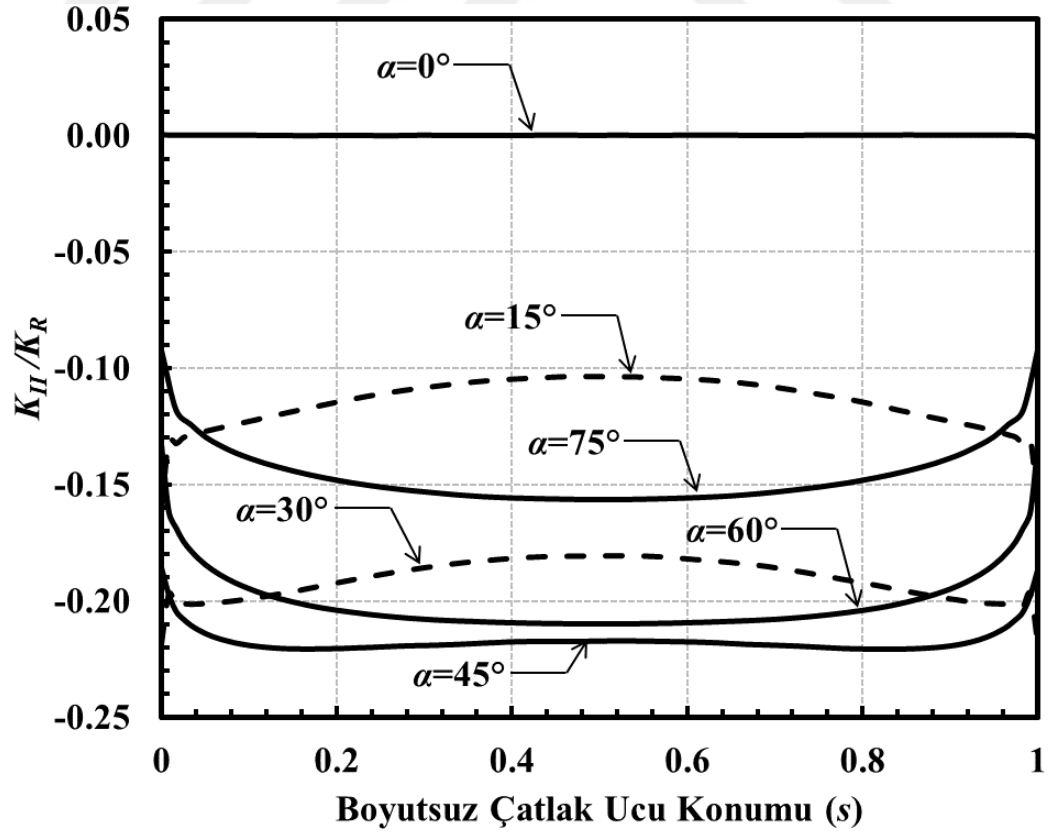
Şekil 3.124. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



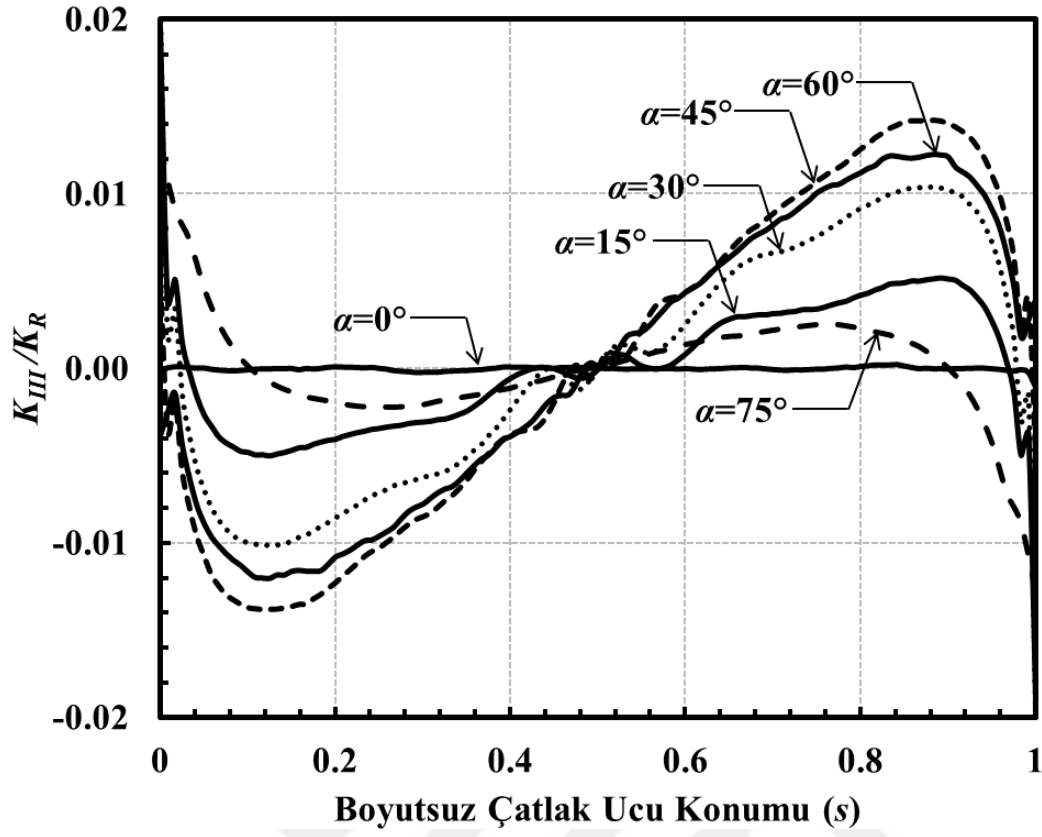
Şekil 3.125. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



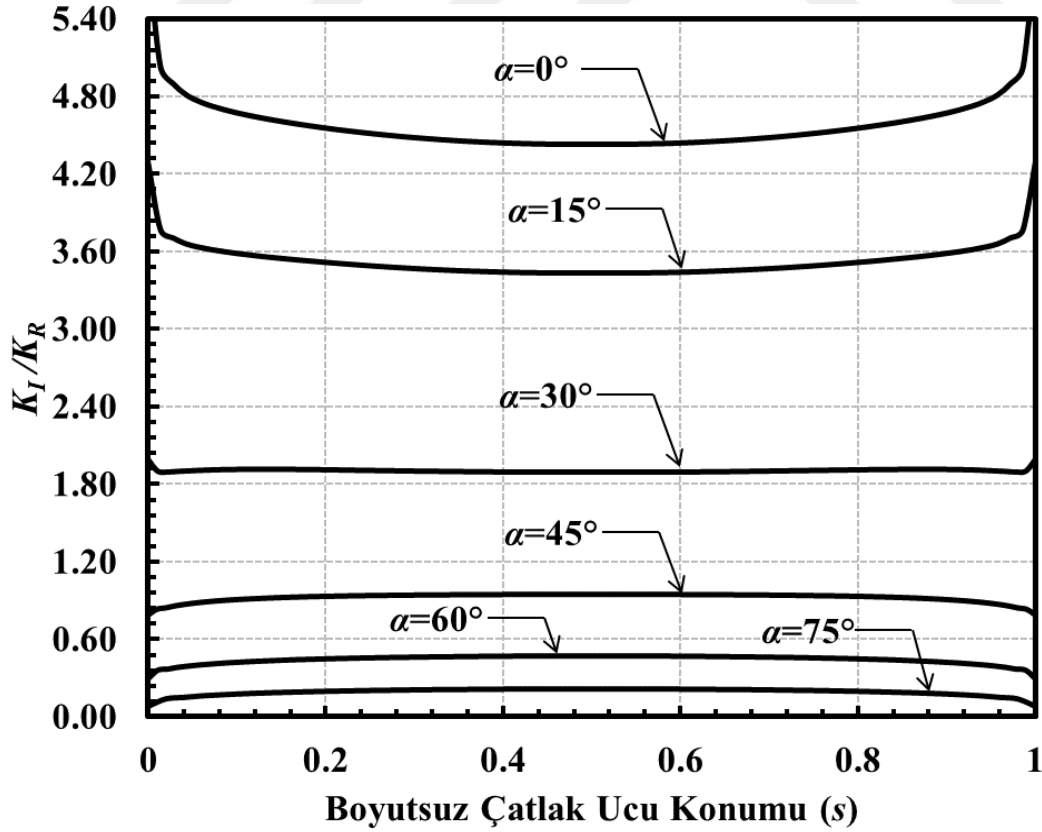
Şekil 3.126. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



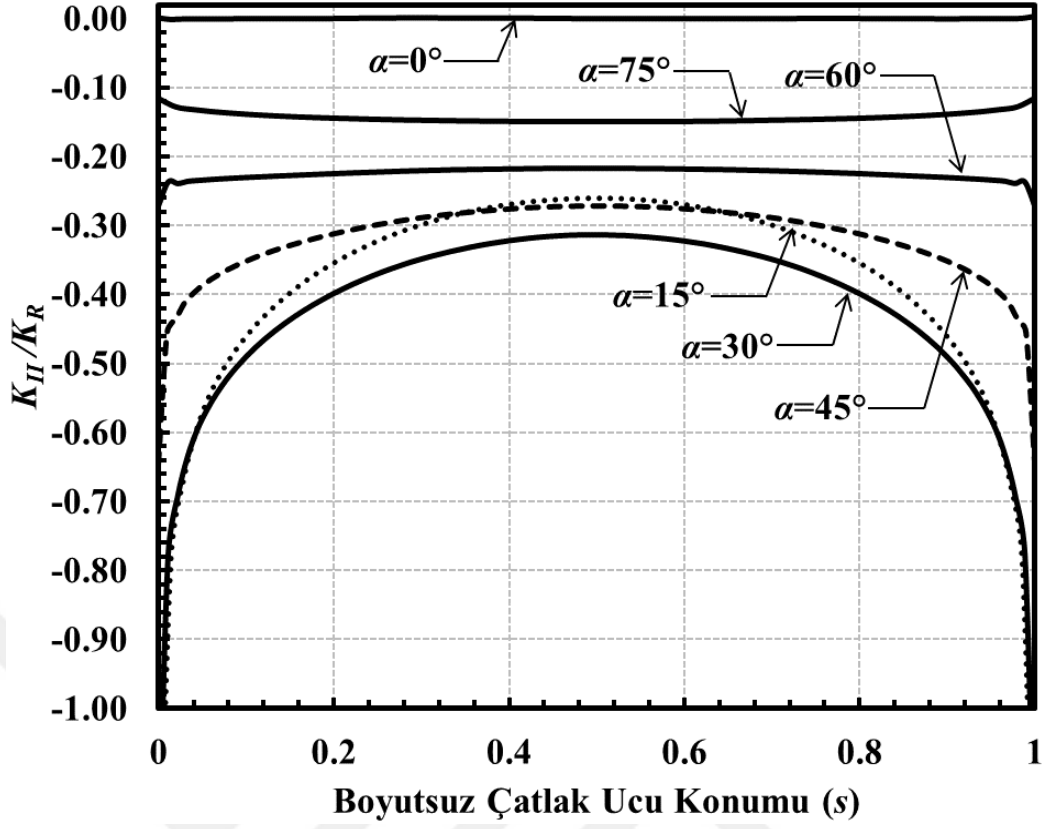
Şekil 3.127. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



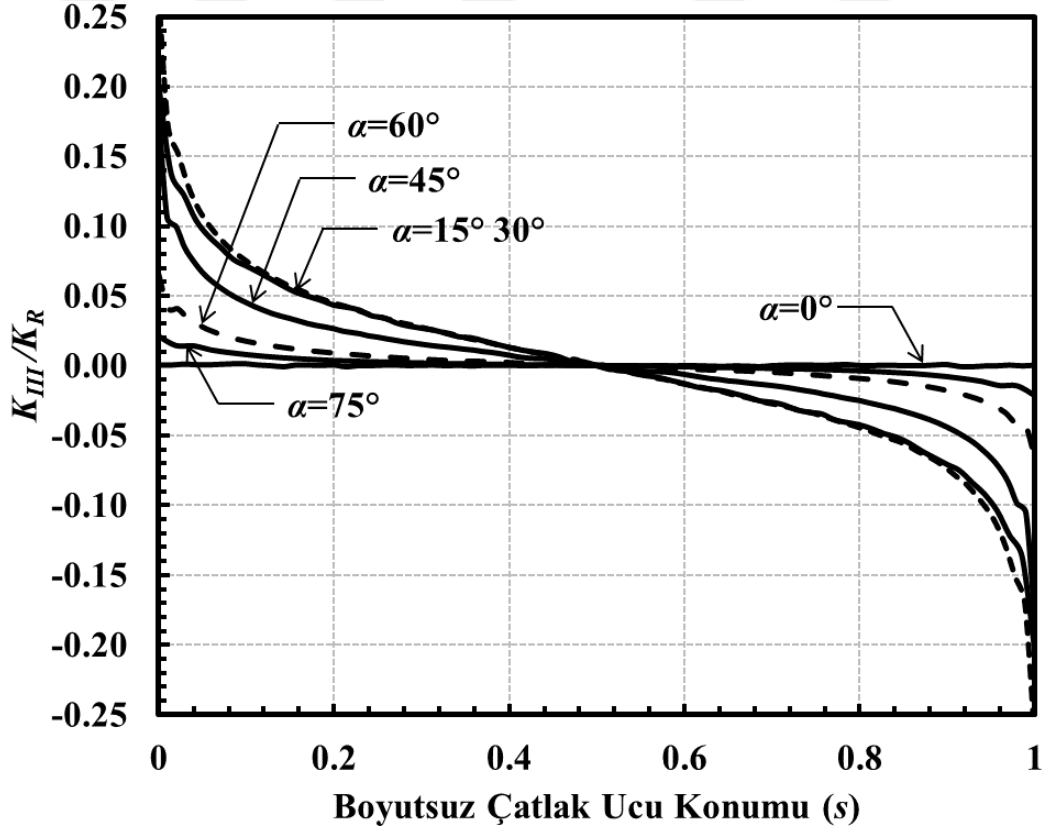
Şekil 3.128. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



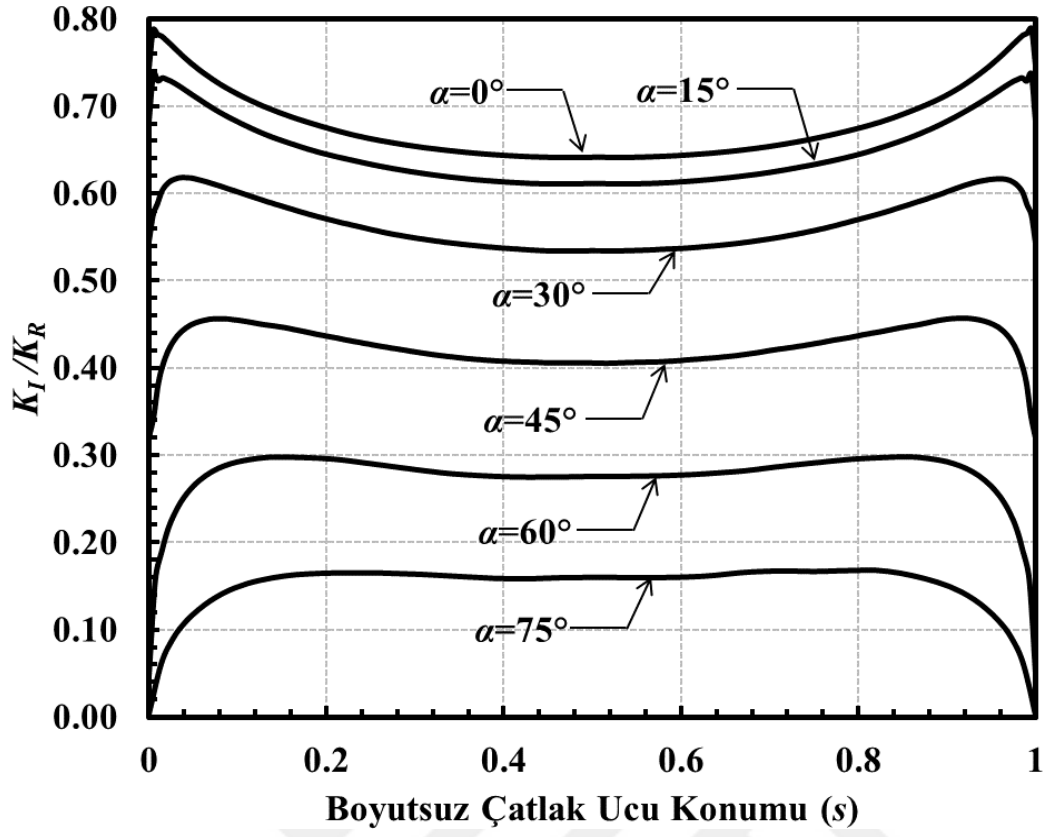
Şekil 3.129. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



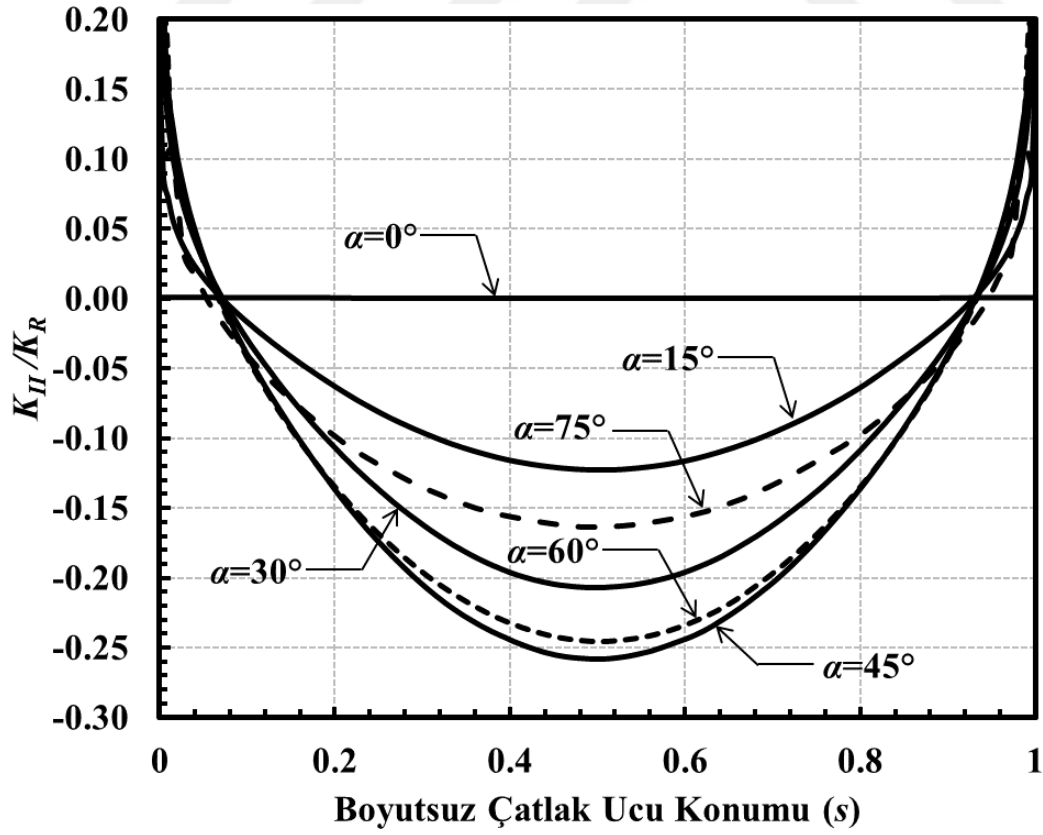
Şekil 3.130. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



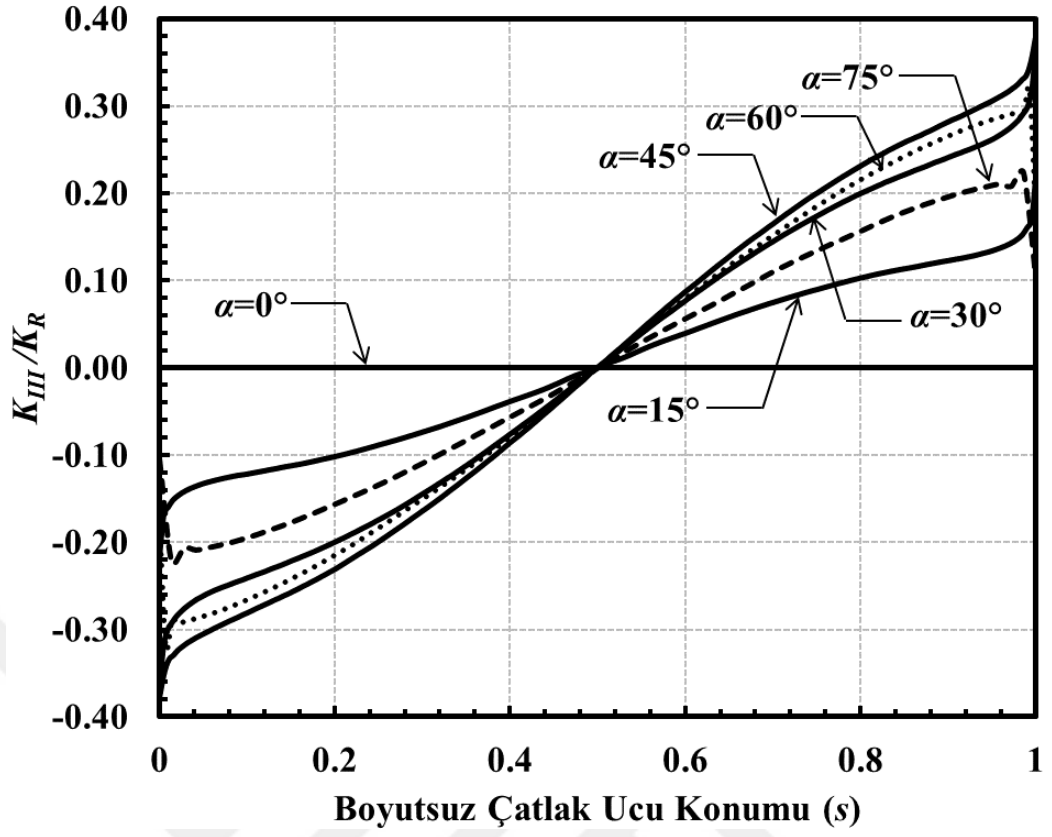
Şekil 3.131. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



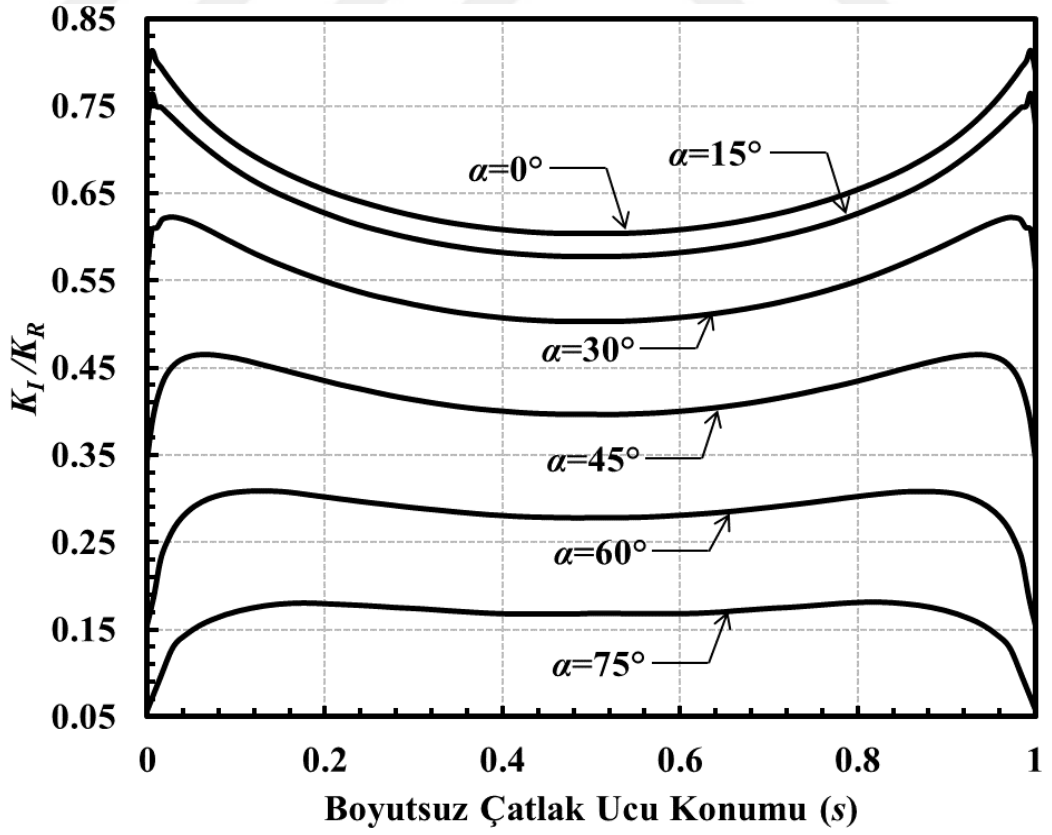
Şekil 3.132. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



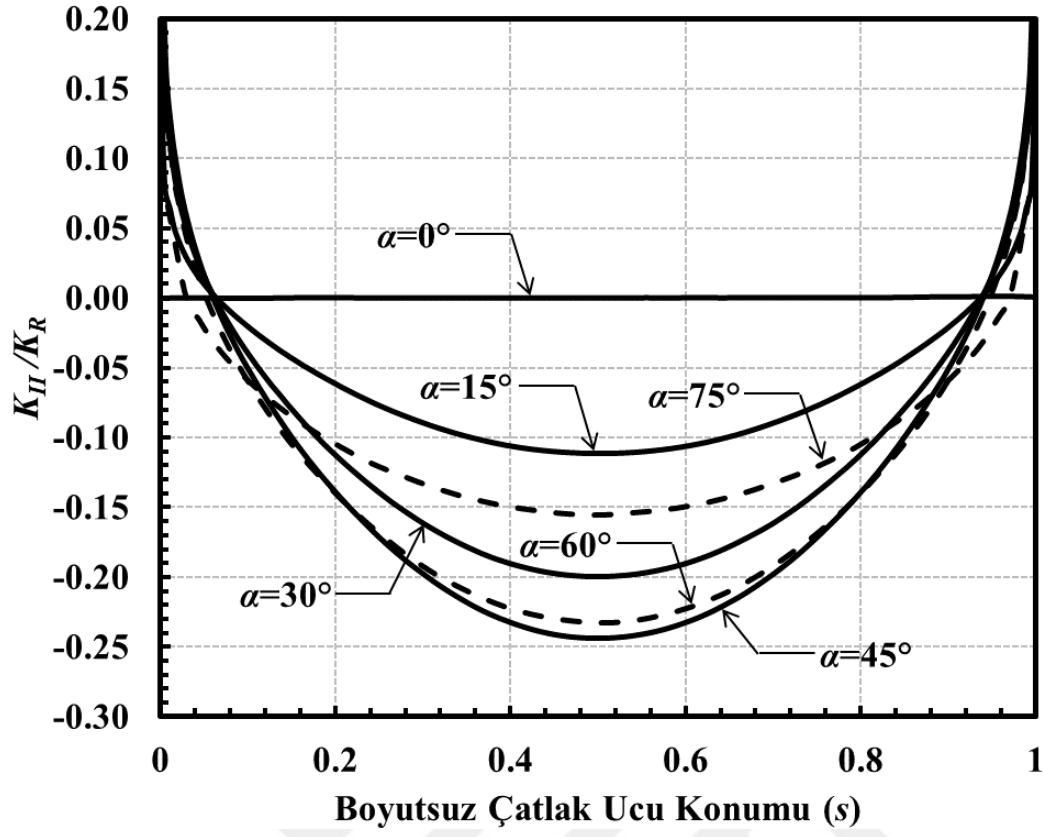
Şekil 3.133. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



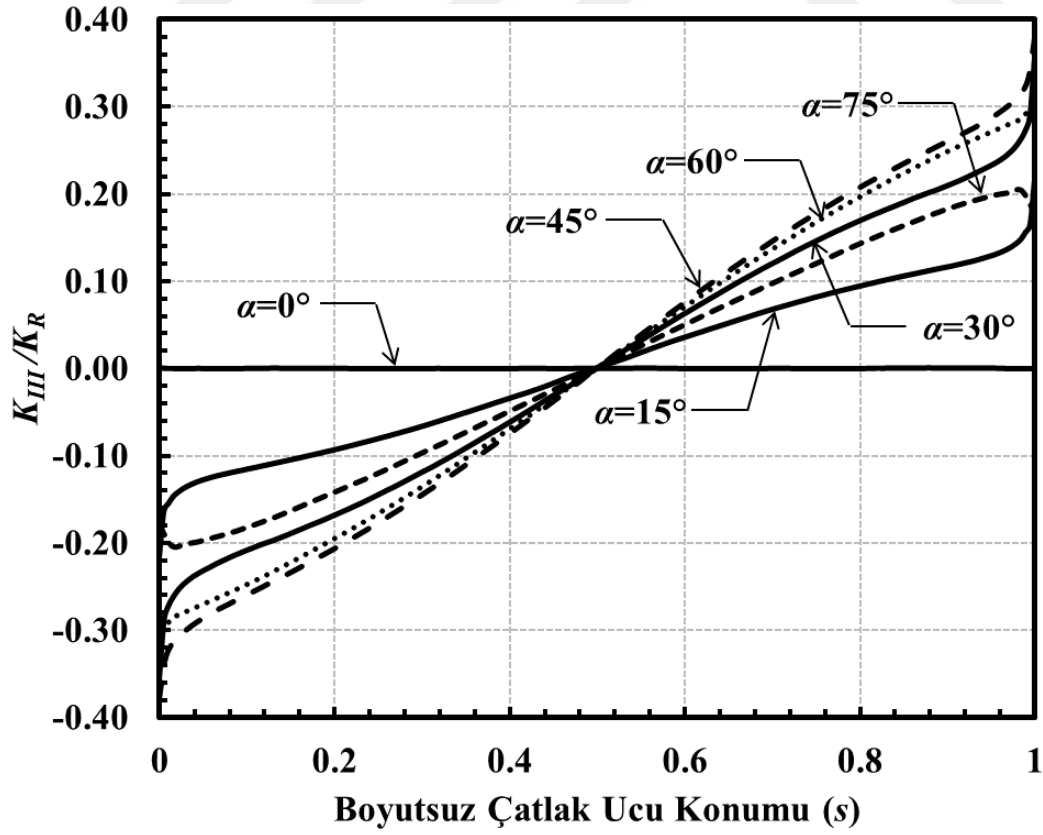
Şekil 3.134. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



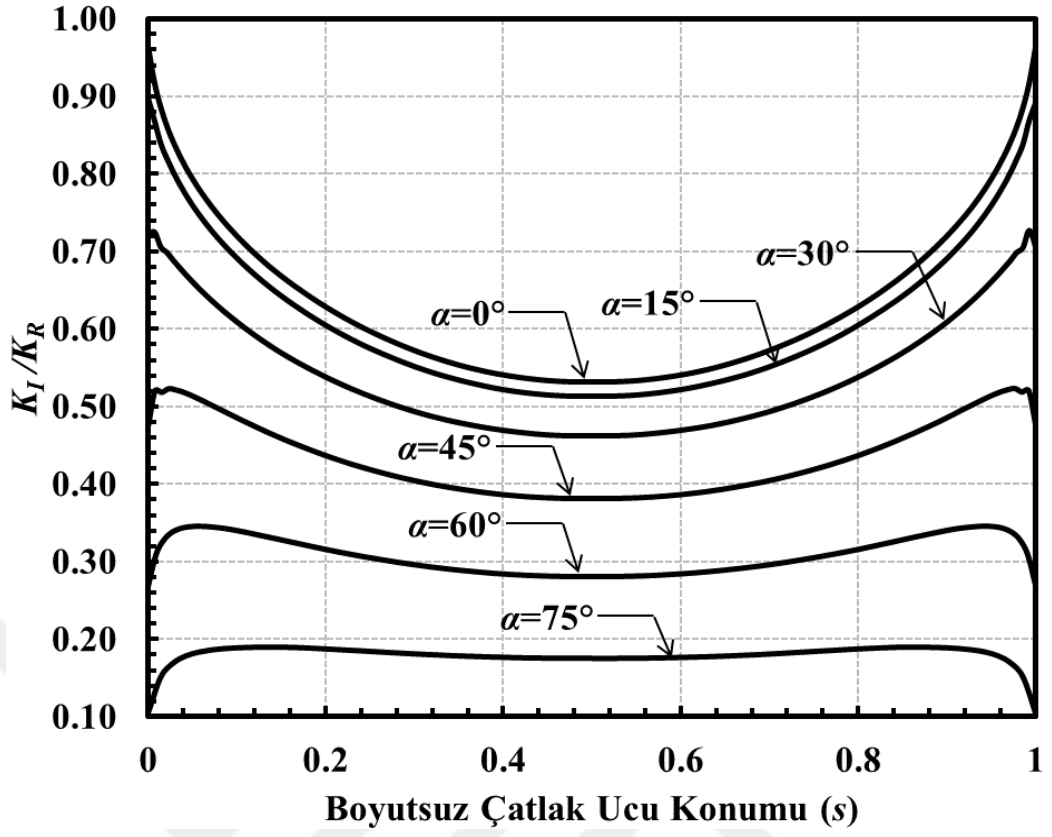
Şekil 3.135. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



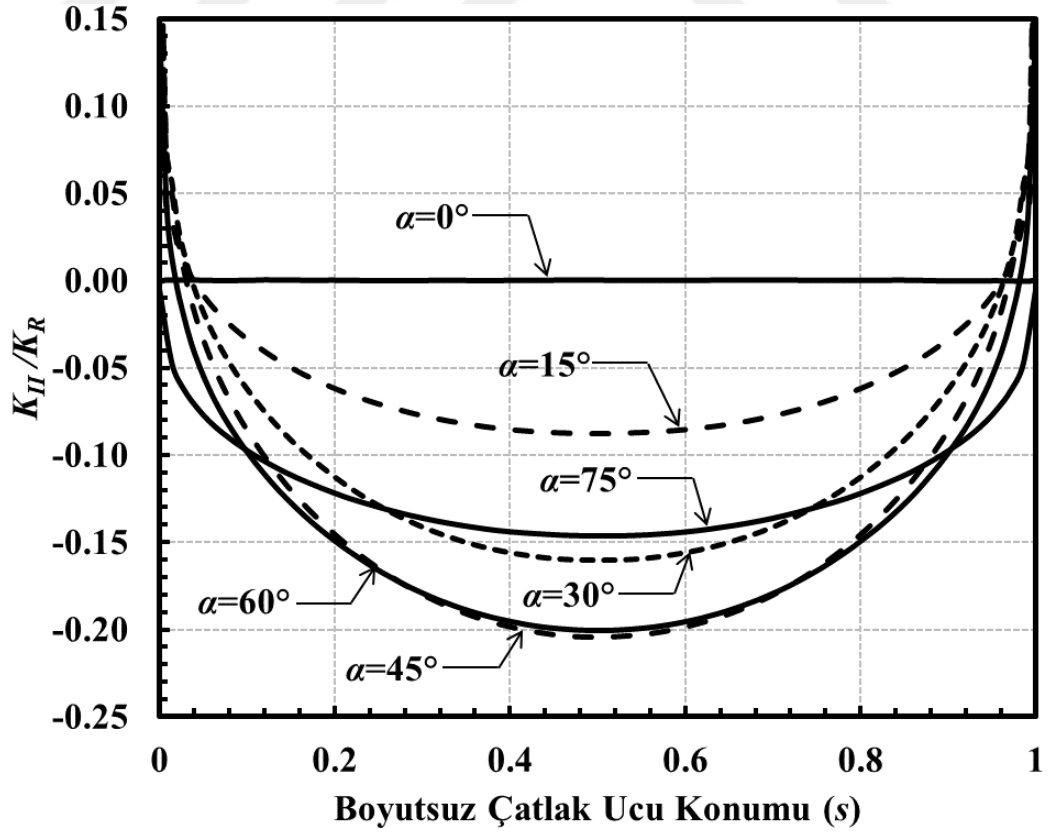
Şekil 3.136. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



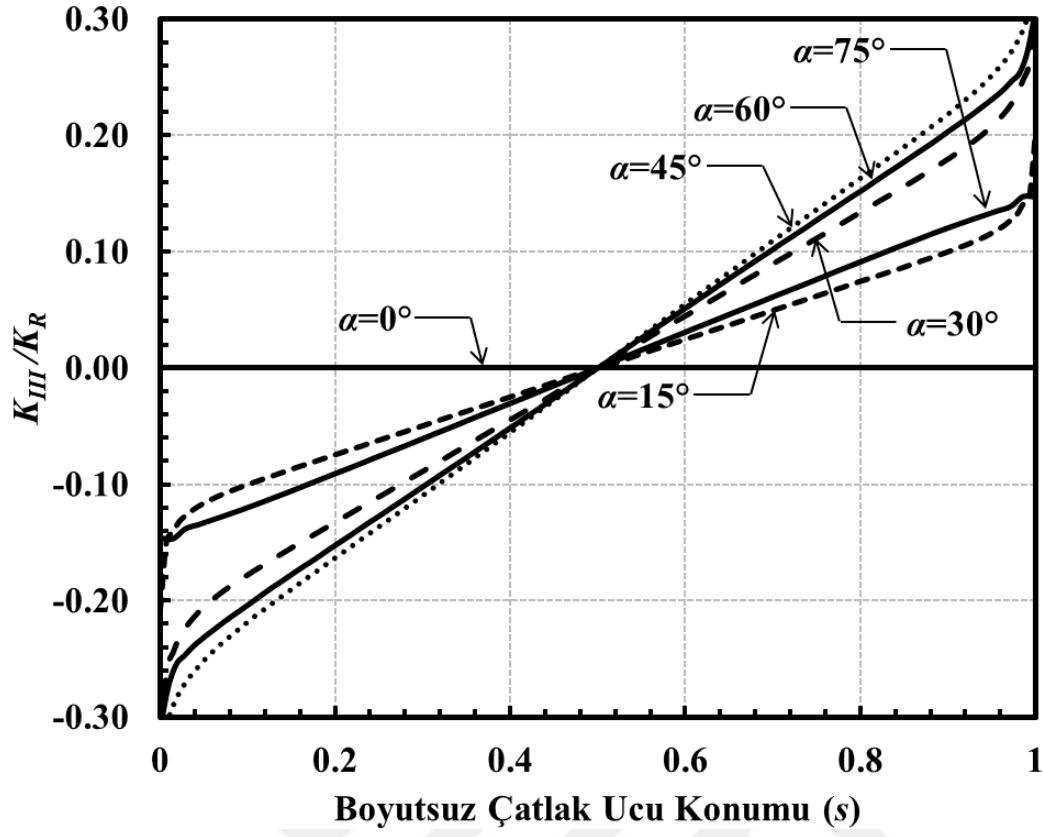
Şekil 3.137. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



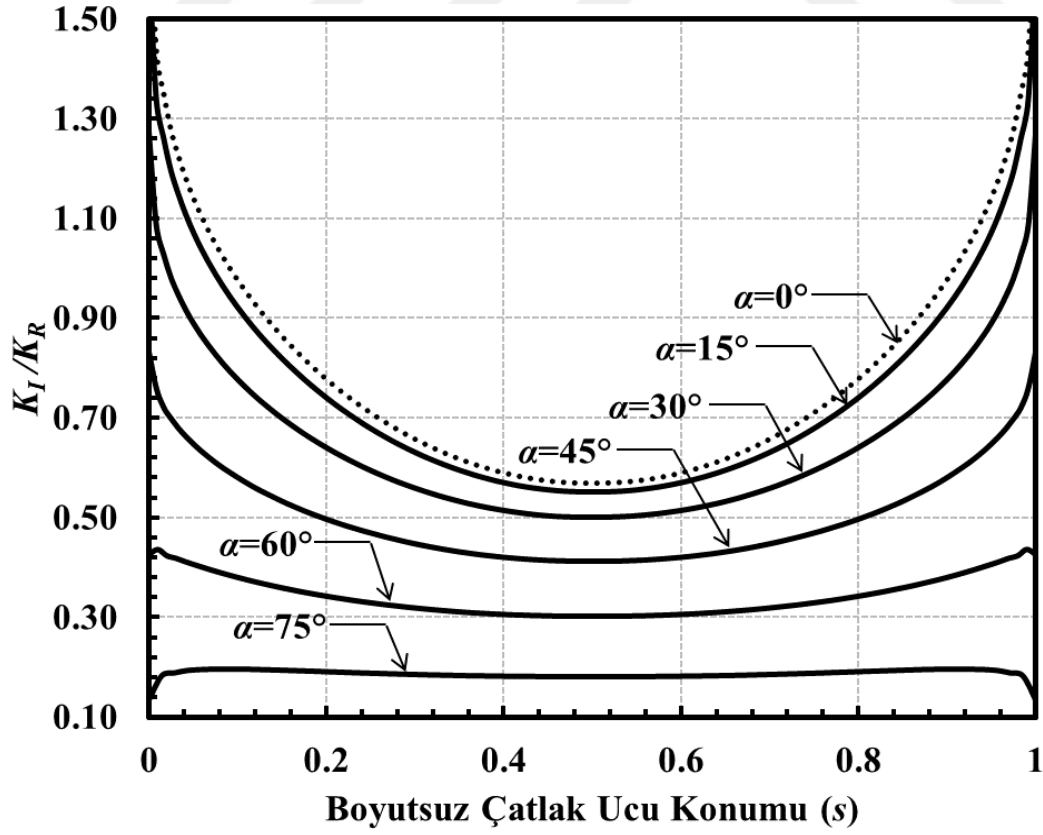
Şekil 3.138. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



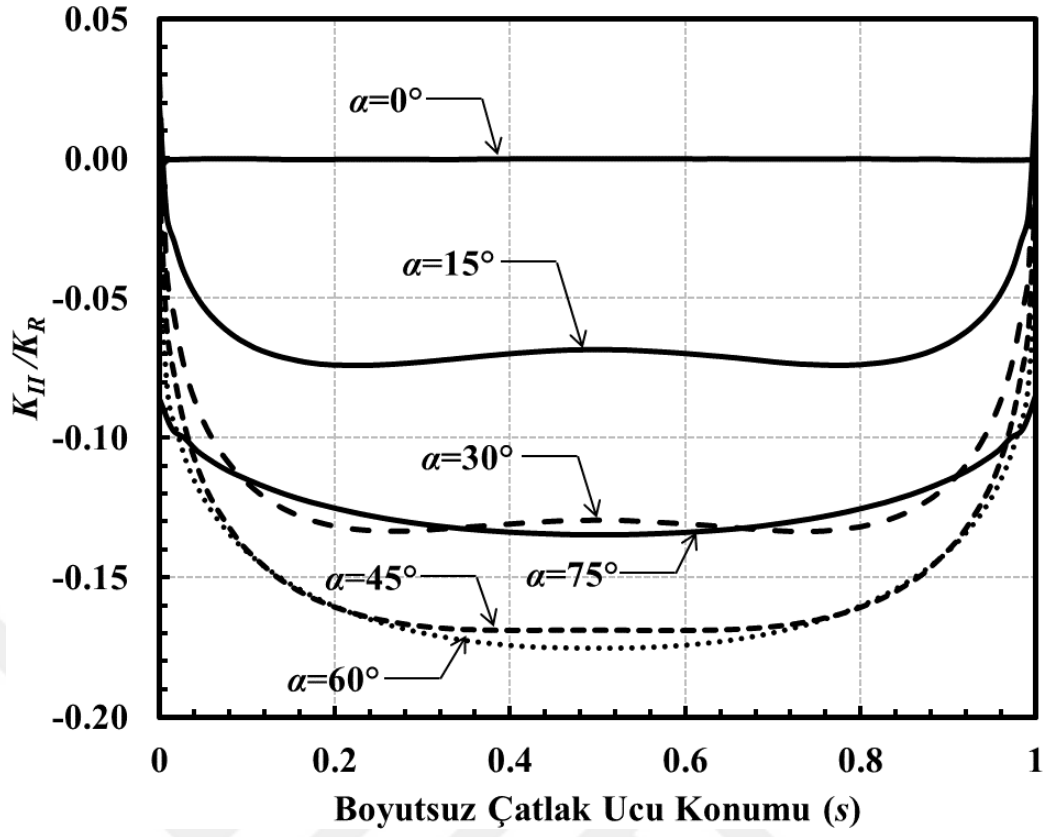
Şekil 3.139. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



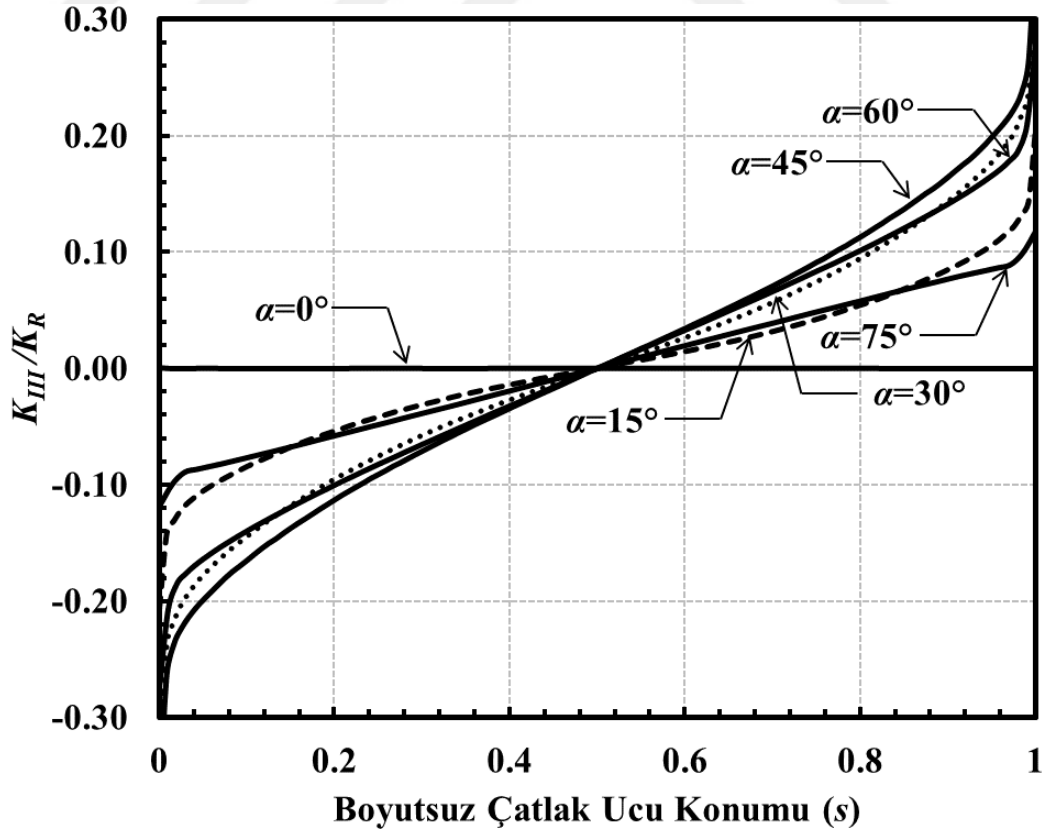
Şekil 3.140. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



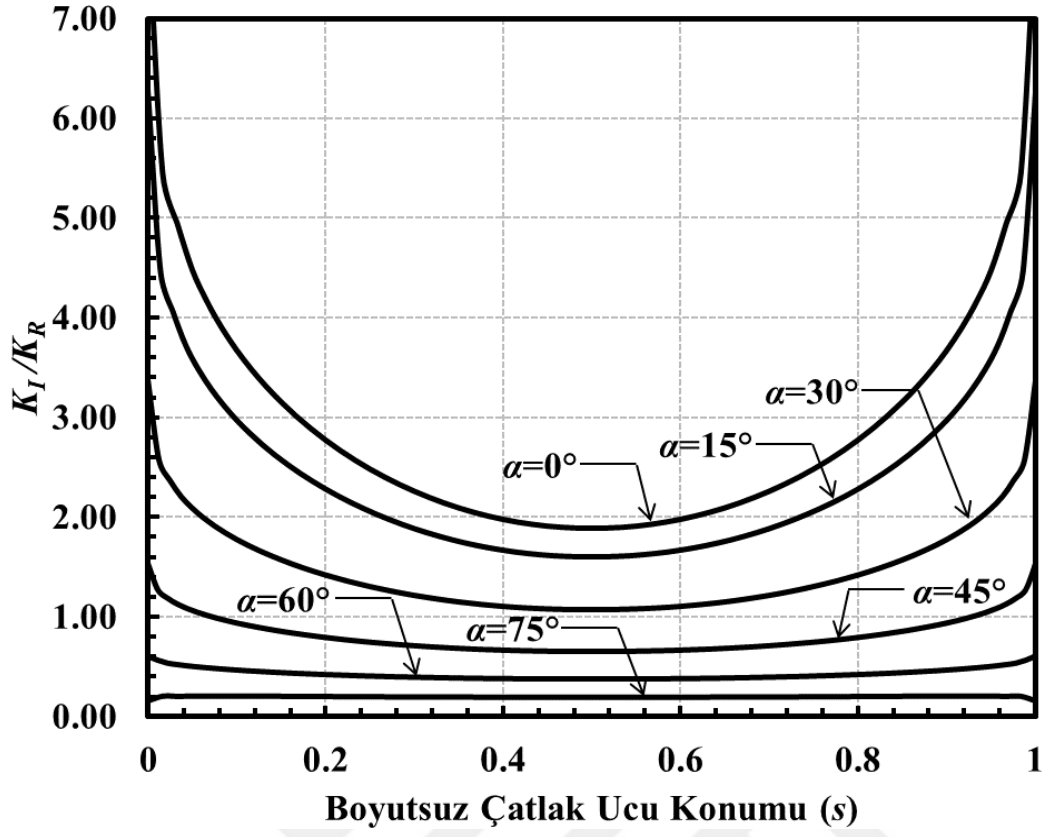
Şekil 3.141. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



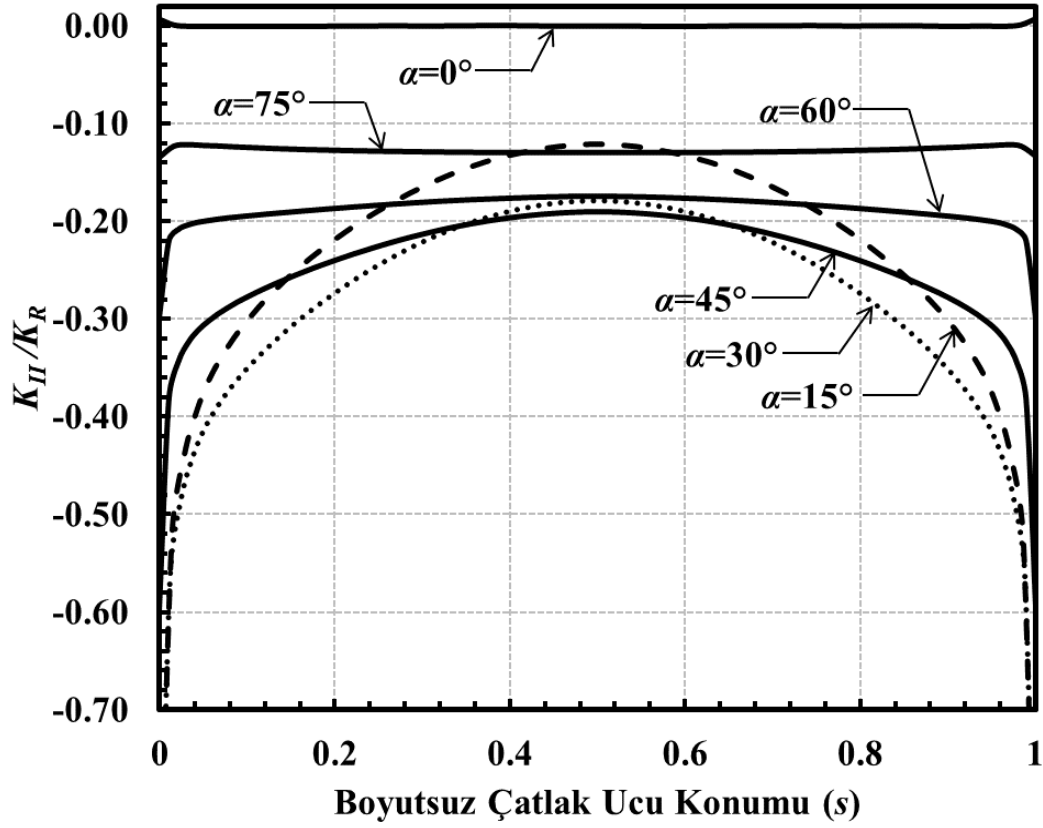
Şekil 3.142. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



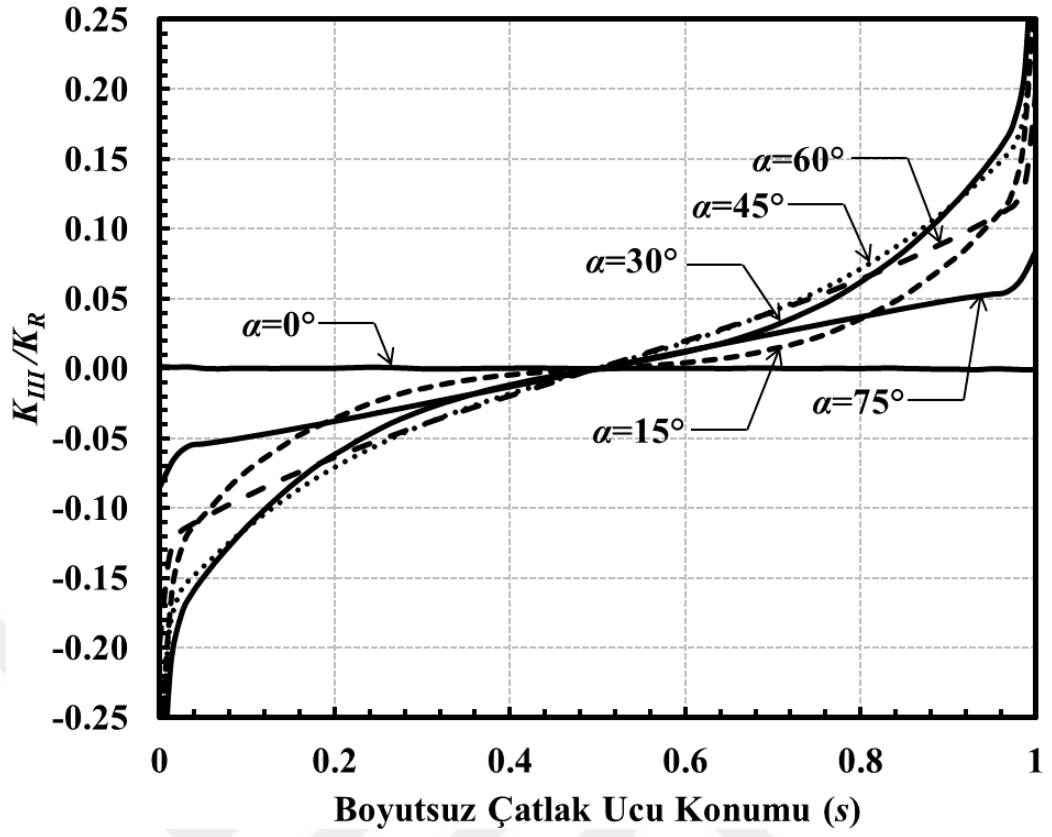
Şekil 3.143. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



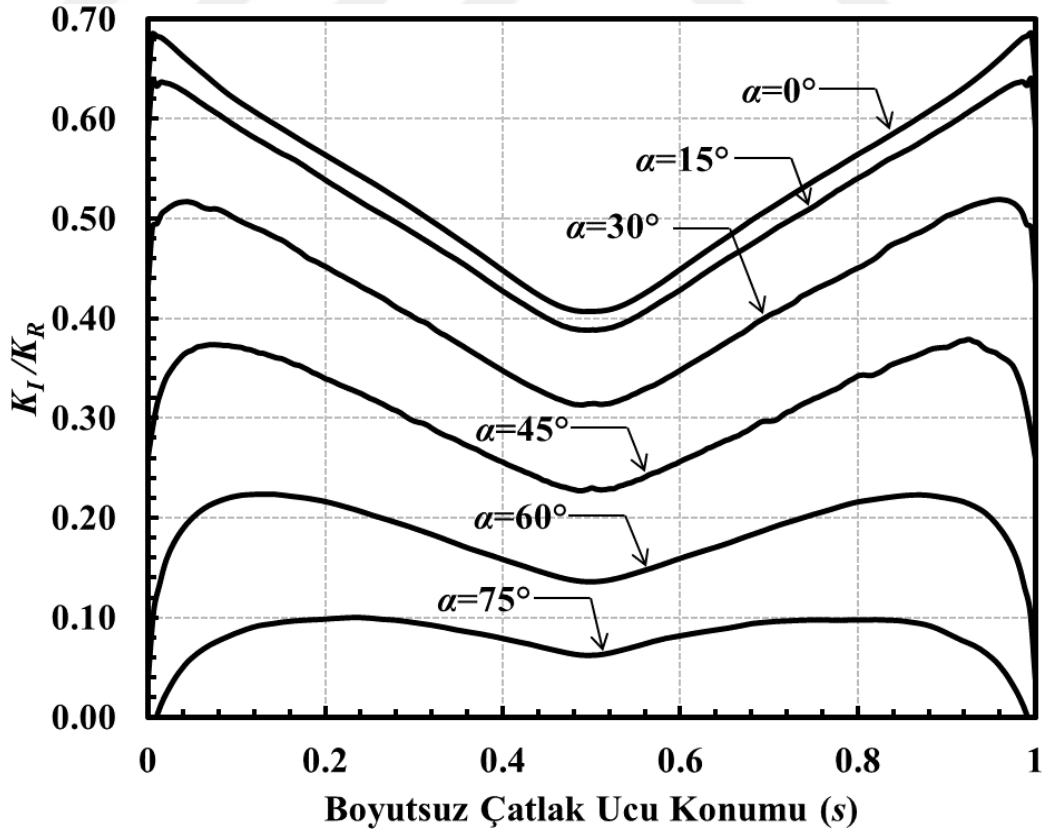
Şekil 3.144. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



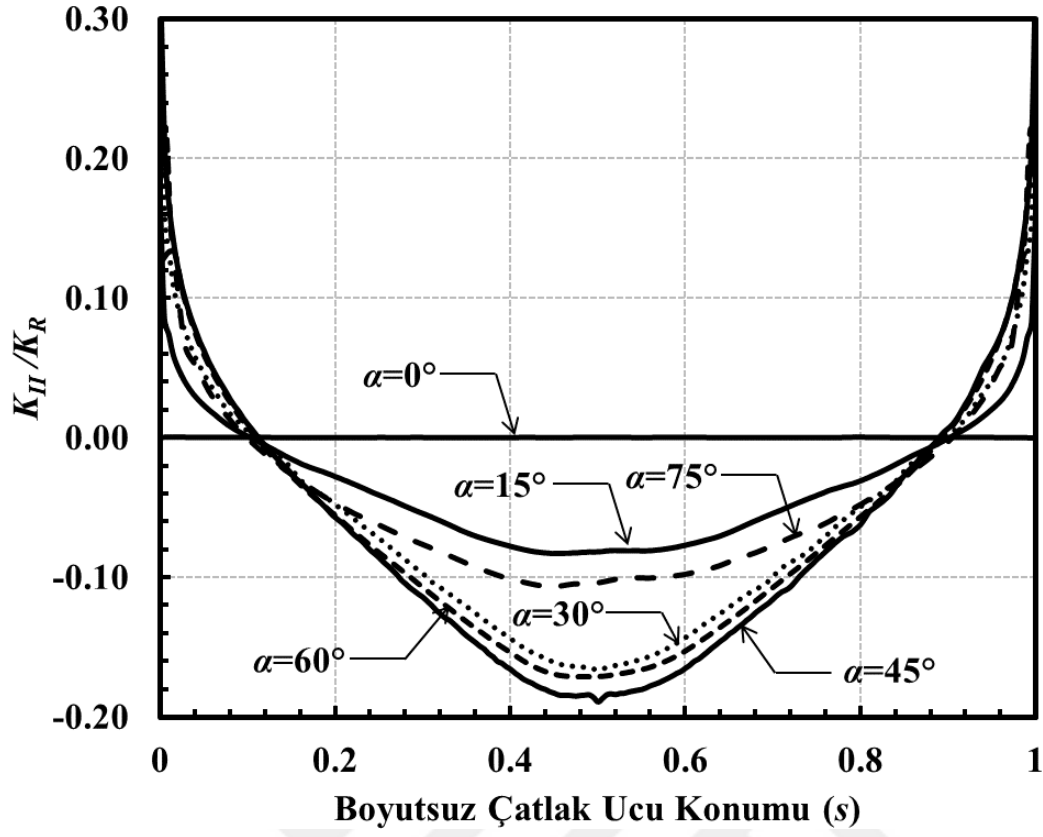
Şekil 3.145. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



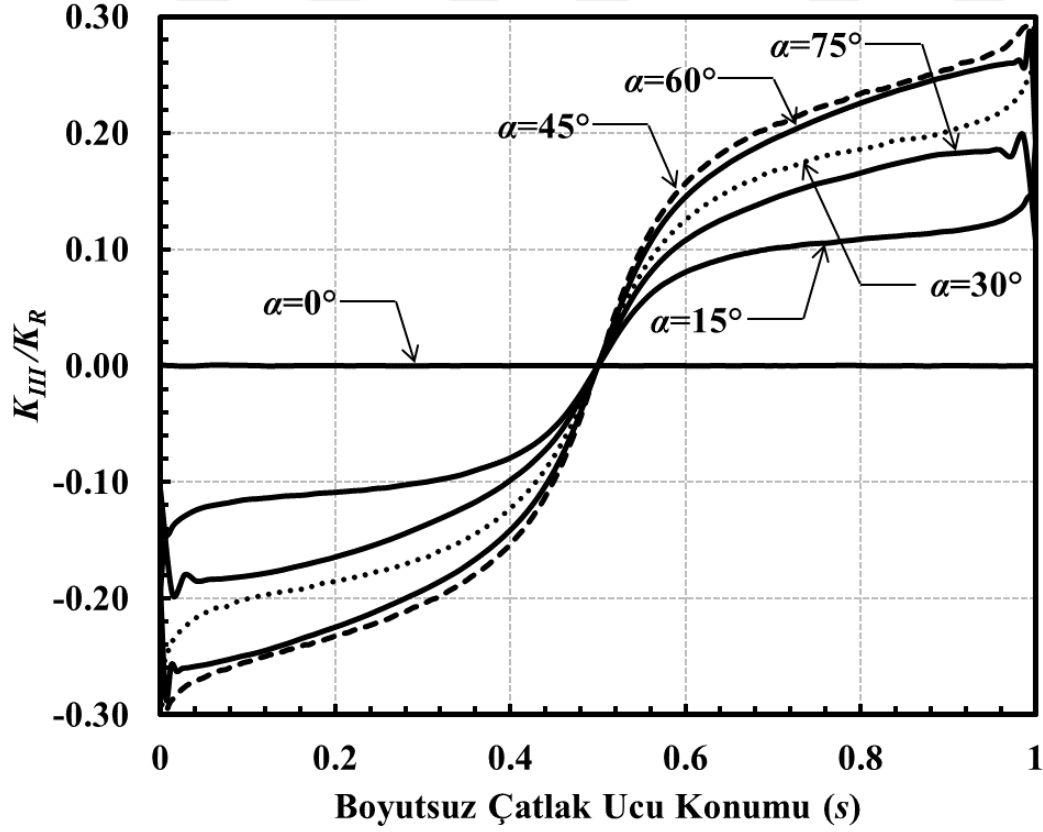
Şekil 3.146. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



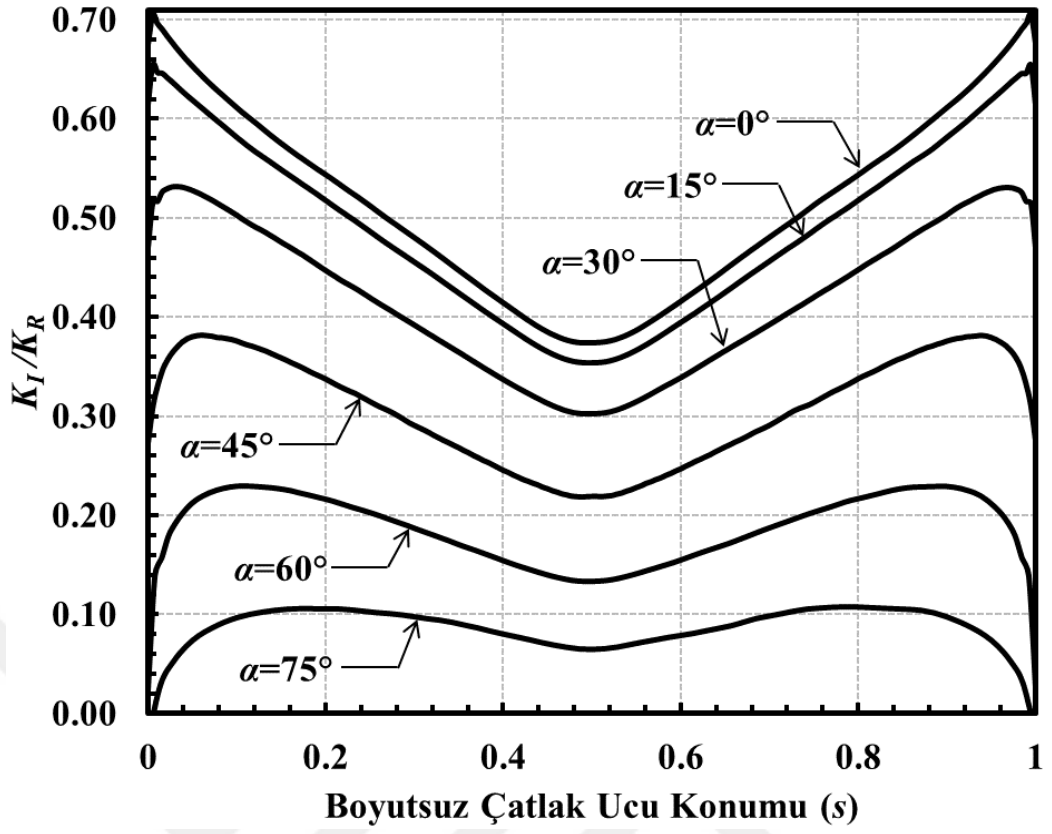
Şekil 3.147. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



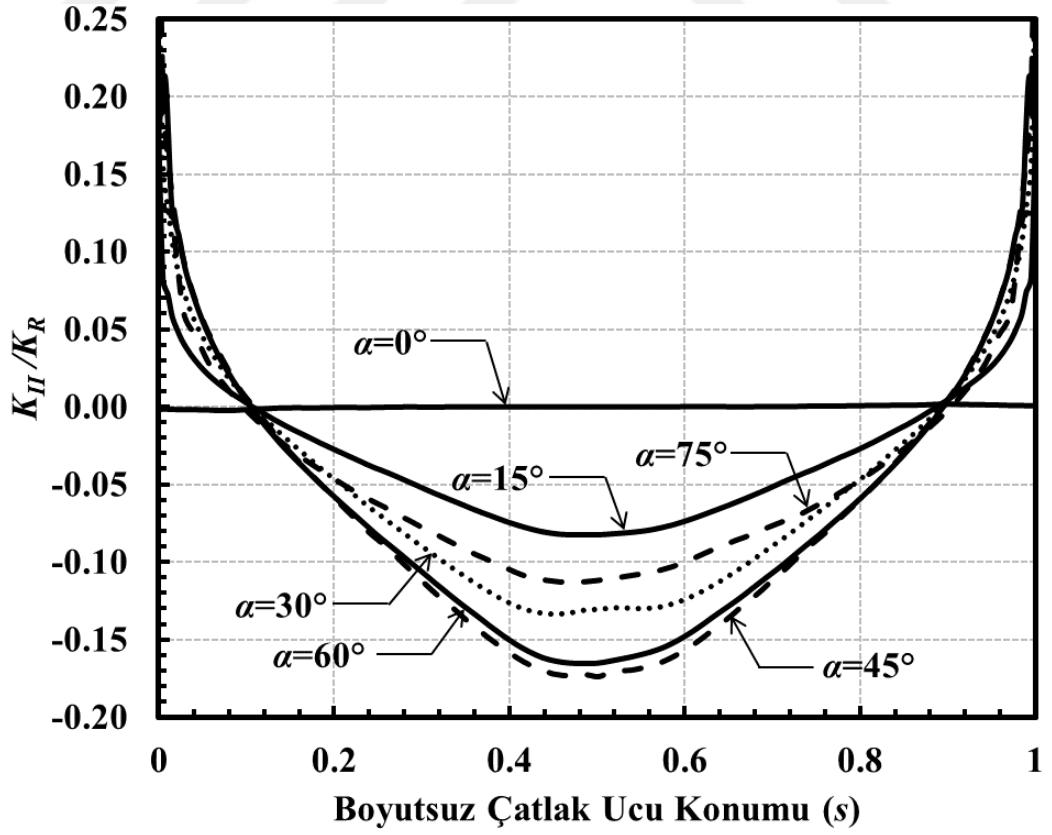
Şekil 3.148. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



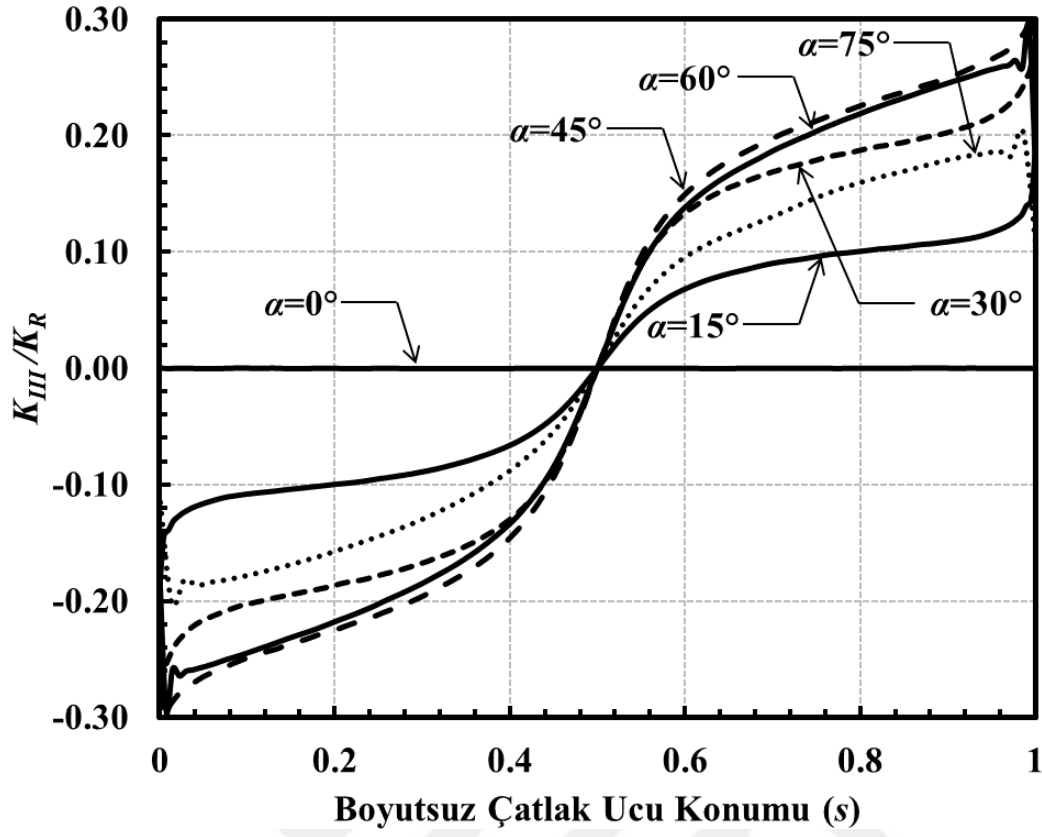
Şekil 3.149. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



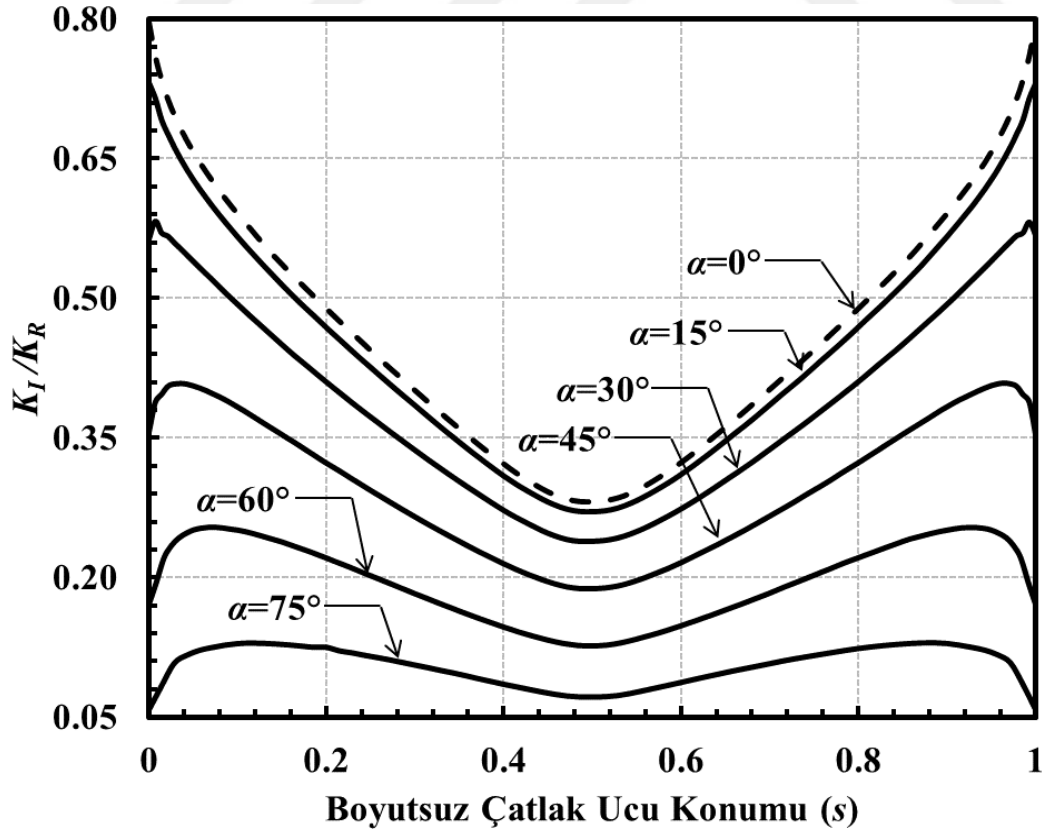
Şekil 3.150. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



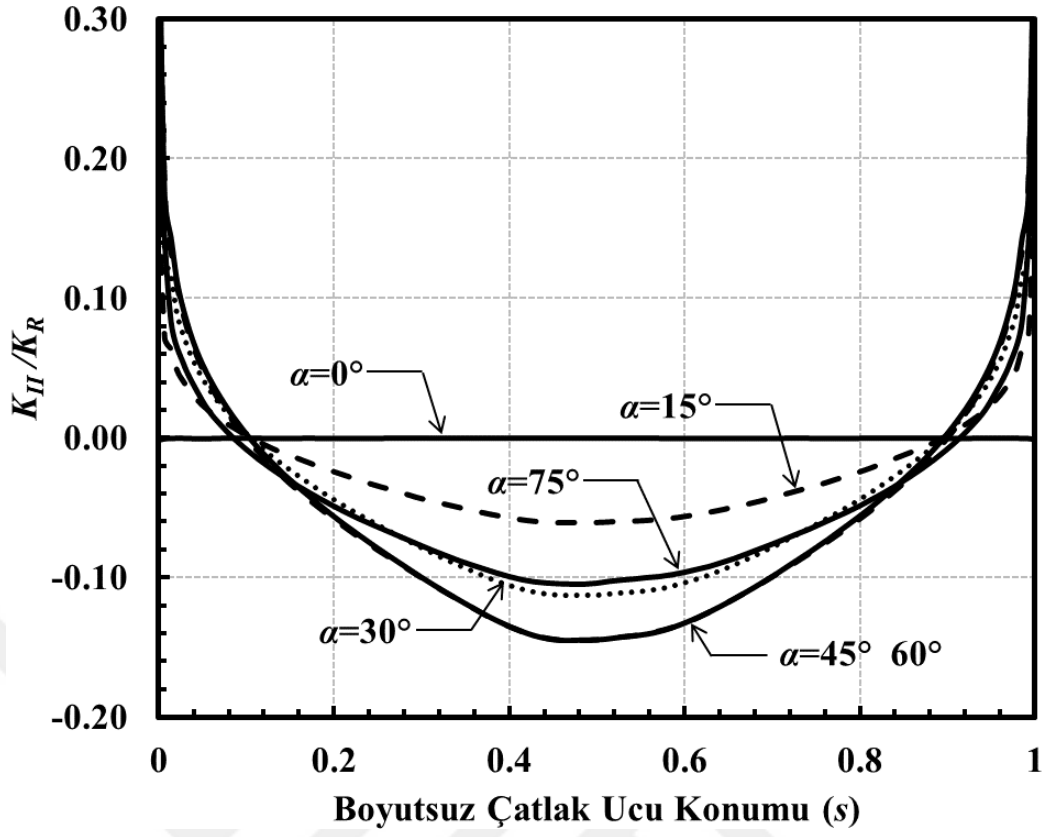
Şekil 3.151. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



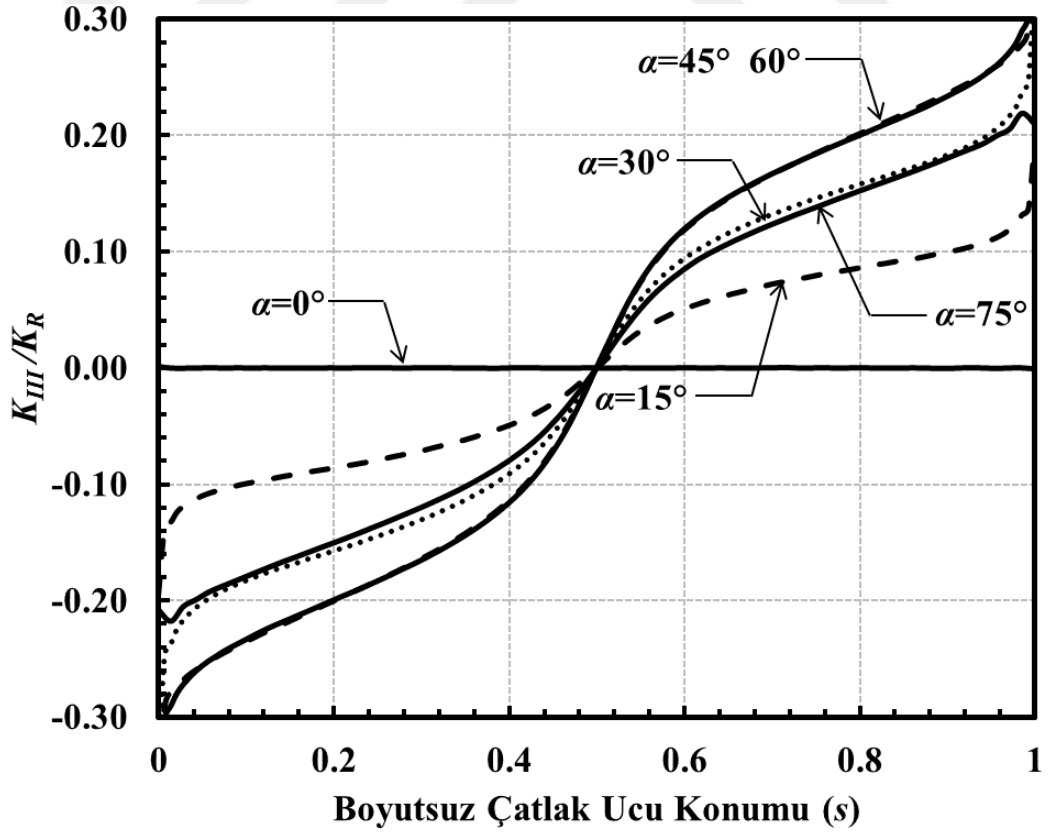
Şekil 3.152. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



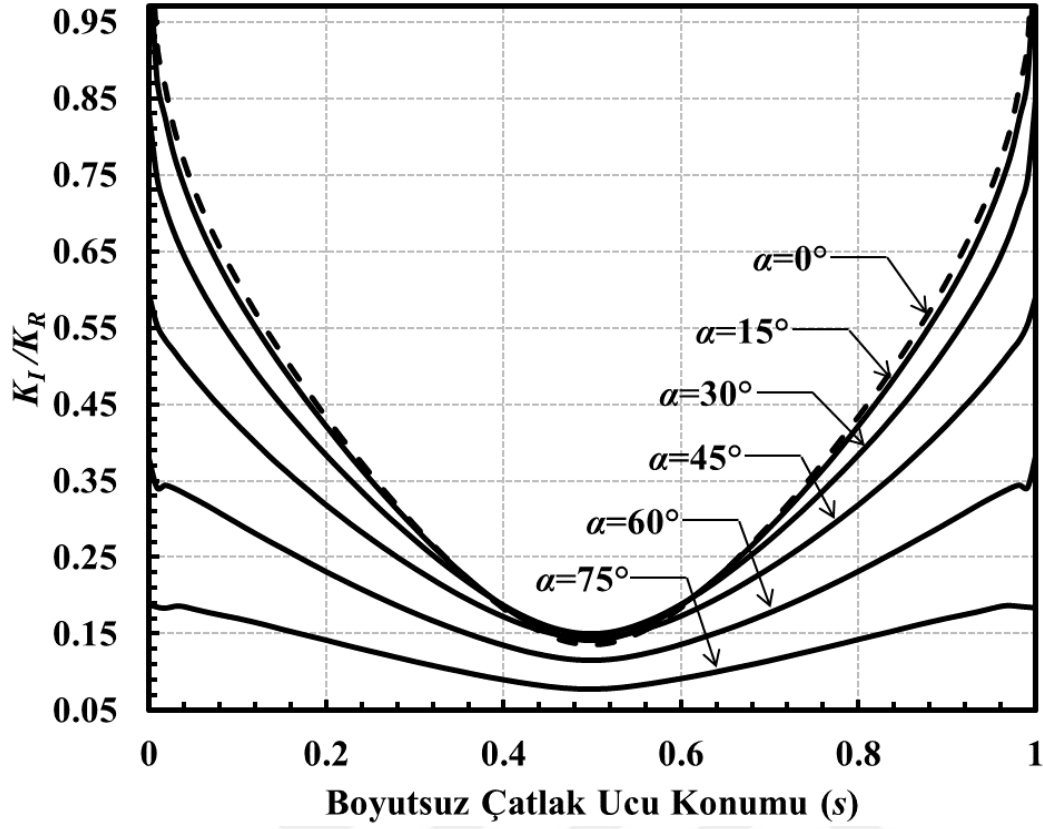
Şekil 3.153. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



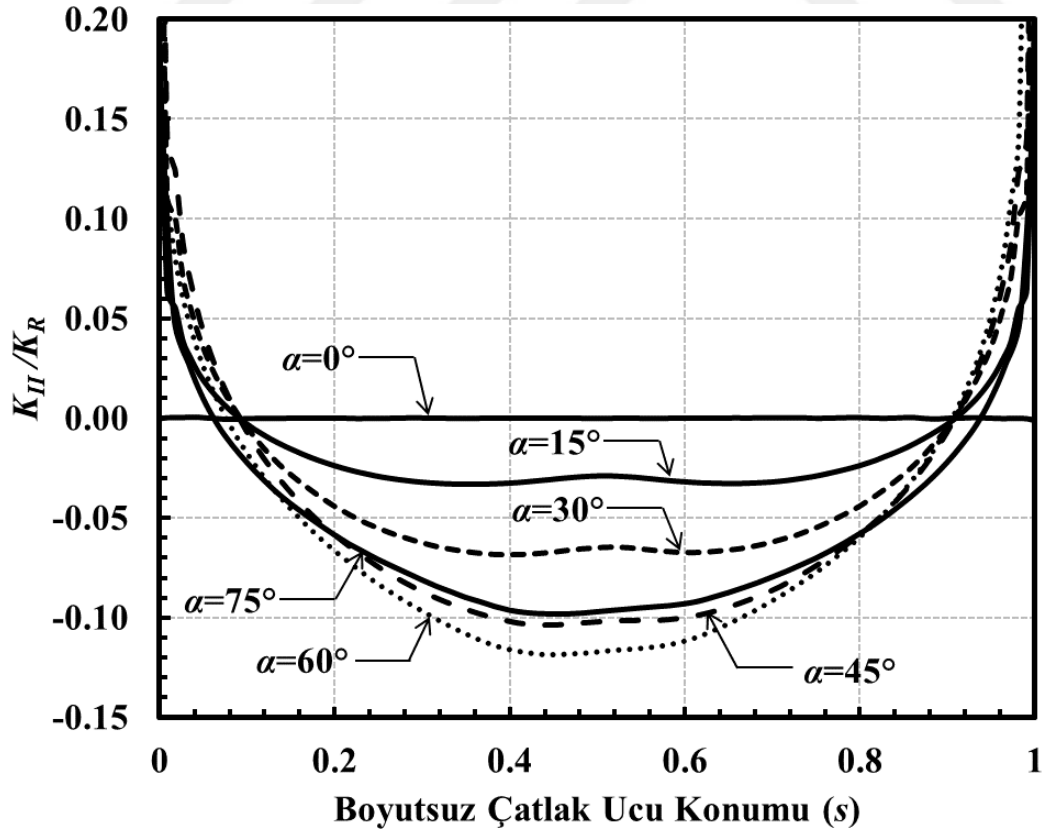
Şekil 3.154. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



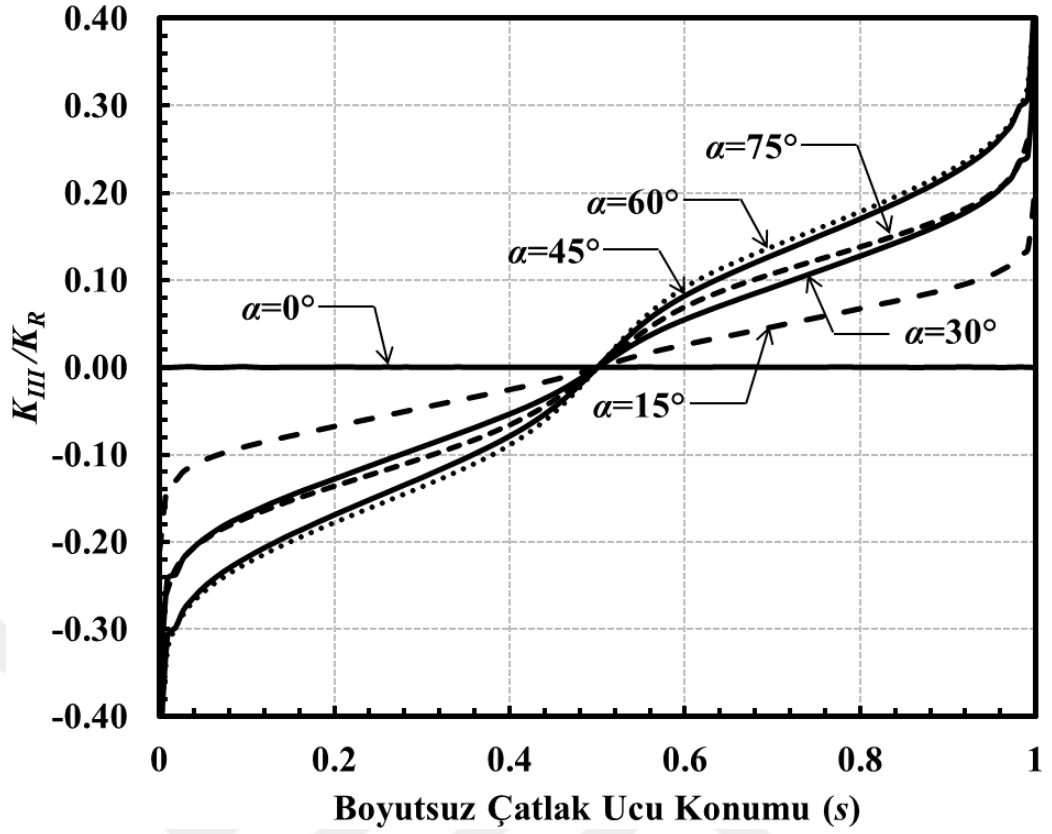
Şekil 3.155. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



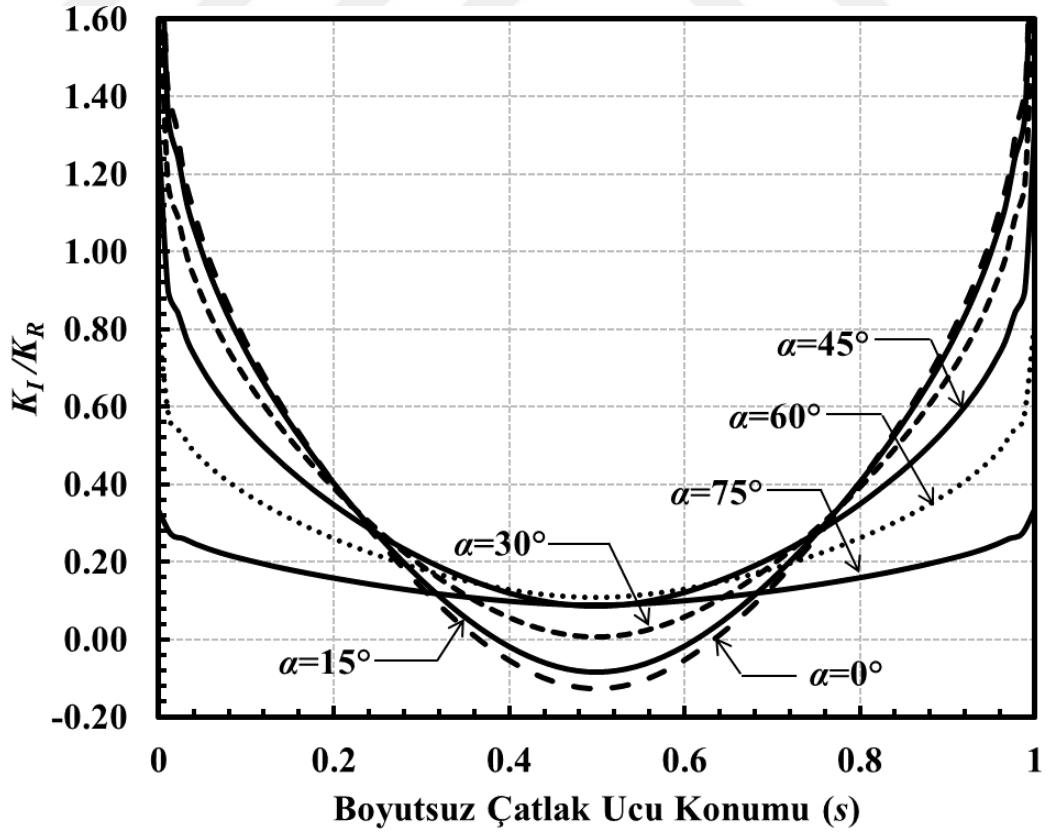
Şekil 3.156. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



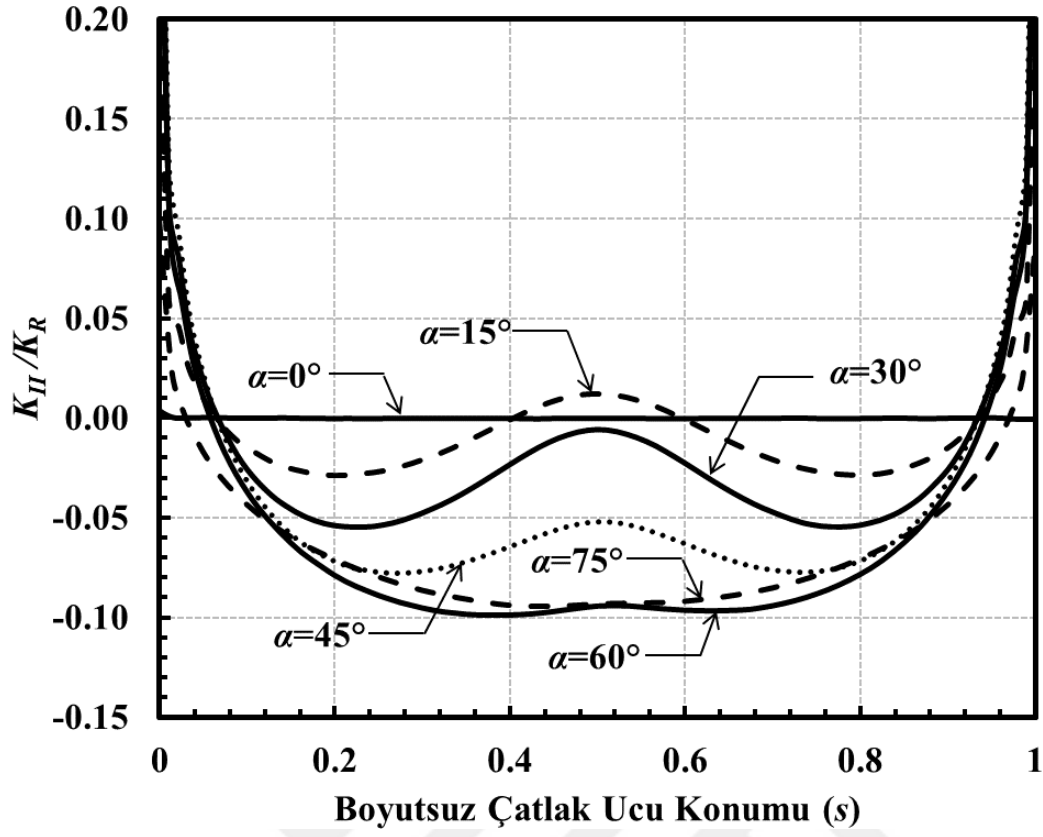
Şekil 3.157. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



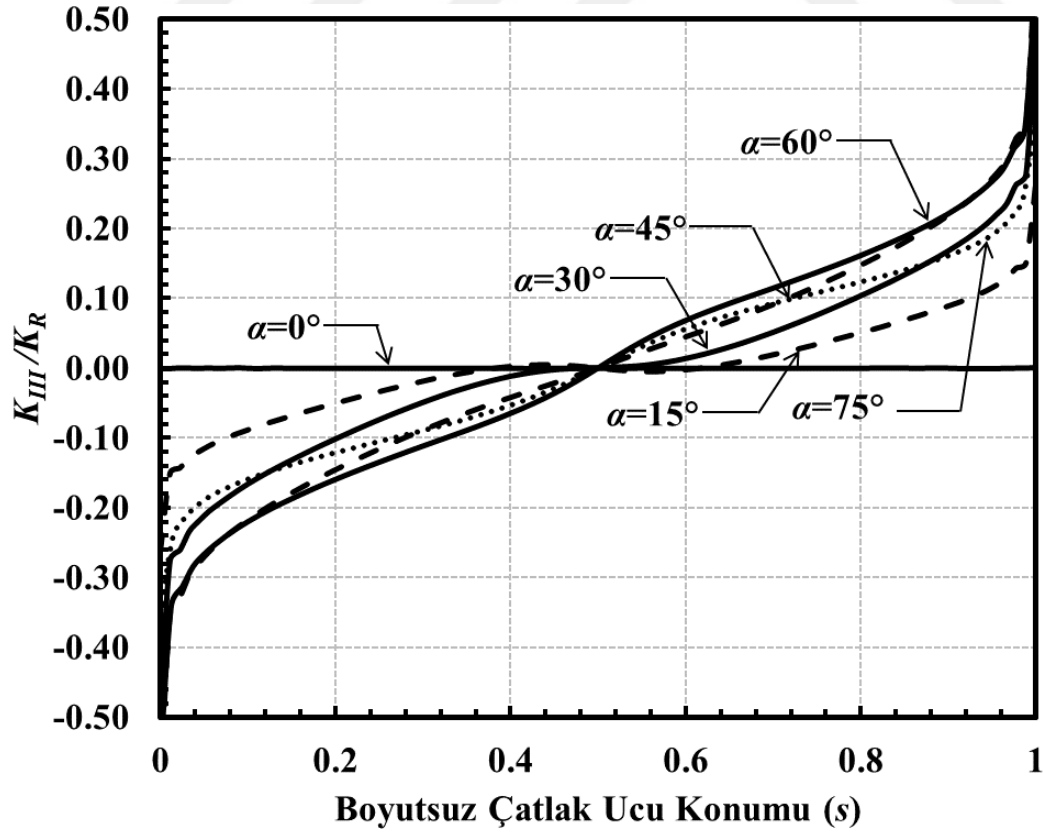
Şekil 3.158. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



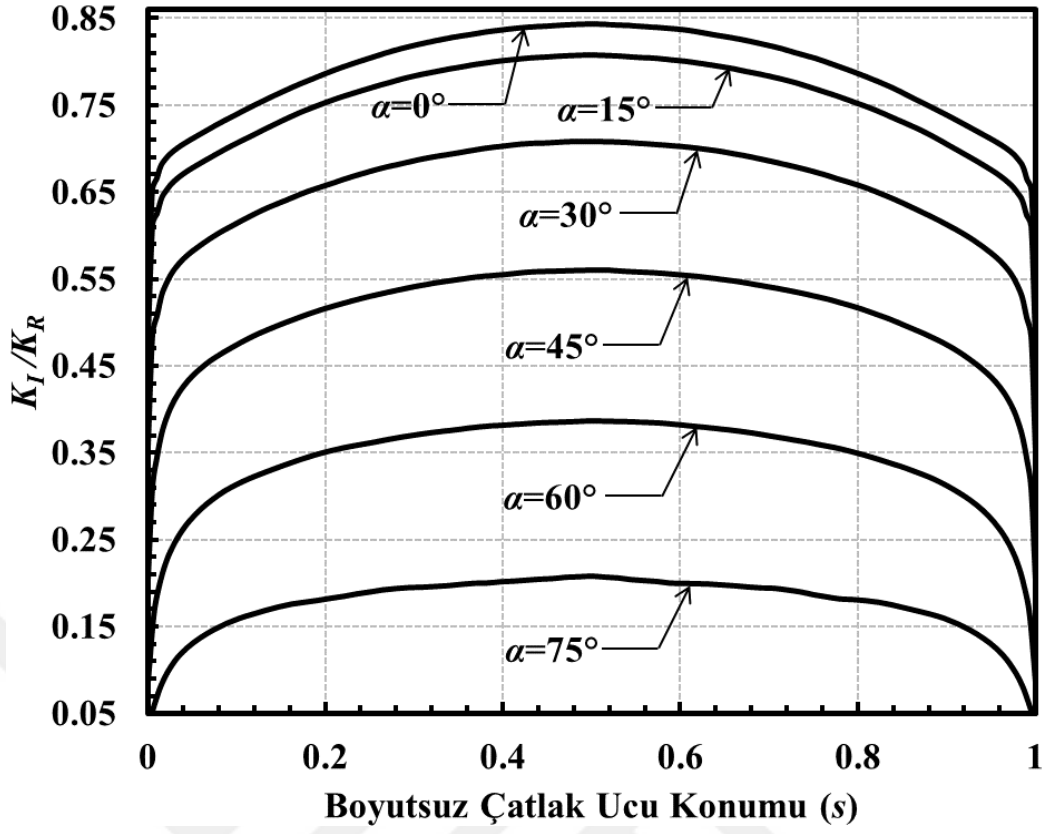
Şekil 3.159. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



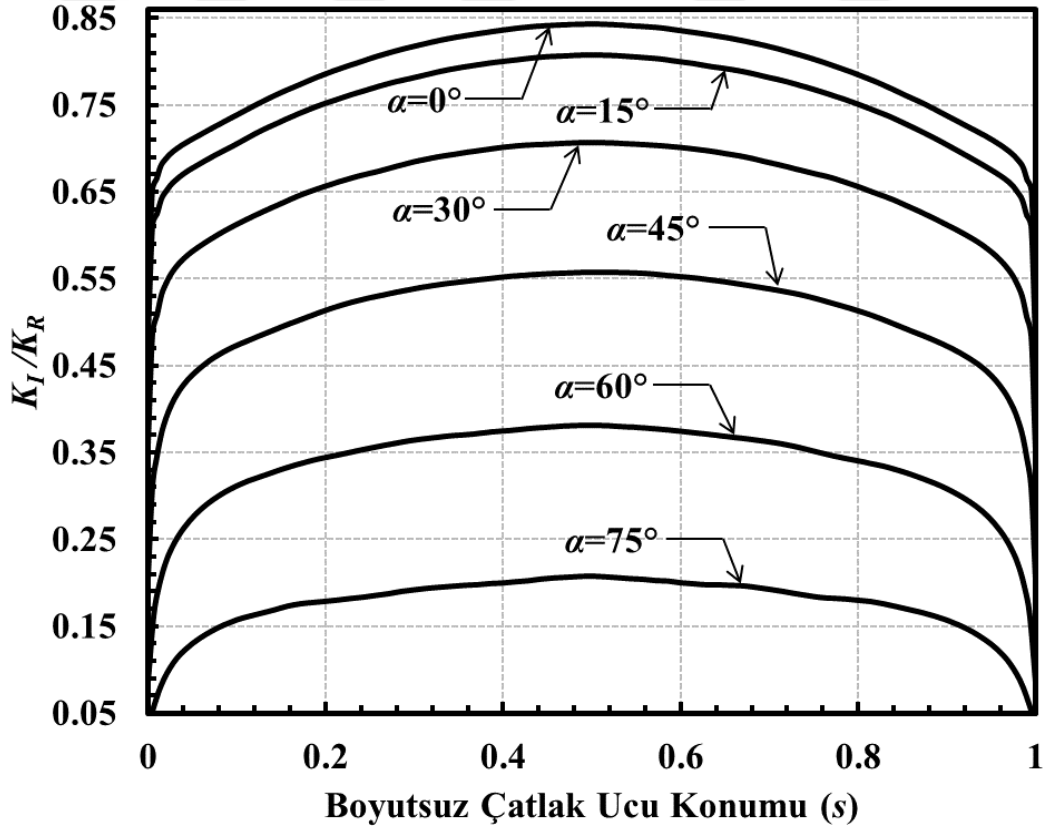
Şekil 3.160. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



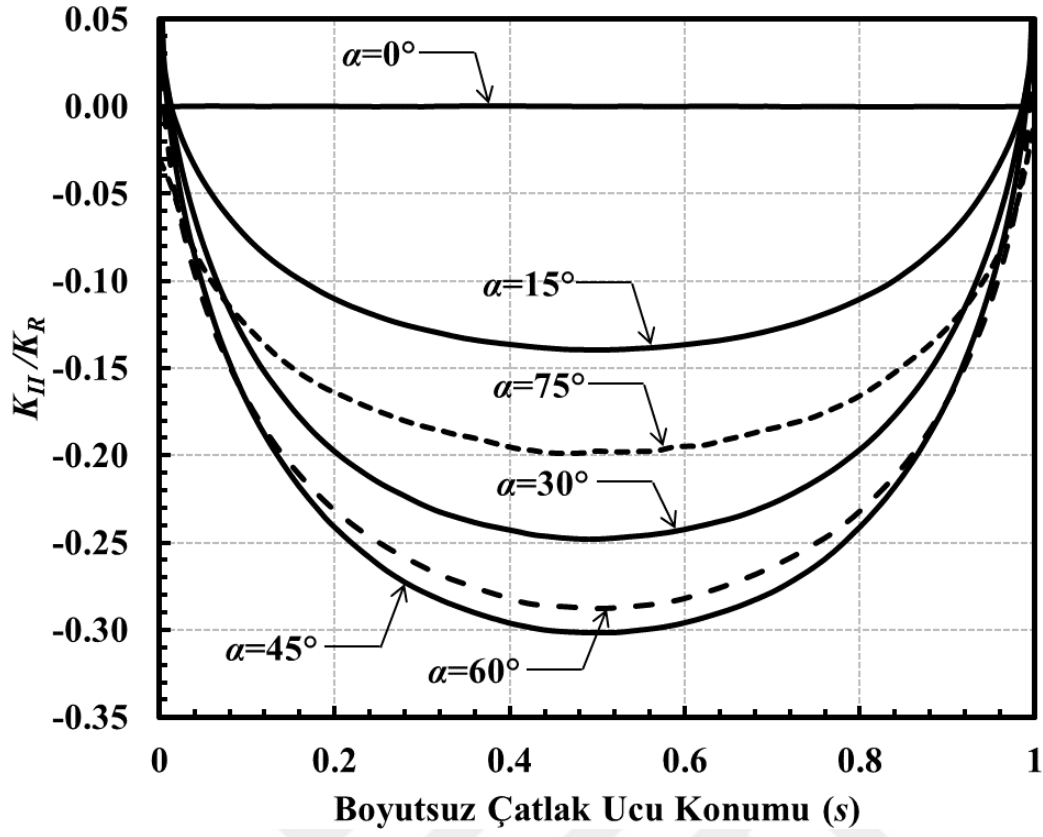
Şekil 3.161. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



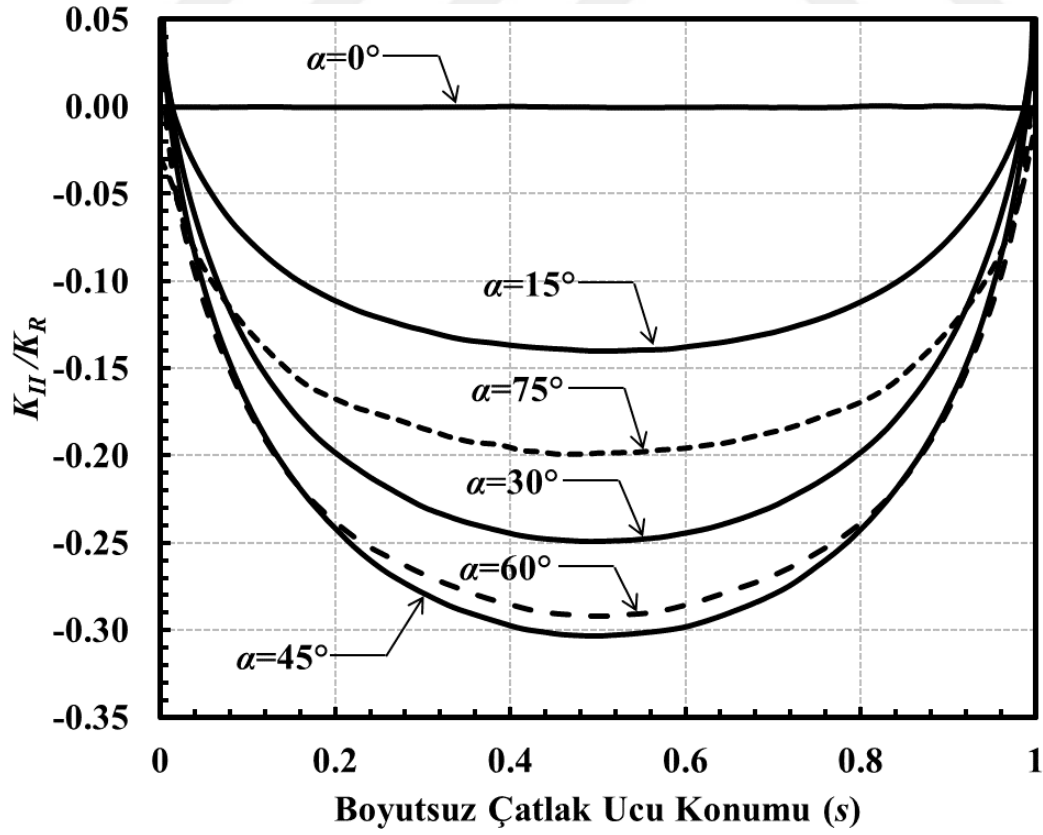
Şekil 3.162. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



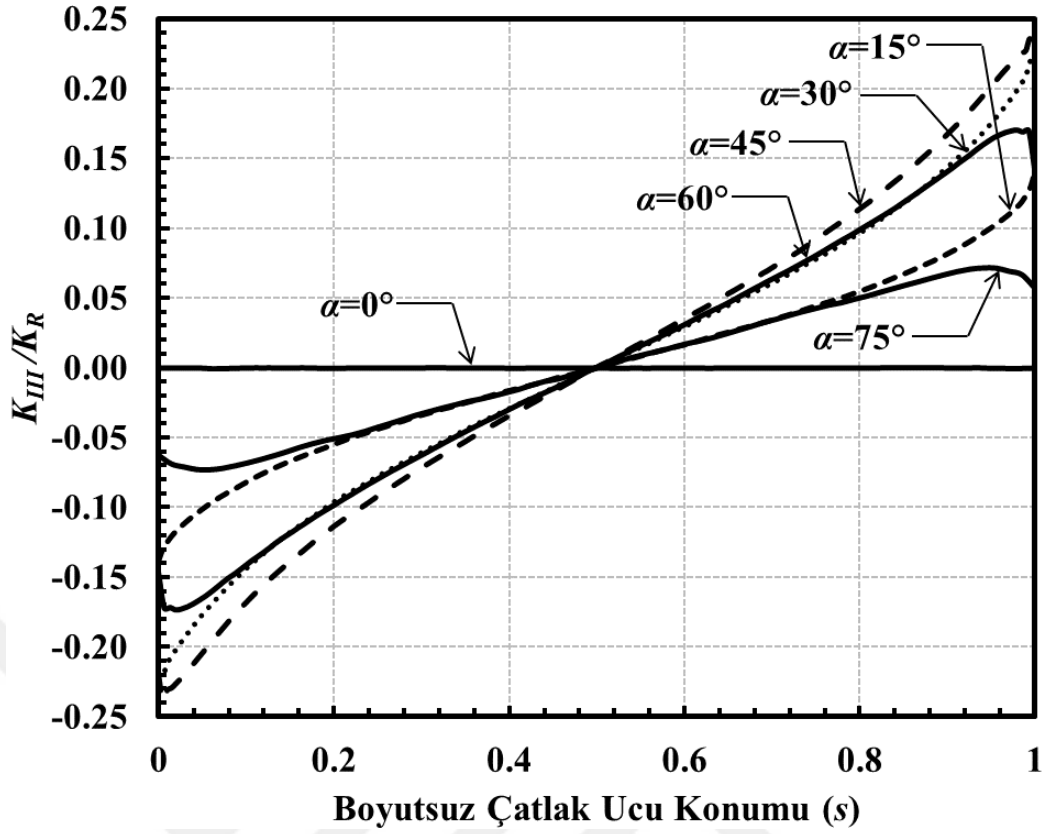
Şekil 3.163. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



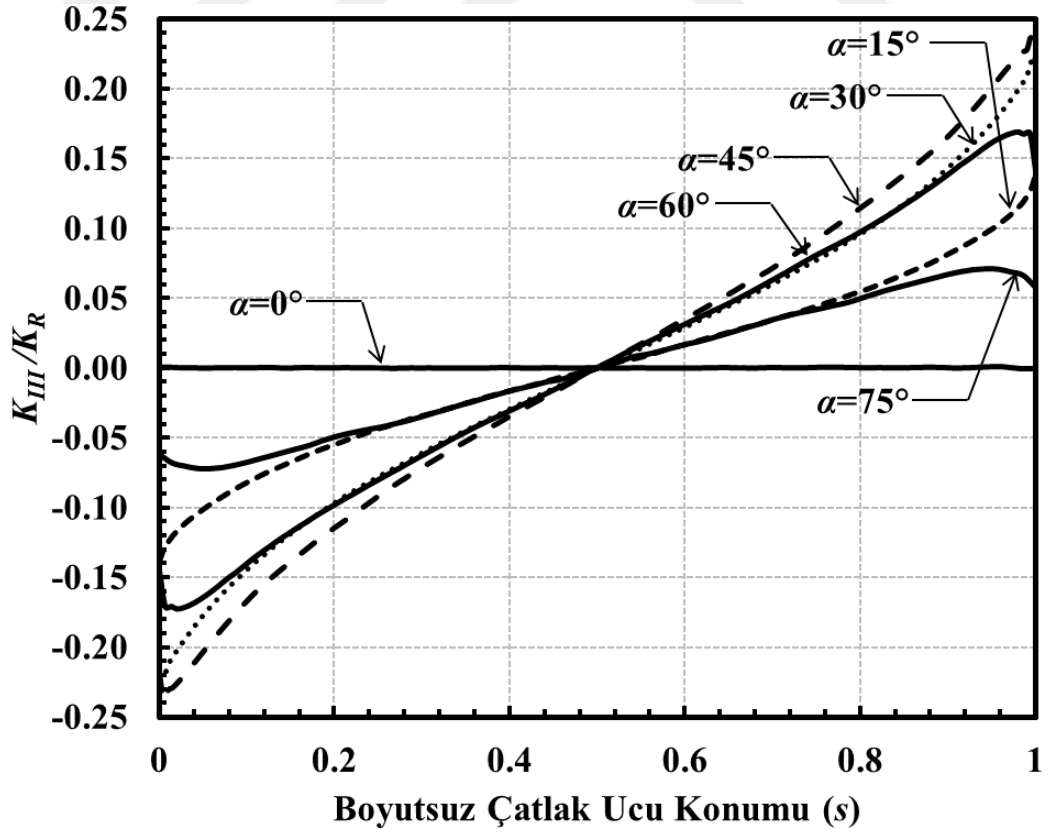
Şekil 3.164. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



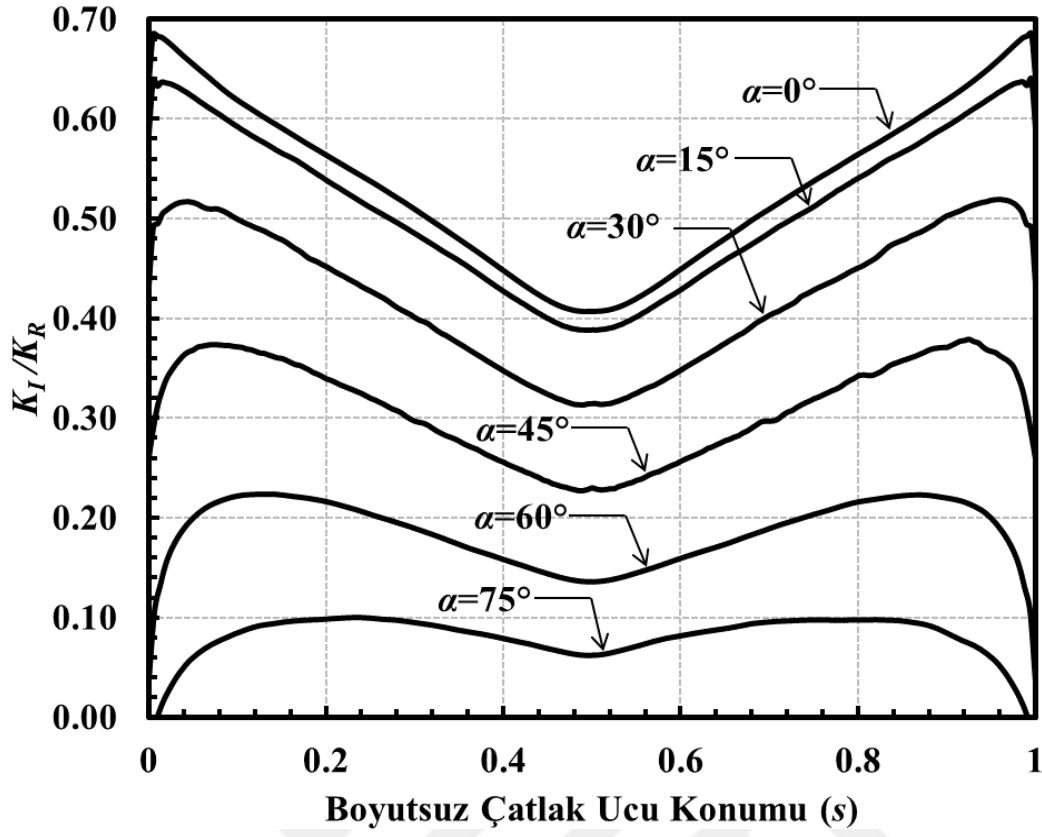
Şekil 3.165. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



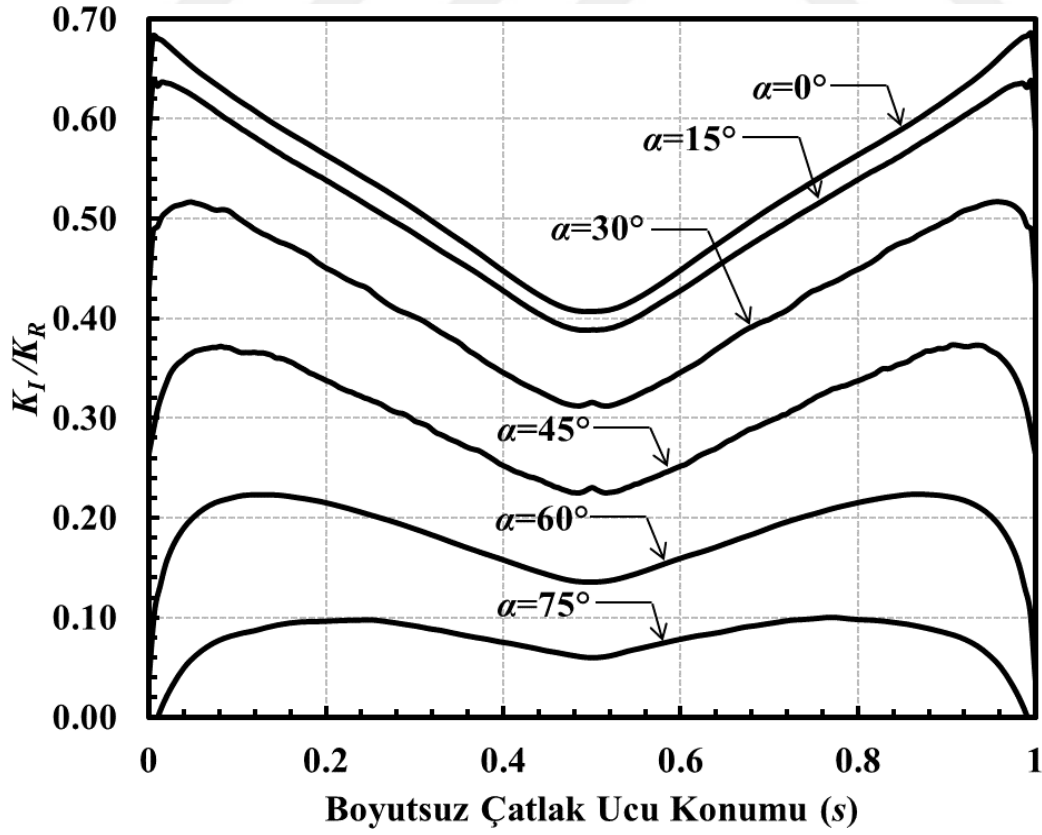
Şekil 3.166. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



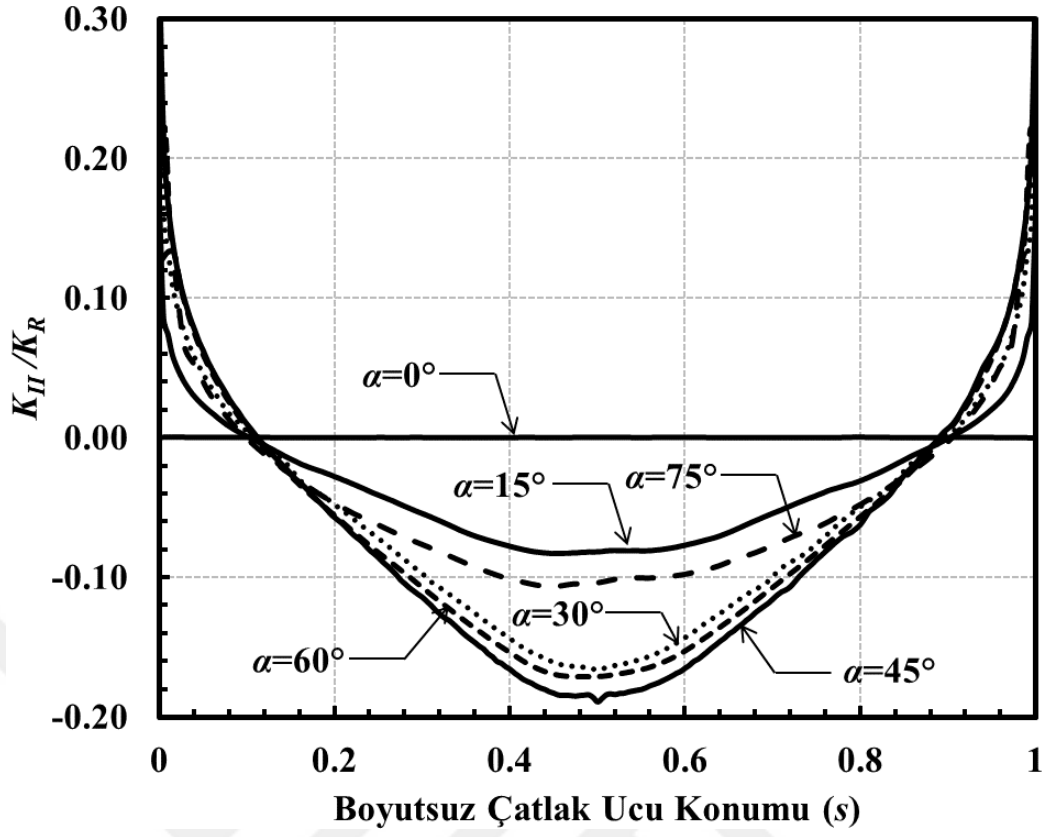
Şekil 3.167. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



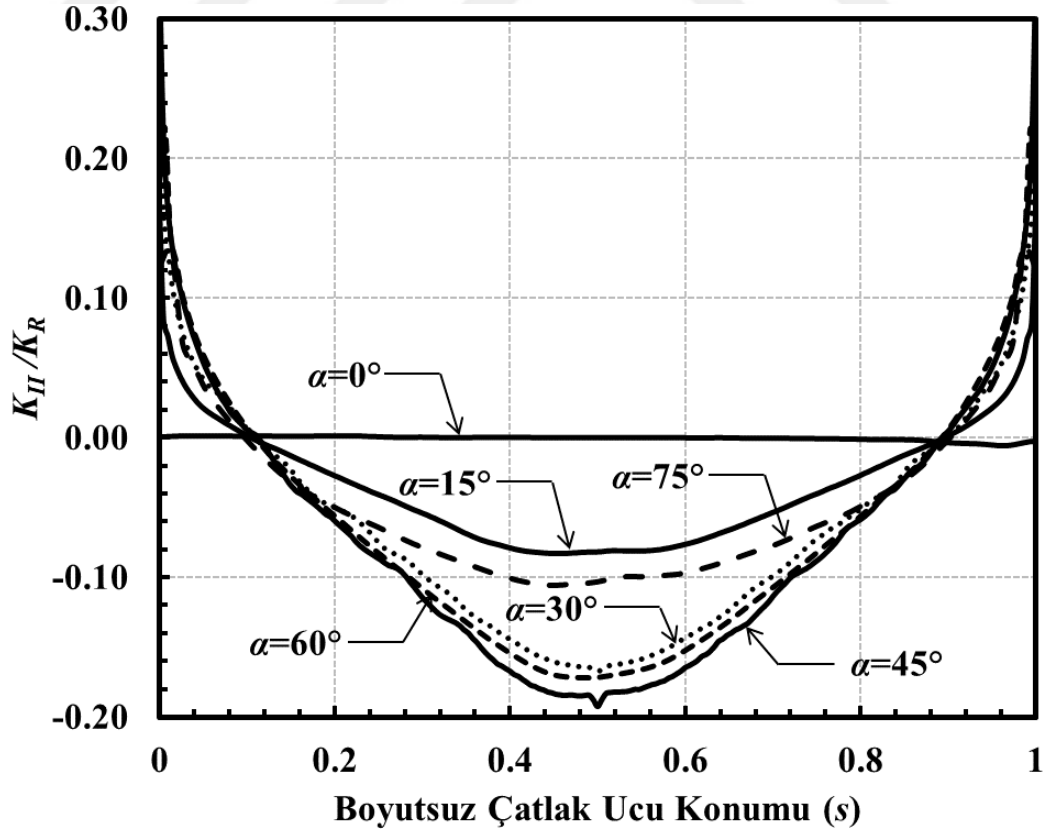
Şekil 3.168. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



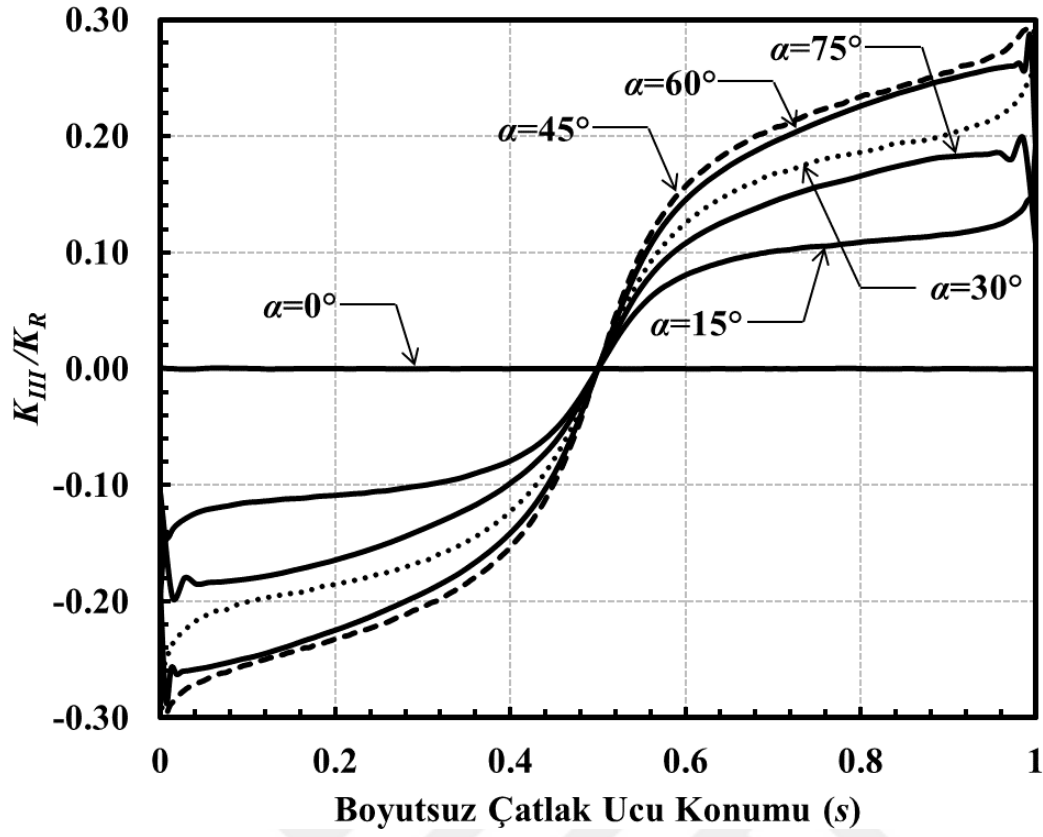
Şekil 3.169. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi).



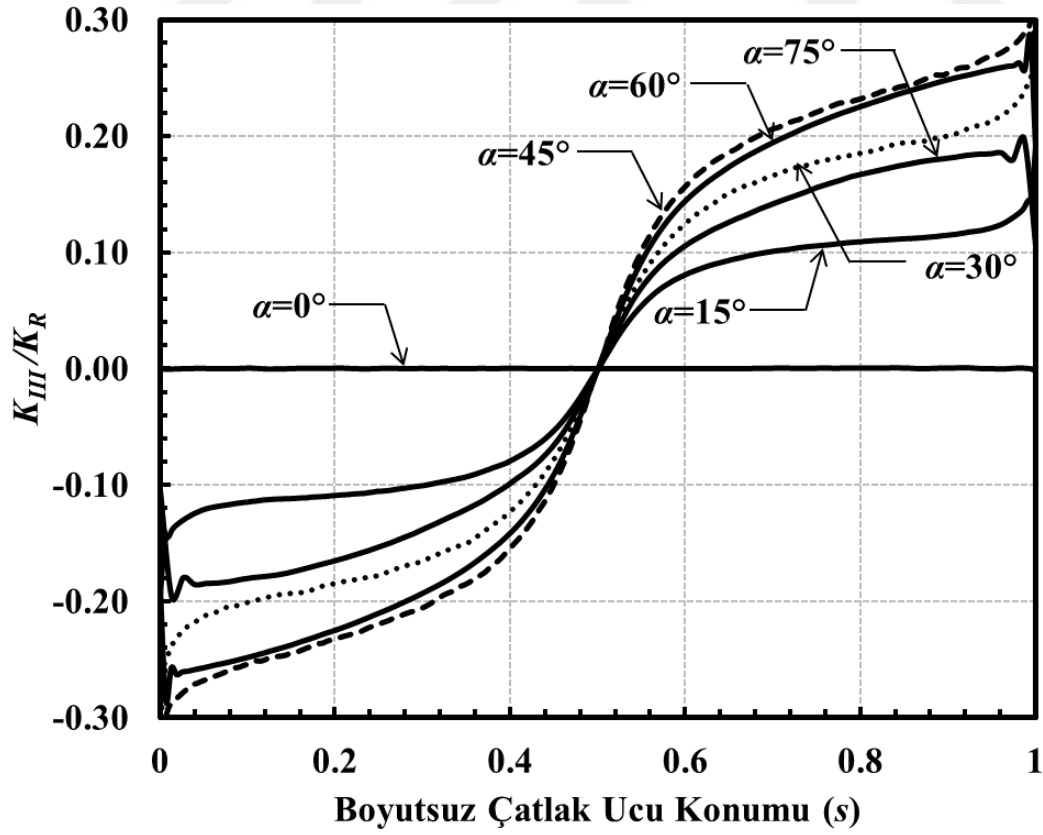
Şekil 3.170. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



Şekil 3.171. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



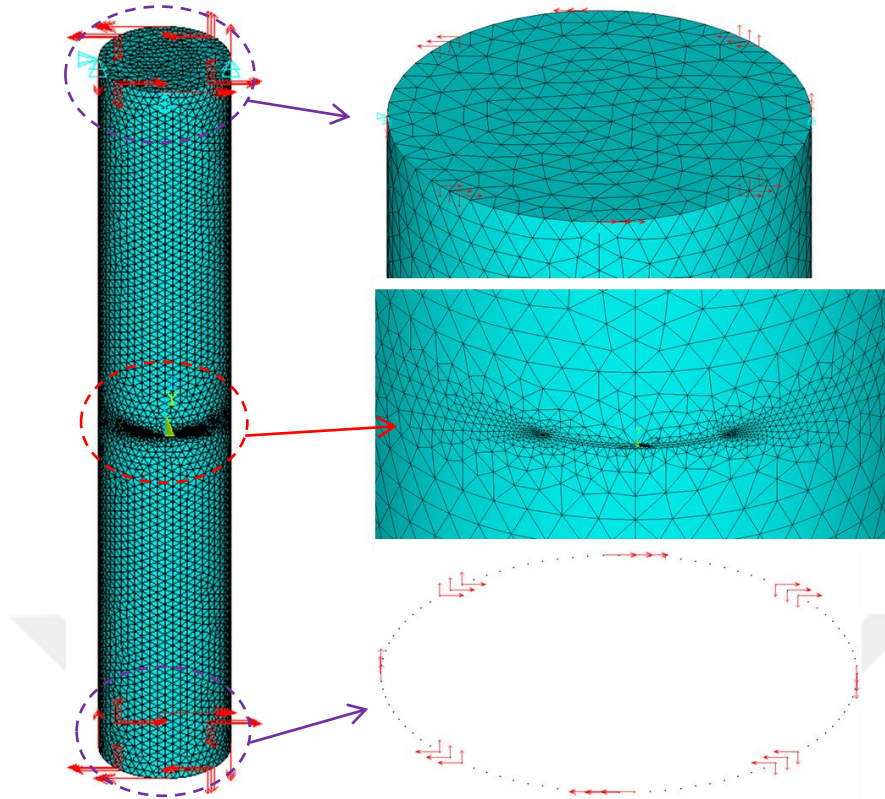
Şekil 3.172. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).



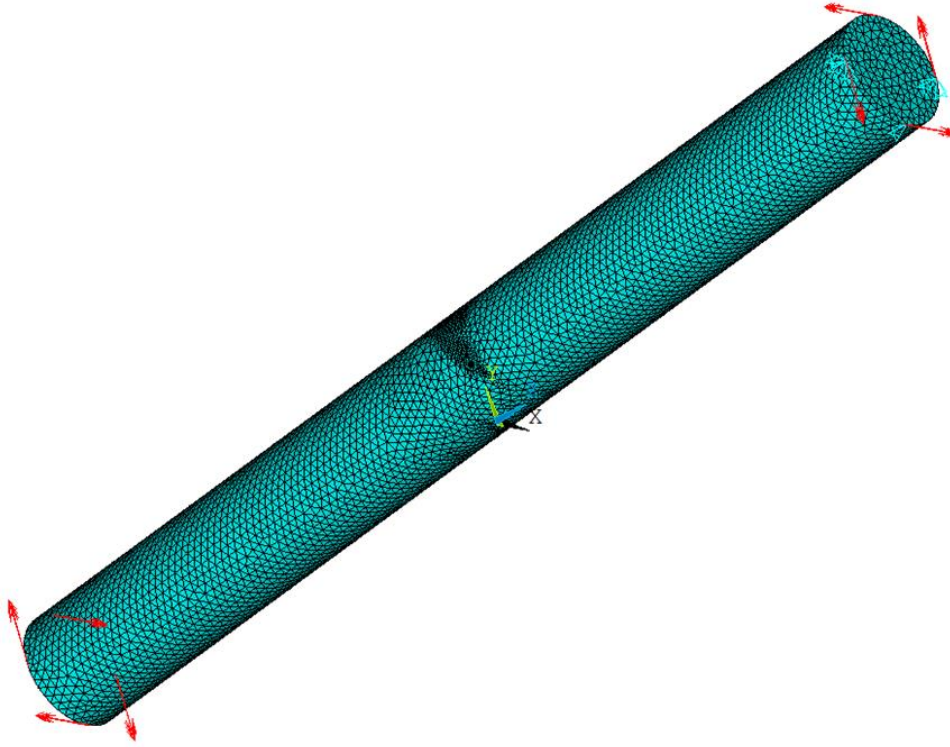
Şekil 3.173. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi).

3.4. Burulma Yüğüne Maruz Katı Silindirik Yapıda Bulunan Dönmüş Çatlak Analizleri

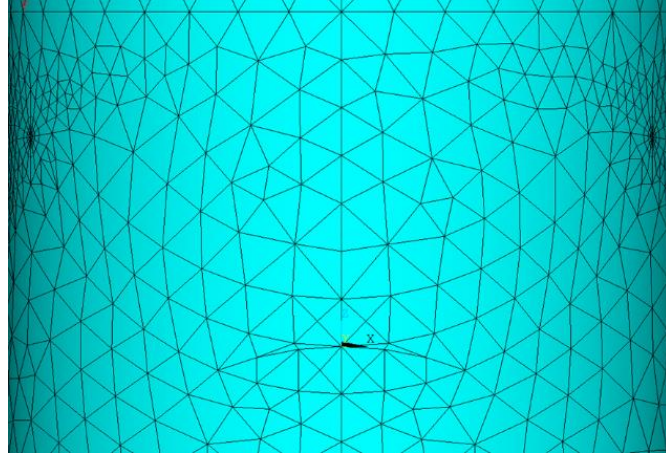
Bu bölümde, burulma yüküne maruz katı bir silindirdeki dönmüş yüzey çatlağı için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} dağılımları verilmektedir. Çatlak derinliği/çatlak uzunluğu oranı olan a/c değerleri 0.25, 0.5, 1.0, 2.0; çatlak derinliği/katı silindir çapı oranı olan a/D değerleri sırasıyla 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8; çatlak ile yatay eksen arasındaki açı parametresi olan α değerleri sırasıyla 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° seçilmiştir. Boyutsuz çatlak ucu konumu, bir serbest yüzey noktasından diğerine 0 ve 1 aralığında değişmektedir. Belirtilen parametre değerlerinin tüm kombinasyonlarına uygun olarak ilgili sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve herbiri için karışık mod GŞF dağılımları hesaplanarak boyutsuz olarak ayrı grafikler halinde sunulmuştur. Çatlak derinliğini tanımlamak için kullanılan a parametresi, tüm modellemelerde 1 birim olarak seçilmiştir. Katı silindirin yarım boy yüksekliği çapın katları olarak alınmıştır. $a/D=0.05$ için 3, $a/D=0.1$ için 4 ve diğerleri için de 5 katı olacak şekilde modeller oluşturulmuştur. Modellerde daha iyi mesh kalitesi elde edebilmek için silindirler yükseklik yönünde üç kısma bölünmüştür. ANSYS Mechanical APDL [25] arayüzünde modeller oluşturularak yapılan tüm işlem adımlarında kolaylık sağlaması açısından programın ürettiği kodlar File=>Log File komutu kullanılarak not defterine kaydedilmiştir. Burulma yükü, katı silindirin alt ve üst dairesel alanı çevreleyen çizgilerde bulunan düğüm noktalarından tanımlanmıştır. Çeyrek daire dilimlerinde düğüm noktalarından merkeze teğet 1 birim kuvvet uygulanmıştır. $a/D=0.05$ değeri için 8 adet kuvvet çifti diğer değerler için 4 adet kuvvet çifti tanımlaması yapılmıştır. Katı silindirin rijit cisim hareketini kısıtlamak için farklı noktalardan sabitleme yapılmıştır. Üst dairesel yüzeyde çeyrek daire dilimlerine karşılık gelen 4 adet anahtar noktası bulunmaktadır. Bu noktalardan birinden üç ekseninde, karşısında bulunan noktadan iki ekseninde ve başka bir noktadan tek ekseninde sabitlenmiştir. Sonraki aşamada FCPAS verileri yardımıyla gerekli *.geo ve *.run dosyaları oluşturularak kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. FRAC3D kullanılarak hesaplanan K_I , K_{II} ve K_{III} değerleri uygulanan yüke bağlı bir referans K_R değeri ile denklem 3.3-3.6'daki ifadeler yardımıyla boyutsuz hale getirilmiştir. Şekil 3.174-3.175'te burulma yükü altında katı silindirin sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir. Şekil 3.176'da çatlak bölgesinin yakından görünümü verilmiştir.



Şekil 3.174. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$, $\alpha =15^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlağına sahip katı silindirin global sonlu elemanlar modeli, burulma yükü için kuvvet dağılımlarının ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.



Şekil 3.175. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$, $\alpha =45^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlağına sahip katı silindirin global sonlu elemanlar modeli ve kuvvet dağılımlarının perspektif görünümü.



Şekil 3.176. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$, $\alpha=45^\circ$ olan dönmüş yüzey çatlakına sahip katı silindirin çatlak bölgesinin yakından görünümü.

Eksenel gerilme ve eğilme gerilmesinden farklı olarak burulma yükünde çatlak ile yatay eksen arasında açının olmadığı durumda açılma modu (mod-I) aktif olmaz. Bunun yerine kayma ve yırtılma modları aktif bulunmaktadır. Çatlak dönme açısının sıfırdan büyük olması durumunda tüm modların dahil olduğu karışık mod gerilme şiddet faktörleri oluşmaktadır.

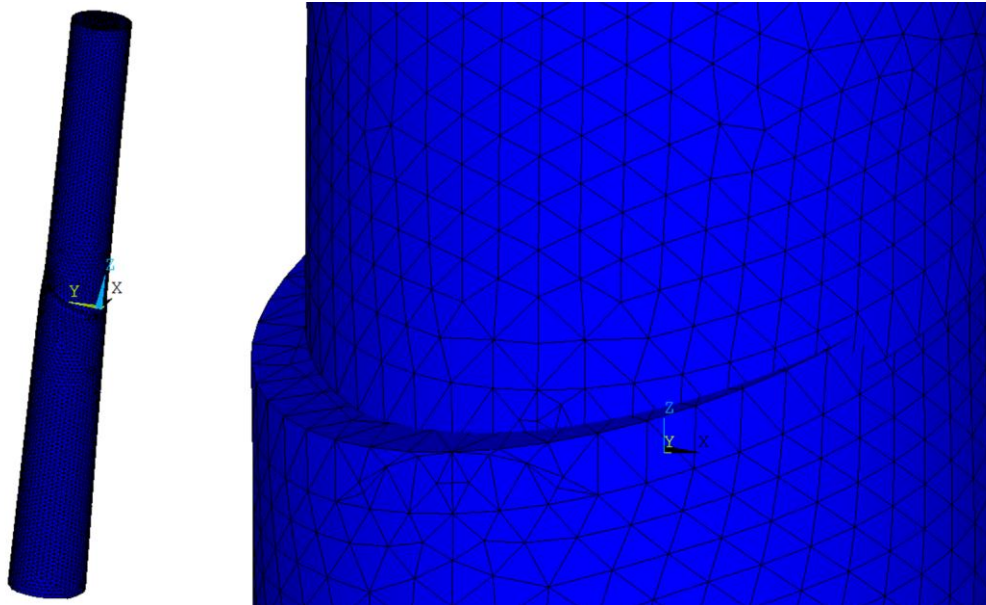
Burulma yükü altında bulunan bir silindirde dış dönmüş yüzey çatlaklarının bir tarafı açılırken, diğer tarafı kapanmaktadır. Çatlak önünün başladığı ve bittiği serbest yüzeylerdeki açılma-kapanma durumlarını daha iyi gözlemlemek için ANSYS Structural [25] Modülünde yapısal analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda elde edilen deformasyonlar Şekil 3.177-3.181’de görülmektedir. FCPAS ile yapılan kırılma analizlerinde de çatlak ucunun kapandığı bölgelerde mod-I GŞF’nün negatif olduğu görülmektedir (Şekil 3.182). Şekil 3.182’de elde edilen boyutsuz K_I dağılımlarının, önceki bölümlerde analizi yapılan eksenel gerilme ve eğilme yükünde üretilen boyutsuz K_{III} dağılımlarına benzediği de görülmektedir. Ayrıca, beklendiği üzere derinlik noktasında boyutsuz K_I değeri 0’dır. Grafiklerde pozitif bölgelerde görülen dağılımlar çatlakın açılma durumunu, negatif bölgelerde görülen dağılımlar ise çatlakın kapanma durumunu temsil etmektedir. FCPAS analizlerinde temas mekaniği modellenmediği için grafiklerde verilen değerler gerçek fiziki şartları temsil etmemektedir. Her ne kadar, burulma yükü altında bulunan dönmüş yüzey çatlaklarının gerçek fiziki şartlarını tam olarak temsil etmese de, problem ile ilgili sunulan çözümlerin tamamlayıcı olması açısından eksenel gerilme ve eğilme yüklemesinde analizi yapılan tüm durumlar için kırılma çözümleri burulma yüklemesi

için de bu bölümde verilmektedir. Mod-I GŞF için, son olarak boyutsuz K_I dağılımlarının serbest yüzeyden diğer serbest yzeeye doğru anti-simetrik olduğu görülmektedir.

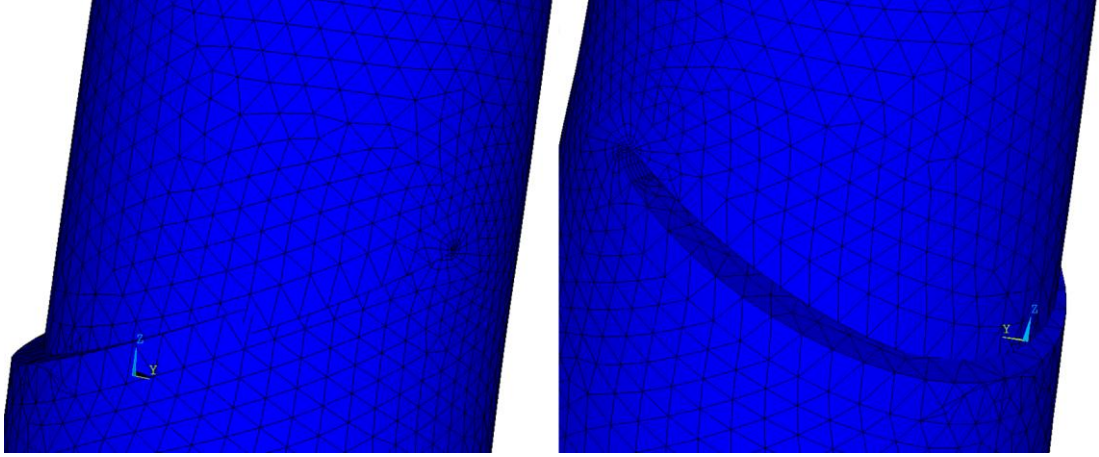
Kayma modu analizlerinde derinlik noktasındaki boyutsuz K_{II} değerleri 0'dır. Genel olarak dönme açısı arttıkça boyutsuz K_{II} değerlerinin Şiddetleri azalmaktadır. Boyutsuz K_{II} dağılımları serbest yüzeyden diğer serbest yzeeye doğru anti-simetriktir. Analiz edilen ilk durum için GŞF dağılımı Şekil 3.183'te görülmektedir.

Yırtılma modu analizlerinde boyutsuz K_{III} dağılımları, önceki bölümlerde analizi yapılan aksenal gerilme ve eğilme yükünde üretilen boyutsuz K_I dağılımlarına benzemektedir. $a/c=1$ ve 2 oranlarındaki bazı değerler hariç genel olarak dönme açısı arttıkça boyutsuz K_{III} değerlerinin azaldığı görülmüştür. Boyutsuz K_{III} dağılımları, serbest yüzeyden diğer serbest yzeeye doğru simetriktir (Şekil 3.184).

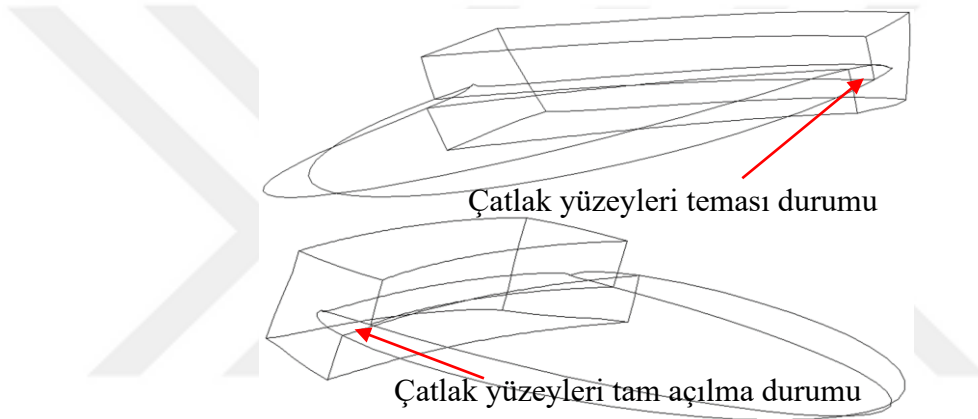
$a/D=0.05$ değerlerinde $a/c=0.5$ ve 2 oranlarında silindir yüksekliklerinin iki katına çıkarılması ile eleman ve düğüm noktalarının sayılarının artmasına bağlı olarak analiz çözüm süreleri artmıştır. Yükseklik artırımını sonrası, grafik dağılımlarında kaydadeğer bir değişim görülmemiştir. Burulma yklemei ile ilgili tüm mod-I, mod-II, mod-III boyutsuz GŞF zmleri Şekil 3.182– 3.253'de verilmiştir.



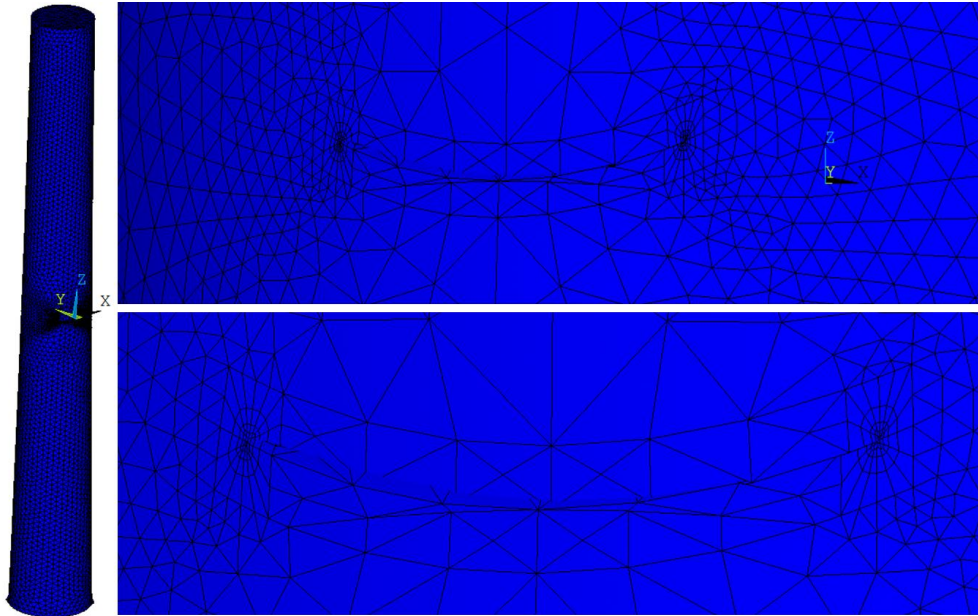
Şekil 3.177. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$, $\alpha =30$ derece dönmüş atlağa sahip katı silindire uygulanan burulma yükü sonucu oluşan deformasyon ve atlık bölgesinin yakından görünümü [25].



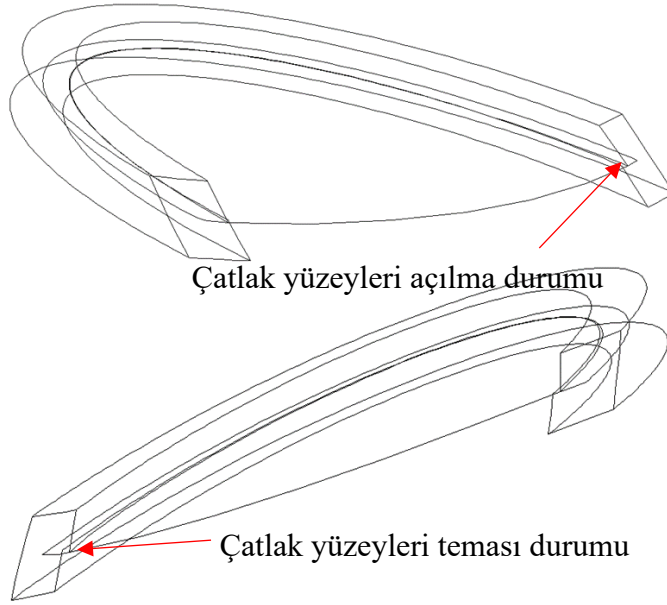
Şekil 3.178. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$, $\alpha =30$ derece dönmüş çatlğa sahip katı silindire uygulanan burulma yükü sonucu sağ bölgedeki çatlak kapanması ve sol bölgedeki çatlak açılması durumu [25].



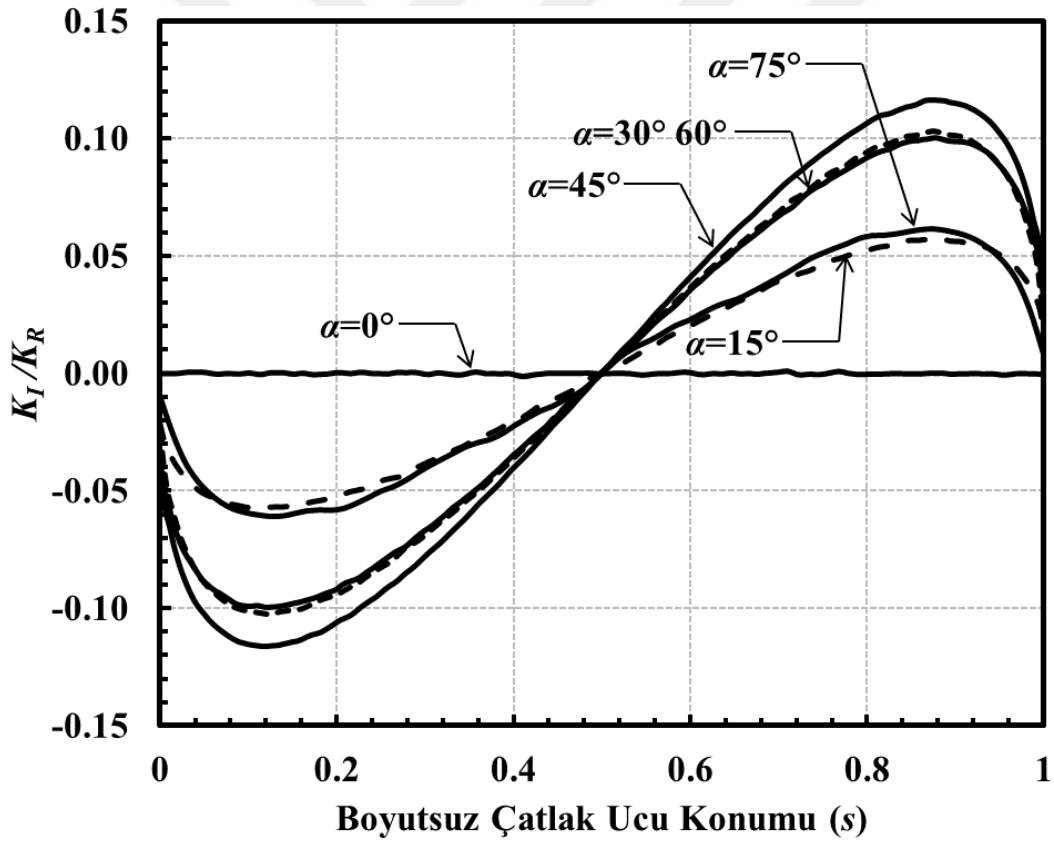
Şekil 3.179. Çatlak tam kapanma durumu ve çatlak tam açılma durumu.



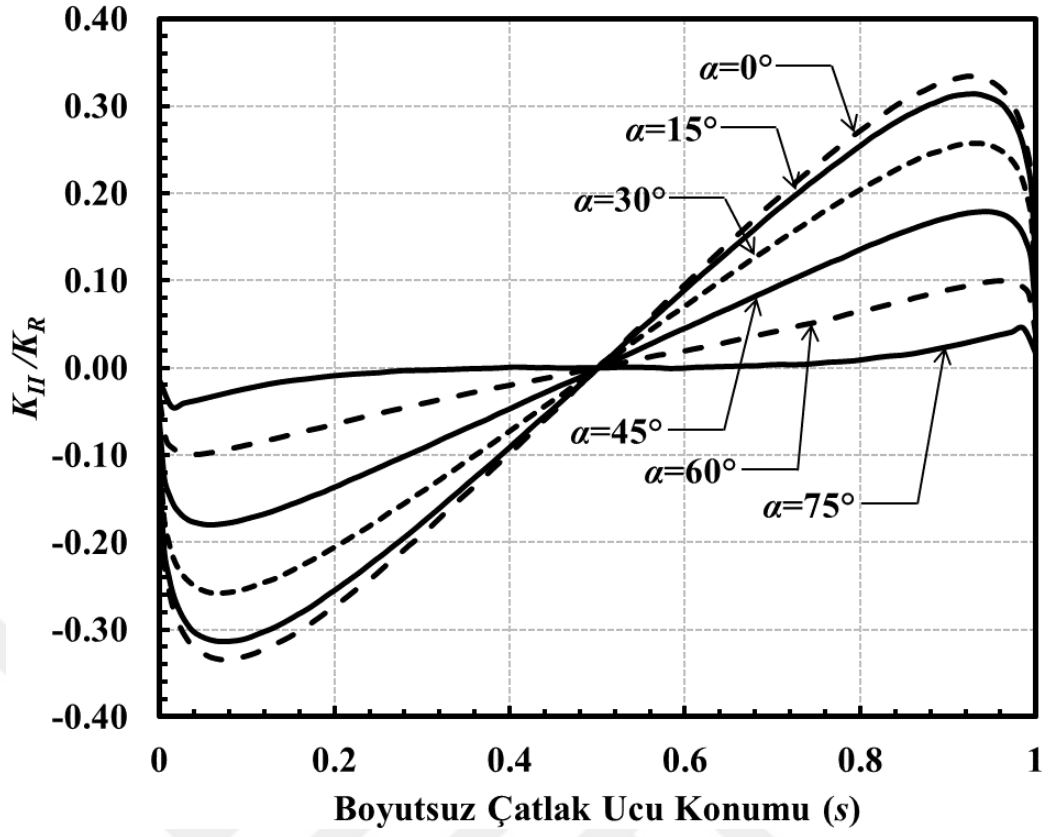
Şekil 3.180. $a/c=2$, $a/D=0.25$, $\alpha =60$ derece dönmüş çatlğa sahip katı silindire uygulanan burulma yükü sonucu oluşan deformasyon ve çatlak bölgesinin yakından görünümü.



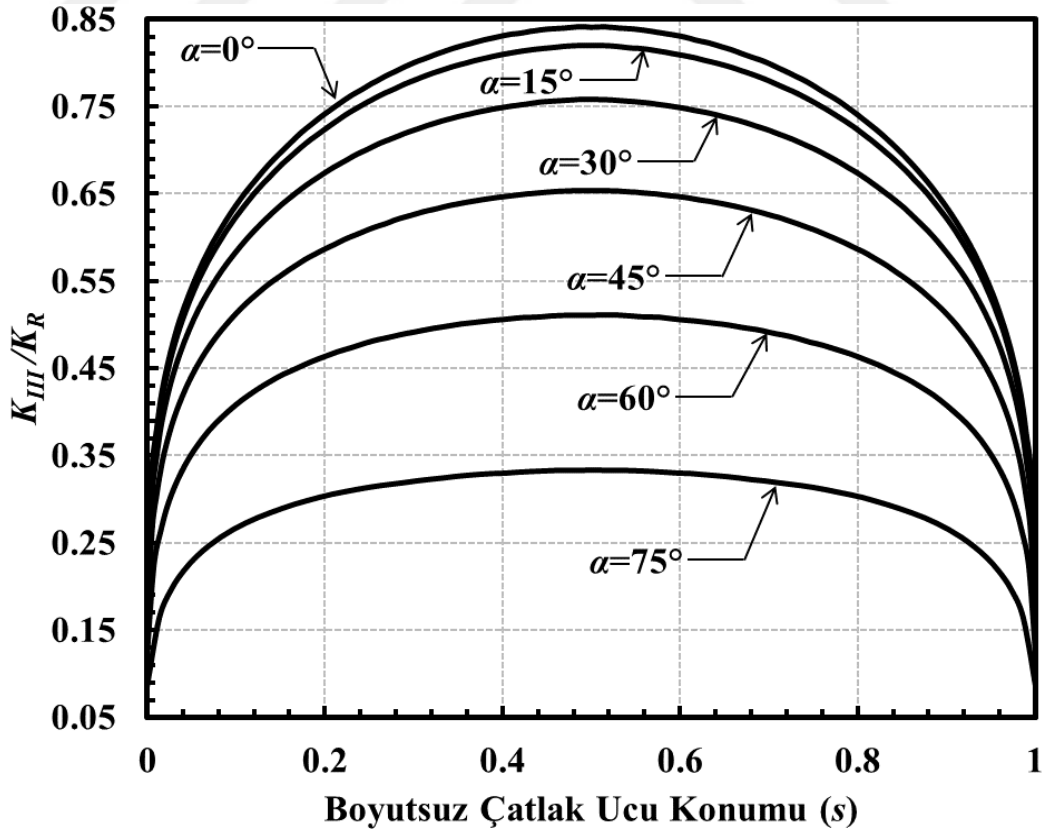
Şekil 3.181. Çatlak çizgilerinin açılma durumu ve çatlak çizgilerinin iç içe geçme durumu.



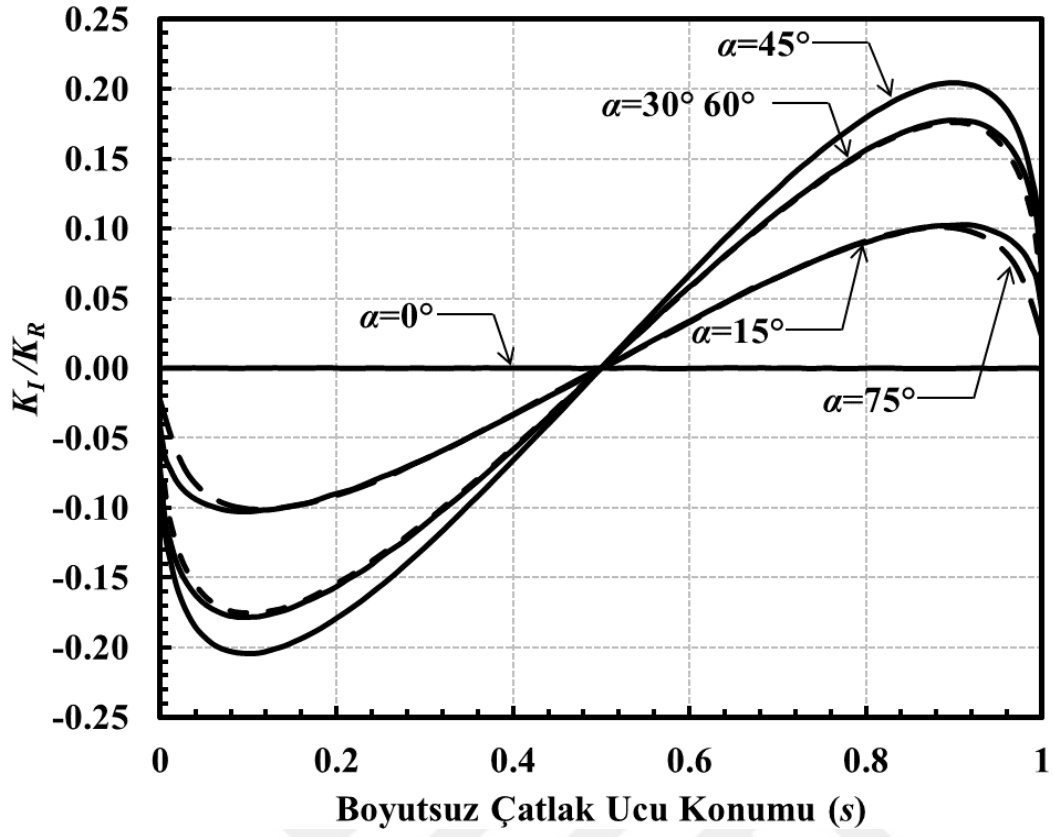
Şekil 3.182. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



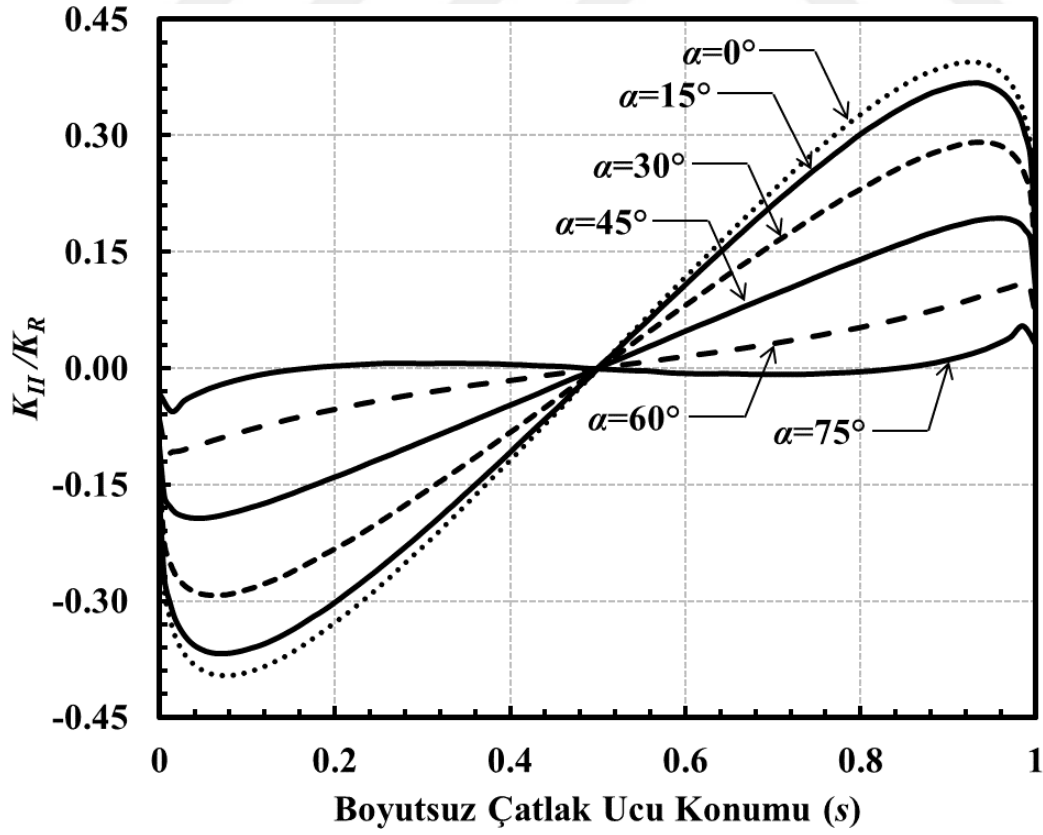
Şekil 3.183. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



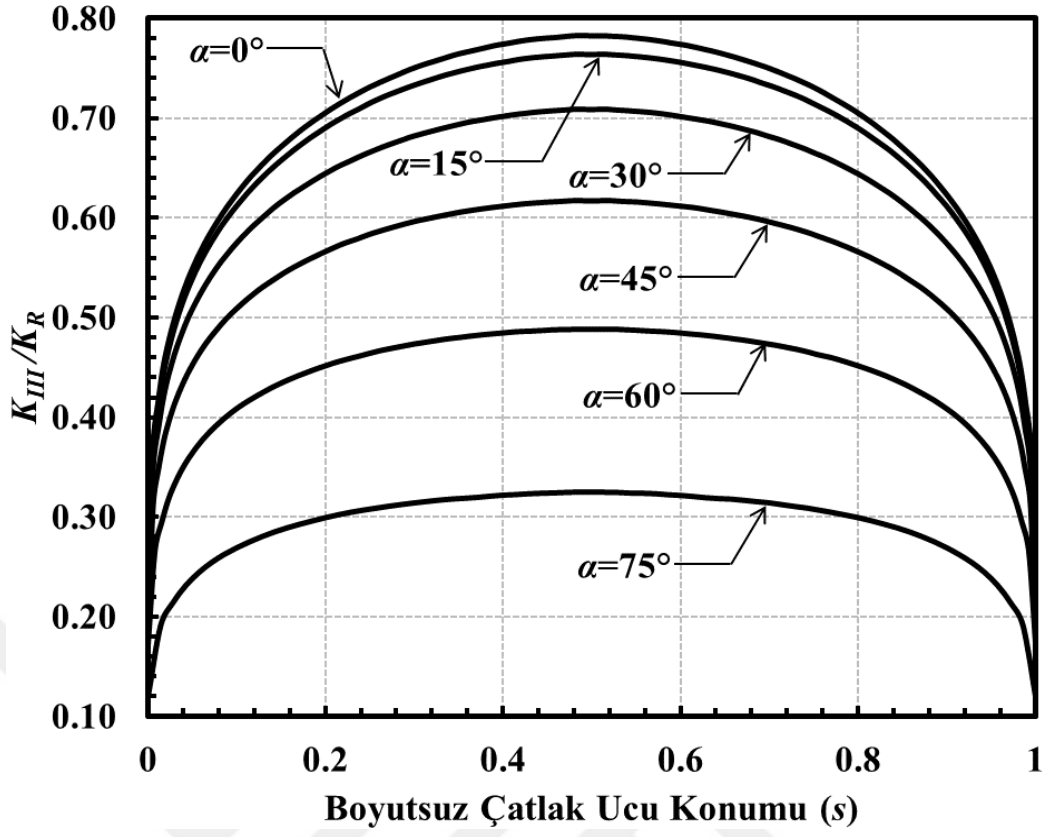
Şekil 3.184. $a/c=0.25$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



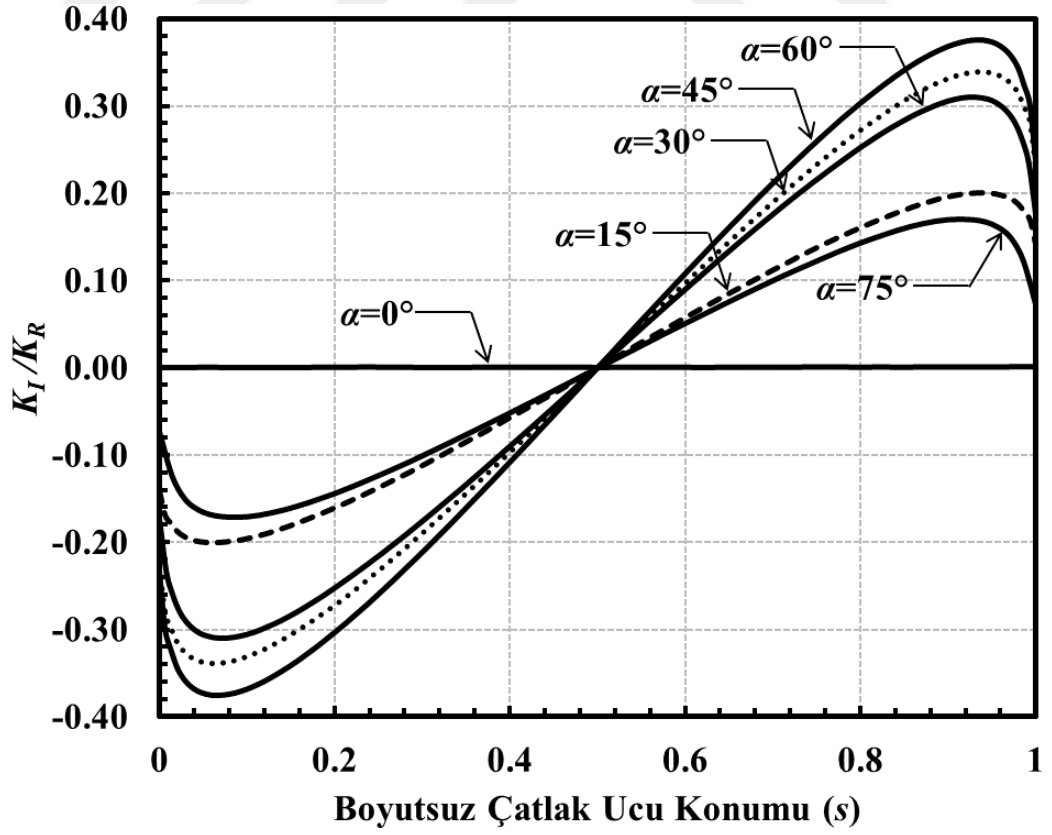
Şekil 3.185. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



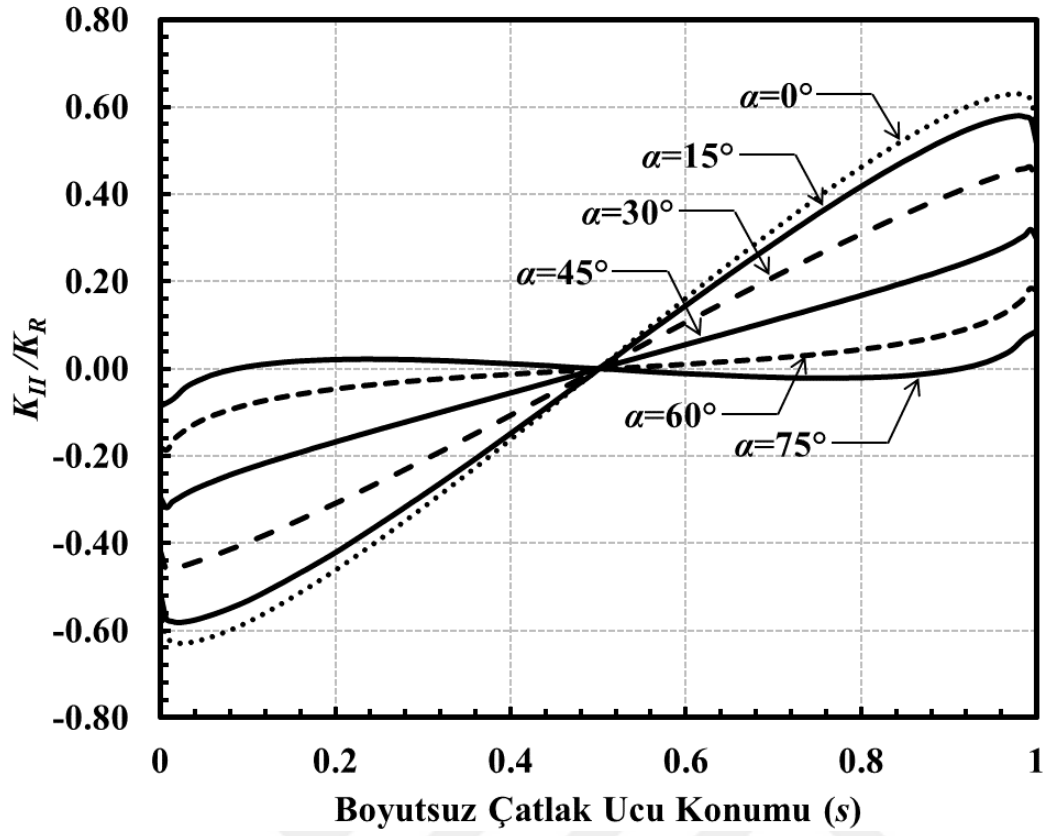
Şekil 3.186. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



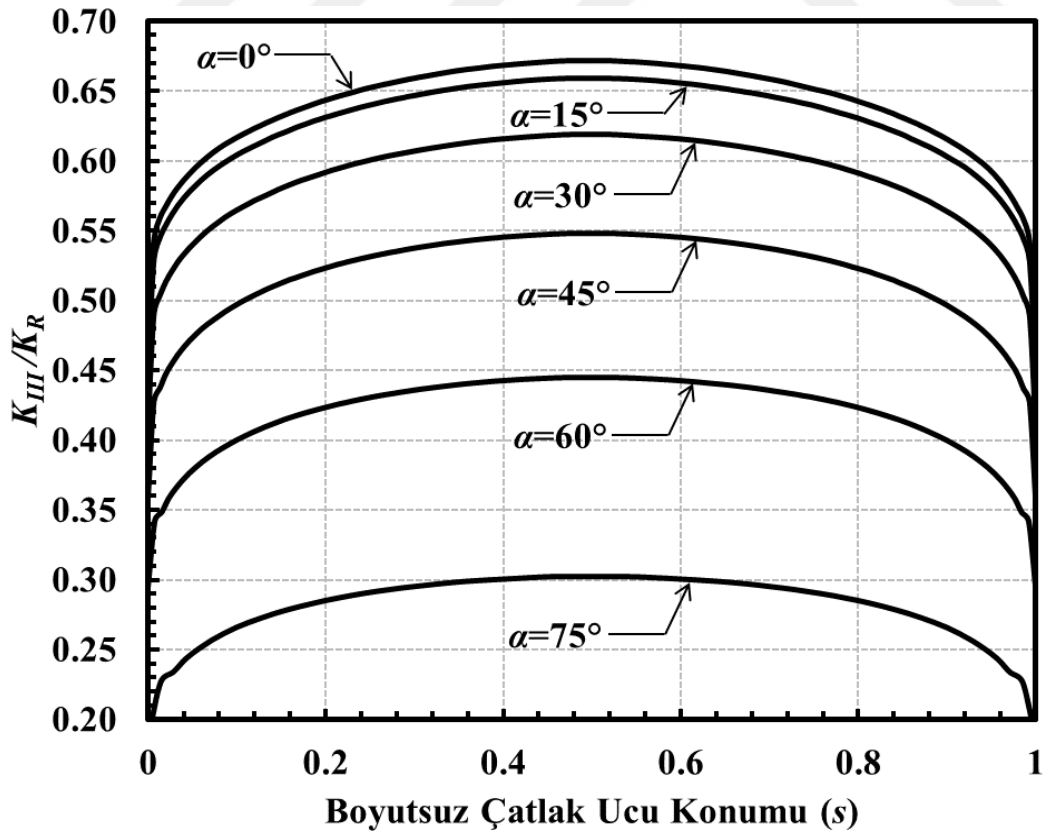
Şekil 3.187. $a/c=0.25$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



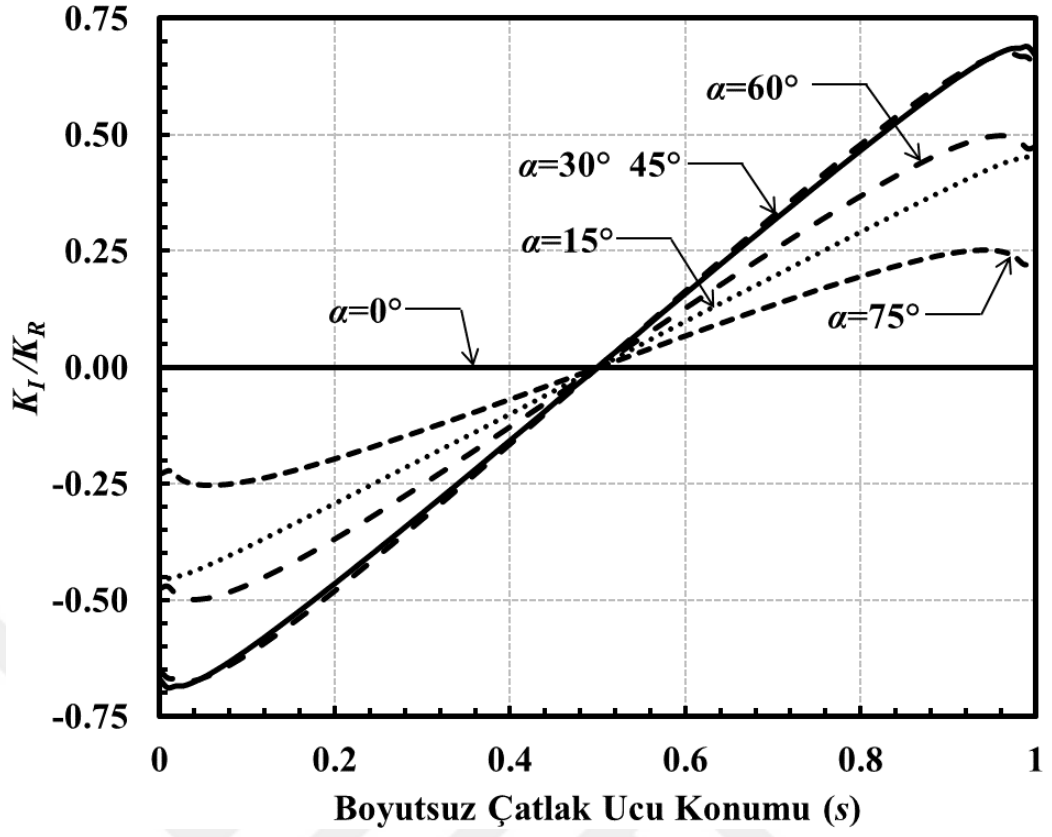
Şekil 3.188. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



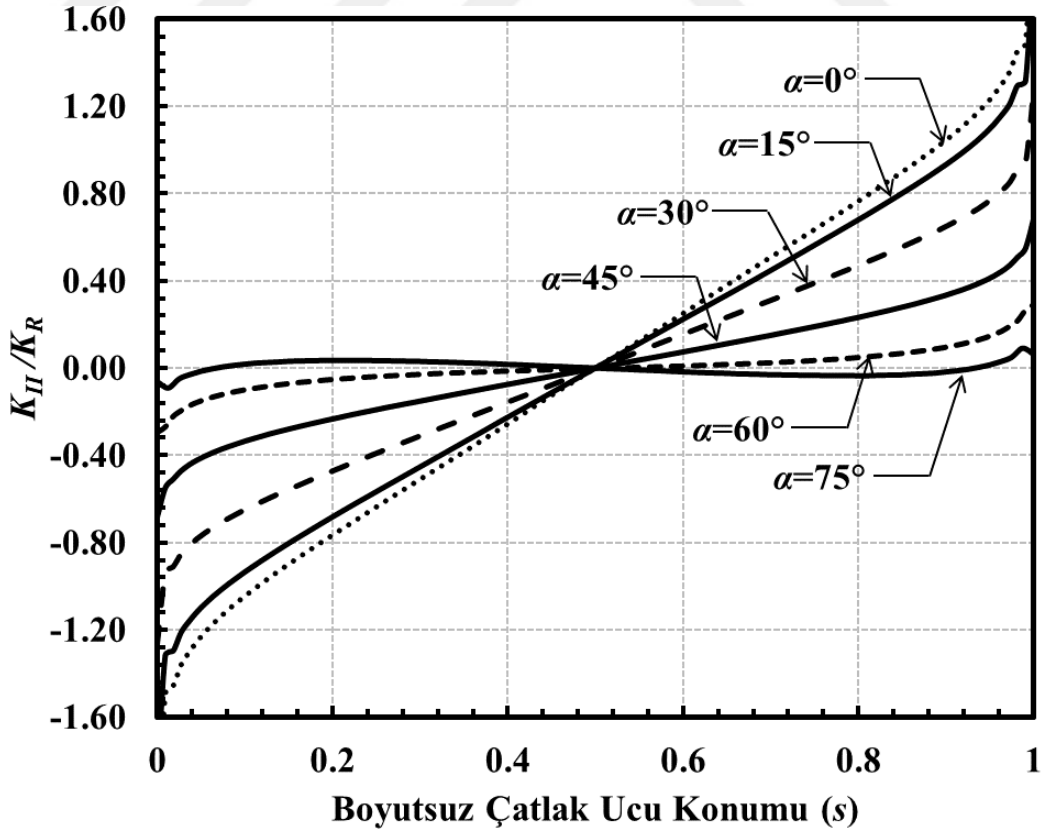
Şekil 3.189. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



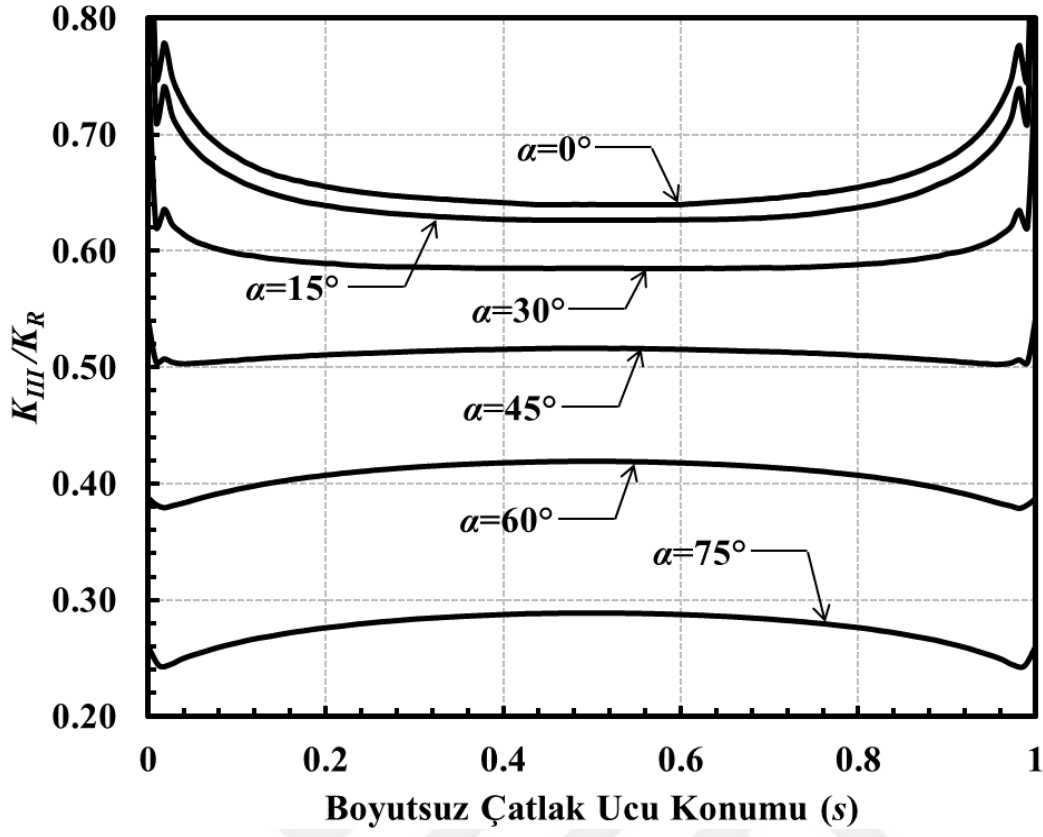
Şekil 3.190. $a/c=0.25$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



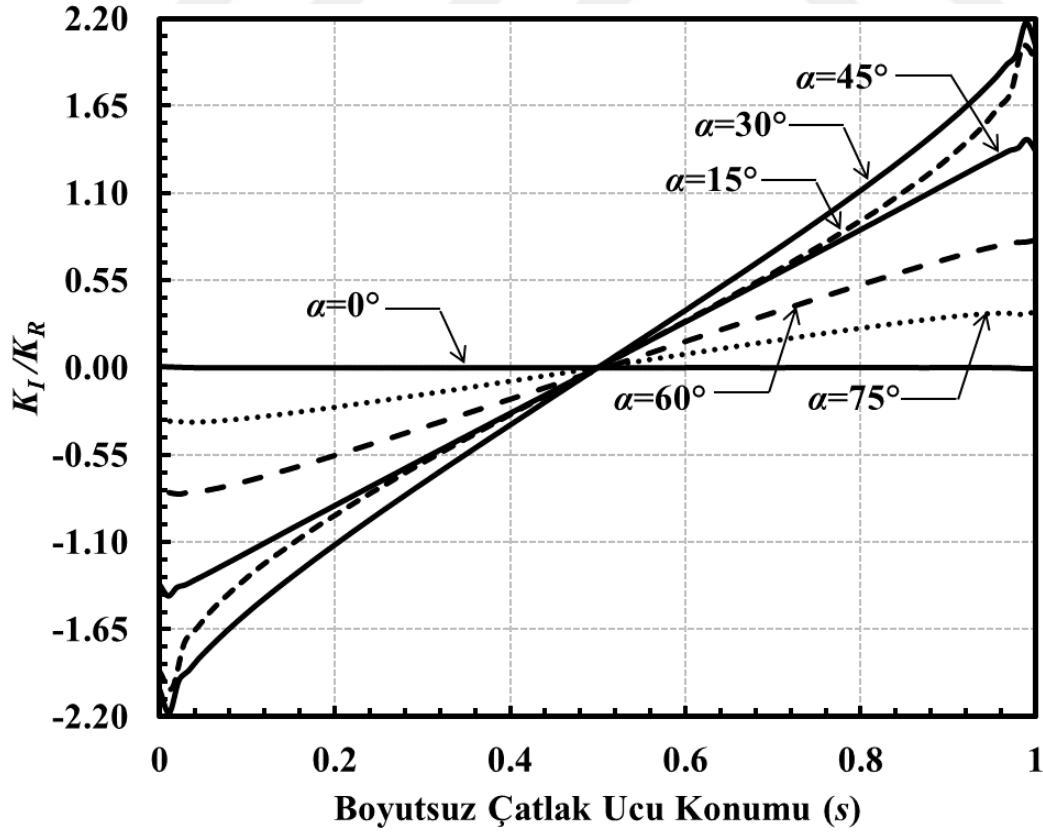
Şekil 3.191. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



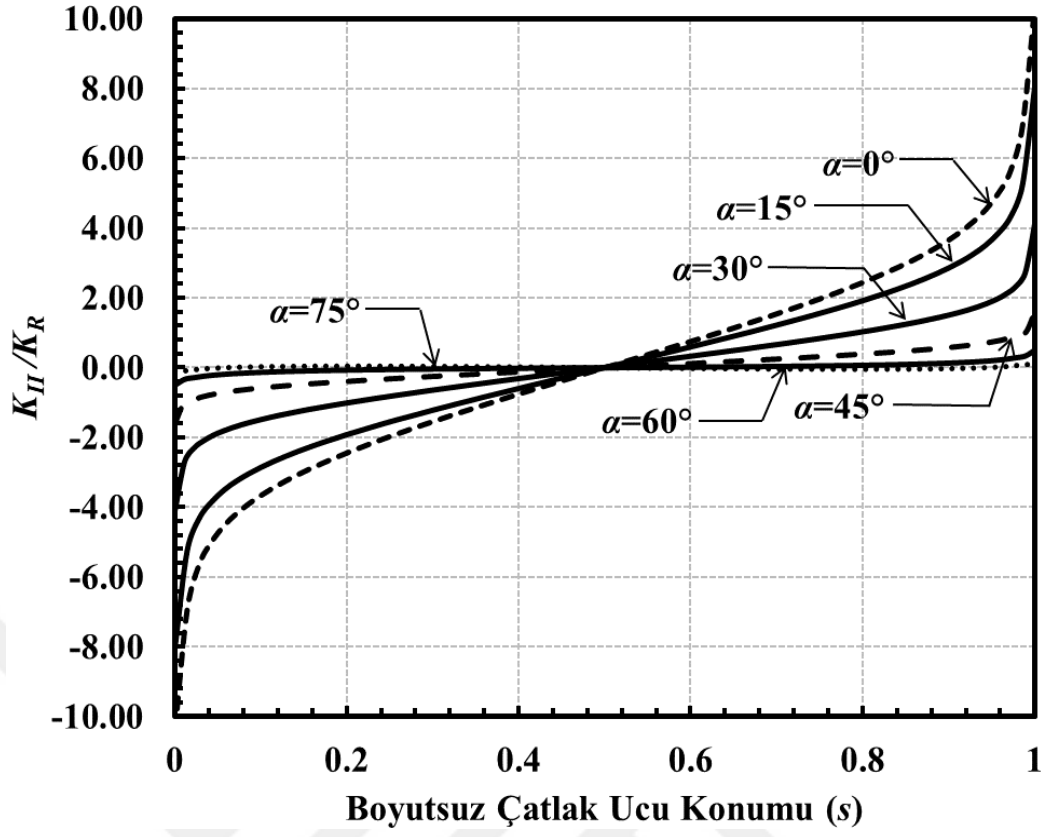
Şekil 3.192. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



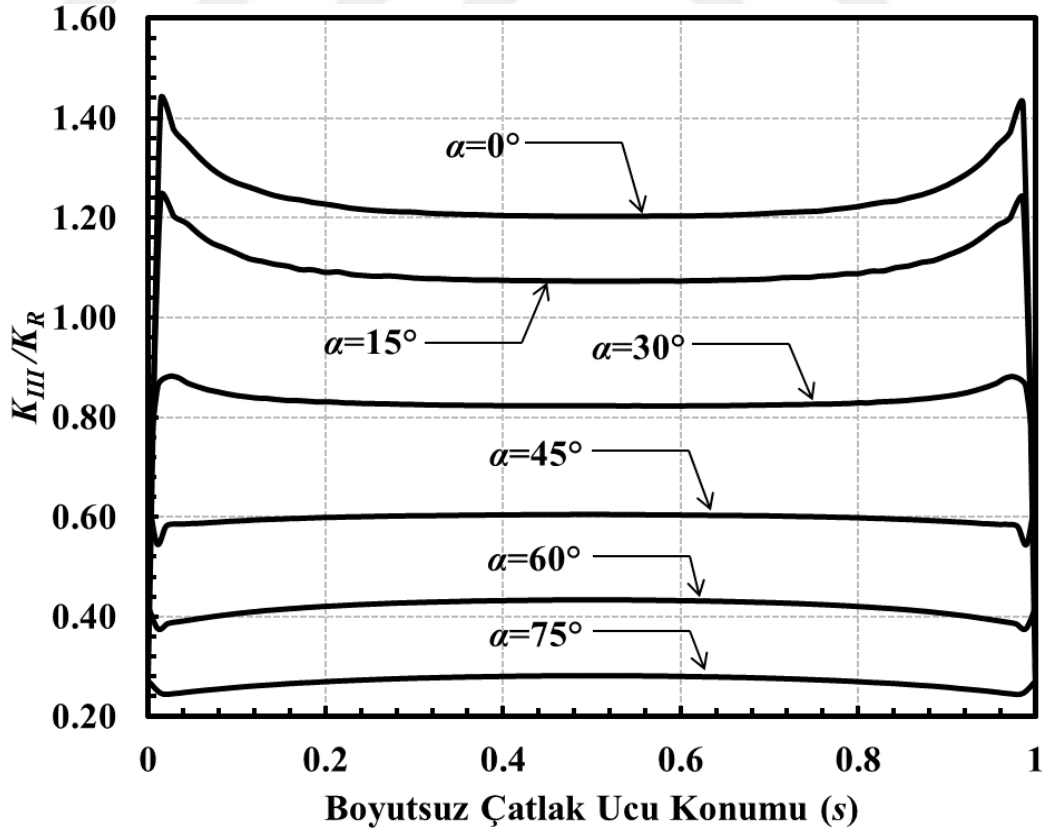
Şekil 3.193. $a/c=0.25$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



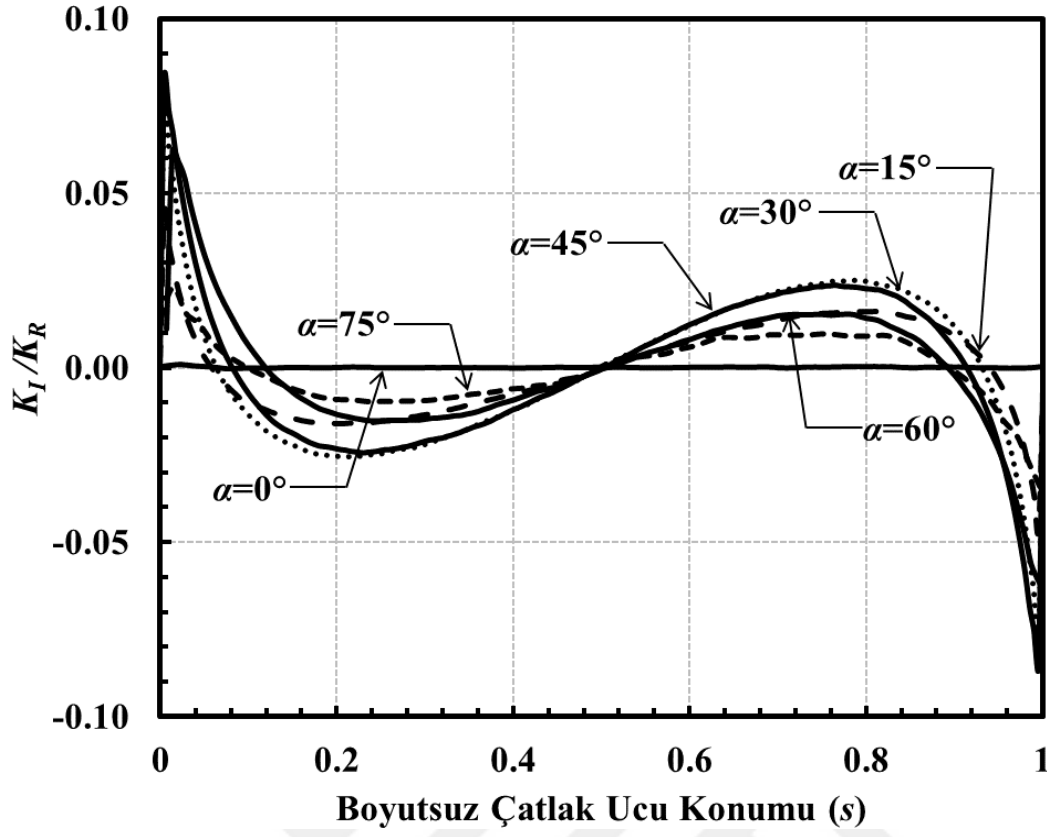
Şekil 3.194. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



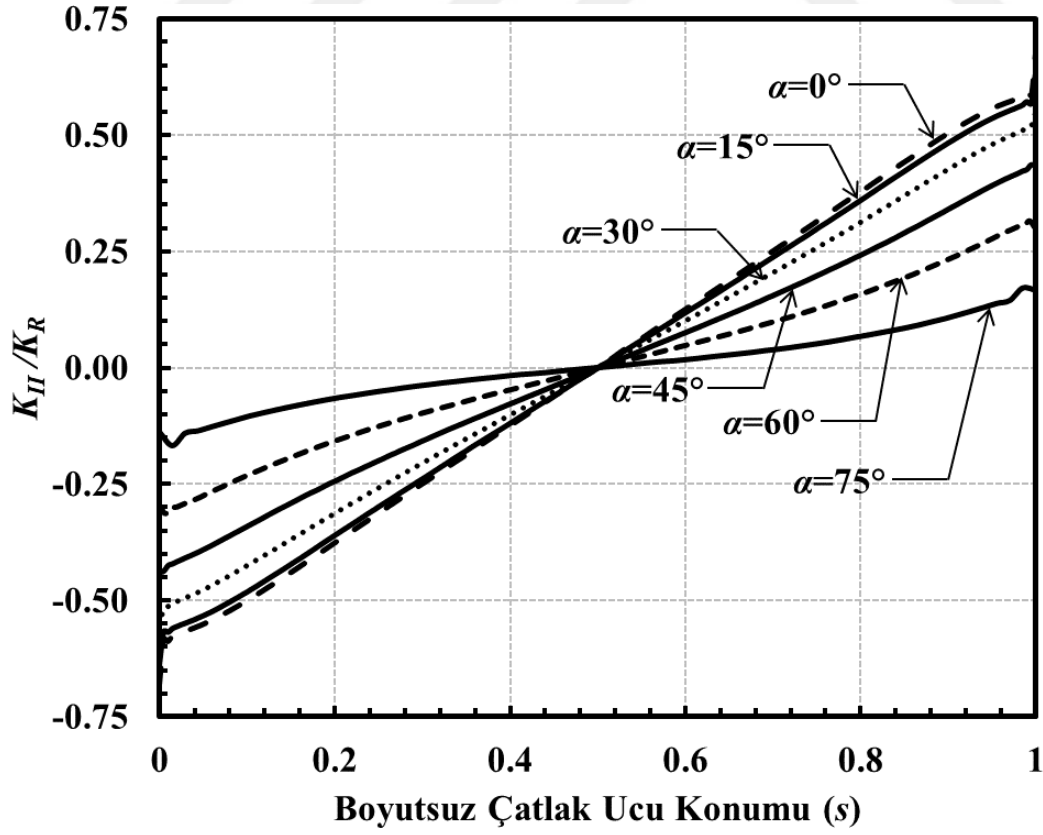
Şekil 3.195. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



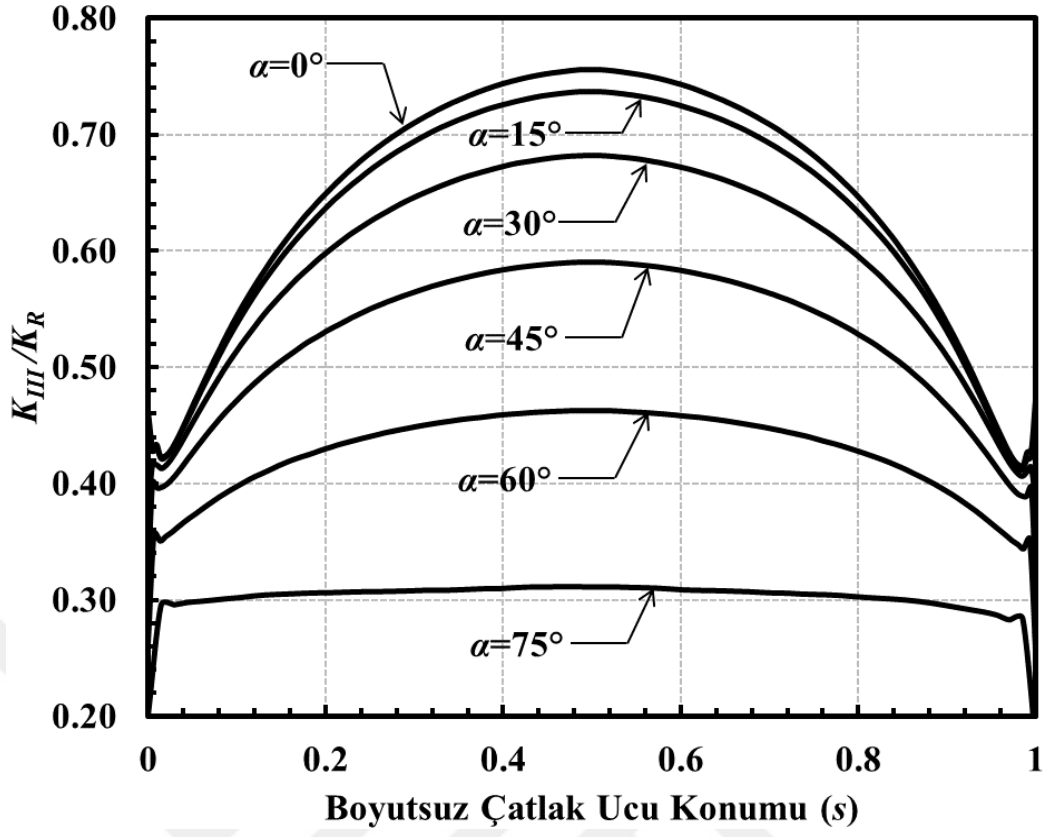
Şekil 3.196. $a/c=0.25$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



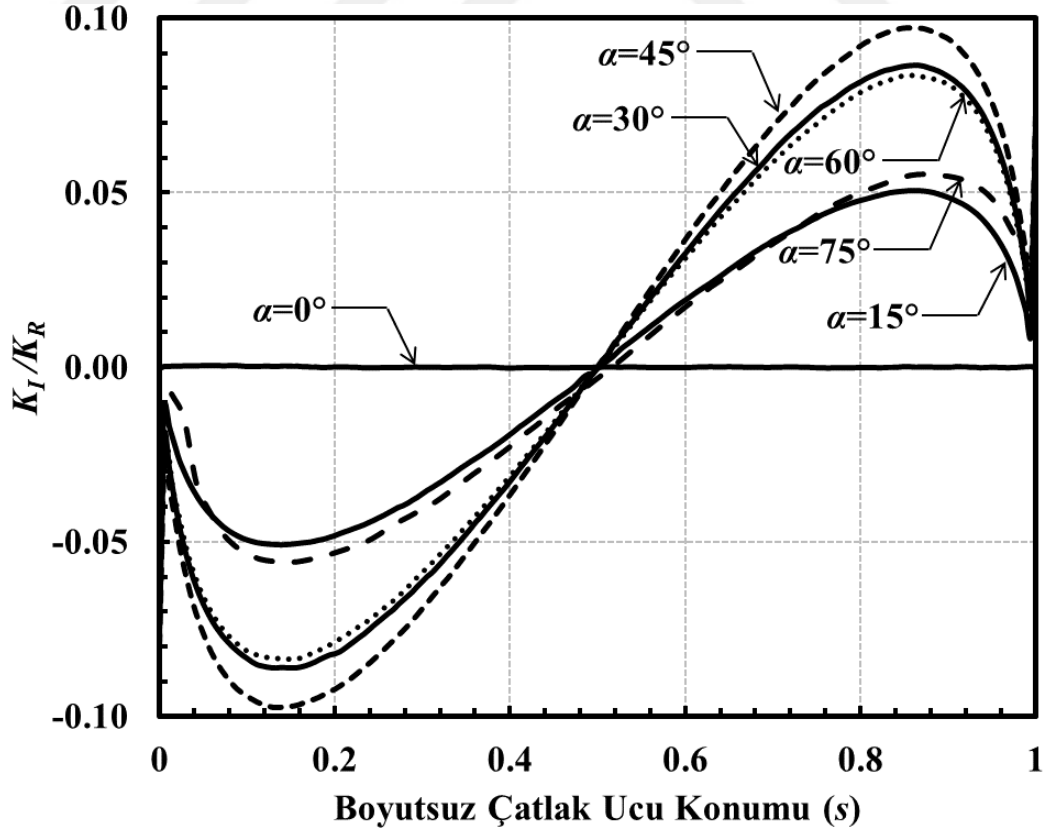
Şekil 3.197. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



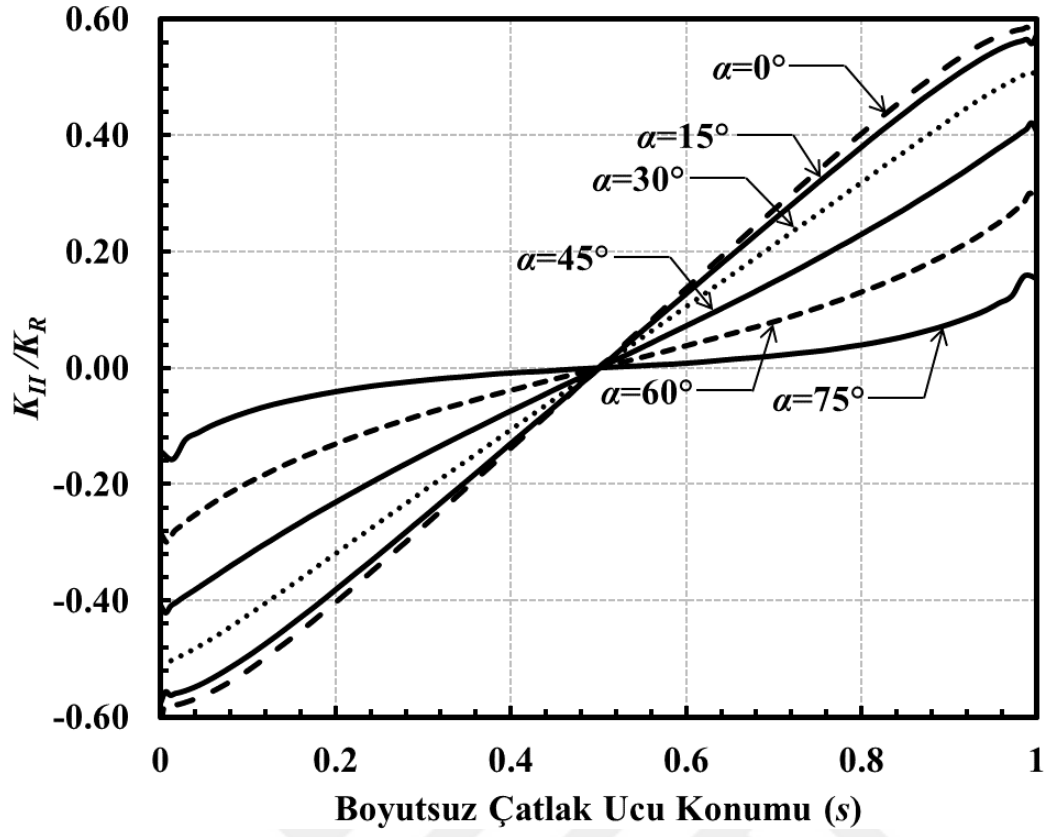
Şekil 3.198. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



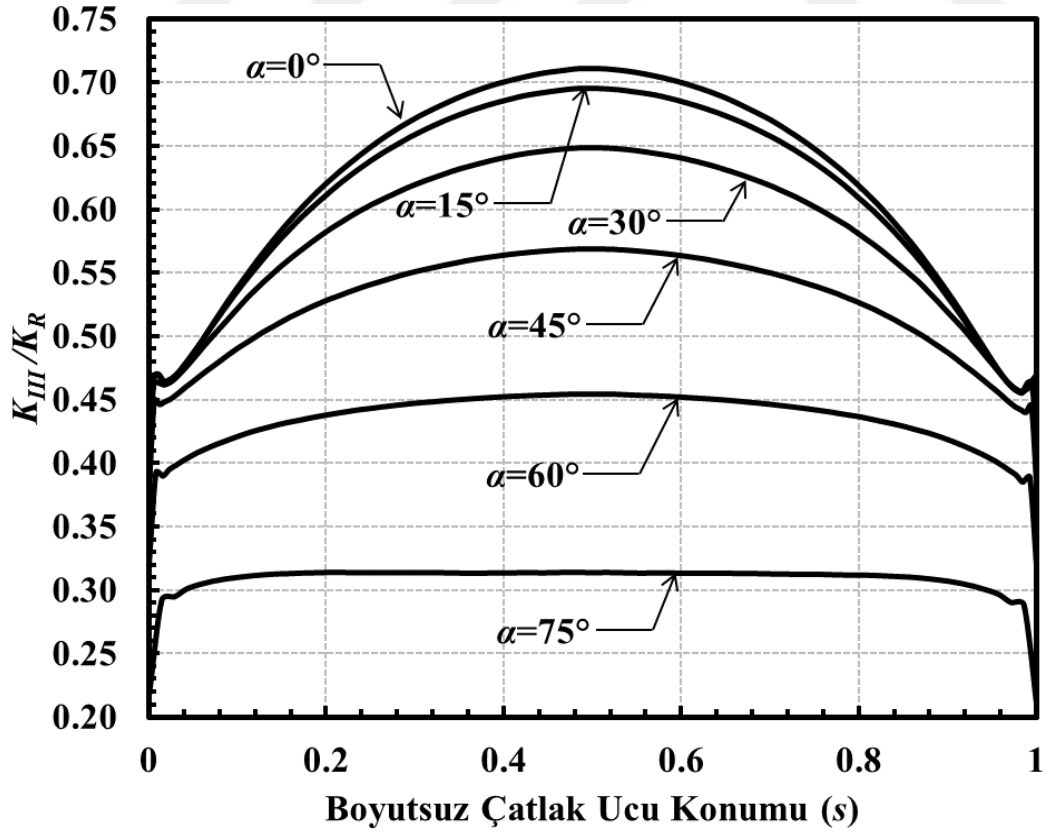
Şekil 3.199. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



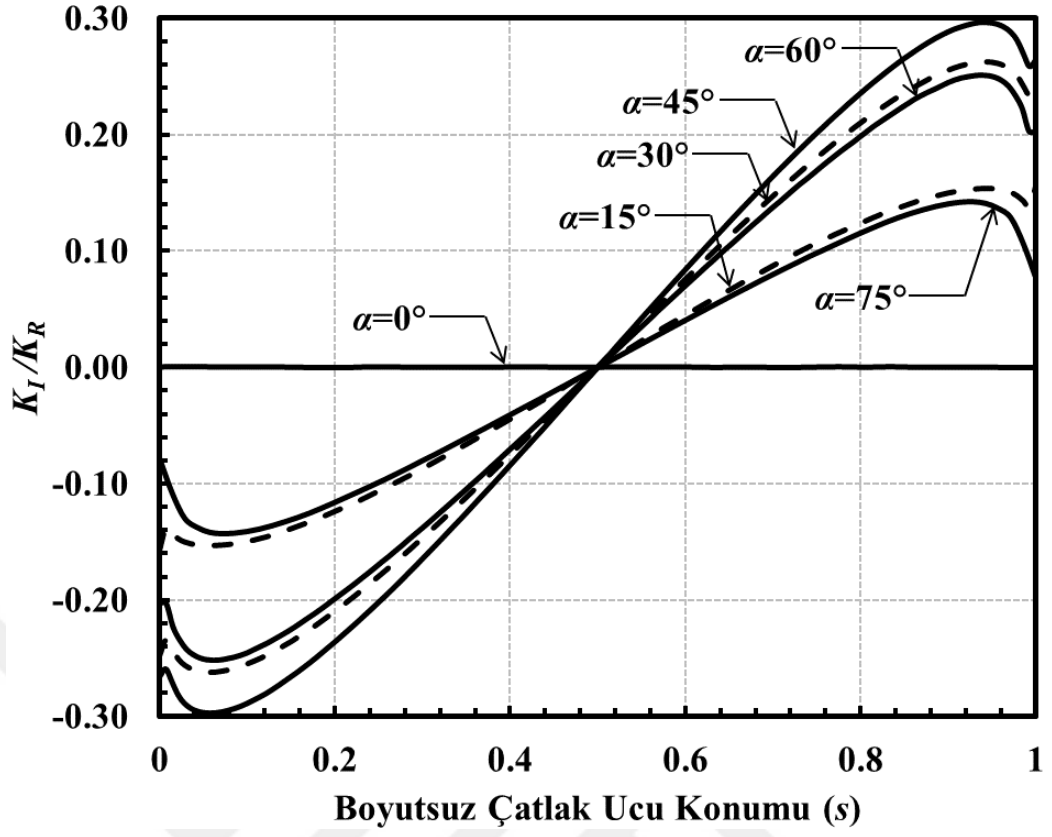
Şekil 3.200. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



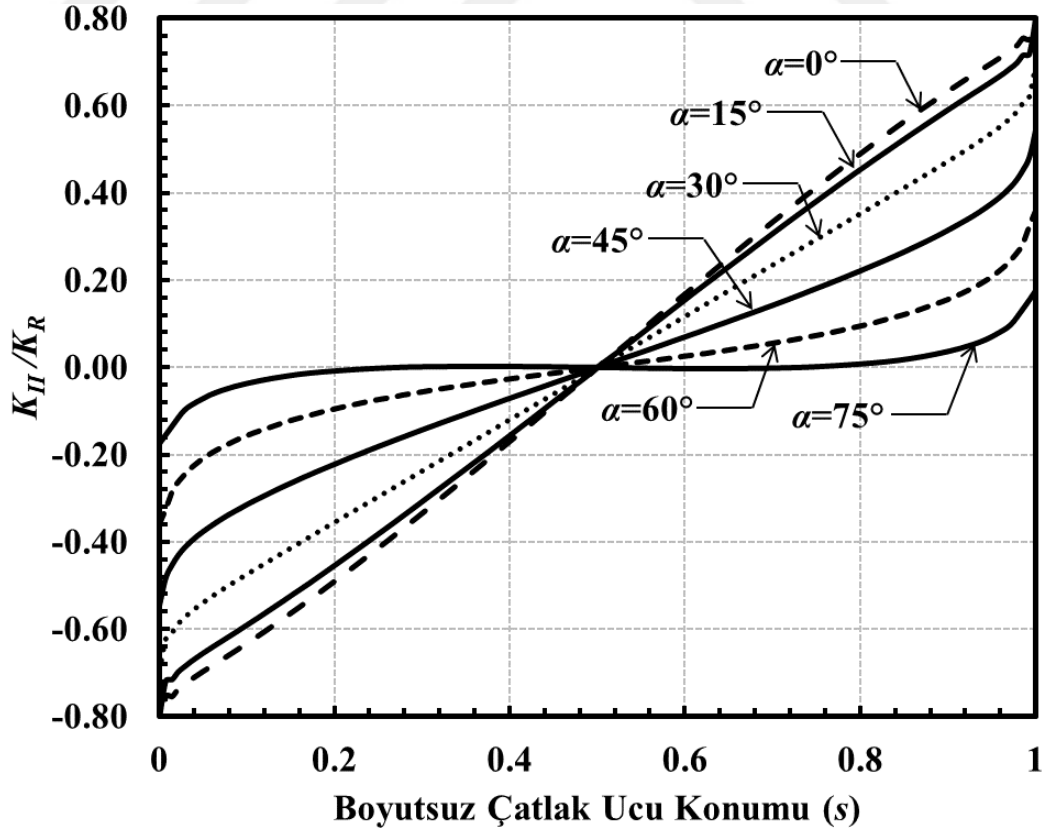
Şekil 3.201. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



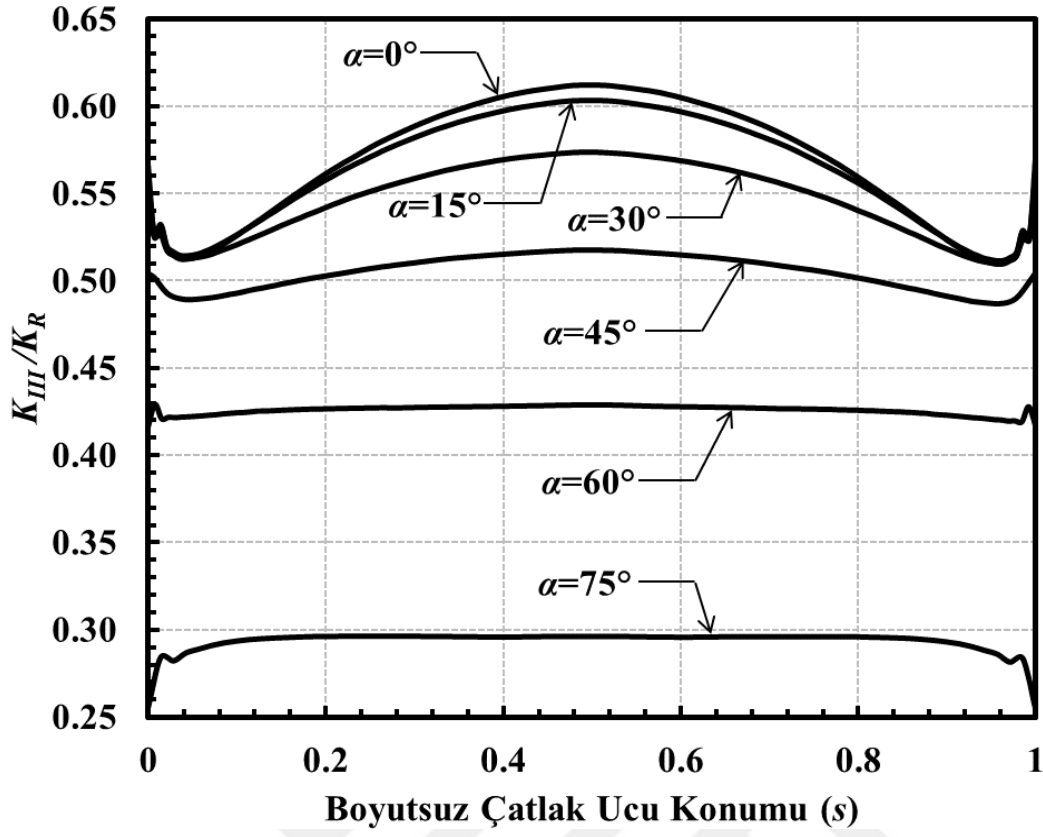
Şekil 3.202. $a/c=0.5$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



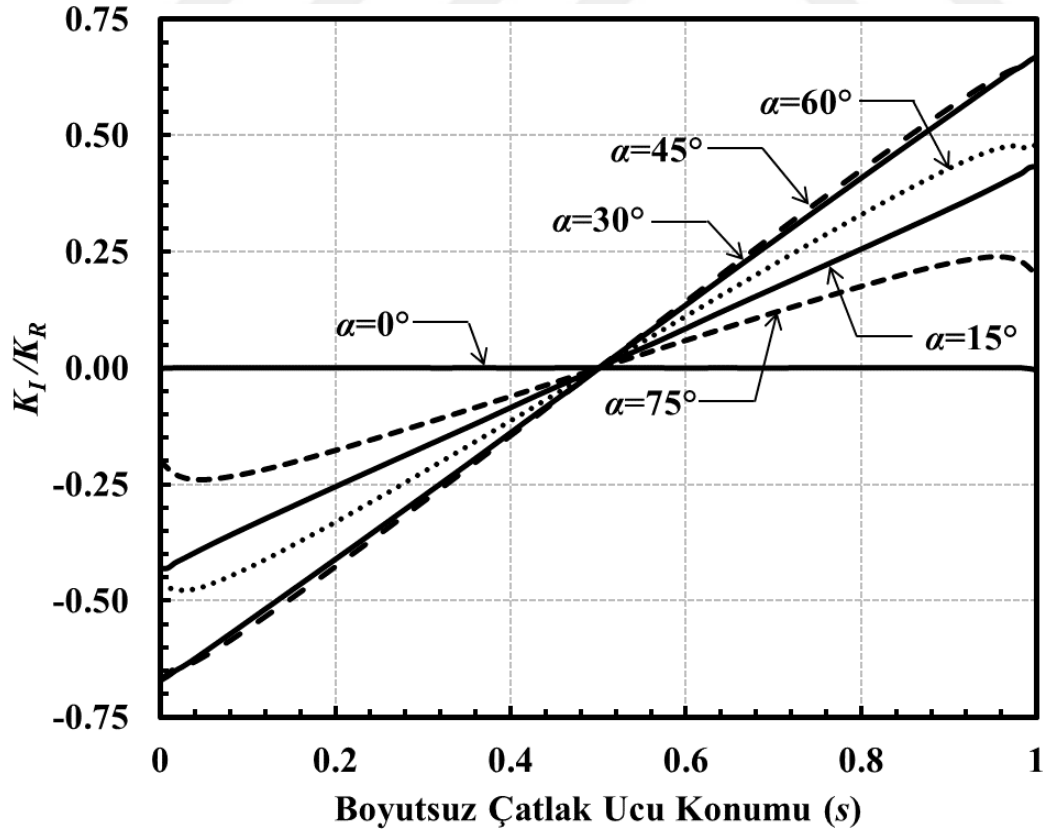
Şekil 3.203. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



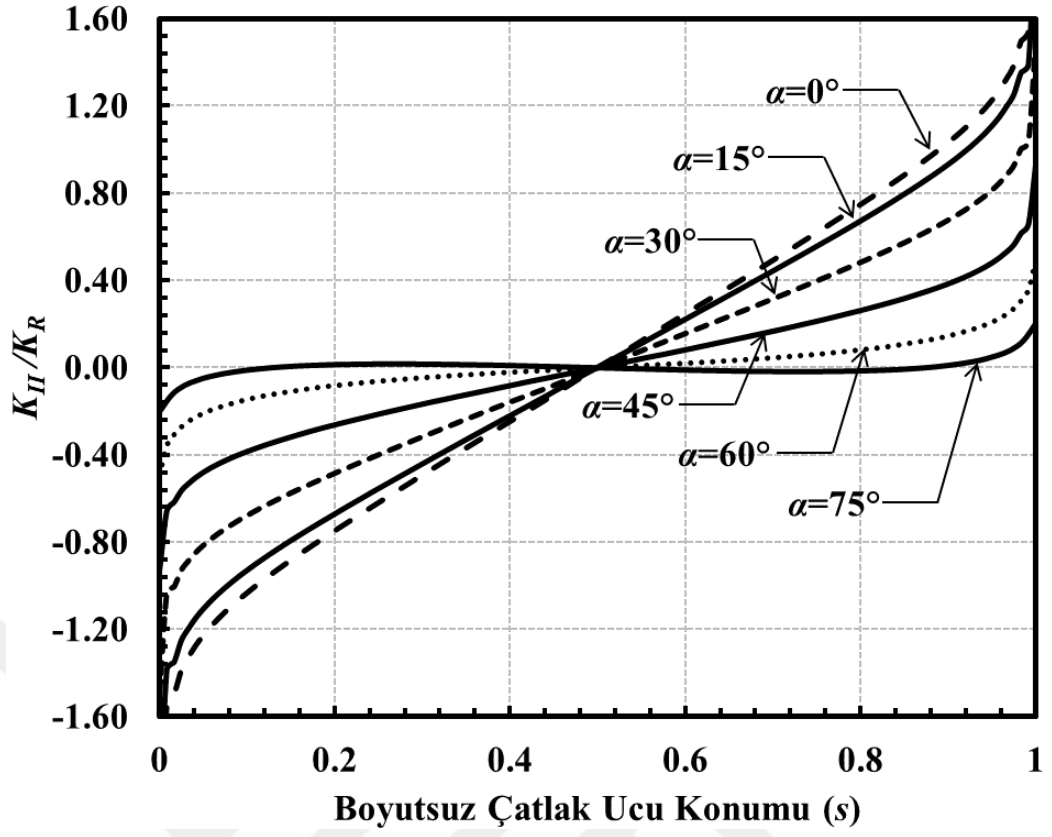
Şekil 3.204. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



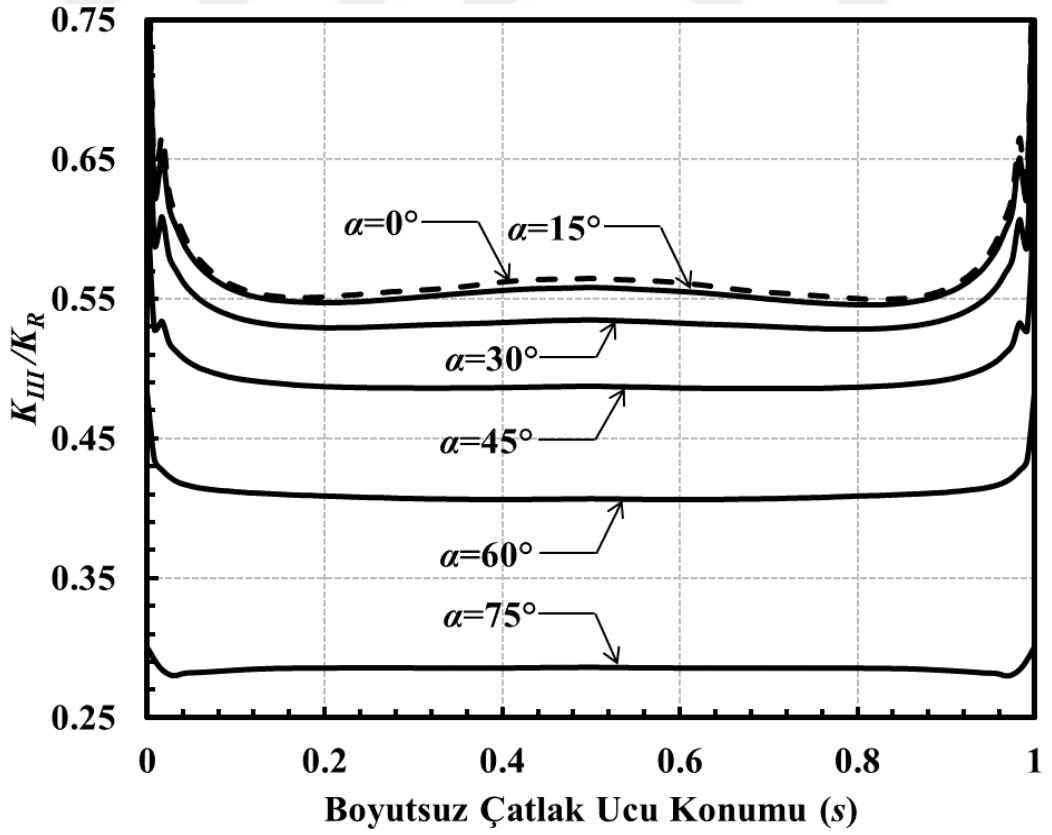
Şekil 3.205. $a/c=0.5$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



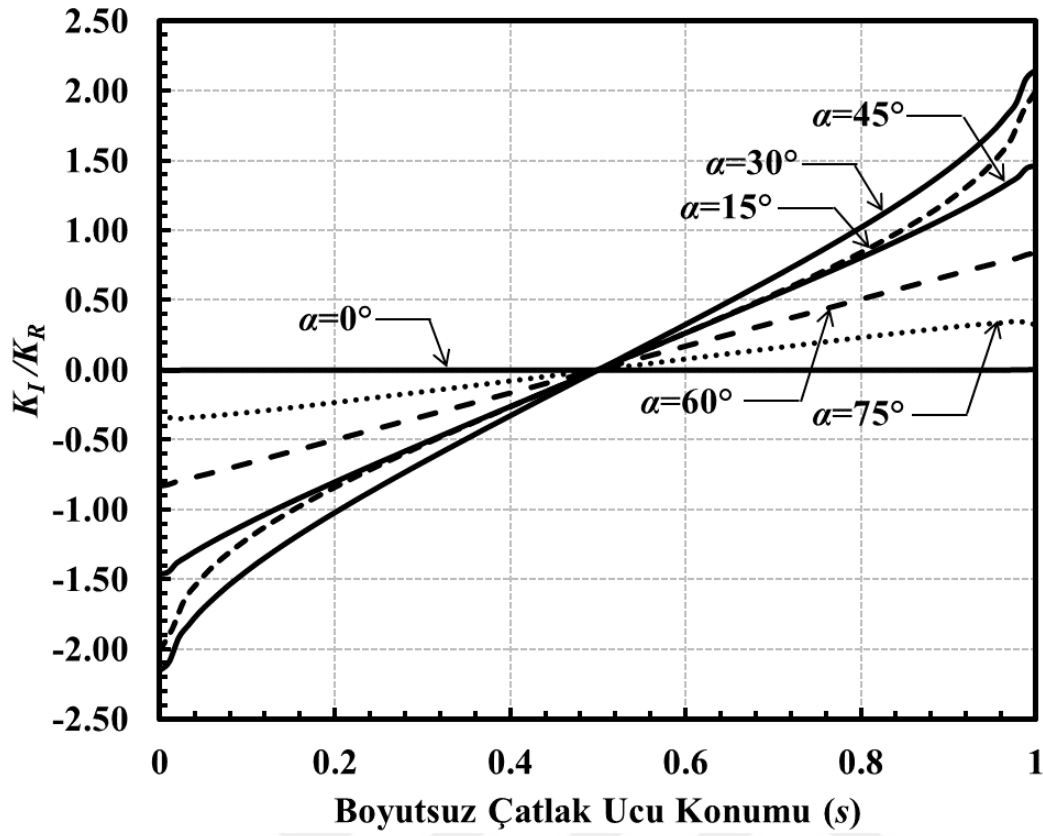
Şekil 3.206. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



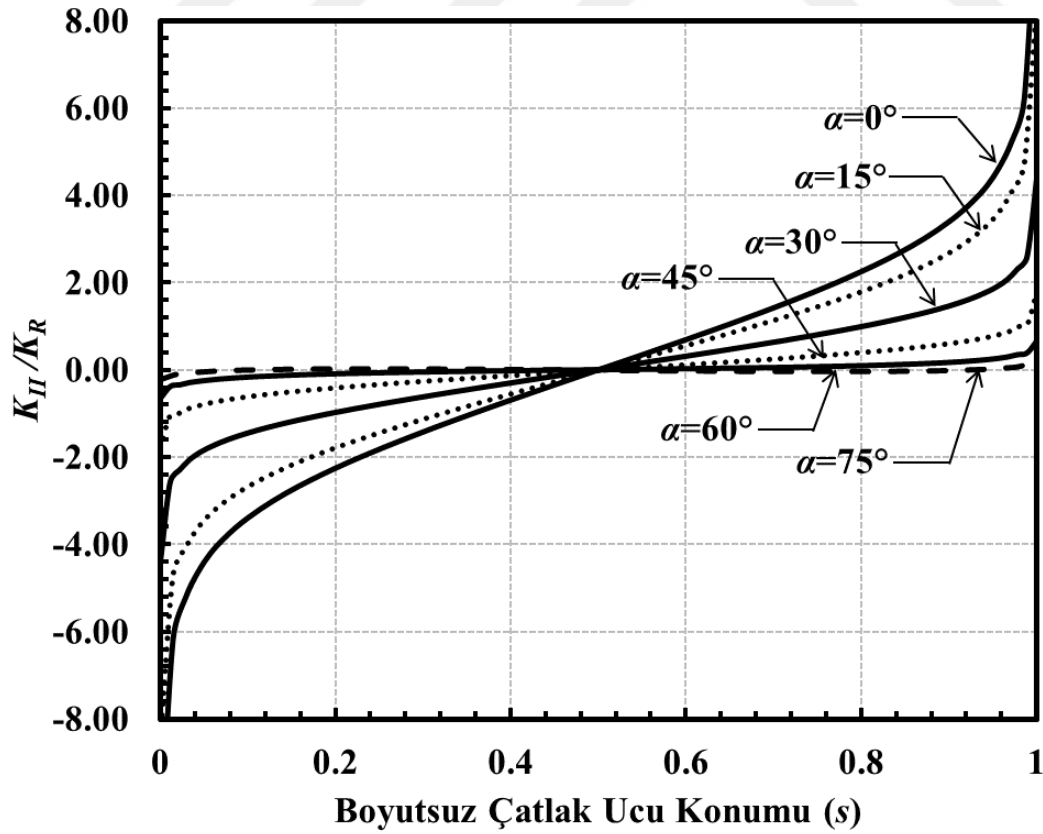
Şekil 3.207. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



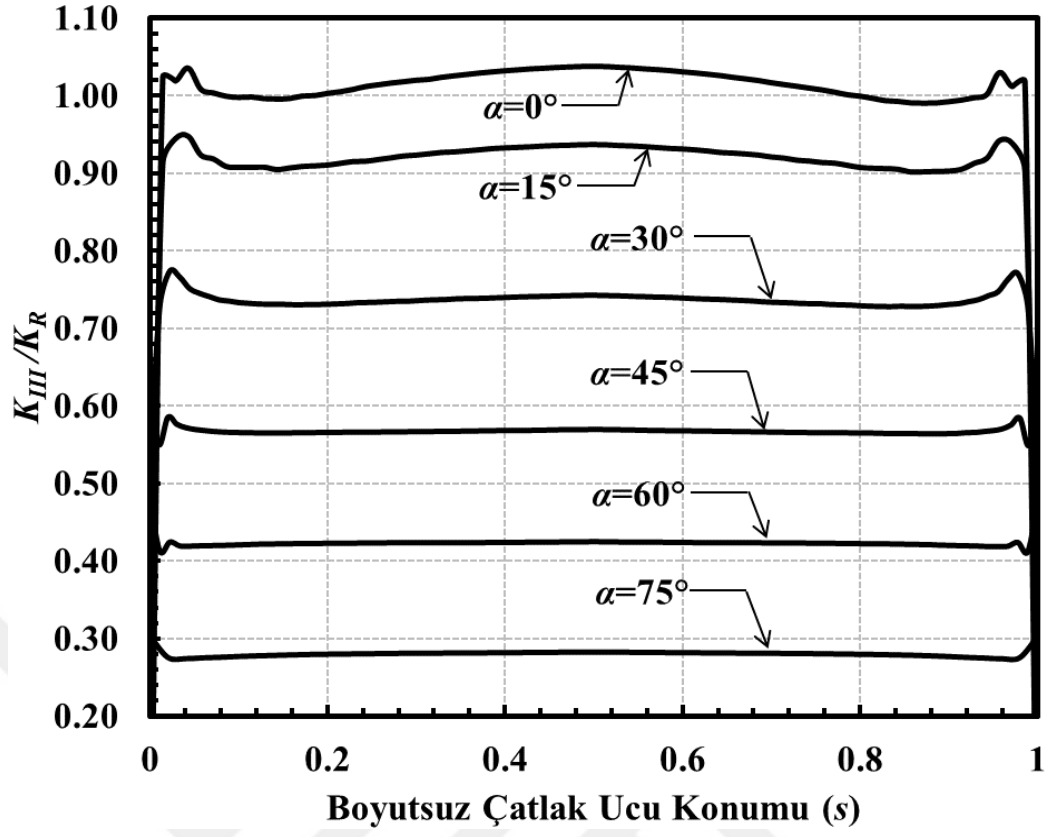
Şekil 3.208. $a/c=0.5$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



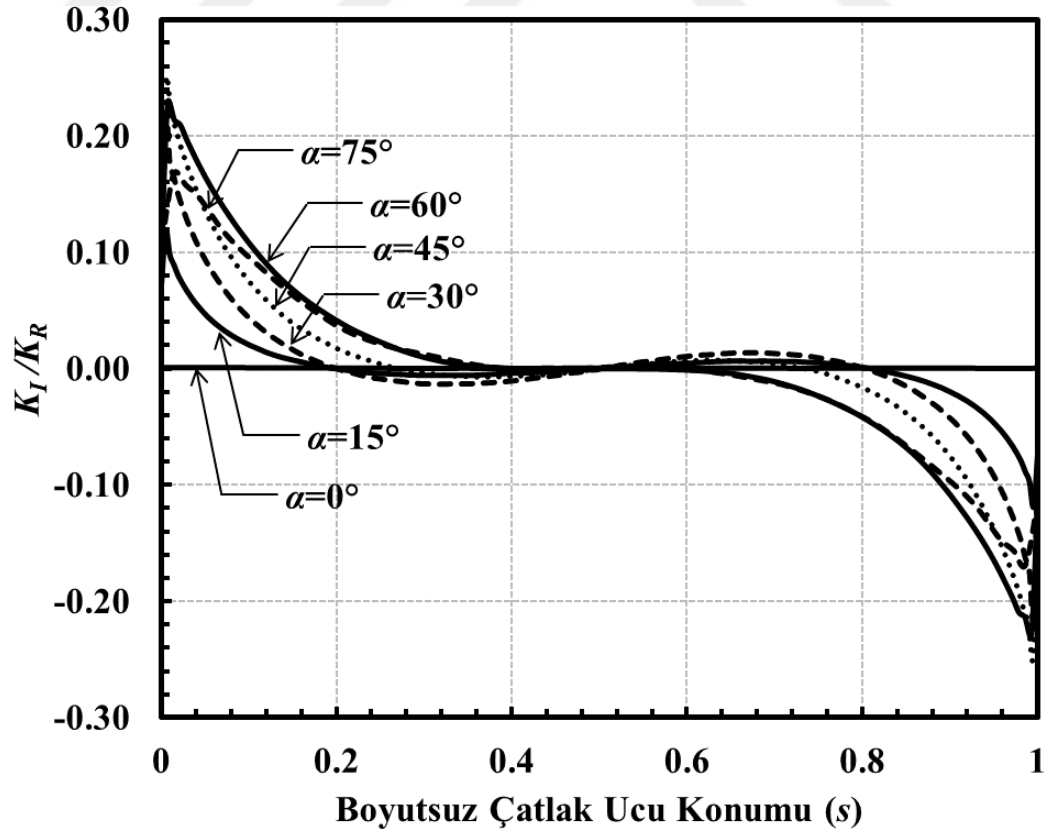
Şekil 3.209. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



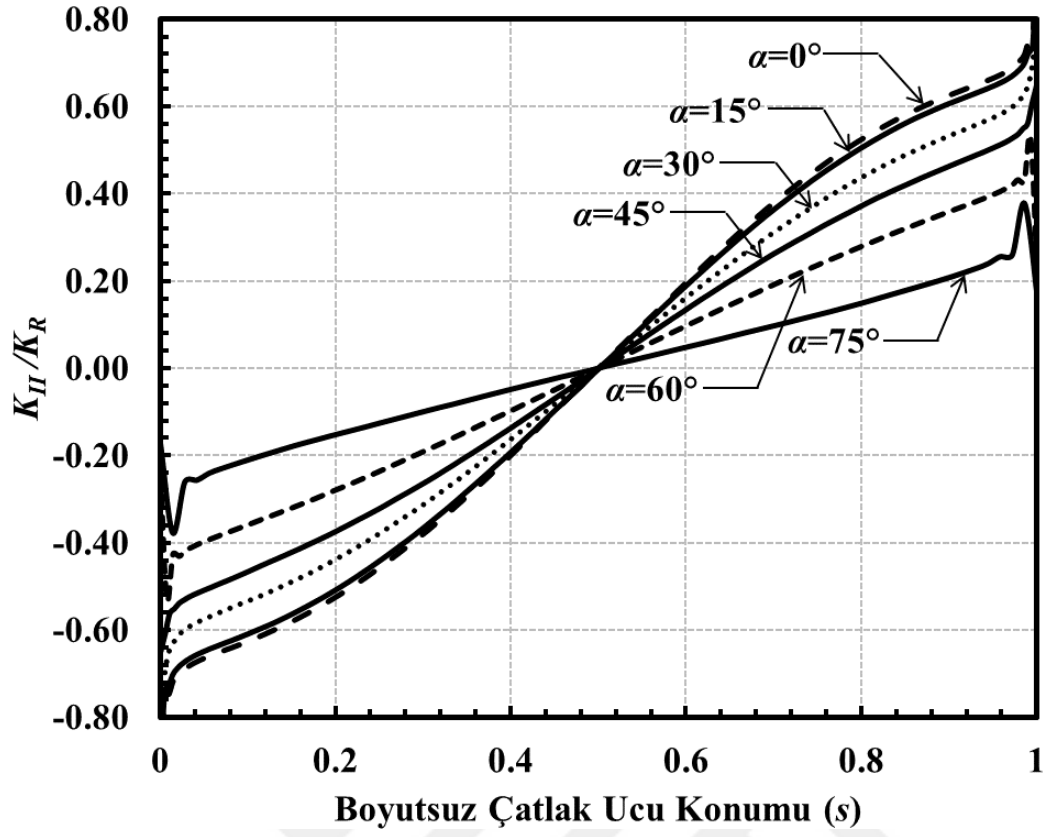
Şekil 3.210. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



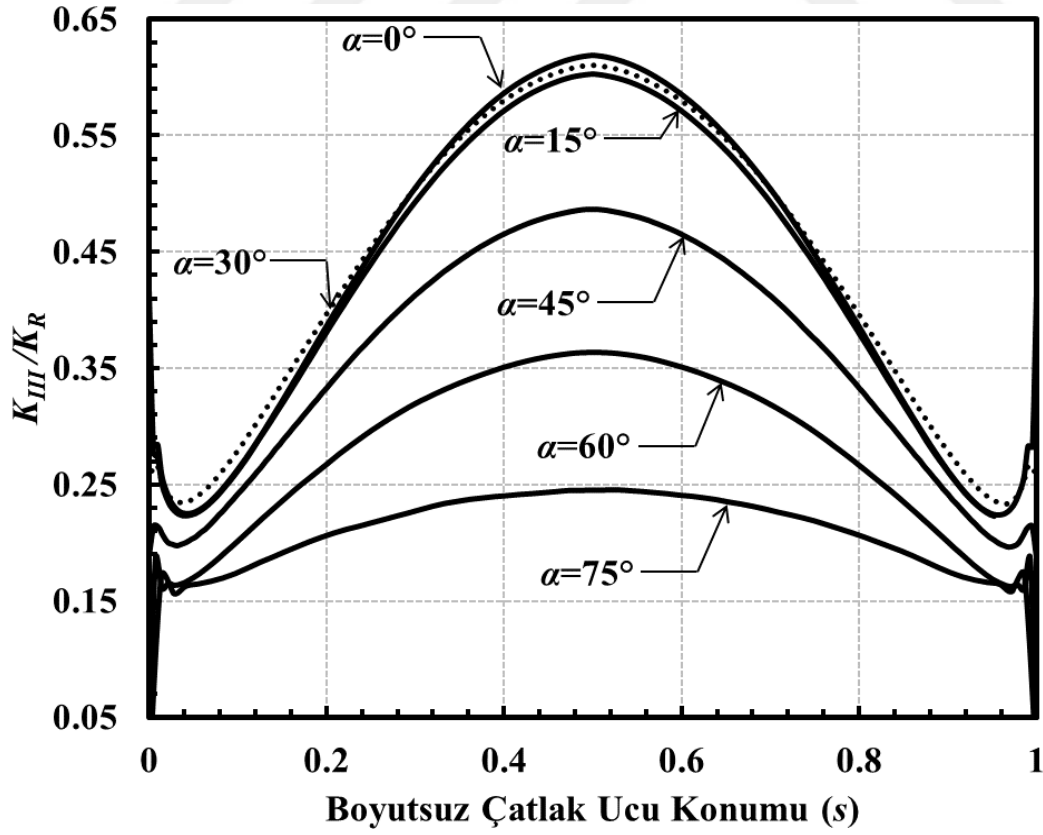
Şekil 3.211. $a/c=0.5$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



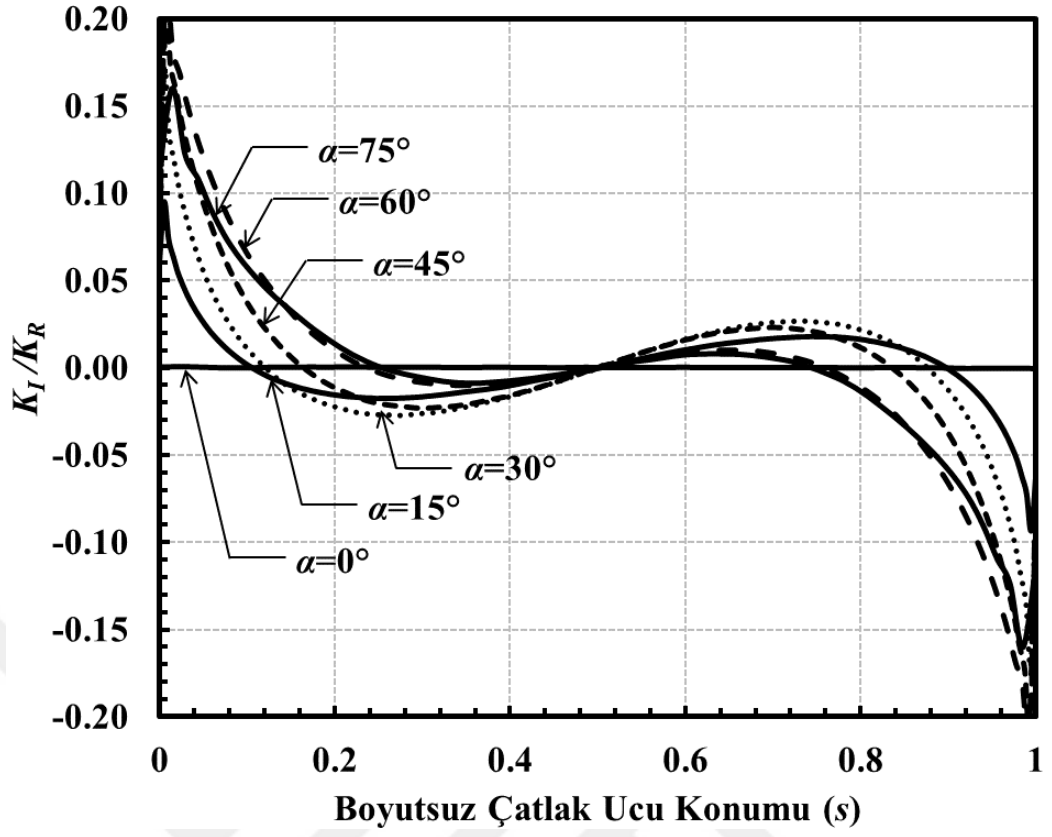
Şekil 3.212. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



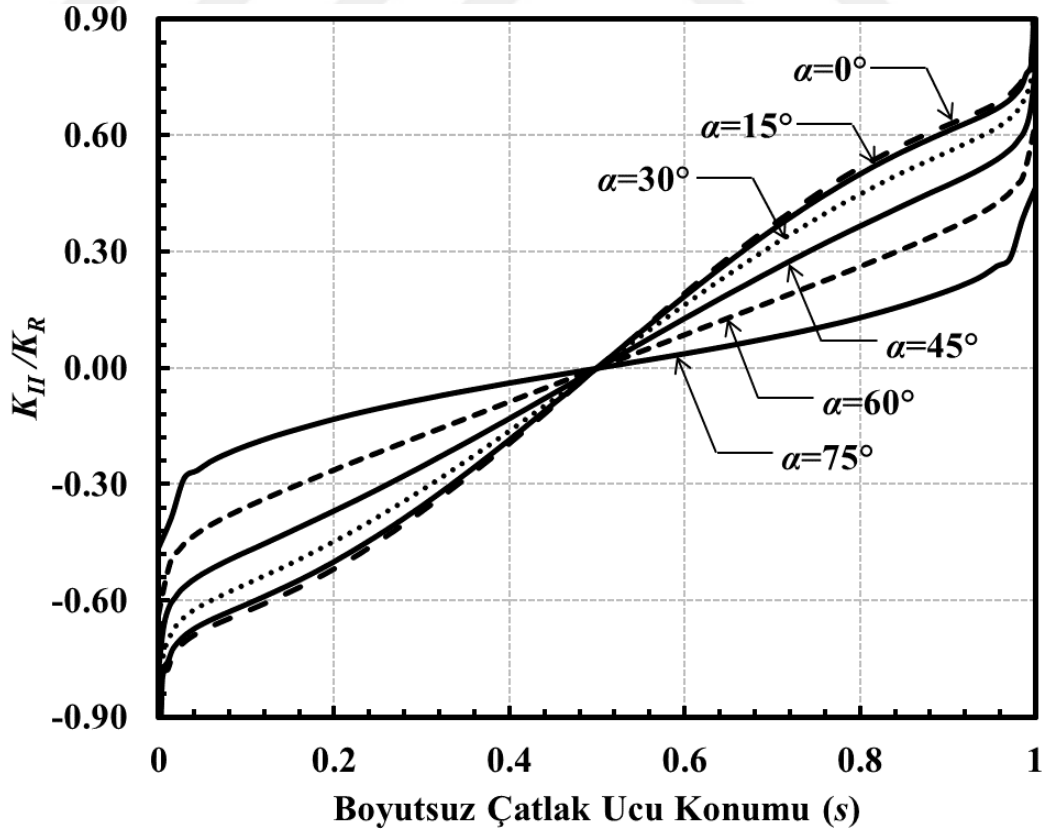
Şekil 3.213. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



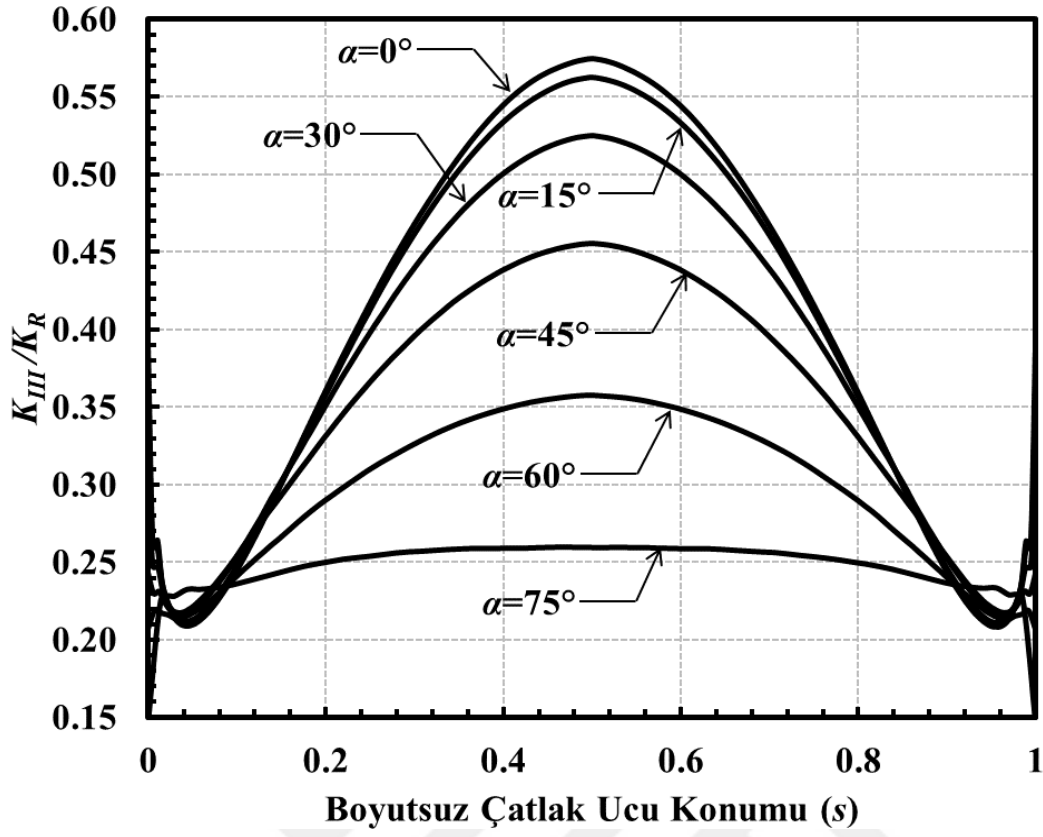
Şekil 3.214. $a/c=1$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



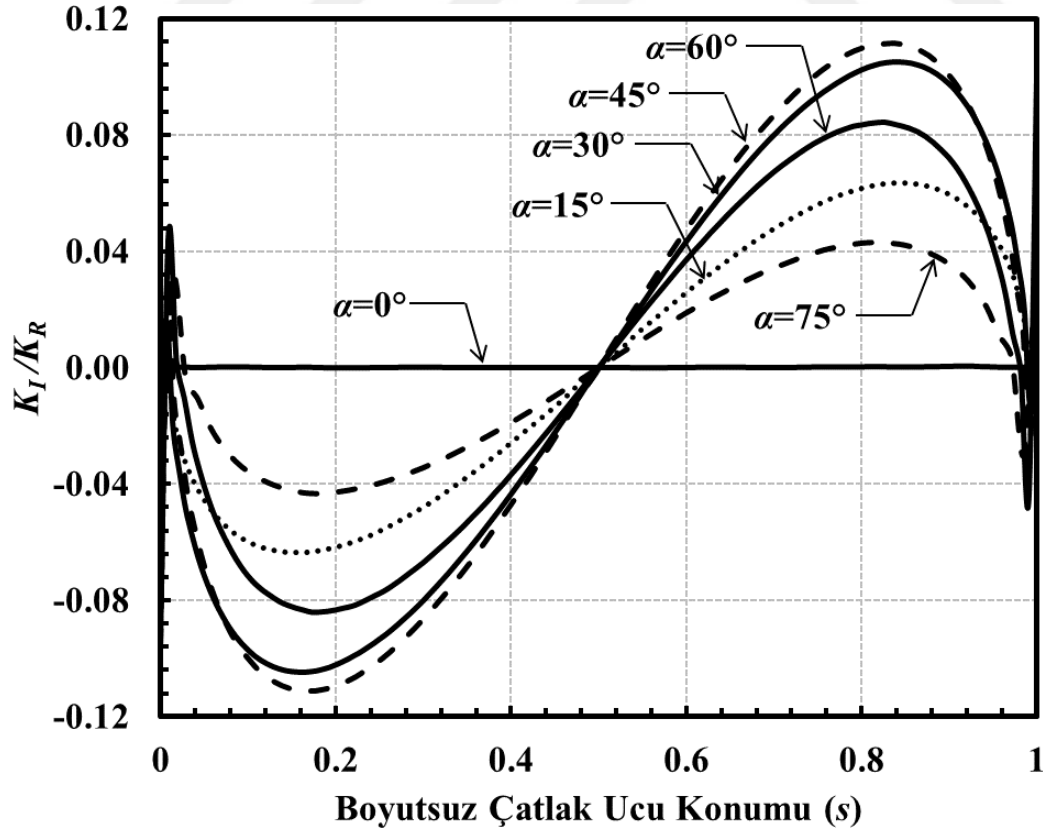
Şekil 3.215. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



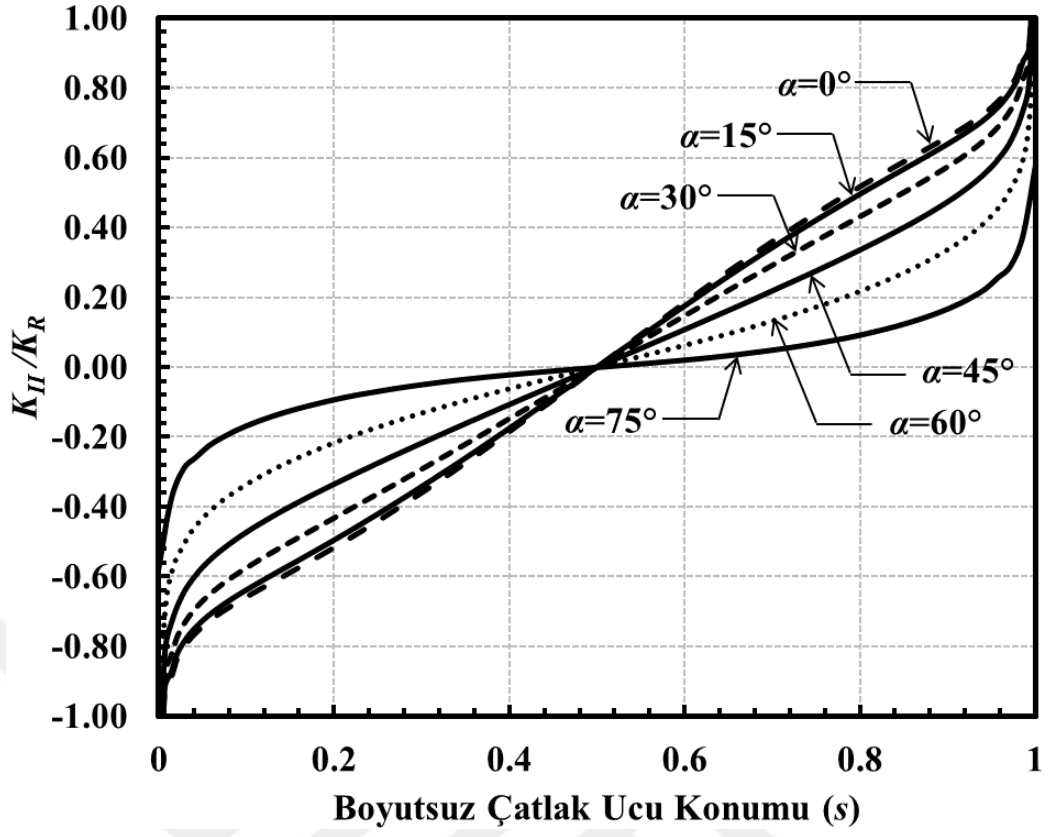
Şekil 3.216. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



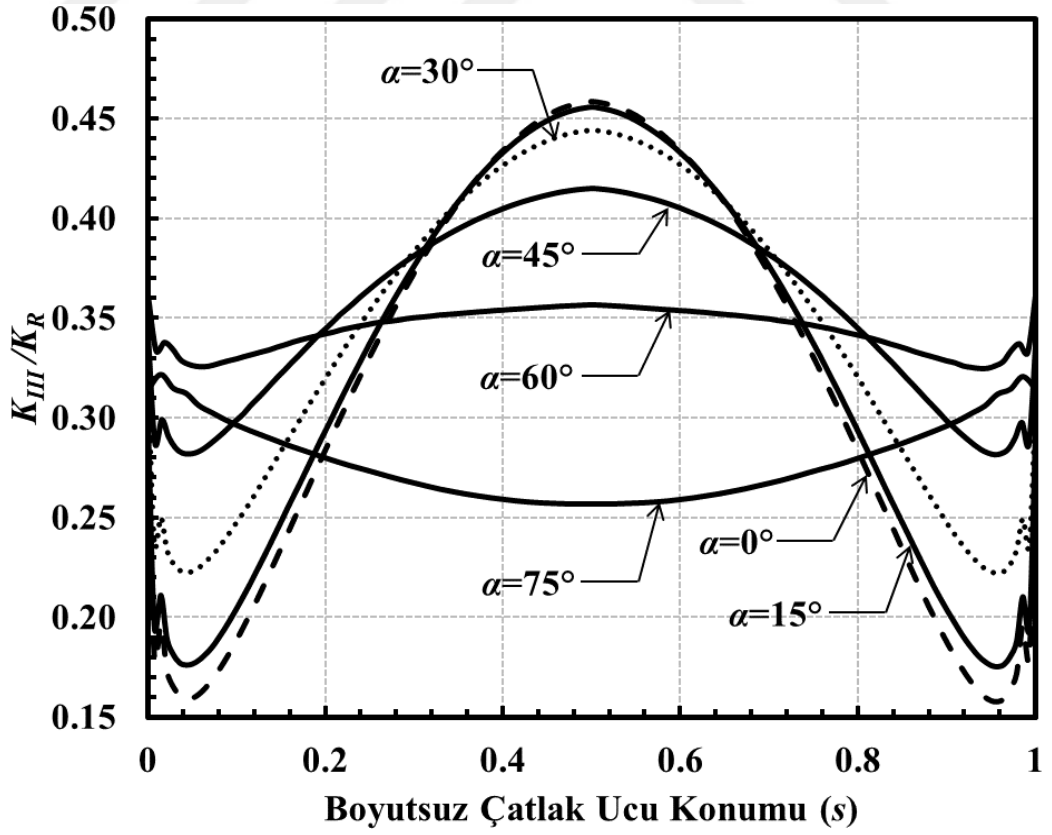
Şekil 3.217. $a/c=1$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



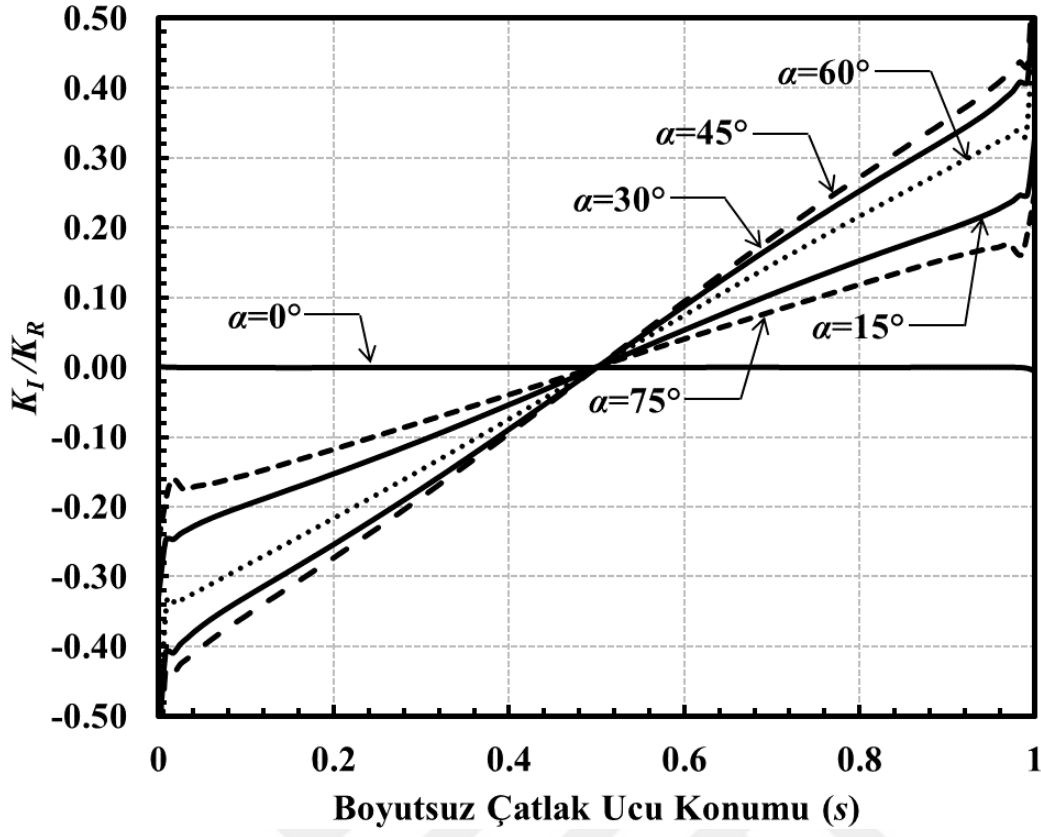
Şekil 3.218. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



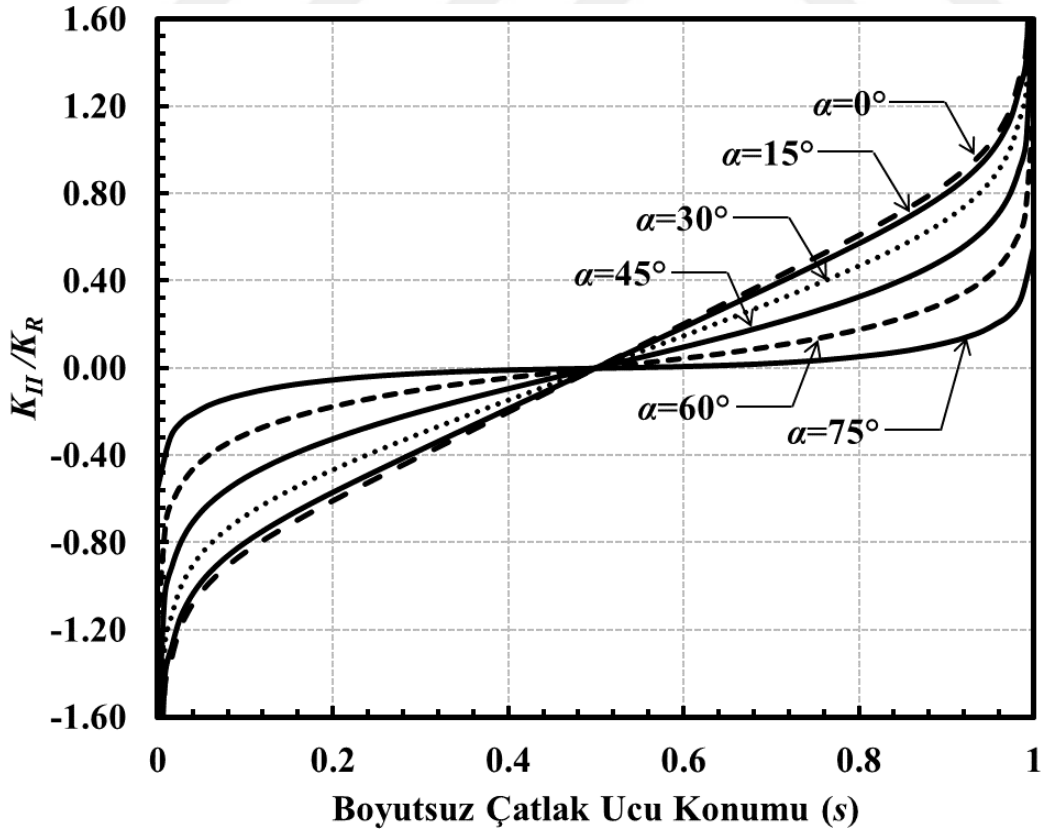
Şekil 3.219. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



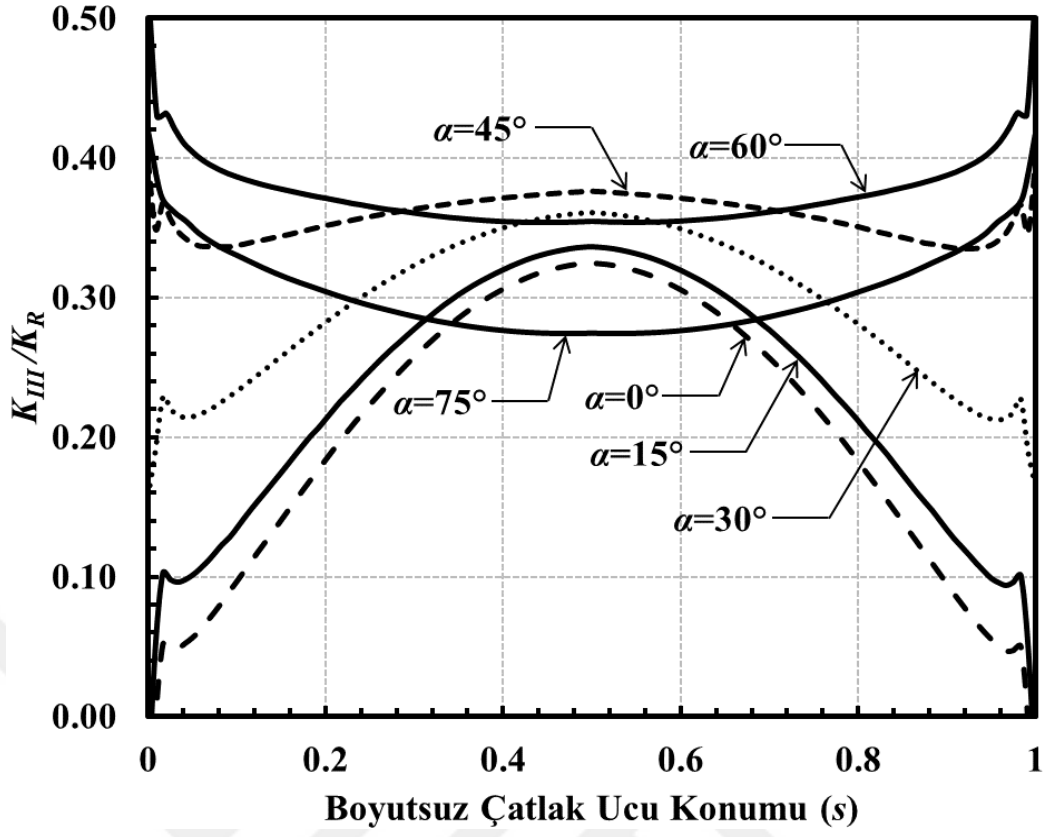
Şekil 3.220. $a/c=1$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



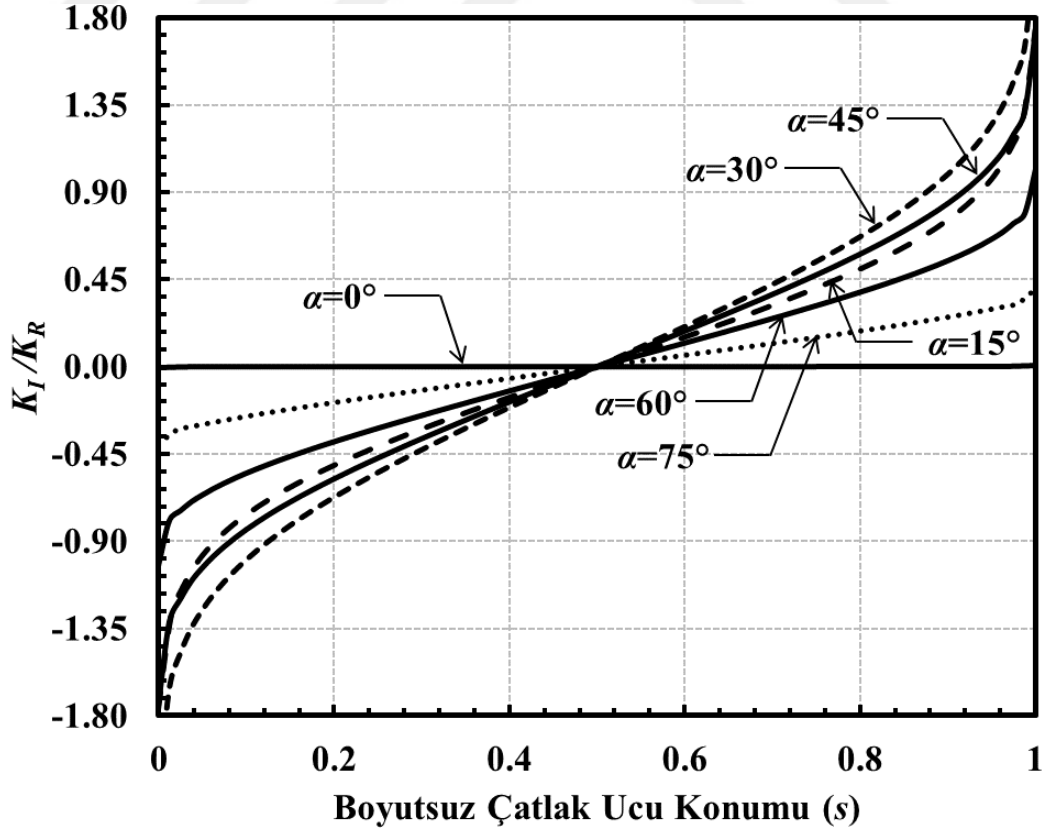
Şekil 3.221. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



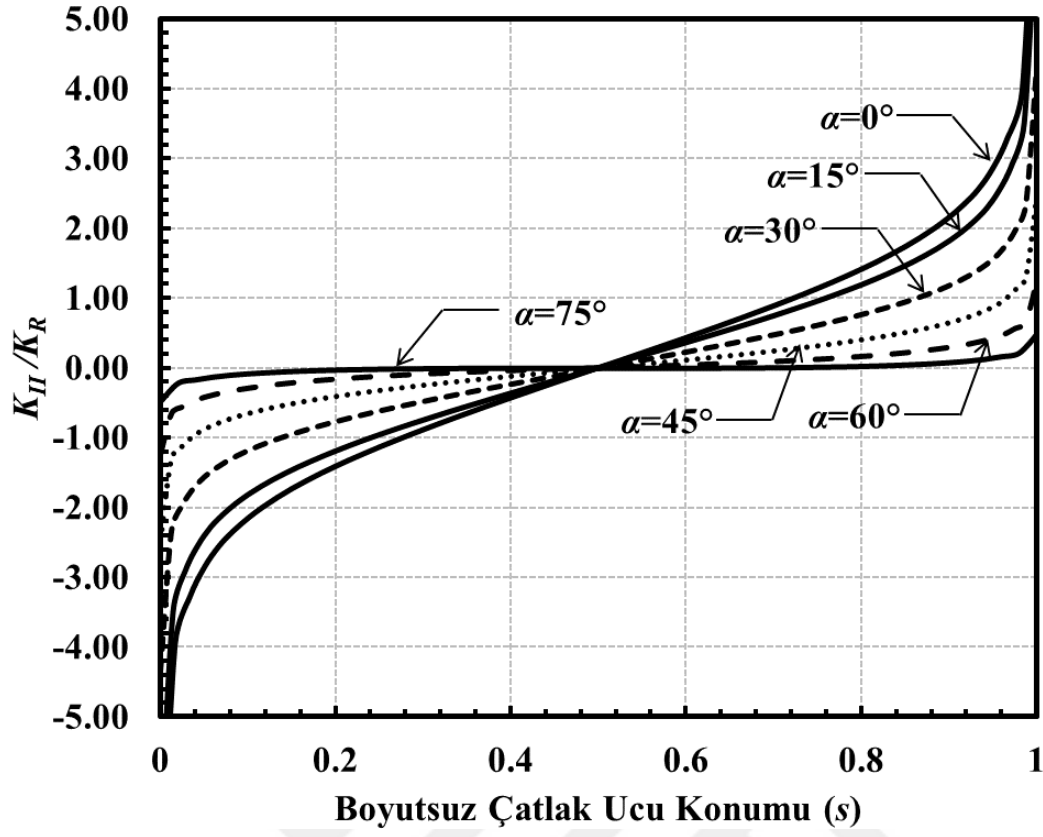
Şekil 3.222. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



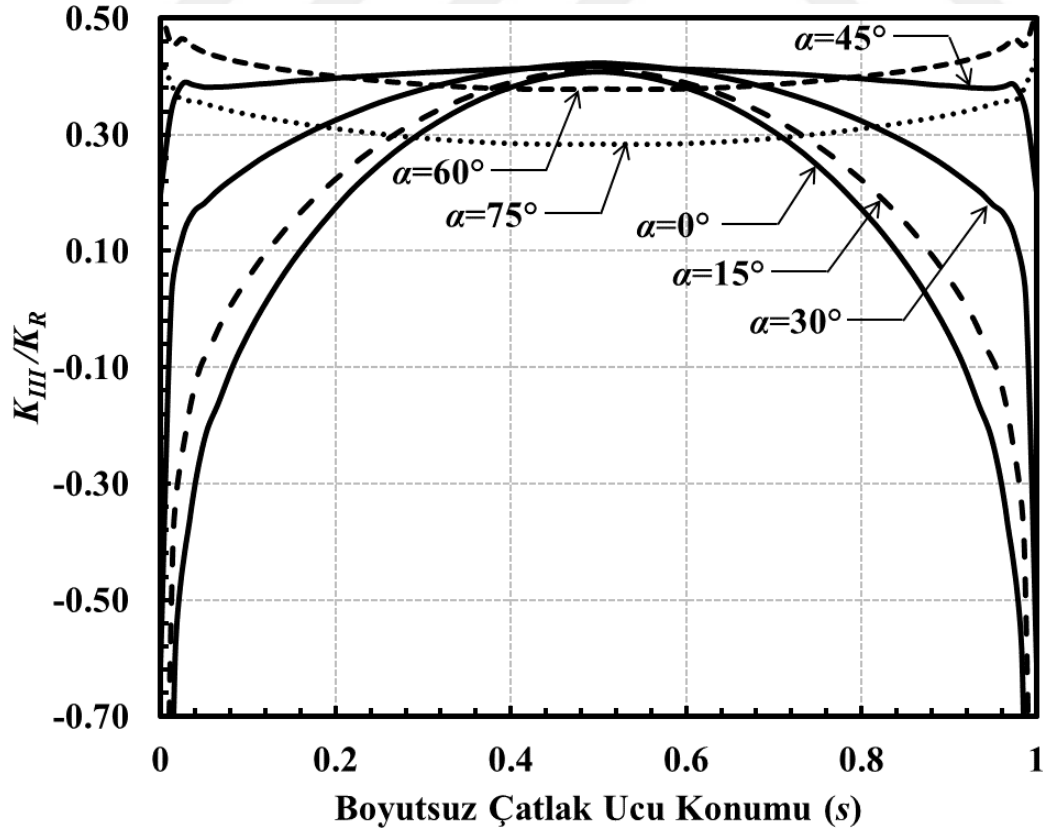
Şekil 3.223. $a/c=1$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



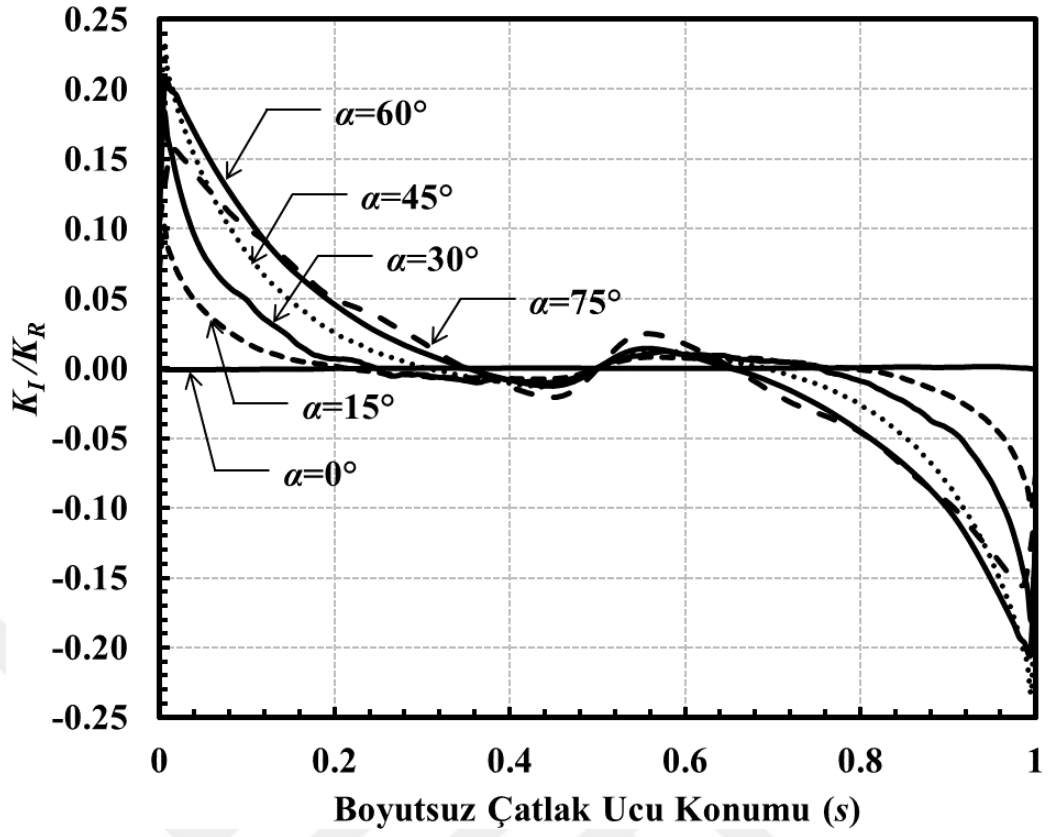
Şekil 3.224. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



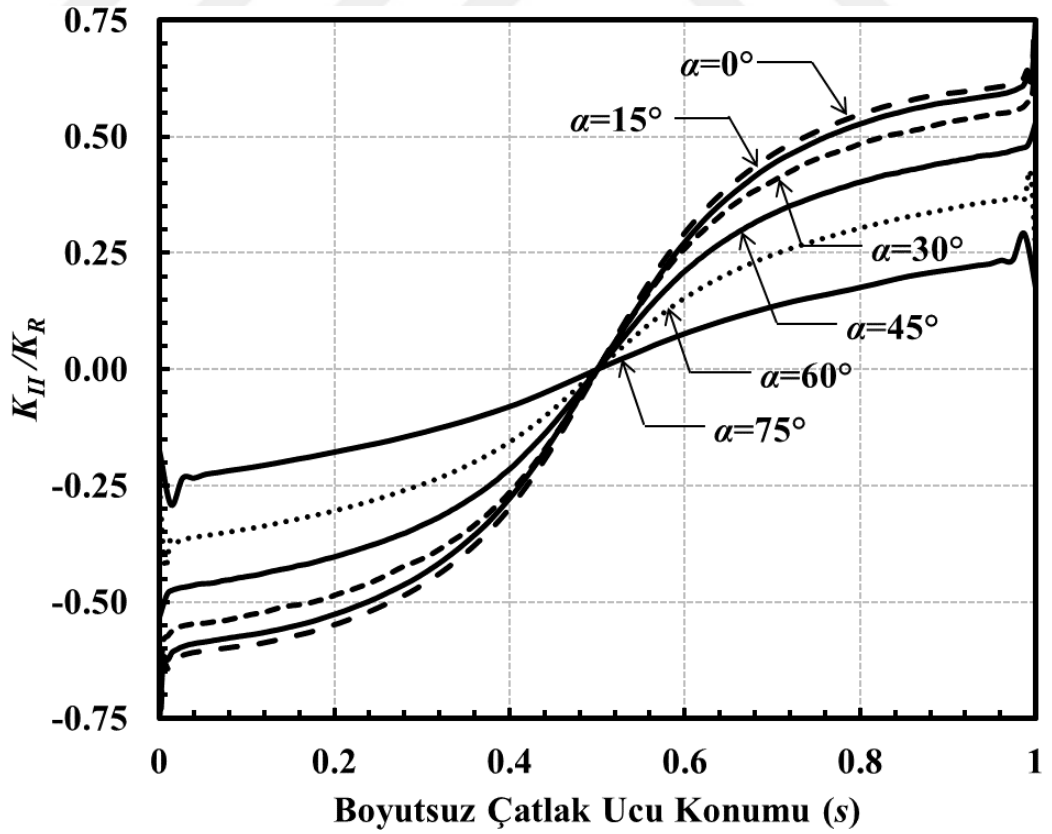
Şekil 3.225. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



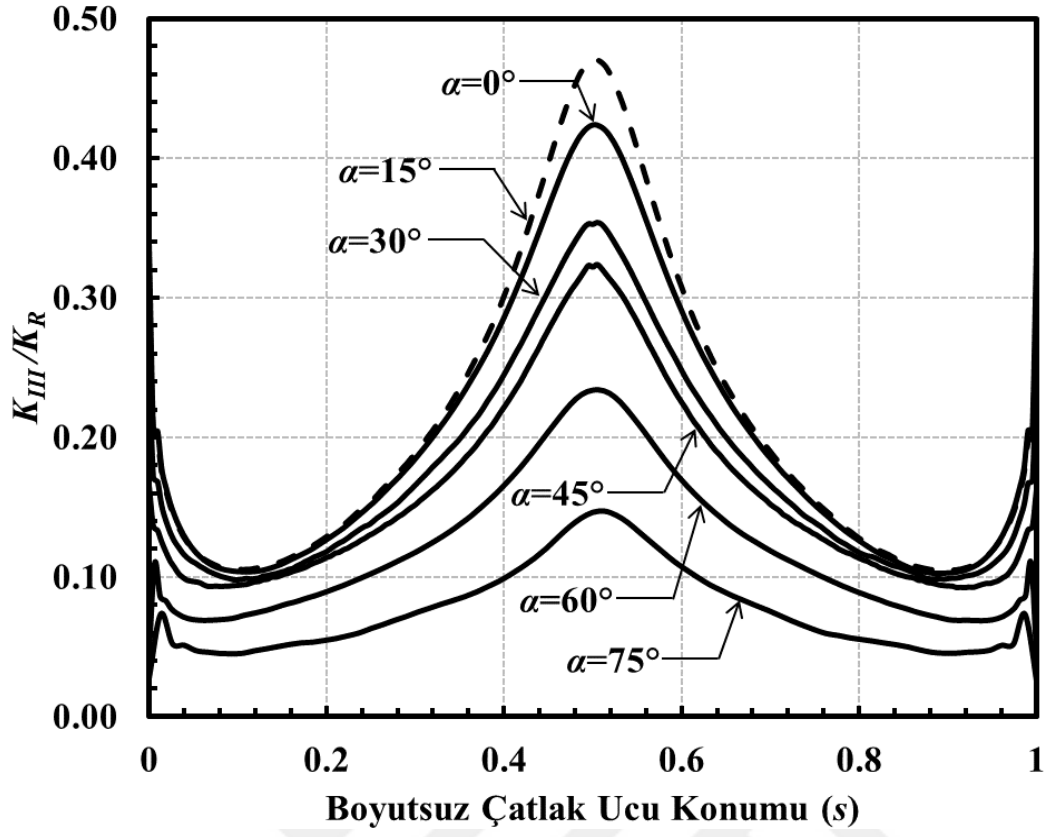
Şekil 3.226. $a/c=1$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



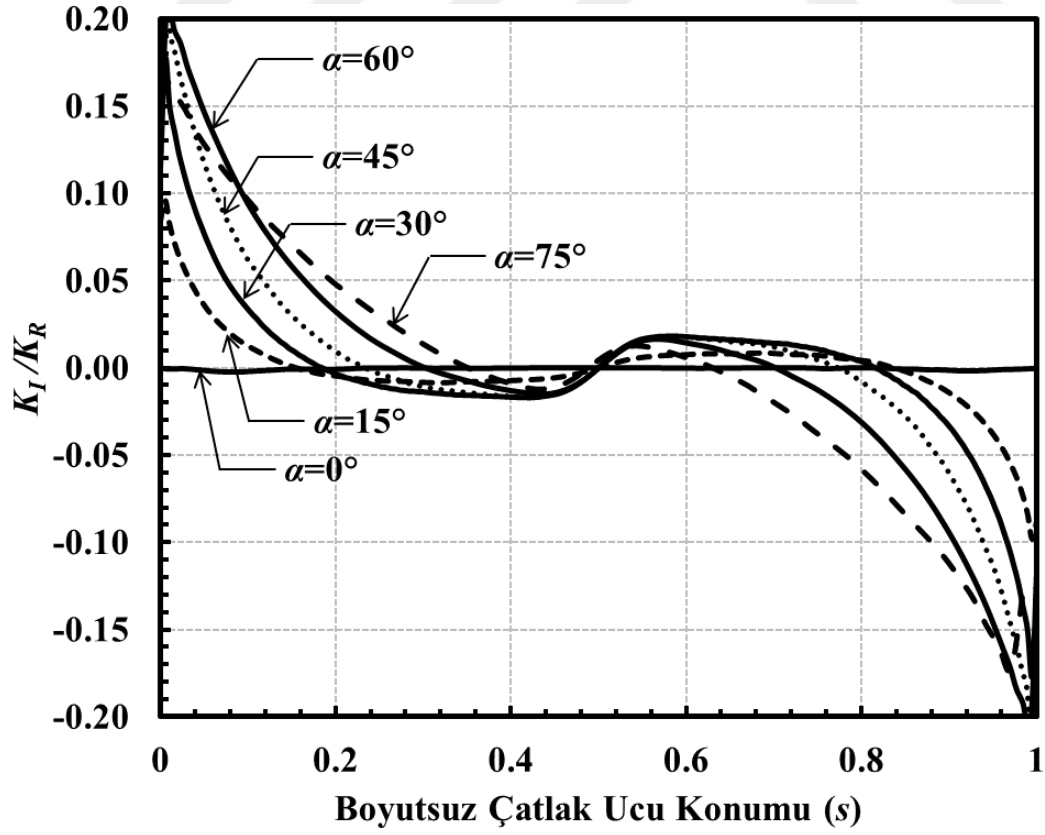
Şekil 3.227. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



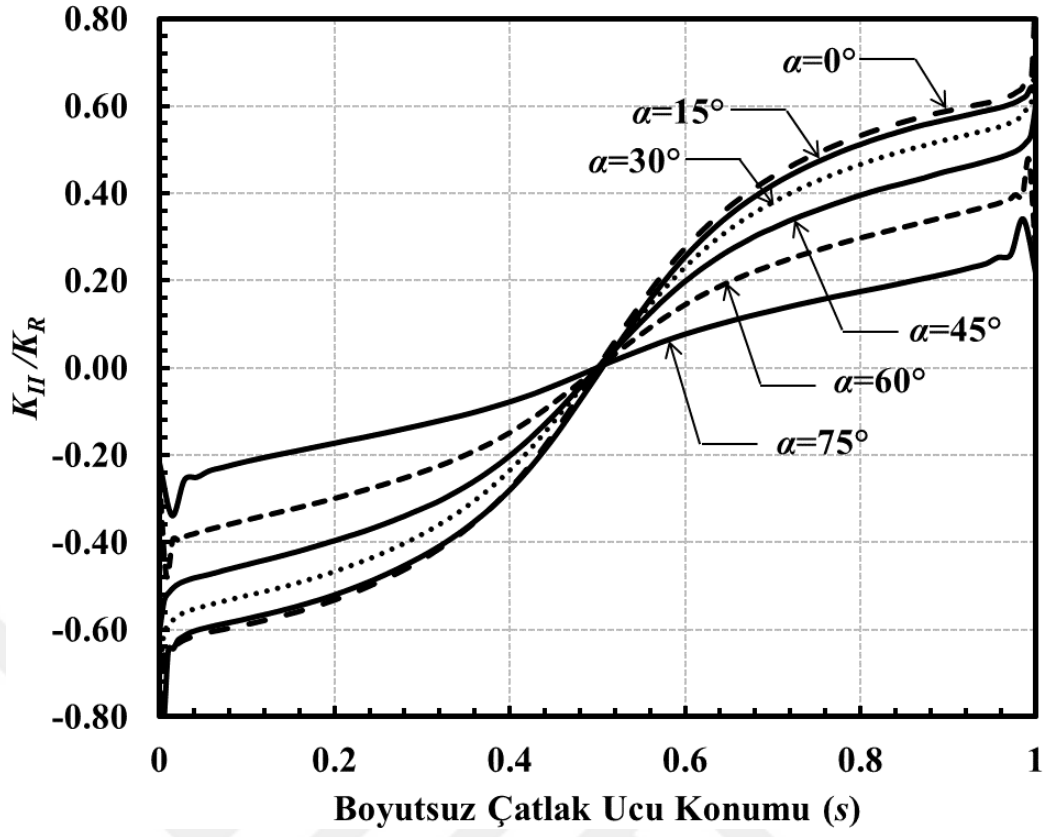
Şekil 3.228. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



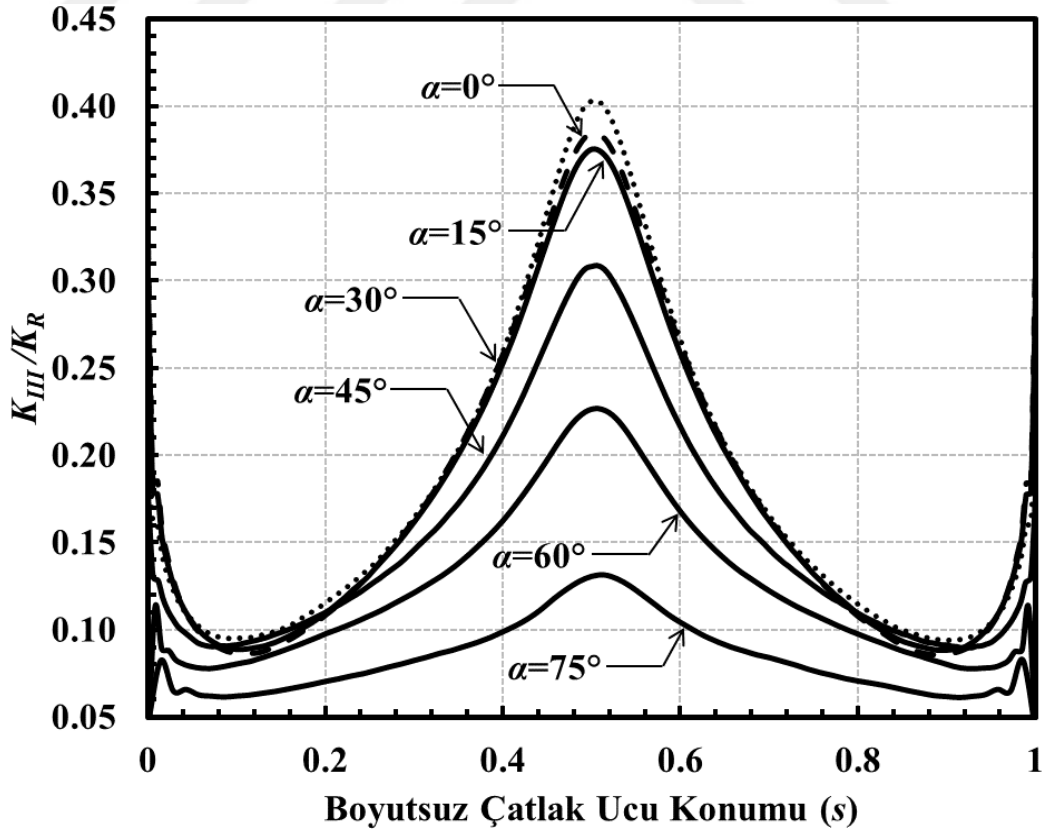
Şekil 3.229. $a/c=2$, $a/D=0.05$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



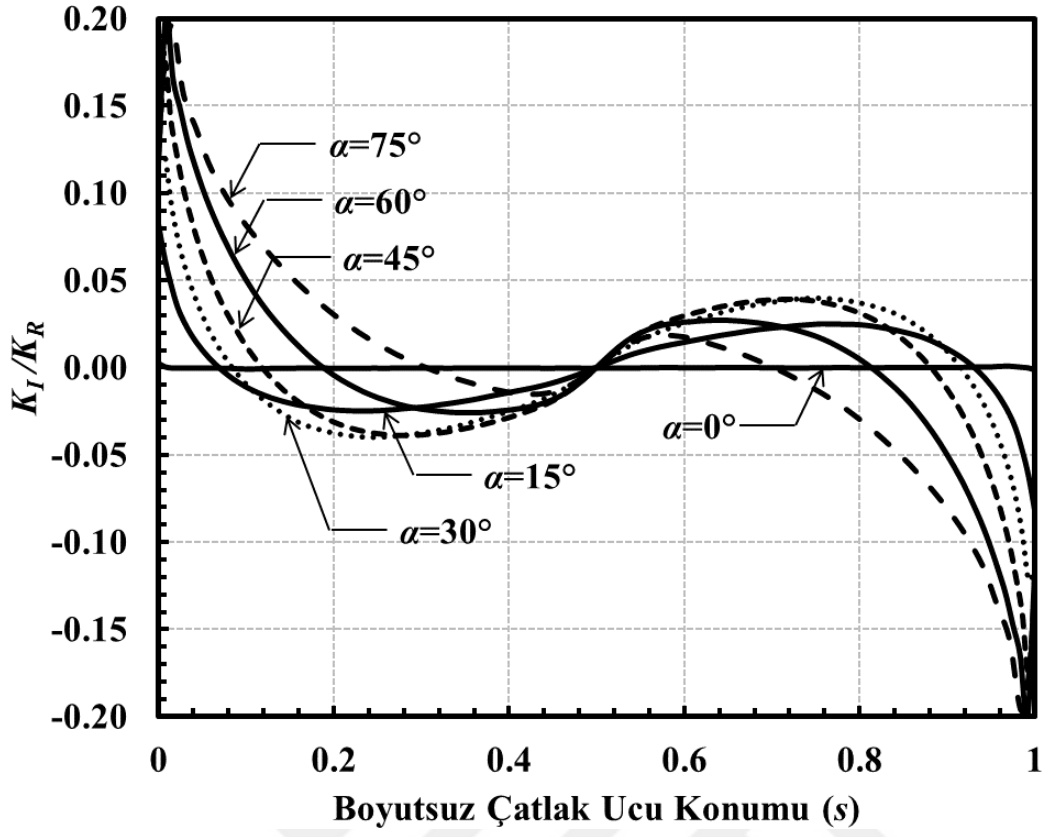
Şekil 3.230. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



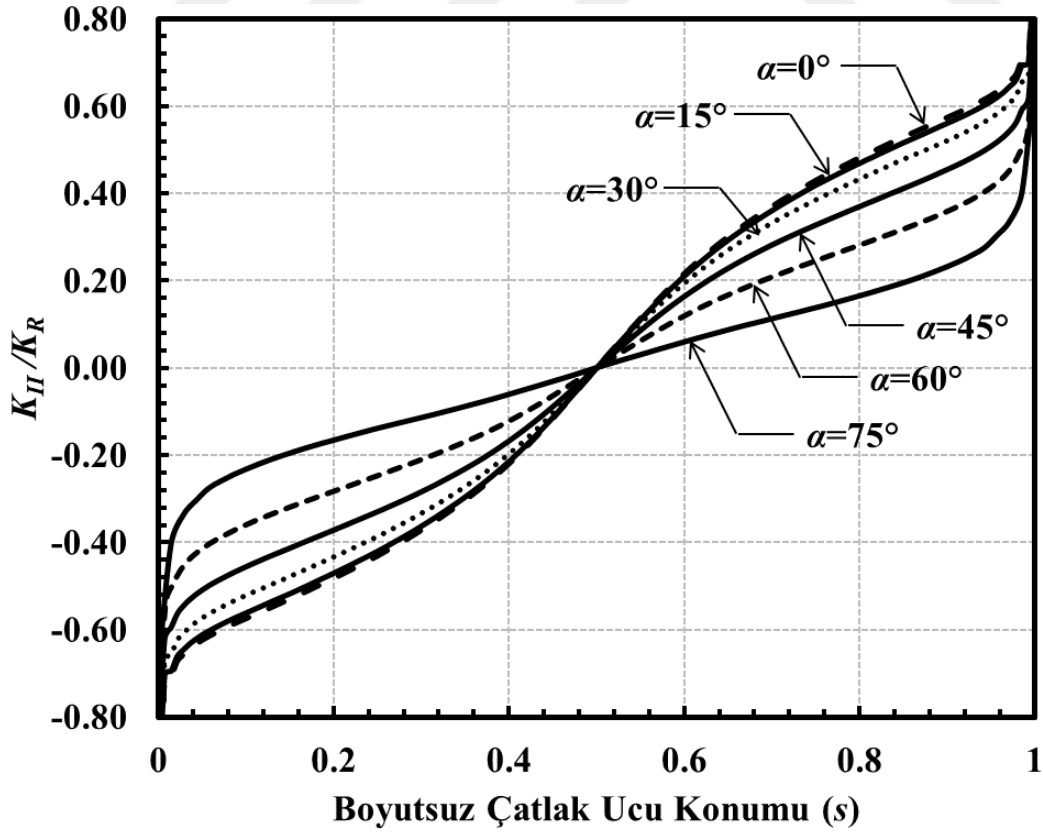
Şekil 3.231. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



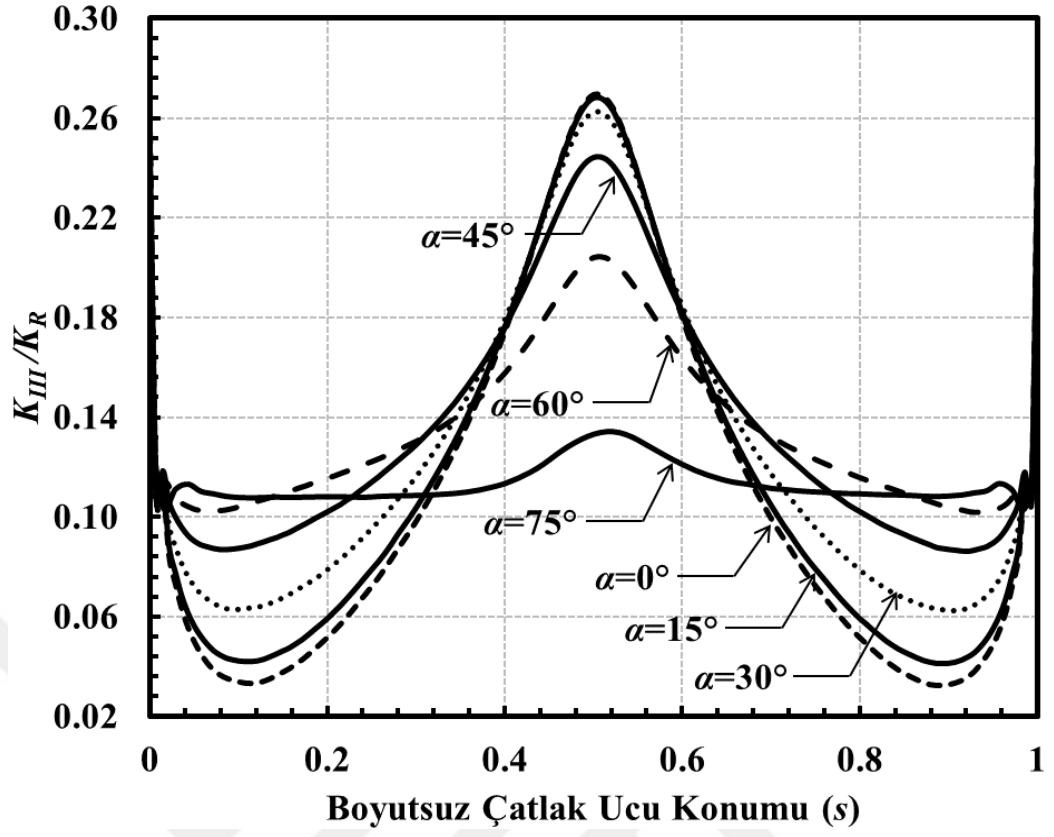
Şekil 3.232. $a/c=2$, $a/D=0.1$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



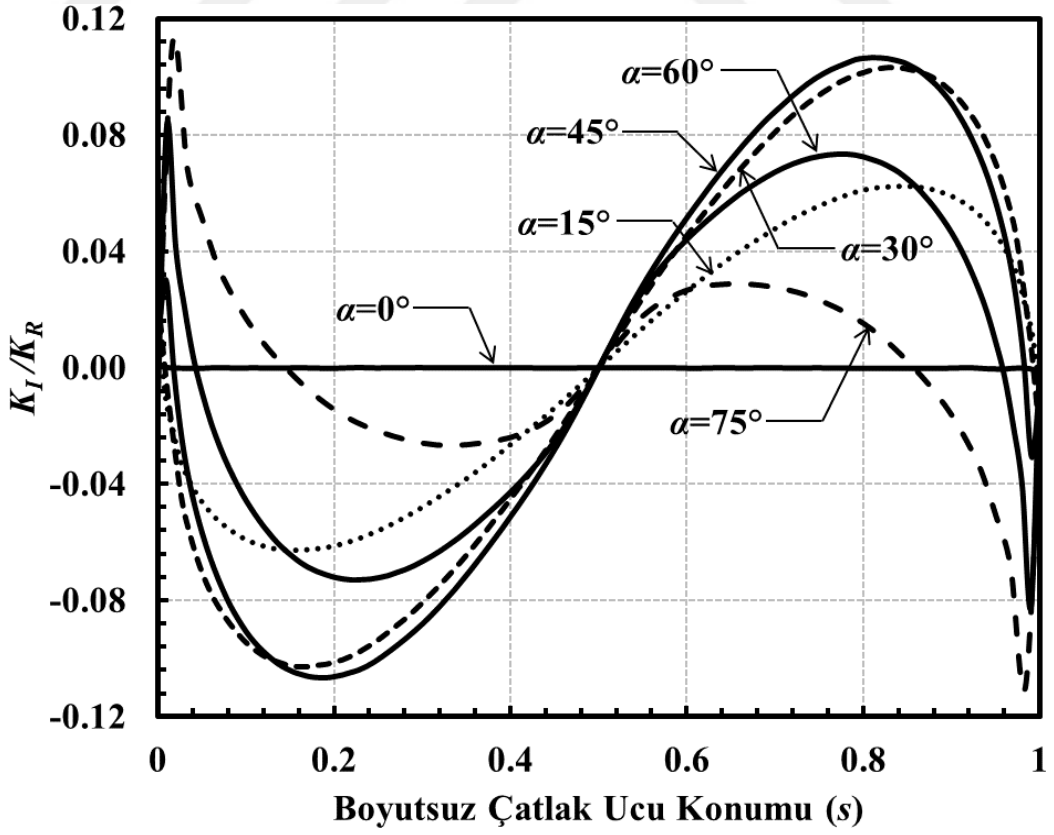
Şekil 3.233. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



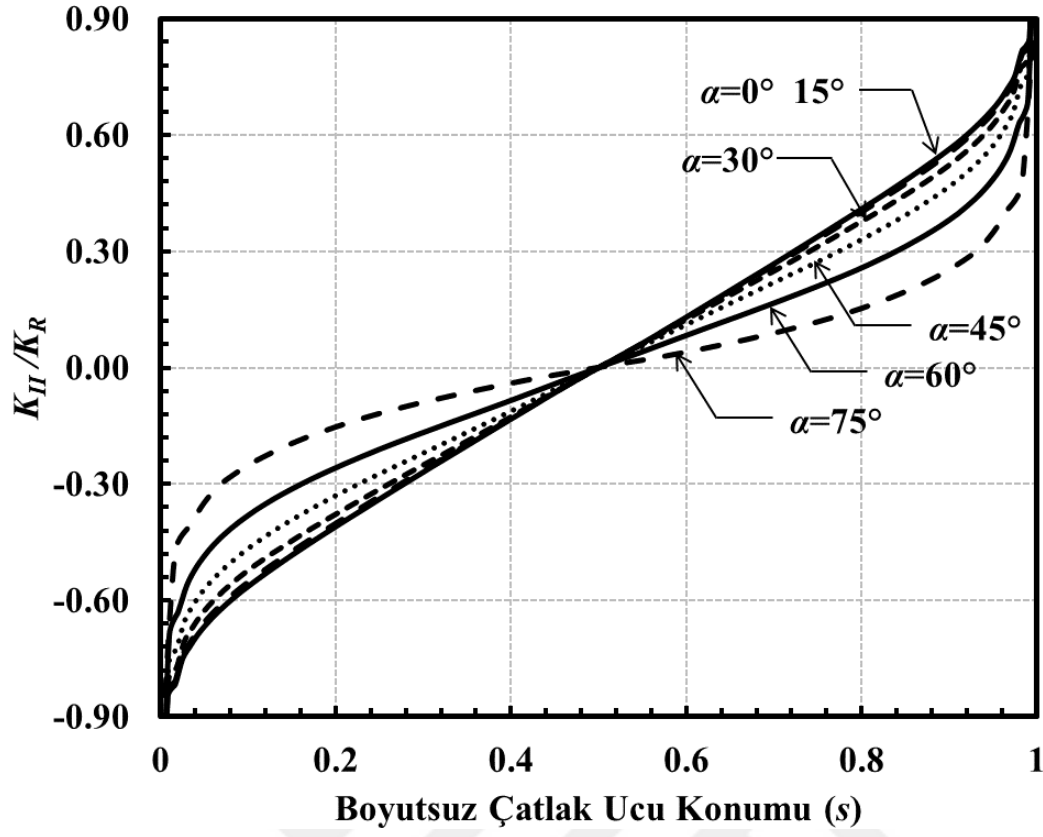
Şekil 3.234. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



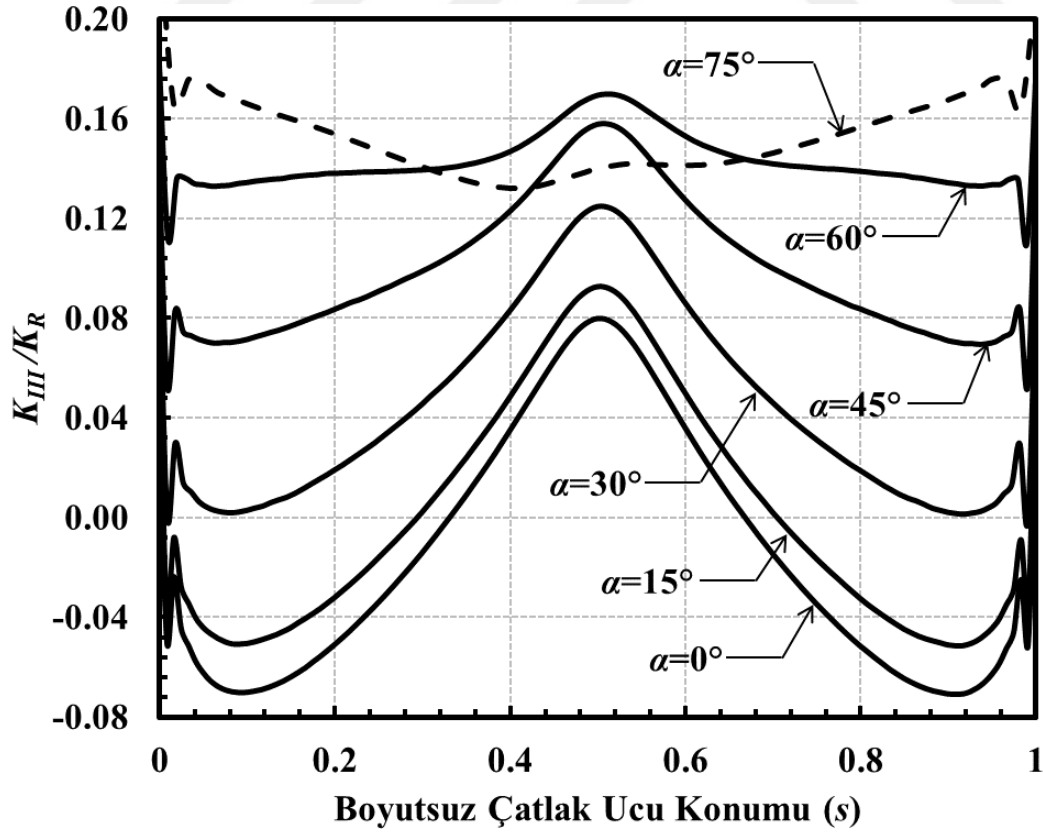
Şekil 3.235. $a/c=2$, $a/D=0.25$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



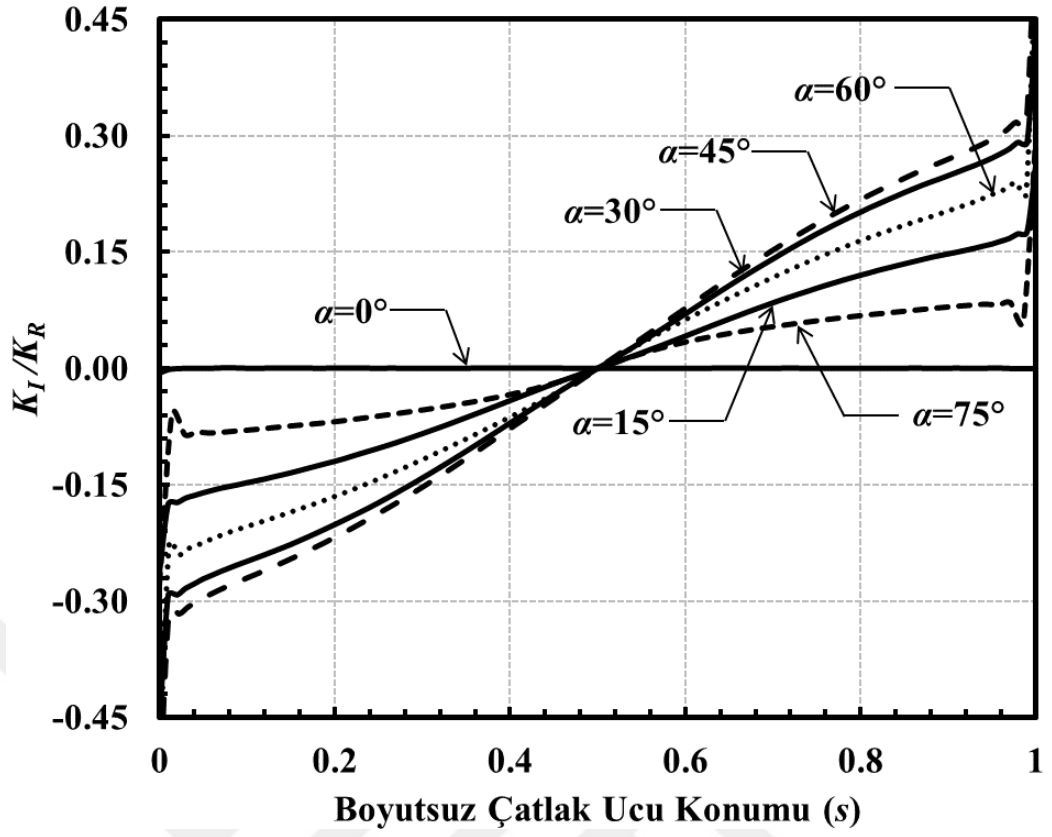
Şekil 3.236. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



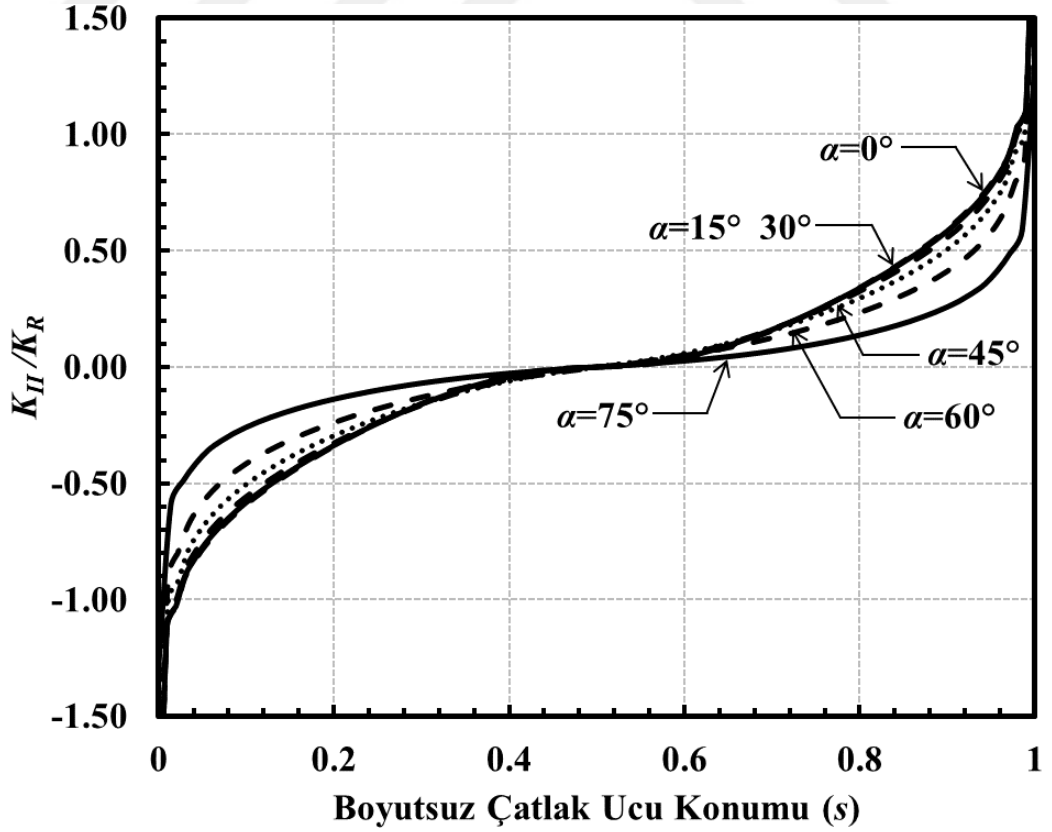
Şekil 3.237. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



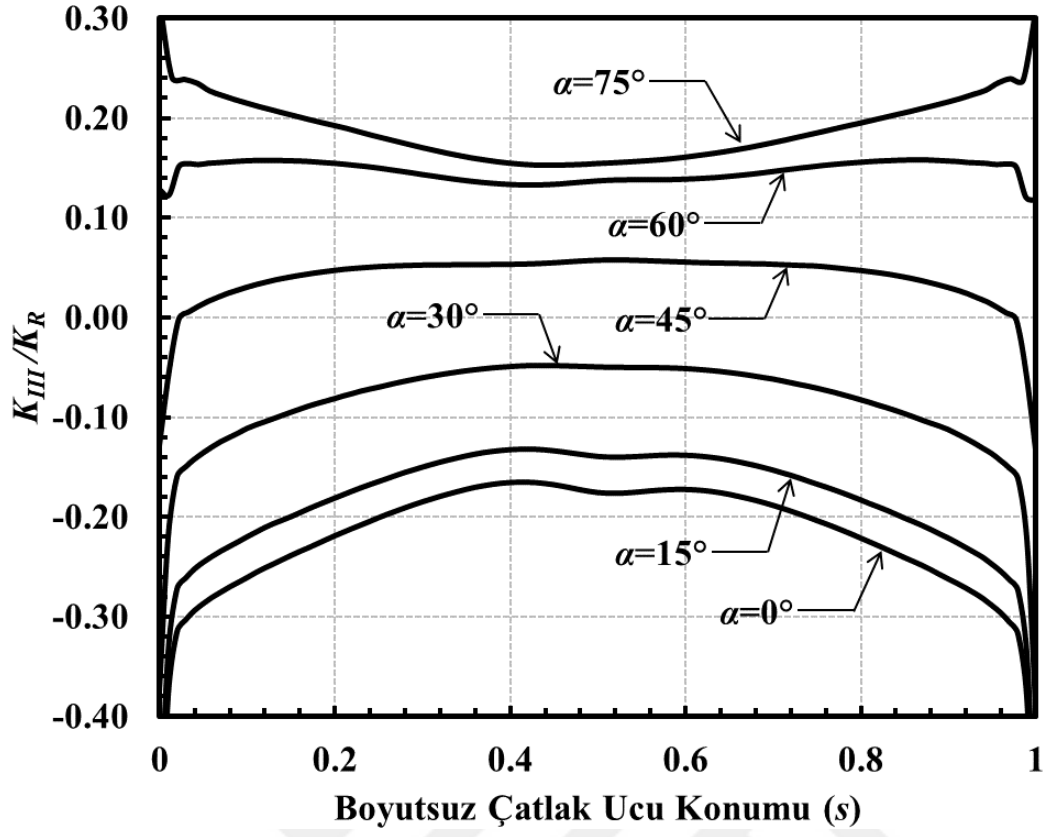
Şekil 3.238. $a/c=2$, $a/D=0.5$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



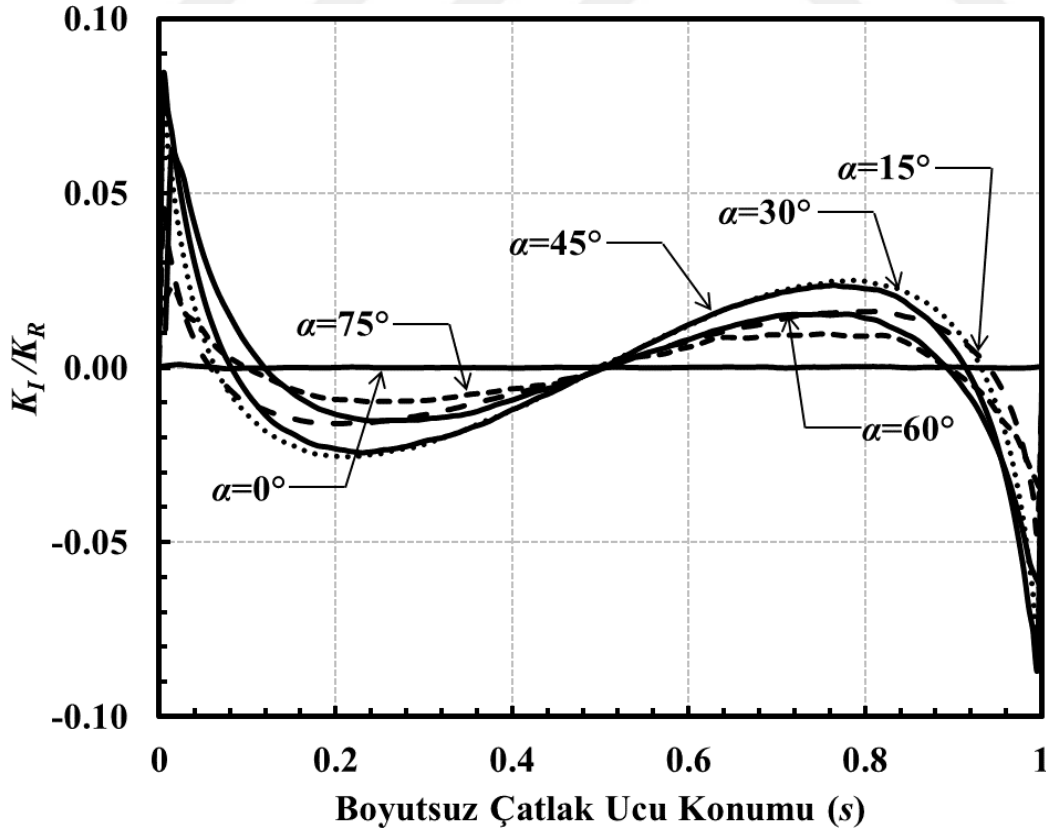
Şekil 3.239. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



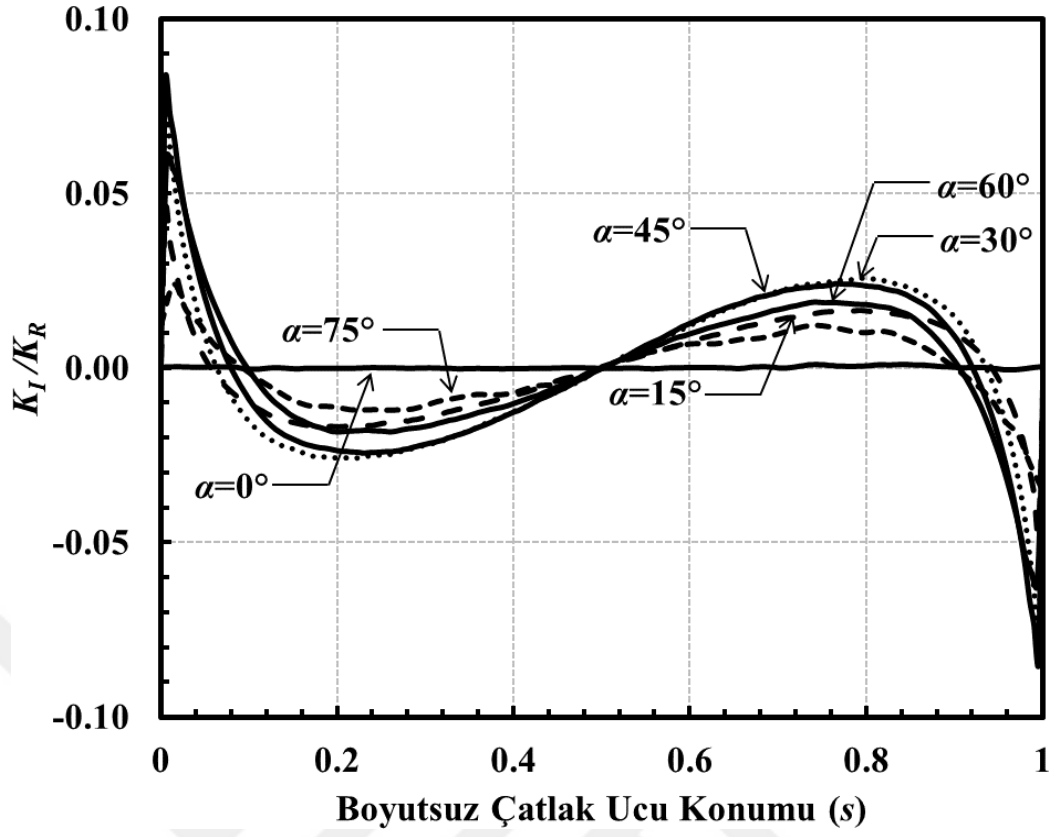
Şekil 3.240. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



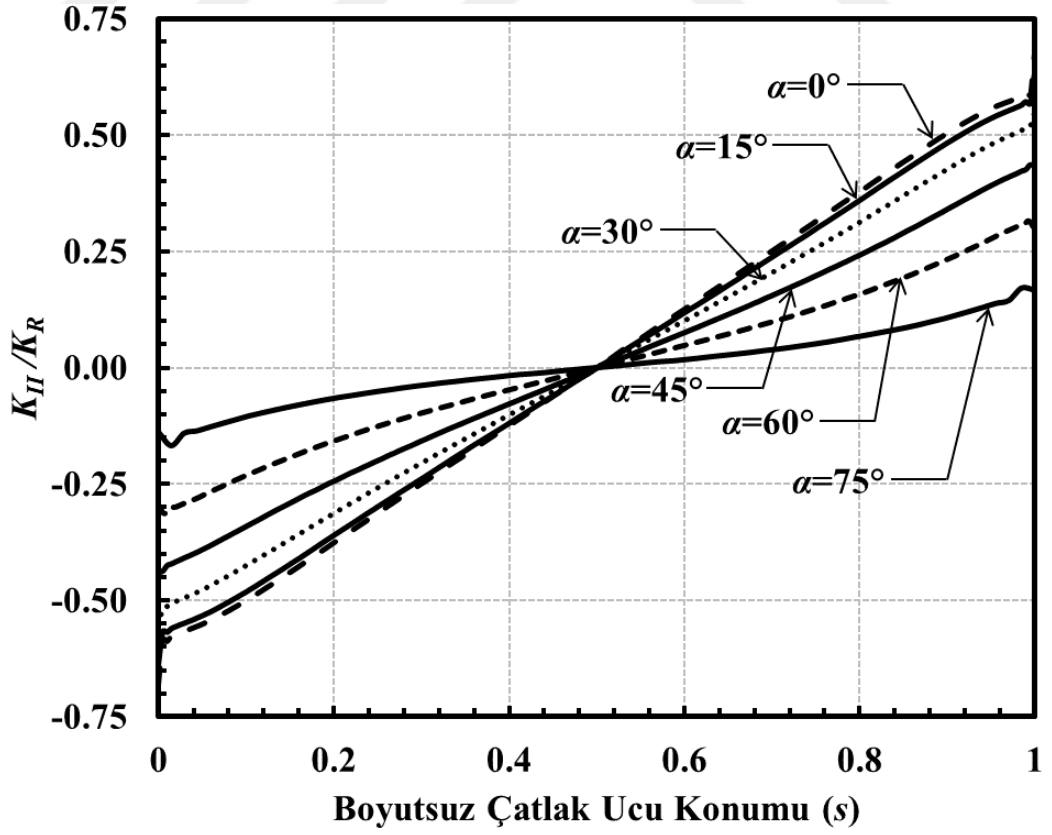
Şekil 3.241. $a/c=2$, $a/D=0.8$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



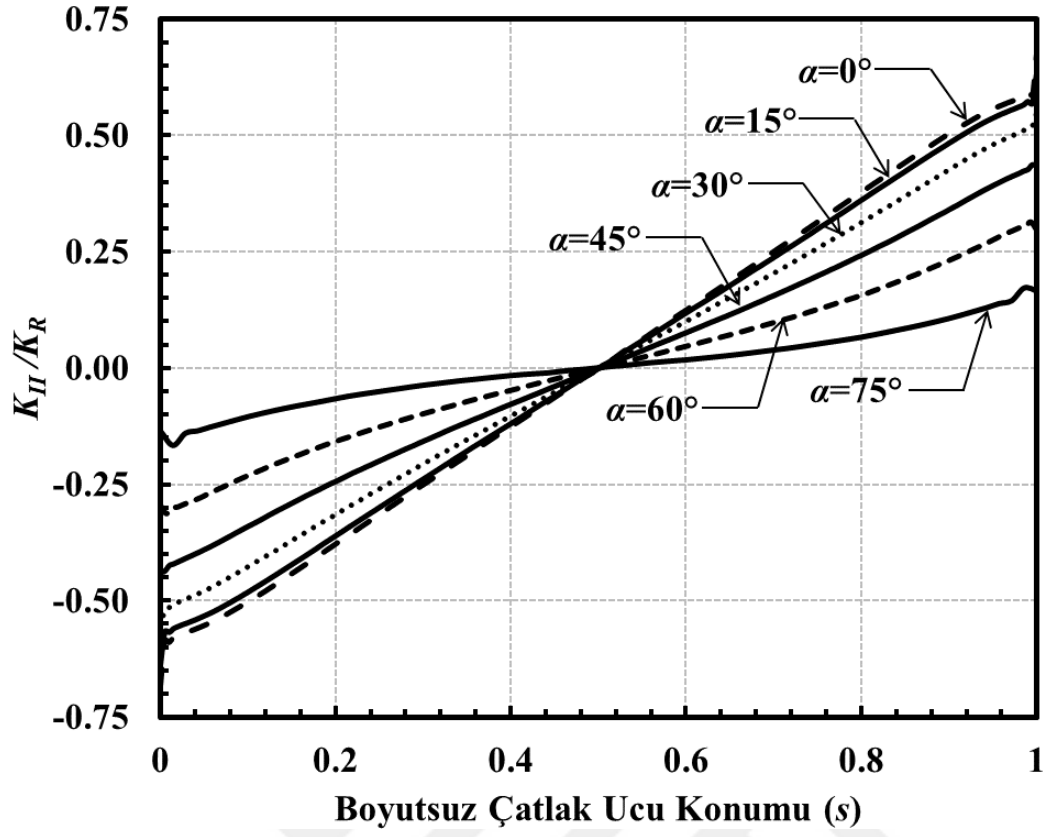
Şekil 3.242. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



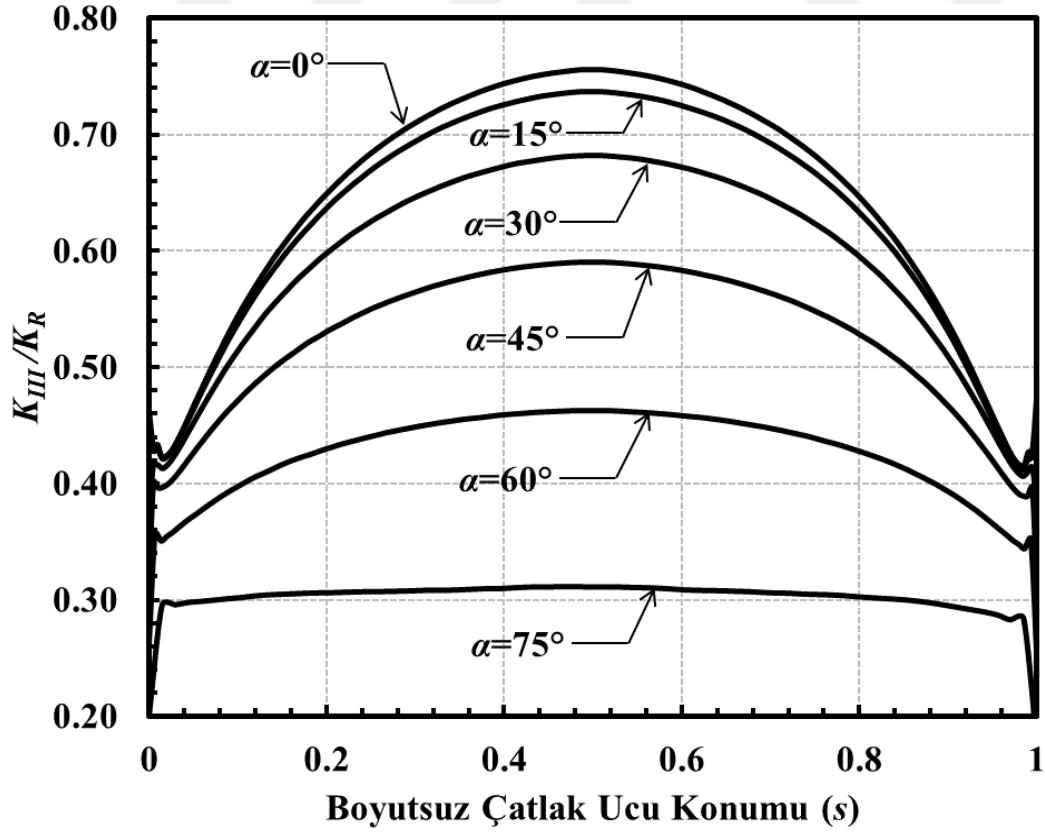
Şekil 3.243. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



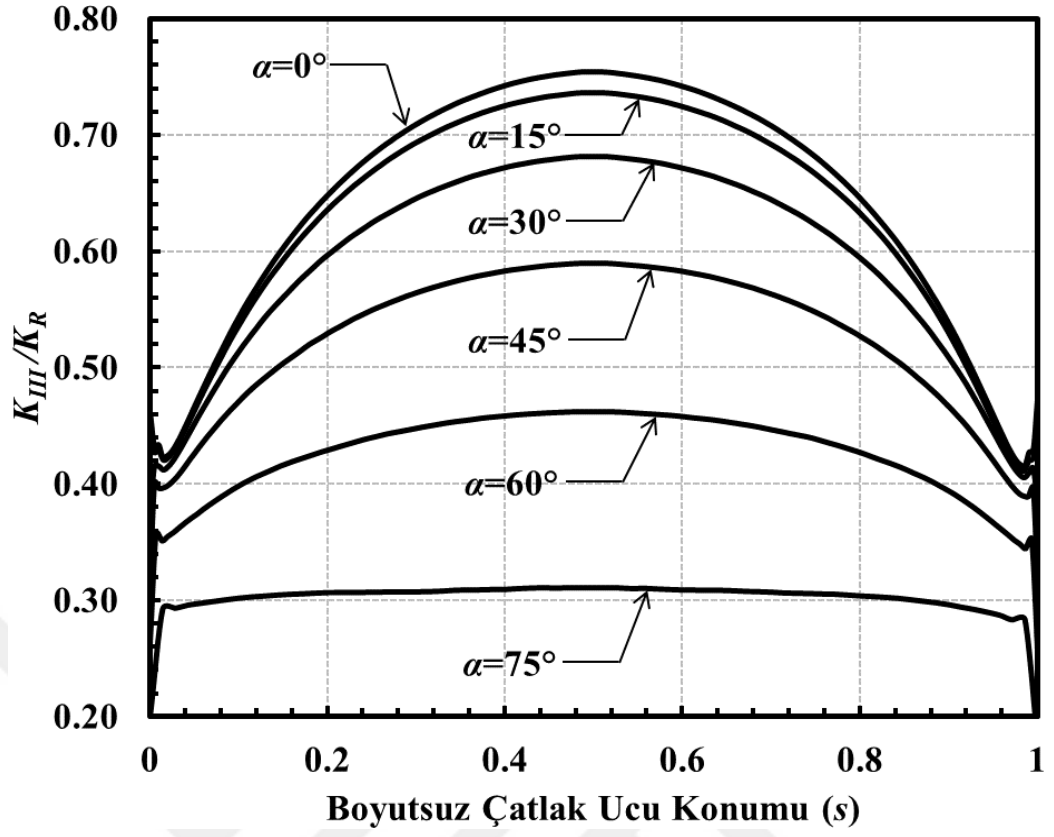
Şekil 3.244. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



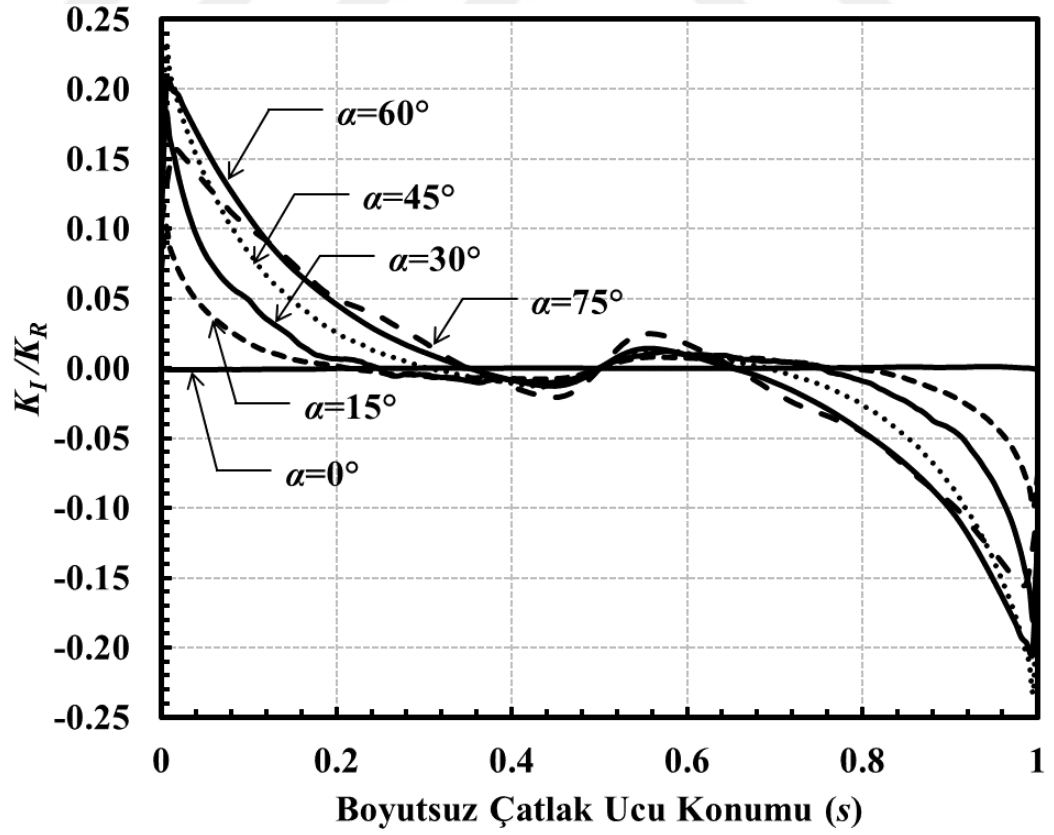
Şekil 3.245. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



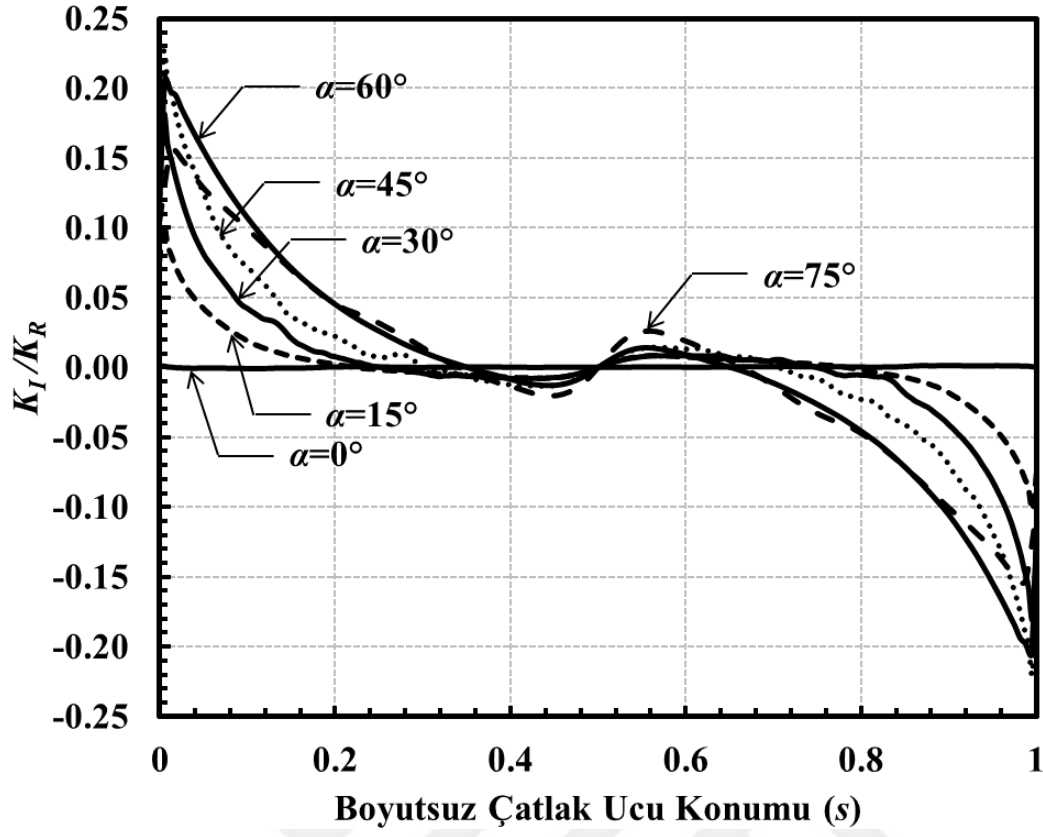
Şekil 3.246. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



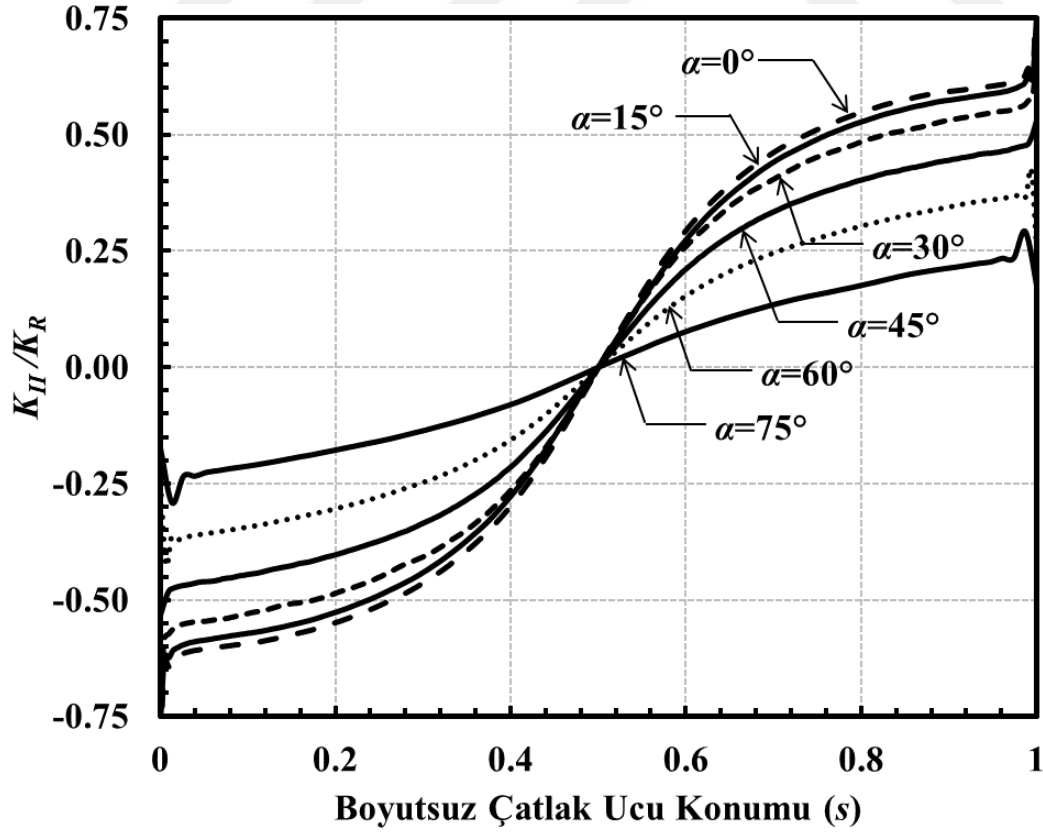
Şekil 3.247. $a/c=0.5$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



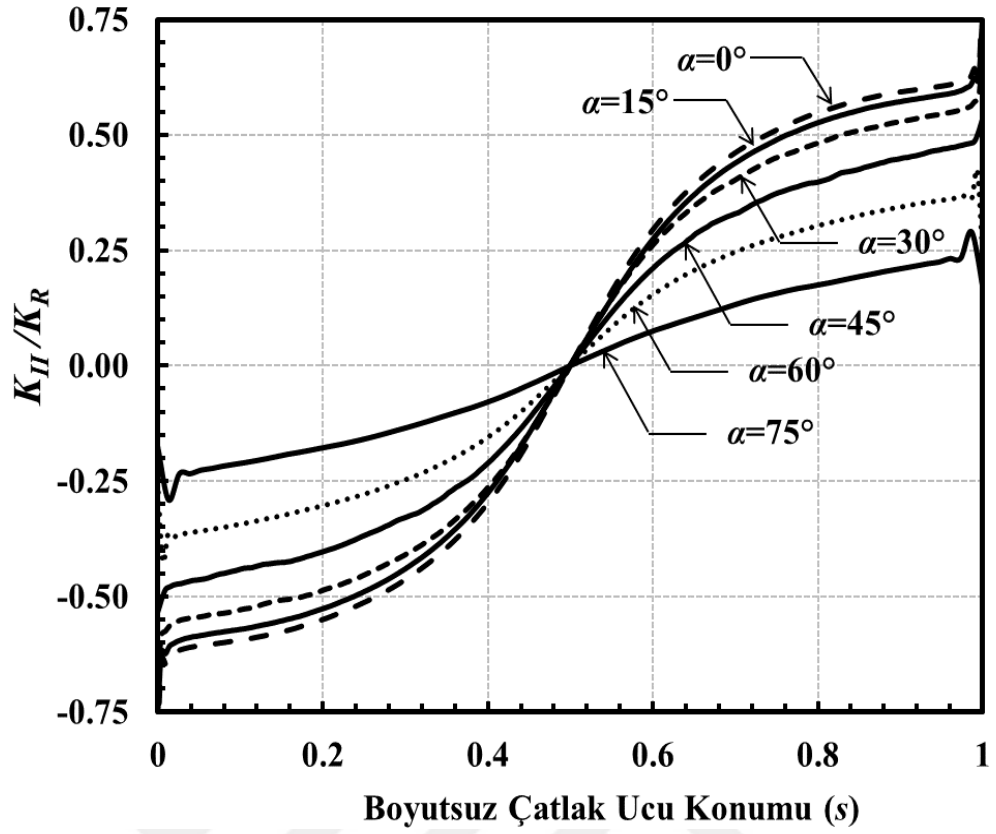
Şekil 3.248. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



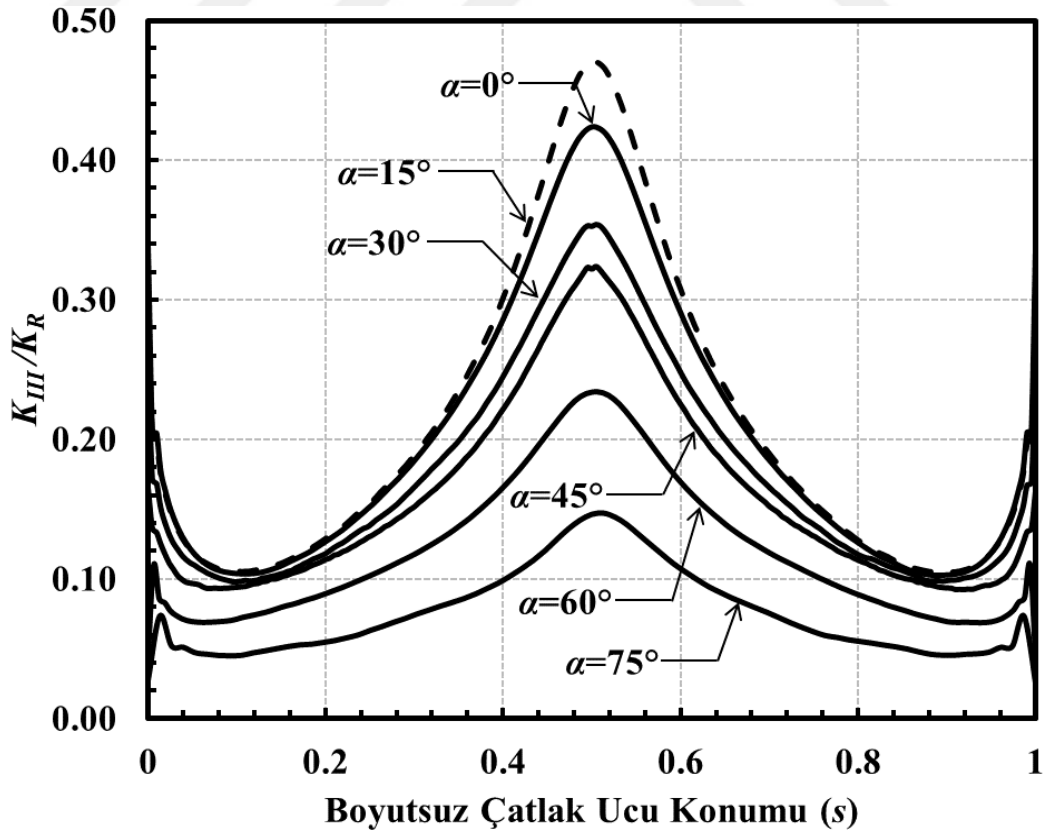
Şekil 3.249. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü).



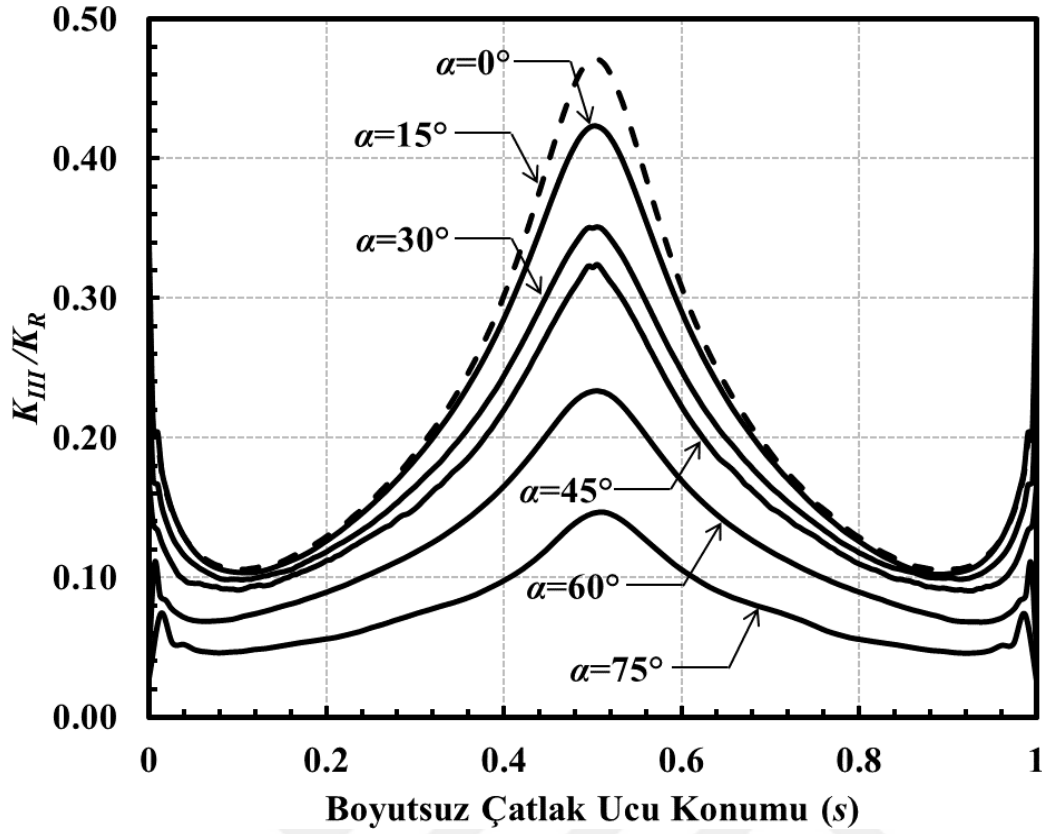
Şekil 3.250. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



Şekil 3.251. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü).



Şekil 3.252. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=3$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).



Şekil 3.253. $a/c=2$, $a/D=0.05$ ve $H/D=6$ için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü).

3.5. Çatlak Derinlik Oranı (a/D) Parametresinin Etkileri

Bölüm 3.2'den 3.4'e kadar verilen grafiklerde, dönmüş çatlaklar için karışık mod boyutsuz K dağılımları, probleme etki eden verilen bir geometrik oran (a/c ve a/D) kombinasyonu ve her bir GŞF modu için ayrı grafikler içerisinde tüm dönme açıları için gösterilmiştir. Bu bölümde ise, orta seviye bir eğiklik açısı sabit olarak alınıp, $\alpha=45^\circ$ için hesaplanan boyutsuz K değerleri baz alınarak her bir grafikte farklı a/c oranlarını temsil edecek şekilde, a/D oranlarının etkileri aynı grafik içerisinde verilmektedir. Analiz sırasına göre boyutsuz karışık mod K dağılımları takip eden grafiklerde sunulmaktadır.

3.5.1. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak

Eksenel yükleme altındaki dönmüş çatlaklar için boyutsuz K değerlerinin dönme açlarına göre hazırlanan grafikleri Bölüm 3.2'de verilmişti. Karışık mod boyutsuz K değerlerinin çatlak derinliği/çatlak uzunluğu (a/c) sabit tutularak farklı çatlak derinliği/katı silindir çapıyla karşılaştırılması bu bölümde verilmektedir. Çatlak önü boyunca boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} dağılımları sırasıyla Şekil 3.254-3.265'te verilmiştir.

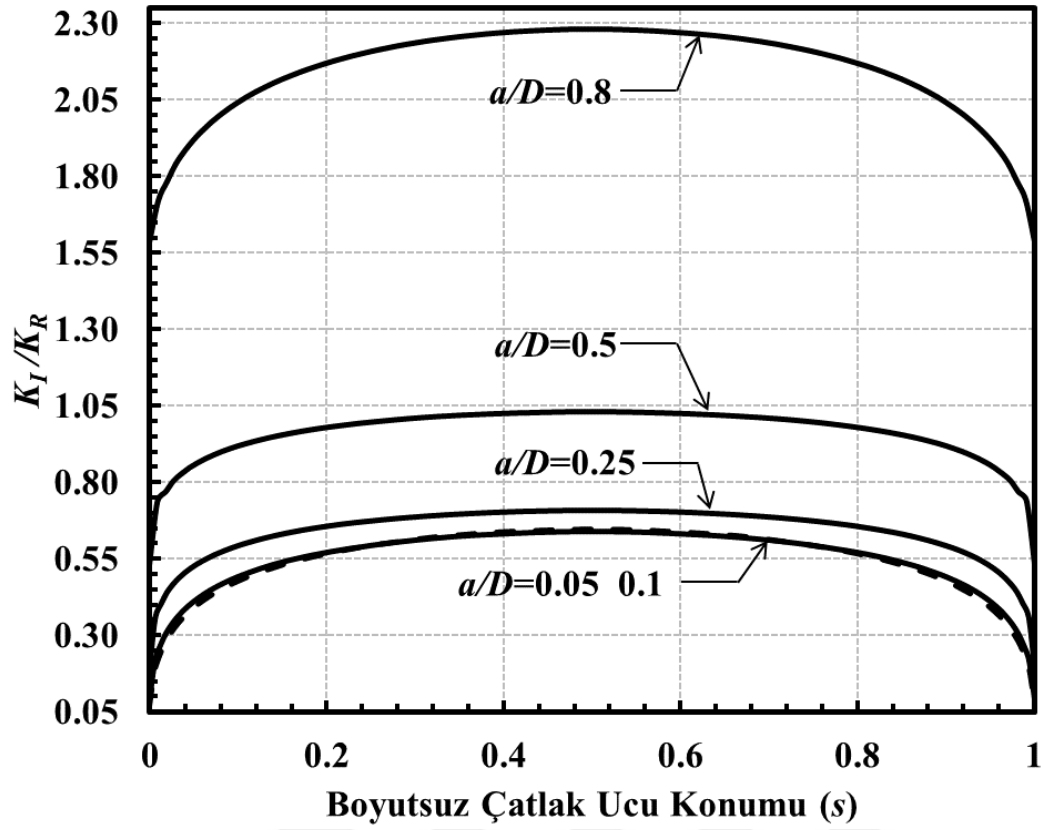
Çatlak şekil oranı sabit kalıp, katı silindir çapı azaldıkça, bir başka deyişle boyutsuz çatlak derinliği arttıkça, çatlak önü boyunca boyutsuz K_I değerleri artmaktadır. Aynı zamanda boyutsuz K_{II} değerlerinin değeri negatif olmakla birlikte, şiddetleri artmaktadır. Boyutsuz K_{III} değerlerinin büyüklüklerinin de, artan boyutsuz çatlak derinliği ile arttığı ilgili grafiklerde görülmektedir.

3.5.2. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak

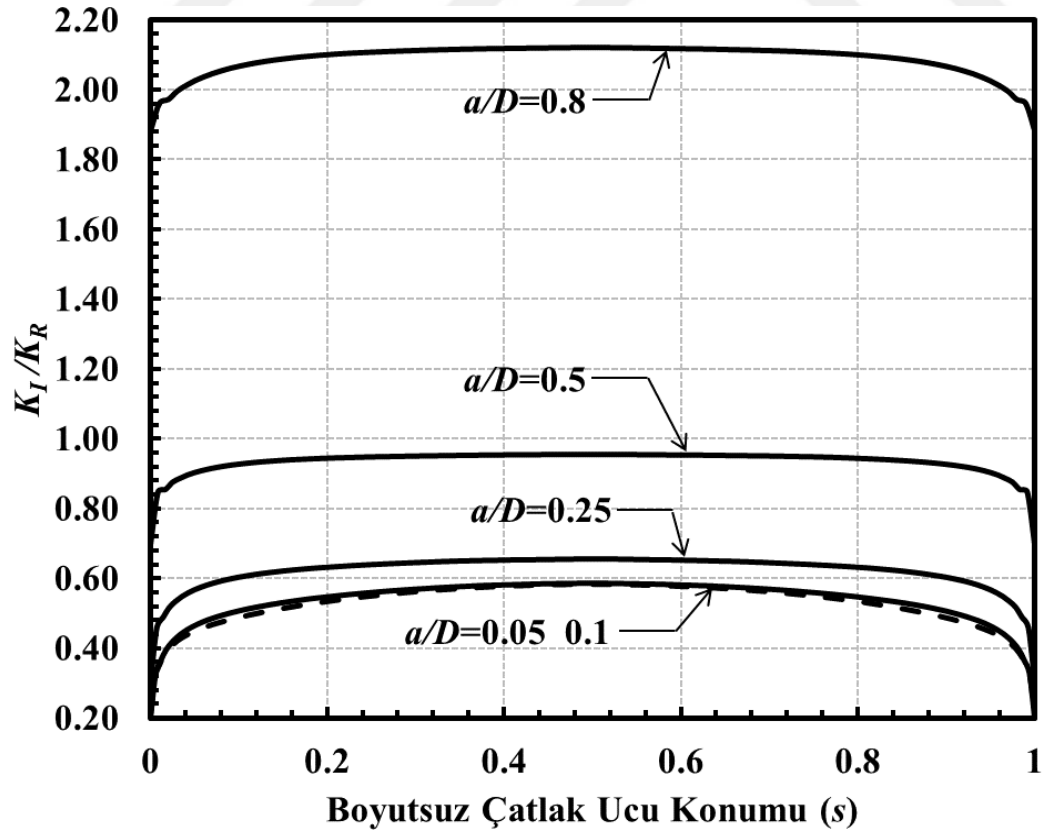
Eğilme yükü altındaki dönmüş çatlakların boyutsuz K değerlerinin açılara göre hazırlanmış grafikleri Bölüm 3.3'te verilmişti. Boyutsuz karışık mod K değerlerinin çatlak derinliği/çatlak uzunluğu (a/c) sabit tutularak farklı çatlak derinliği/katı silindir çapıyla kıyaslanması bu kısımda verilmiştir. Boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} dağılımları sırasıyla Şekil 3.266–3.277'de verilmiştir. Eksenel gerilme durumunda olduğu gibi, artan boyutsuz çatlak derinliği değeri ile boyutsuz karışık mod GŞF değerleri de, özellikle serbest yüzey noktalarında çoğunlukla artmakta, bazı durumlarda derinlik noktalarında ise azalmaktadır.

3.5.3. Burulma yüküne maruz dönmüş çatlak

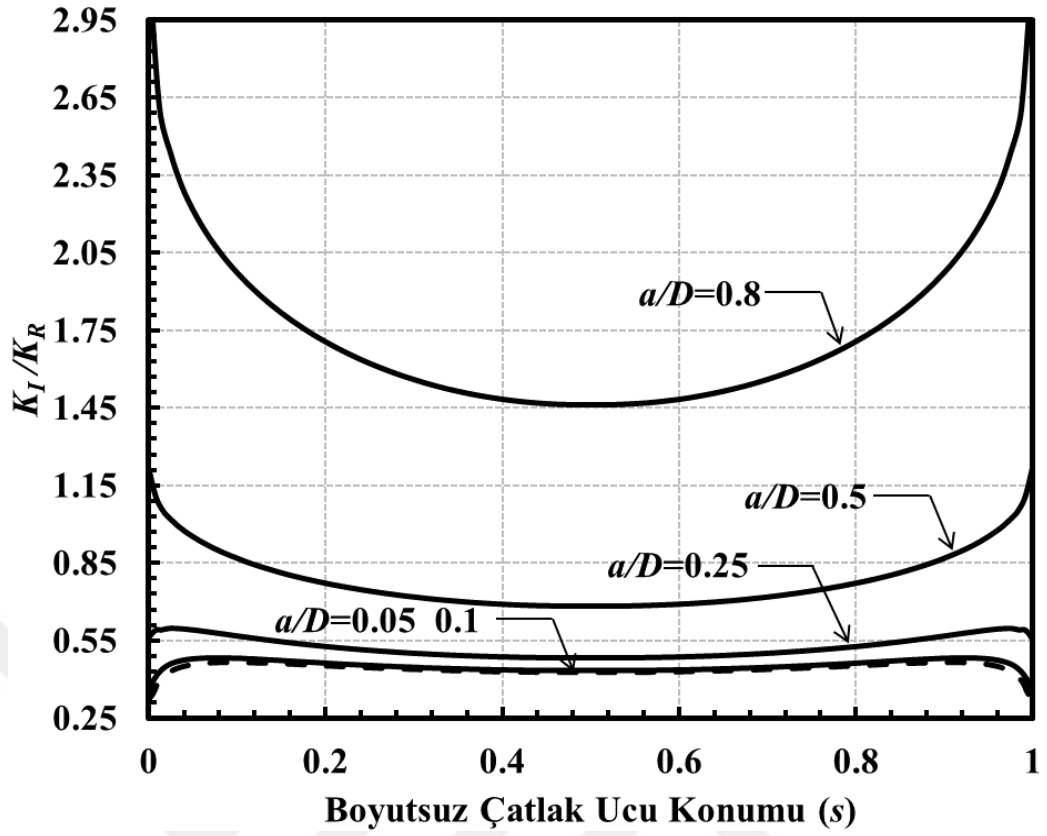
Burulma yükü altındaki dönmüş çatlakların boyutsuz K değerlerinin açılara göre hazırlanmış grafikleri Bölüm 3.4'te verilmişti. Boyutsuz karışık mod K değerlerinin çatlak derinliği/çatlak uzunluğu (a/c) sabit tutularak farklı çatlak derinliği/katı silindir çapıyla kıyaslanması grafikler halinde bu kısımda verilmiştir. Boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} değerleri bu grafikler içerisinde sırasıyla Şekil 3.278–3.289'da verilmiştir.



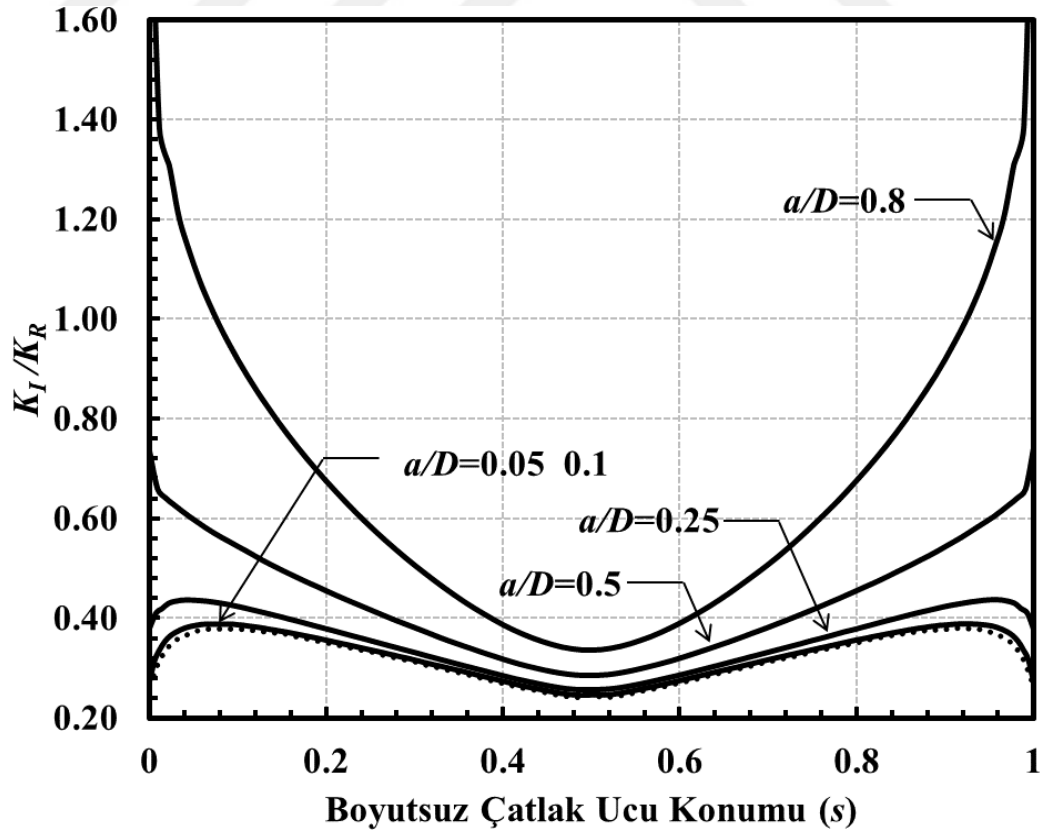
Şekil 3.254. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).



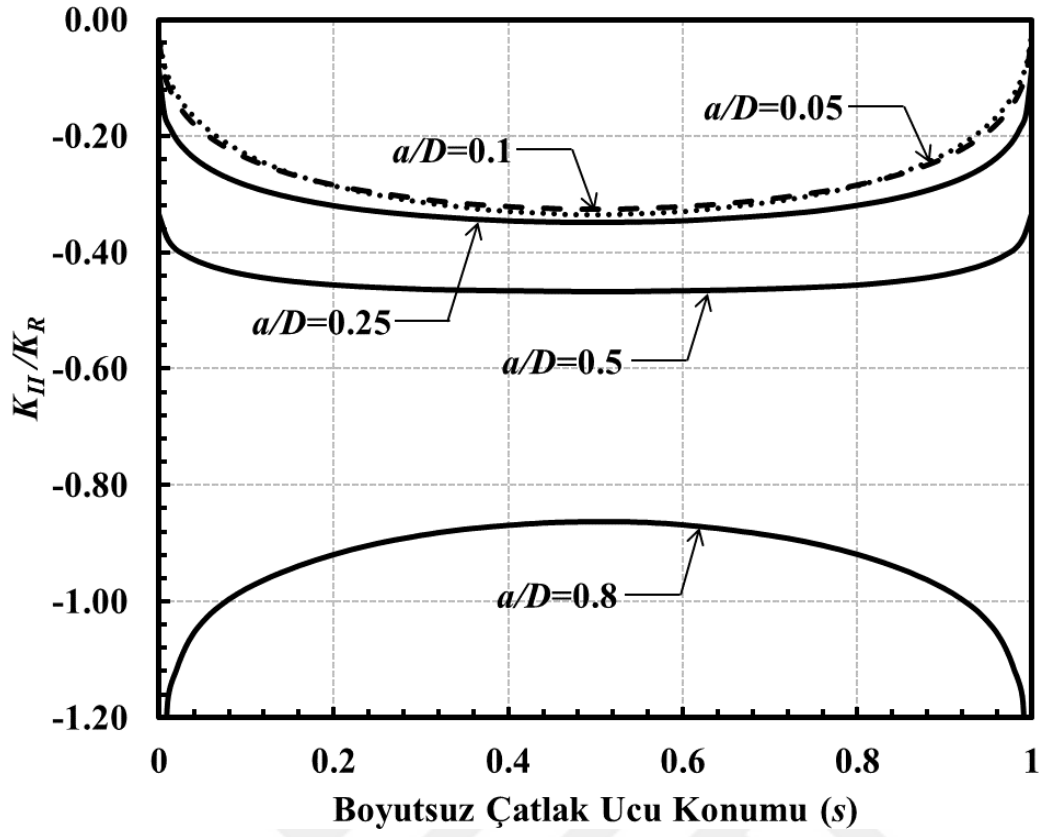
Şekil 3.255. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).



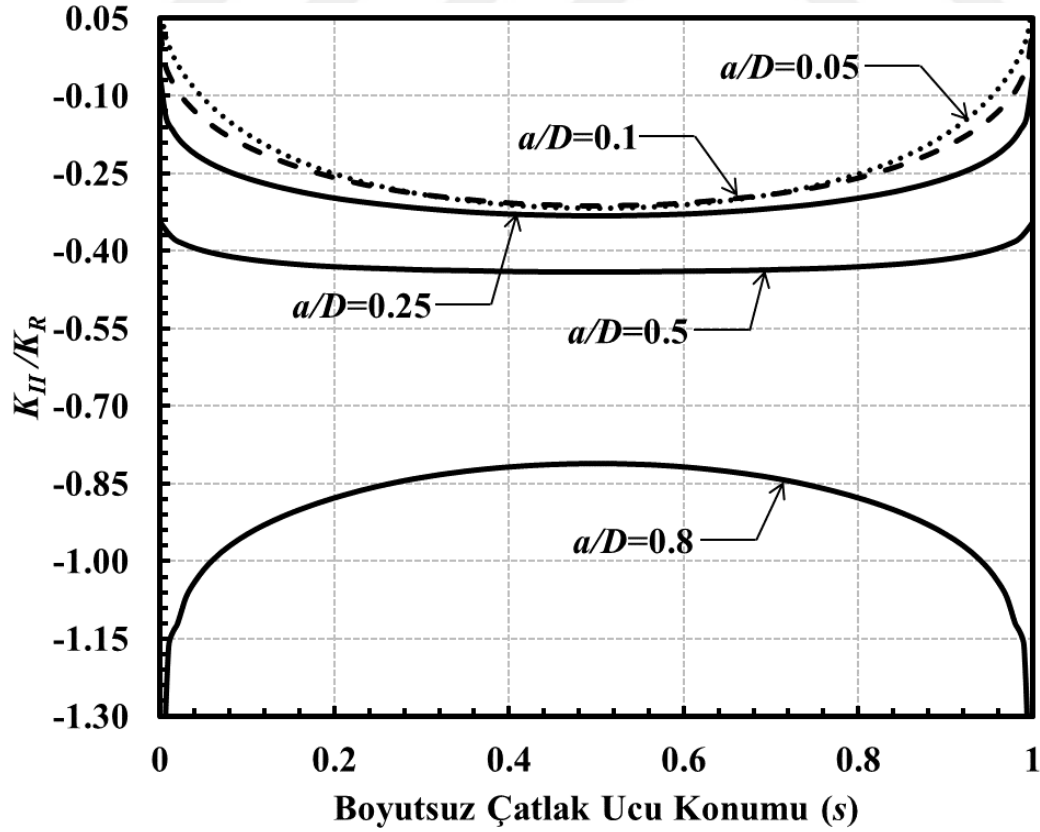
Şekil 3.256. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).



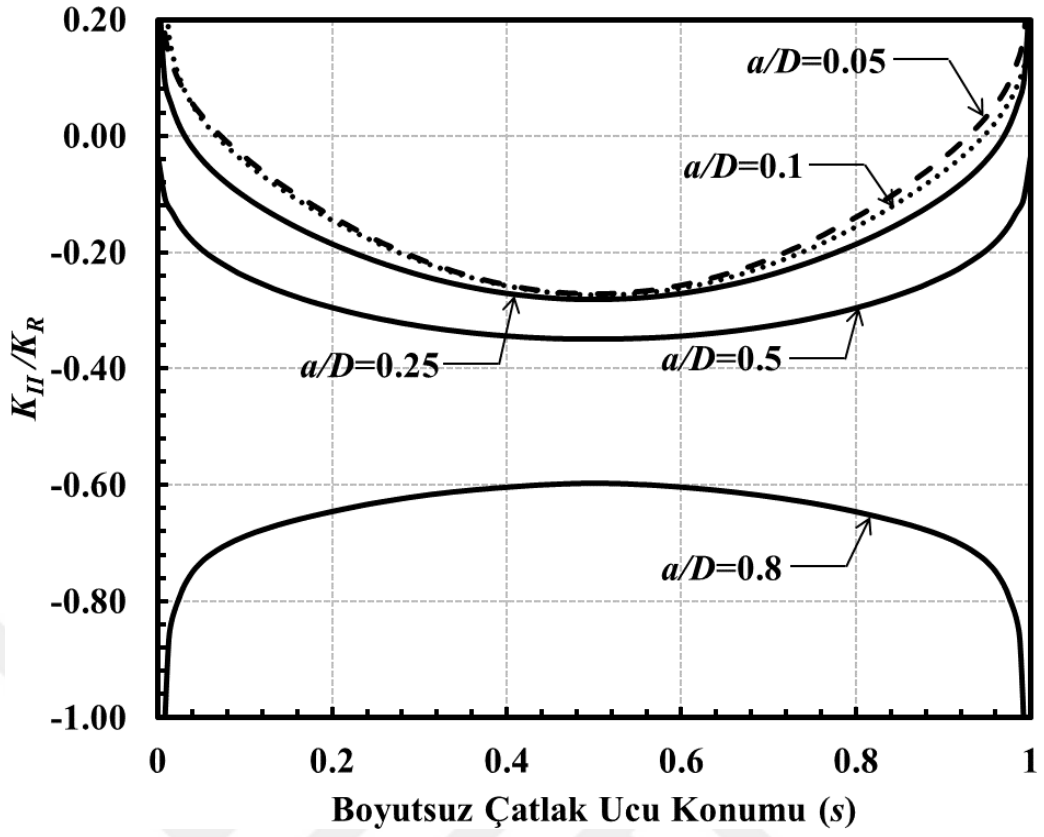
Şekil 3.257. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).



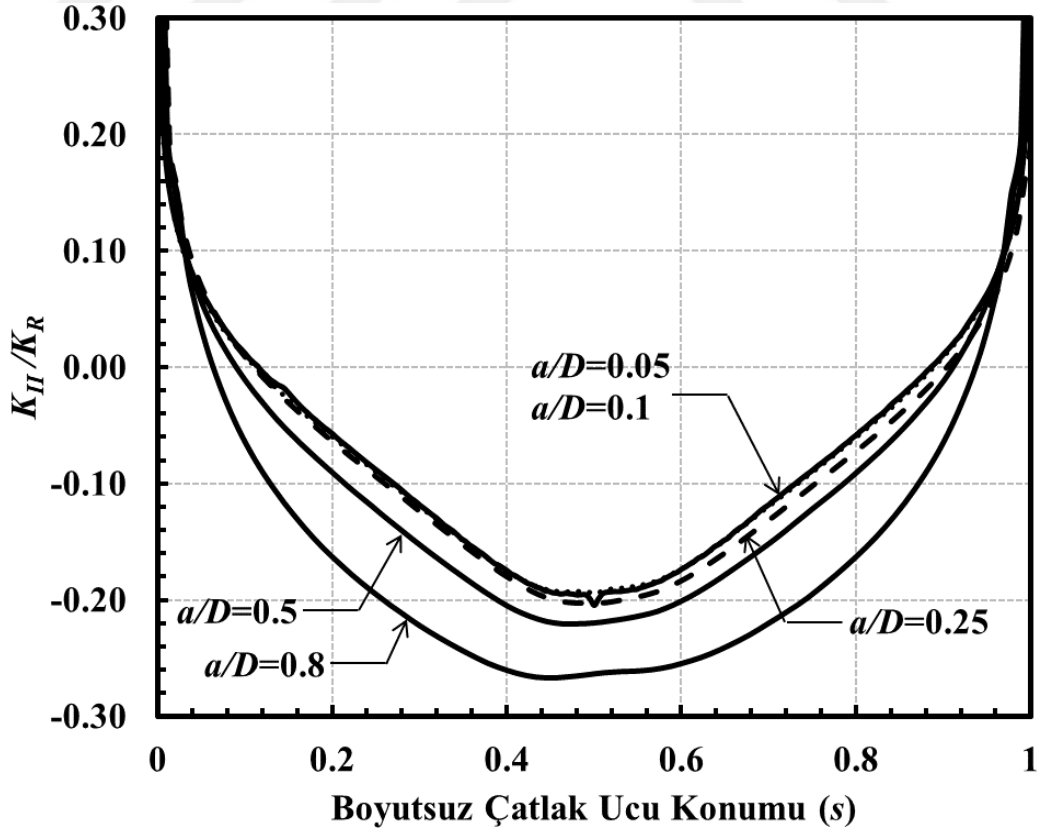
Şekil 3.258. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).



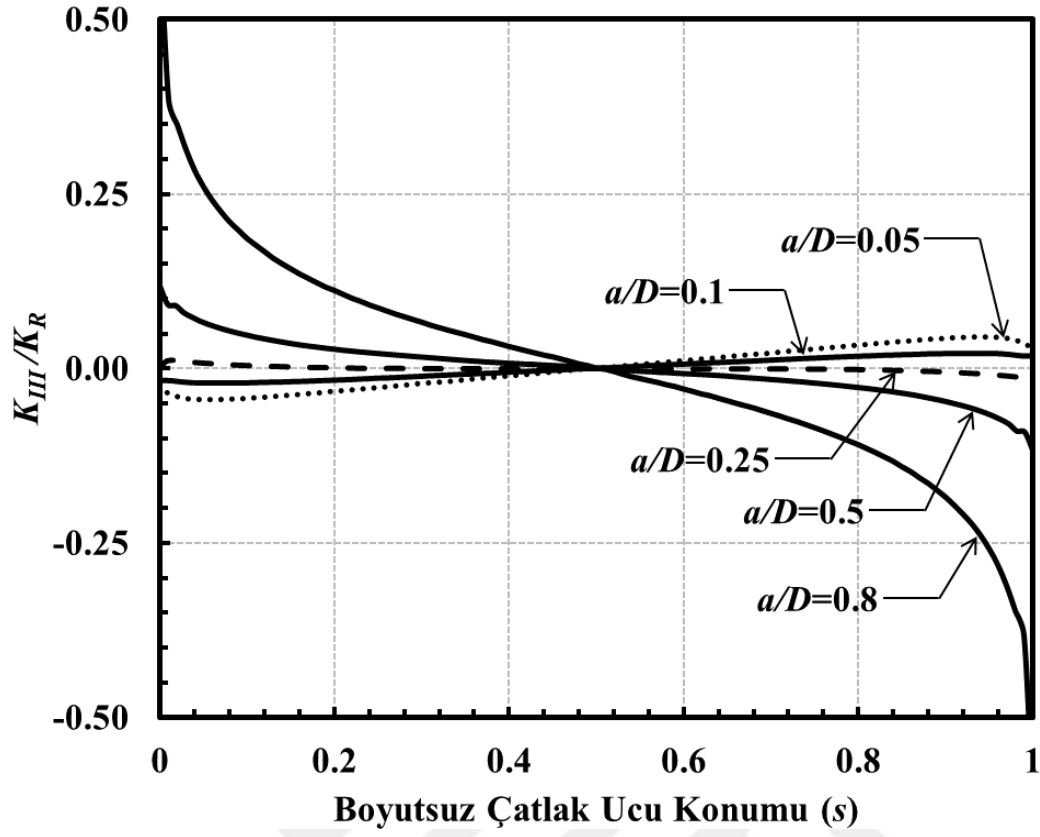
Şekil 3.259. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).



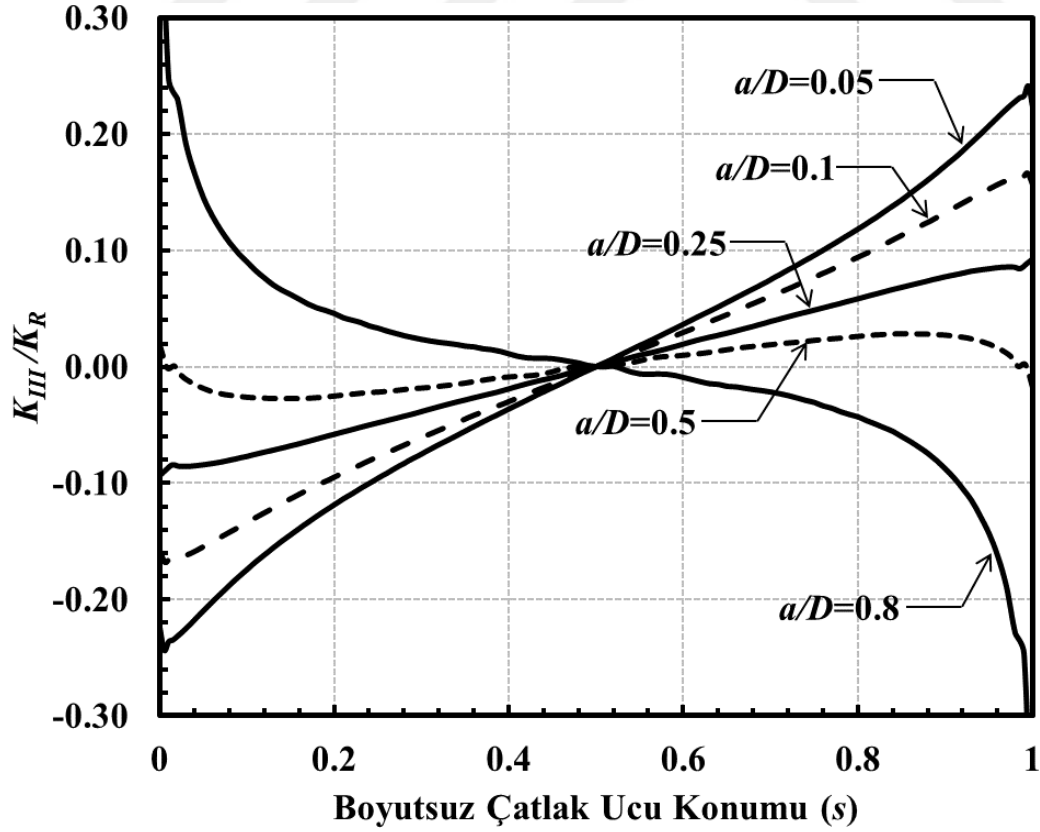
Şekil 3.260. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).



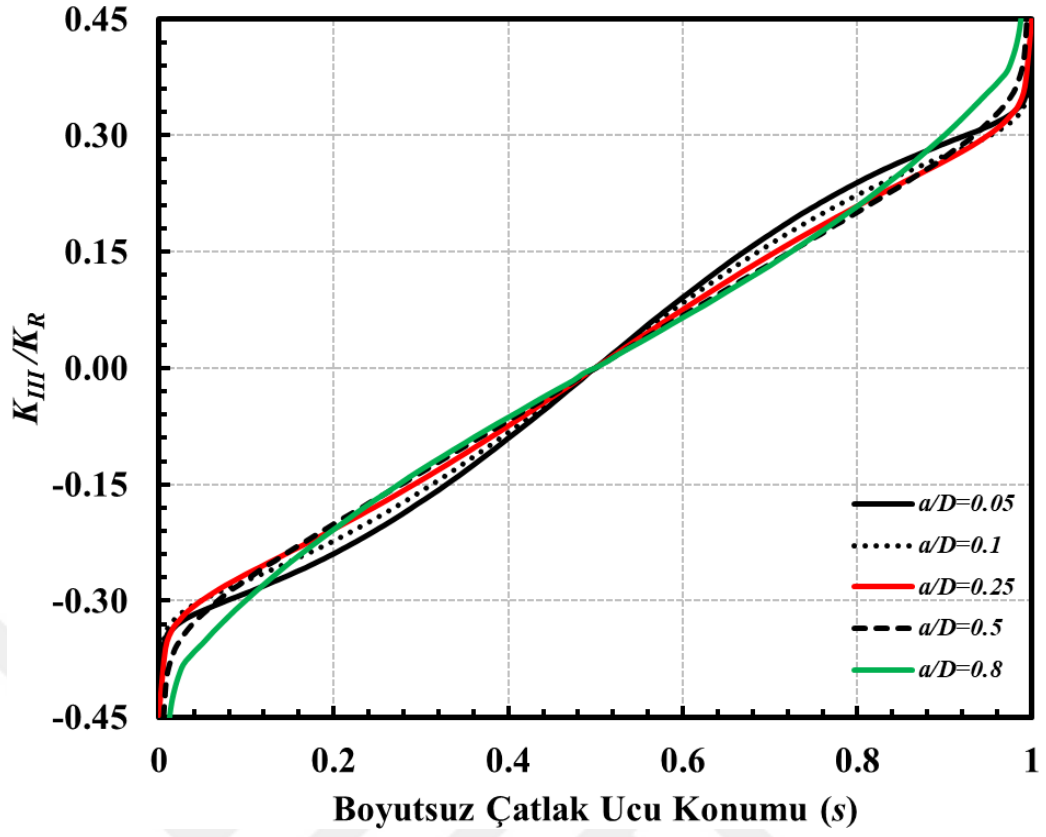
Şekil 3.261. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).



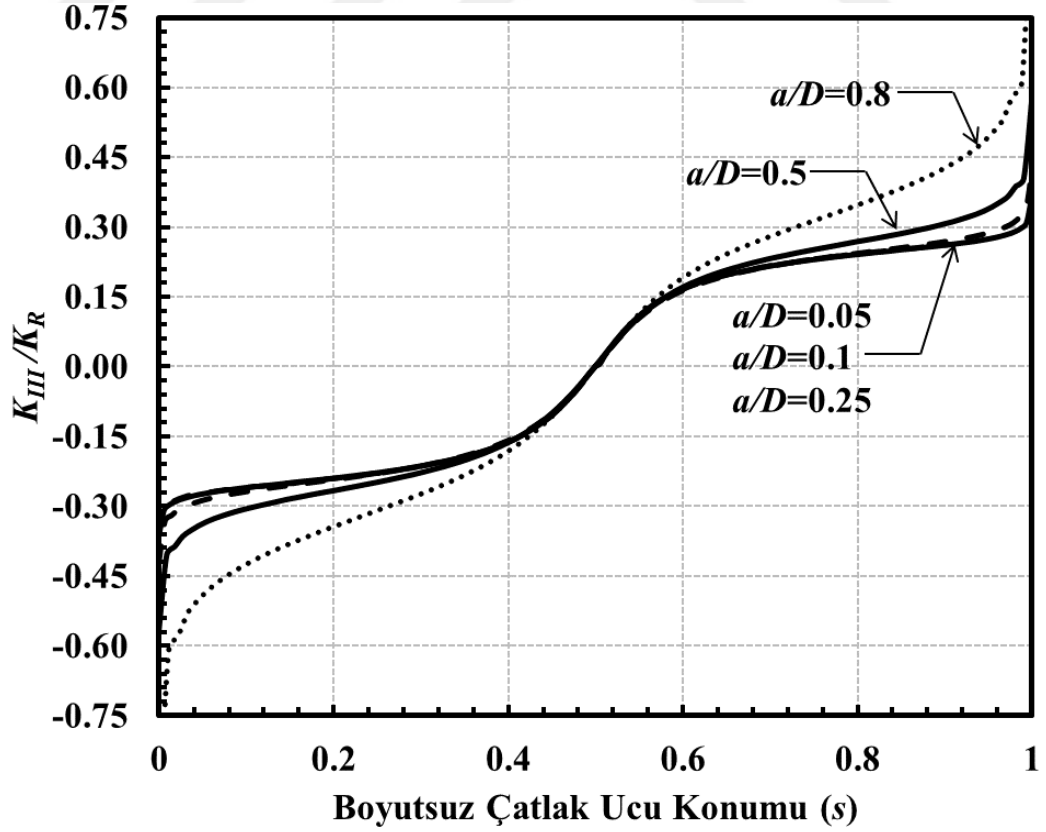
Şekil 3.262. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).



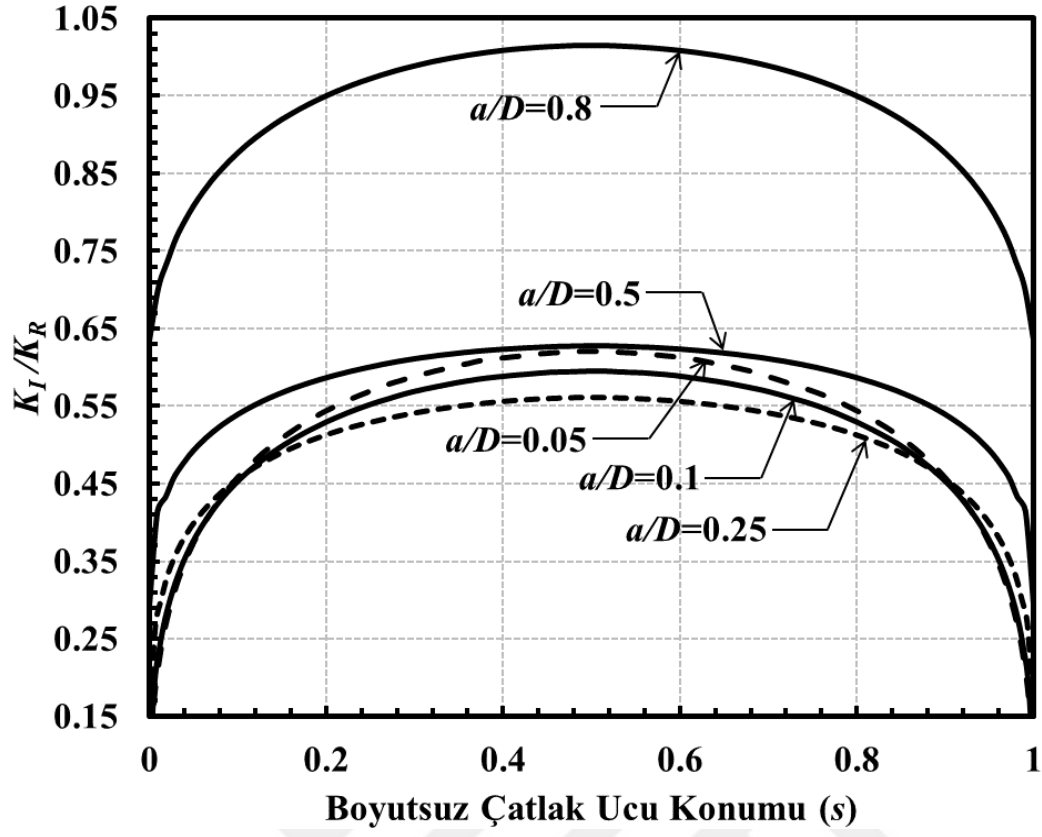
Şekil 3.263. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).



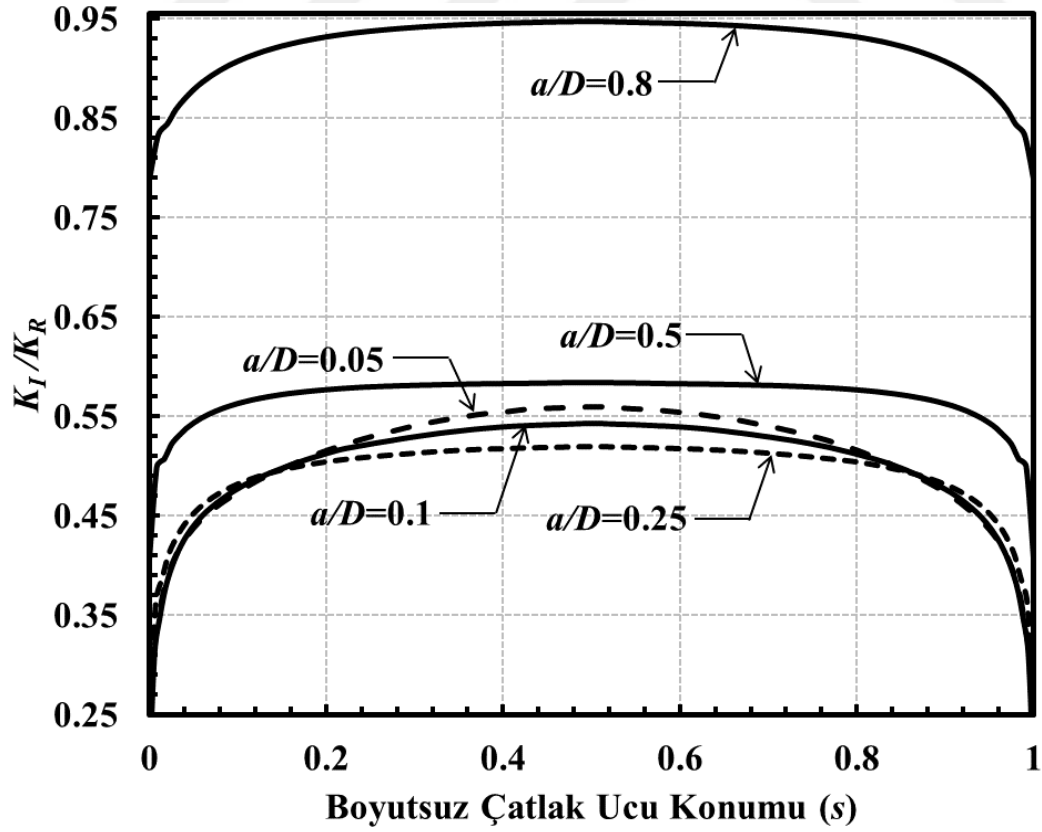
Şekil 3.264. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).



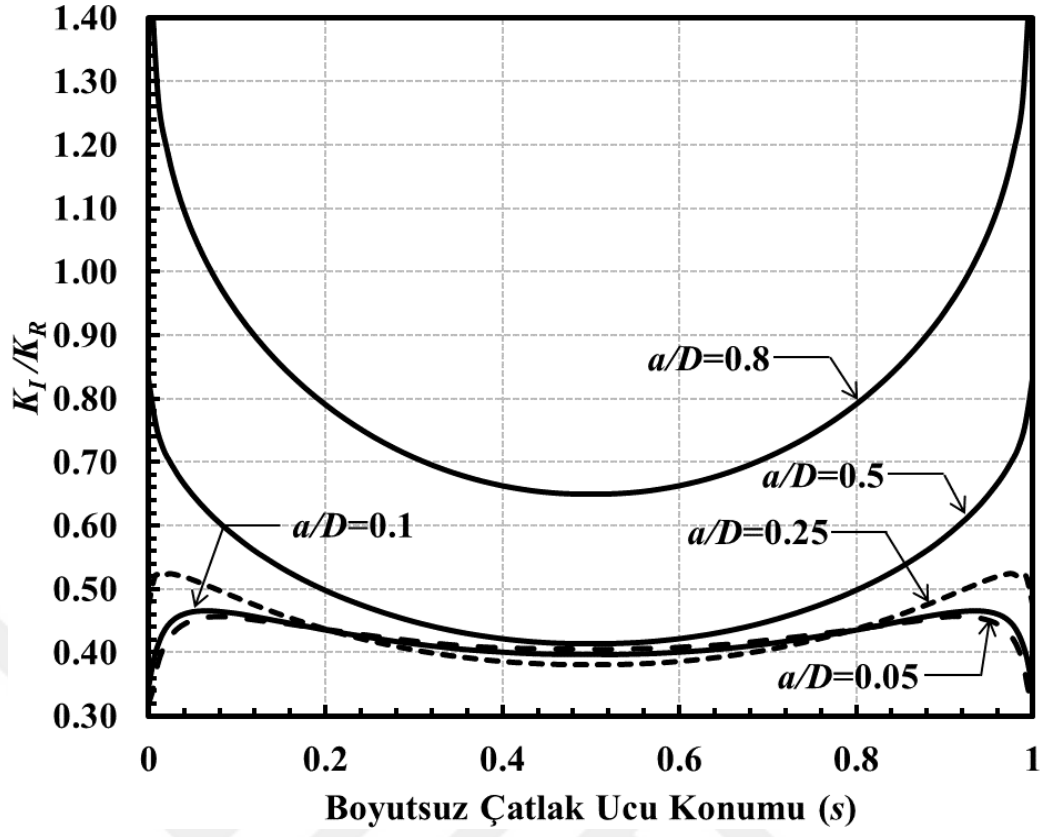
Şekil 3.265. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).



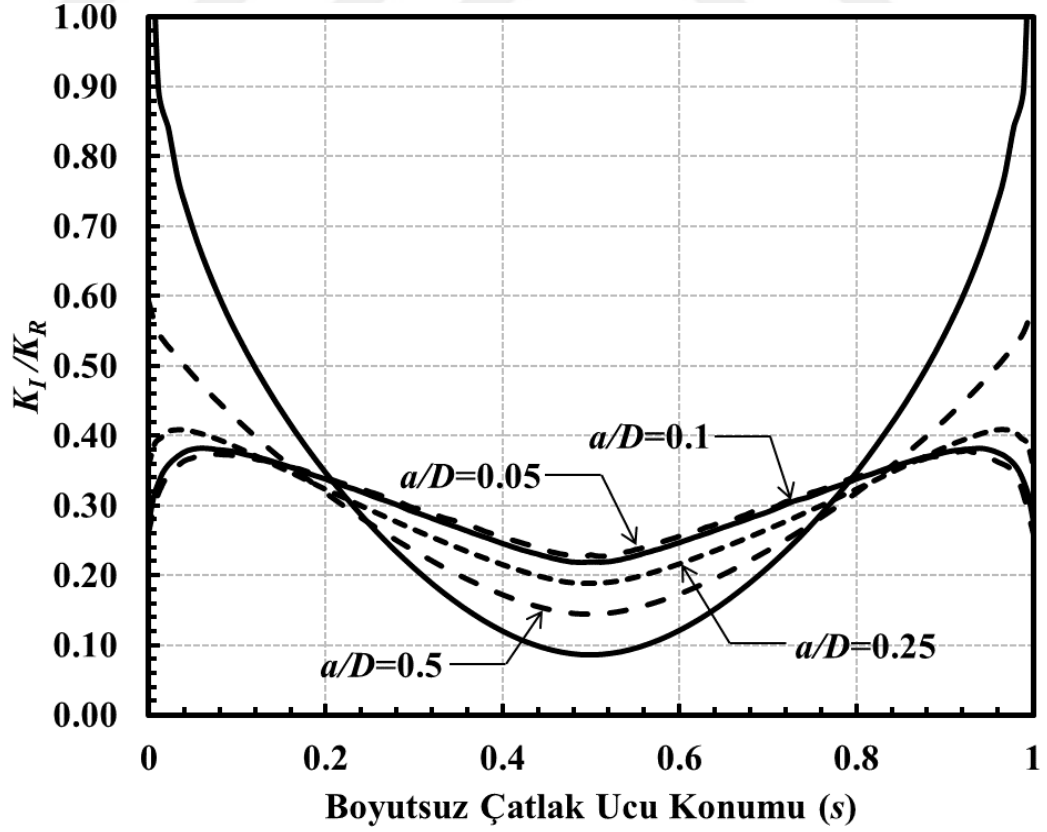
Şekil 3.266. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).



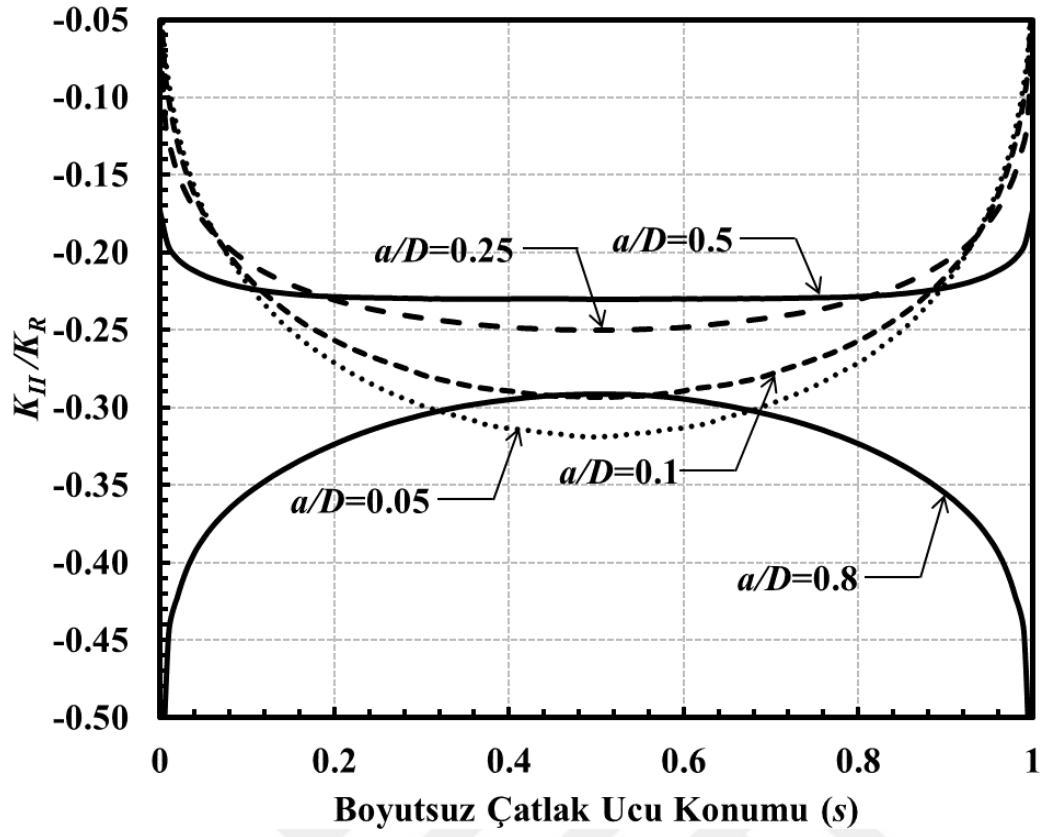
Şekil 3.267. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).



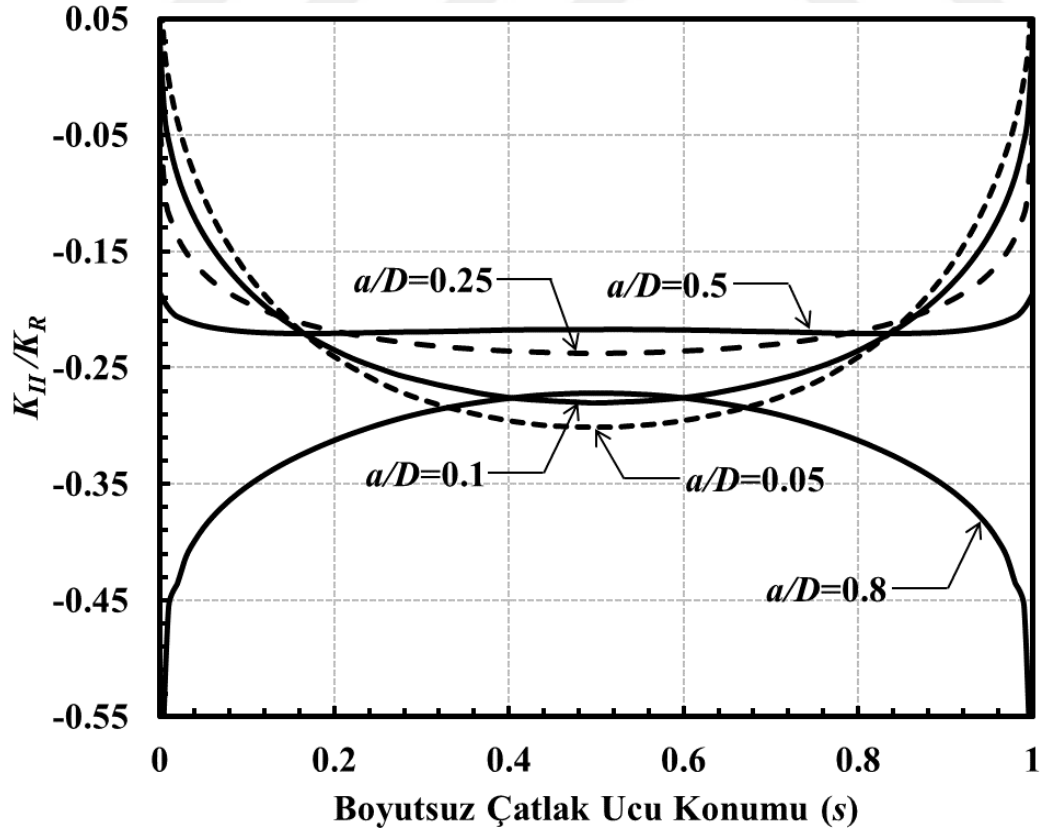
Şekil 3.268. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/c=1$).



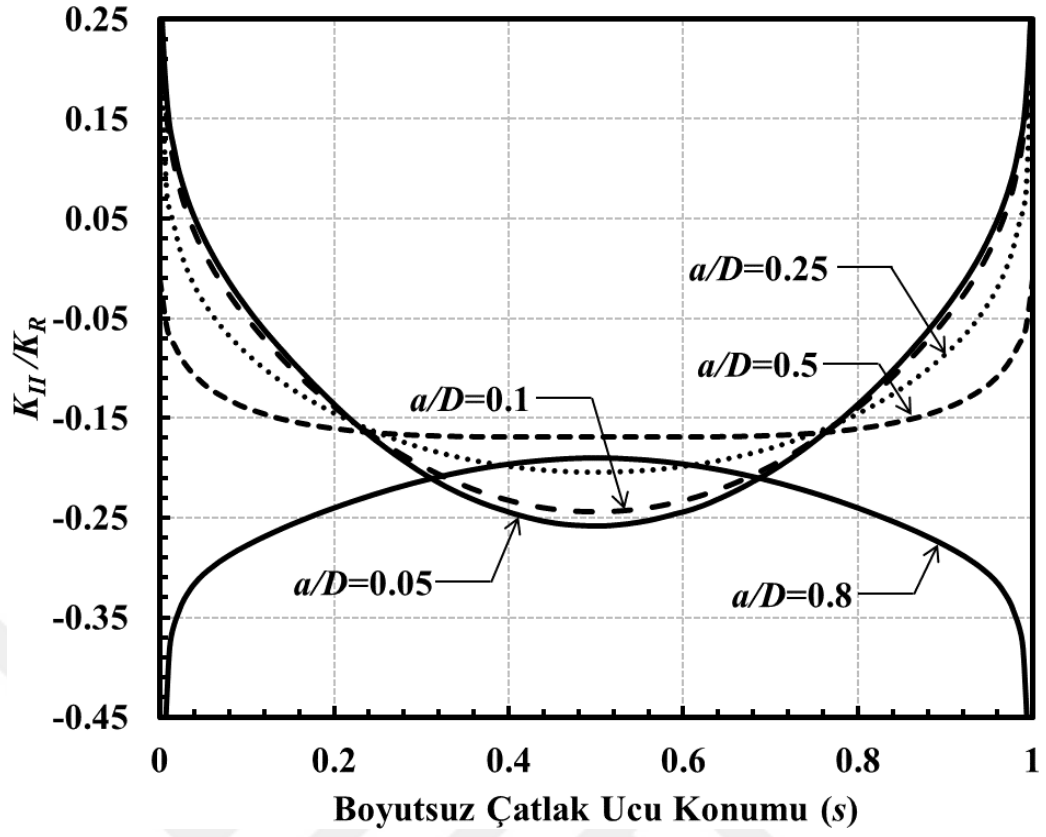
Şekil 3.269. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/c=2$).



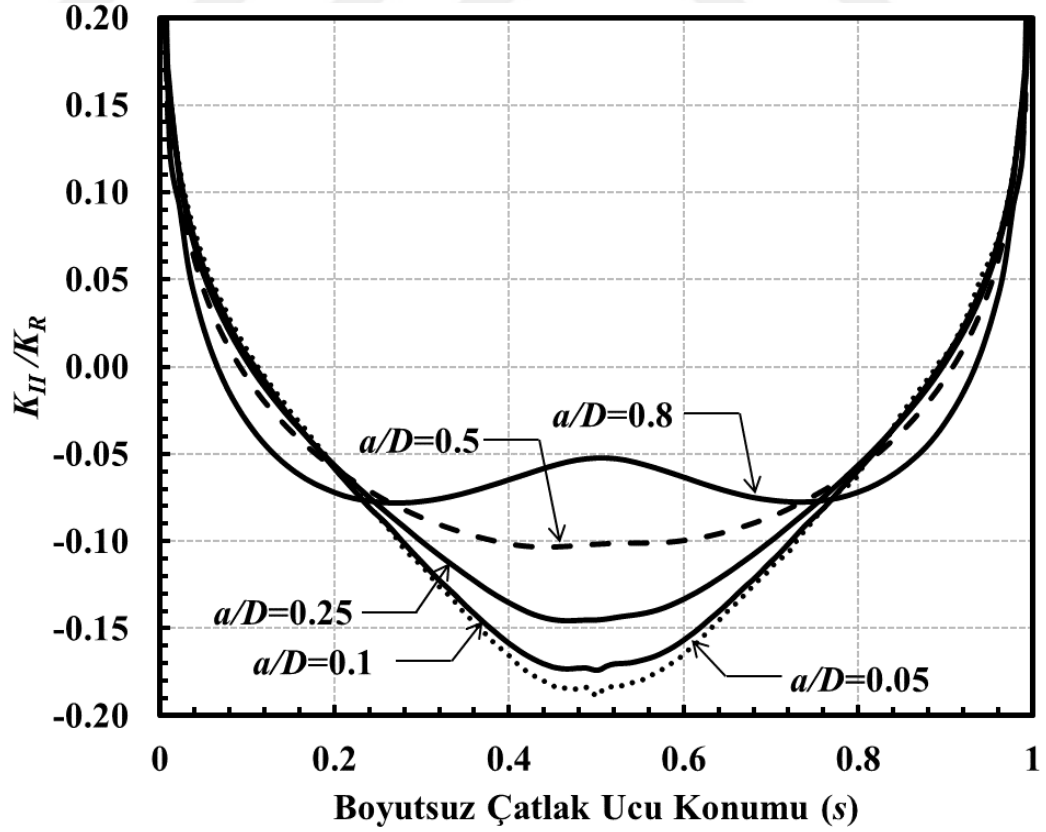
Şekil 3.270. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).



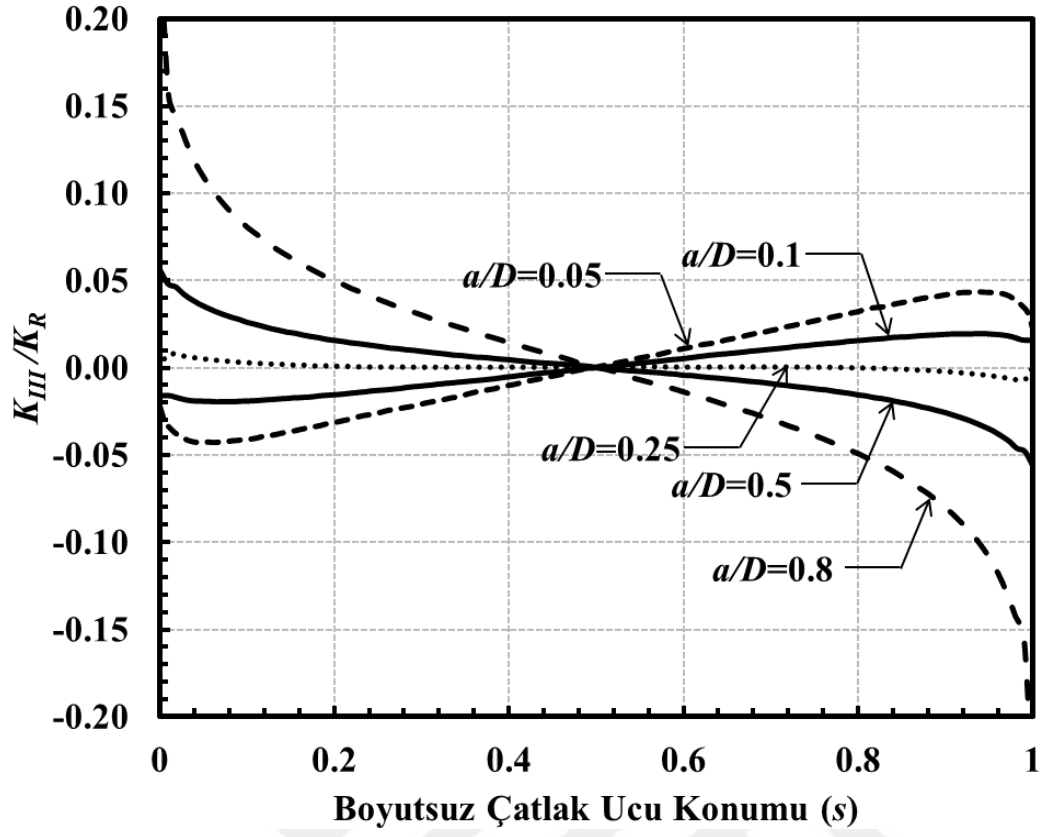
Şekil 3.271. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).



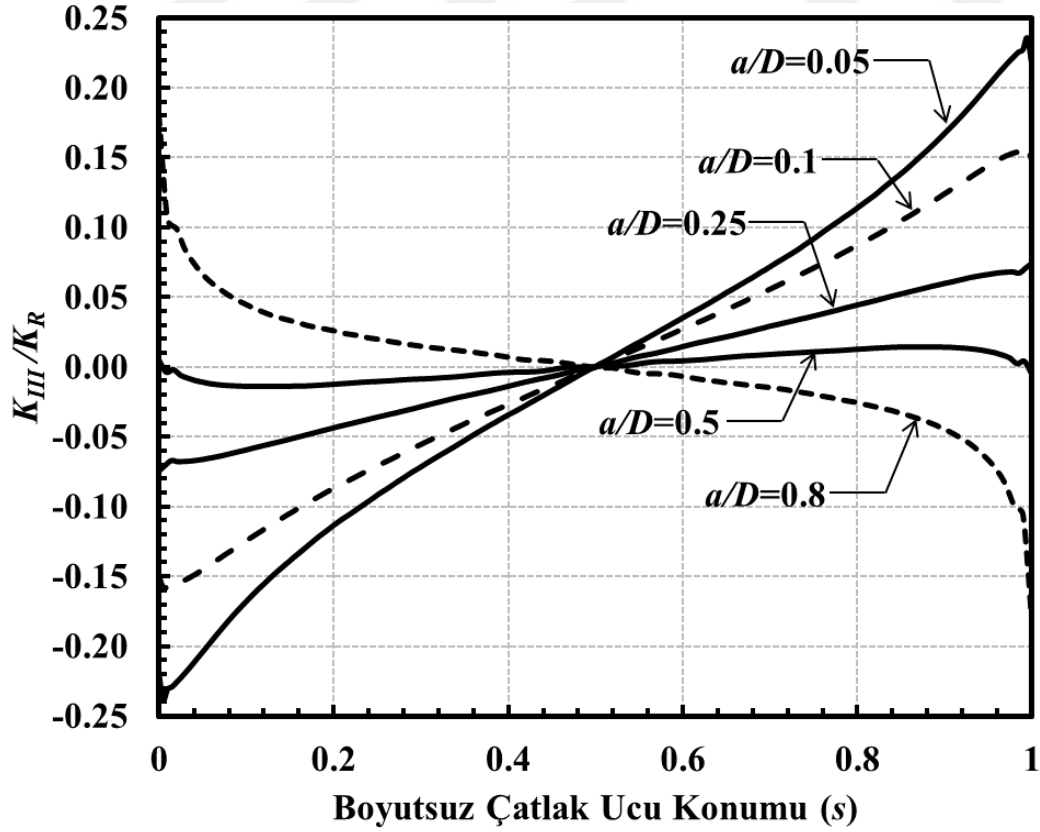
Şekil 3.272. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).



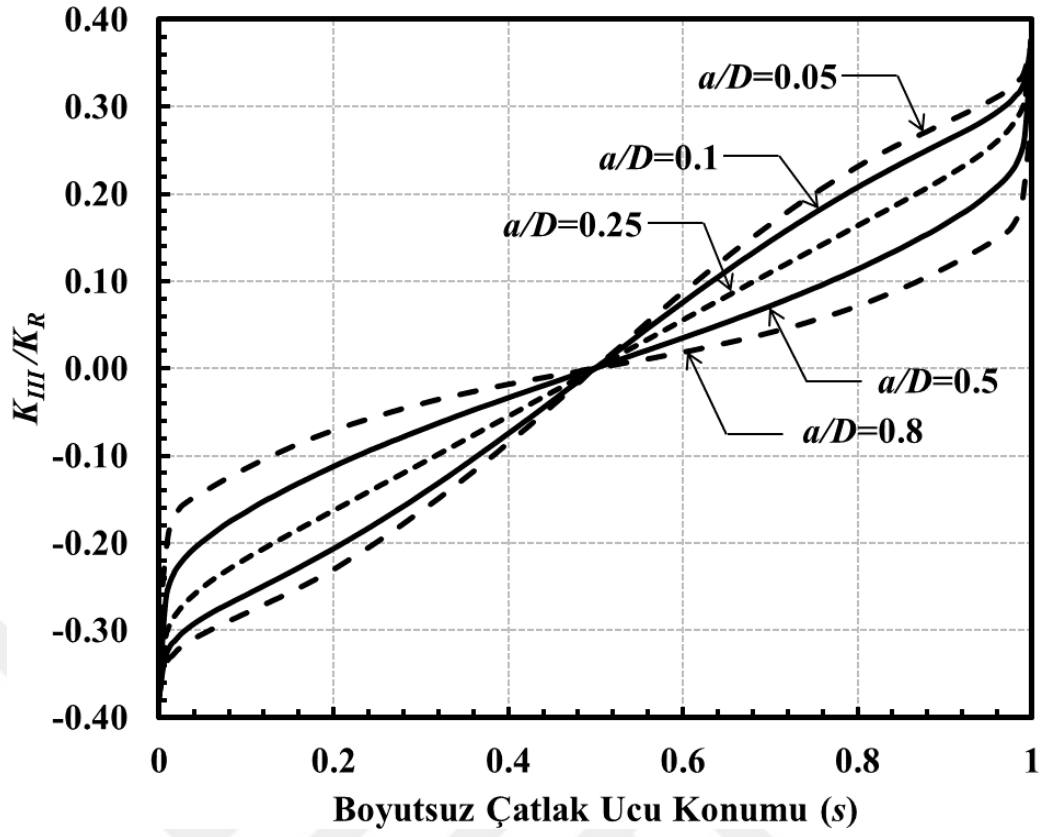
Şekil 3.273. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).



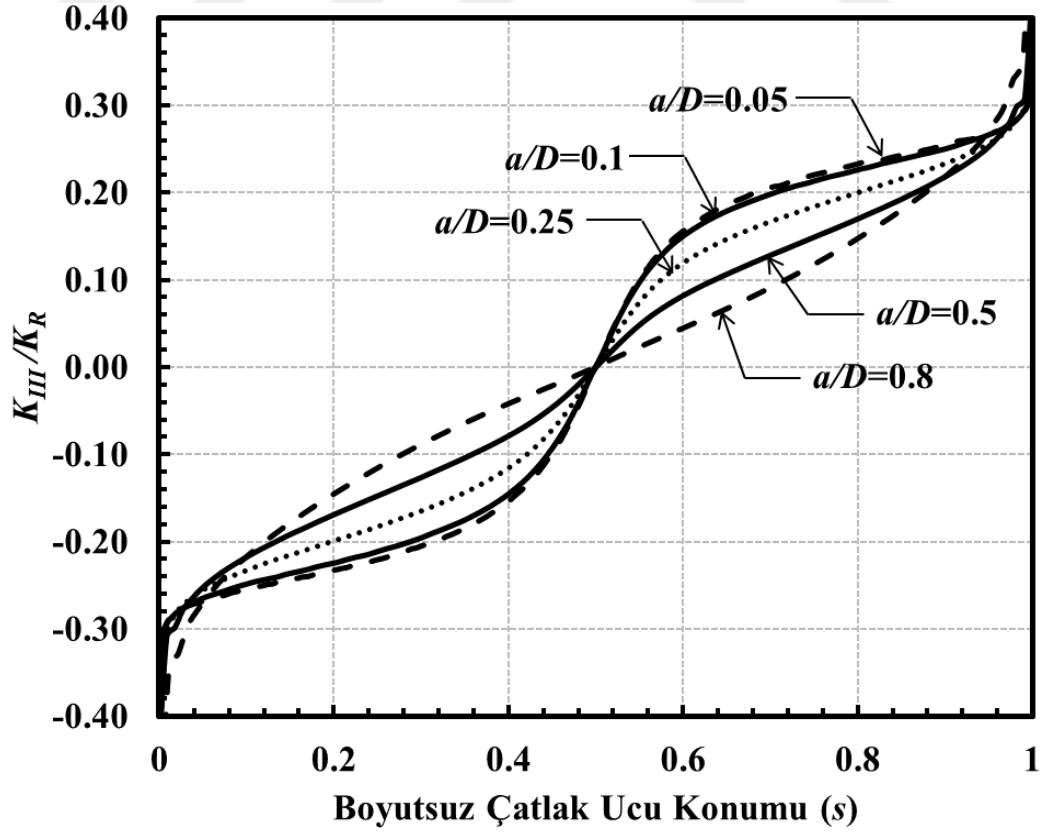
Şekil 3.274. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).



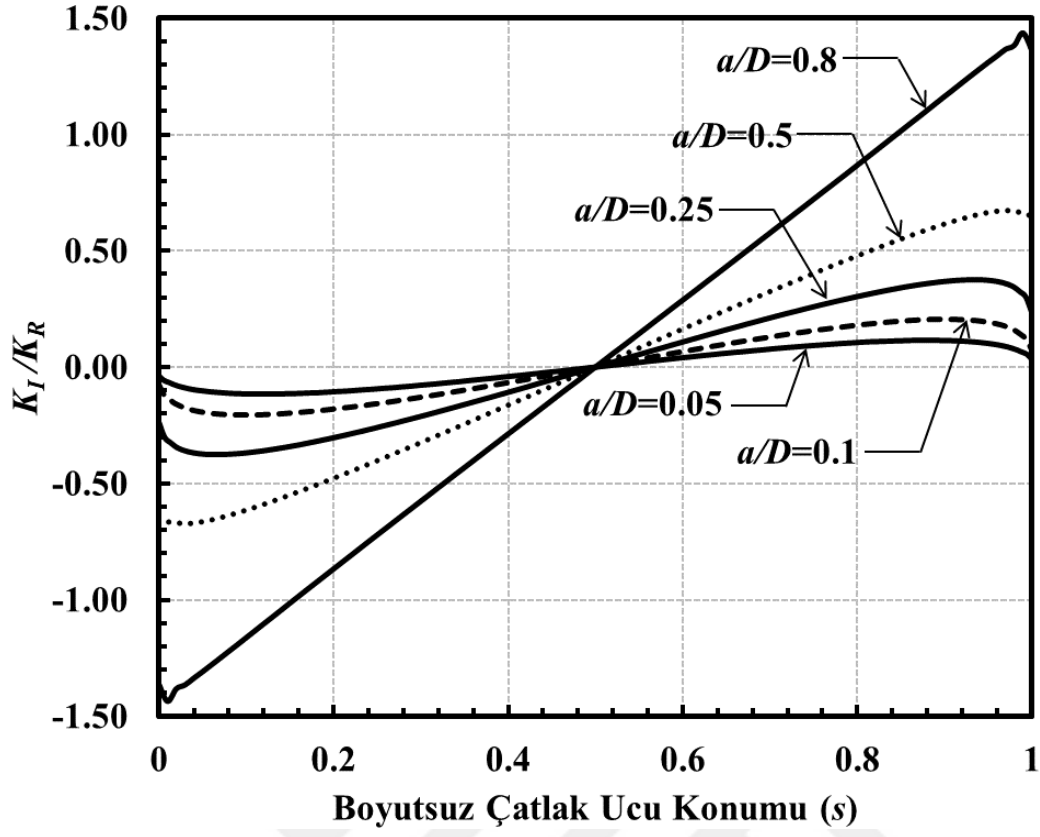
Şekil 3.275. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).



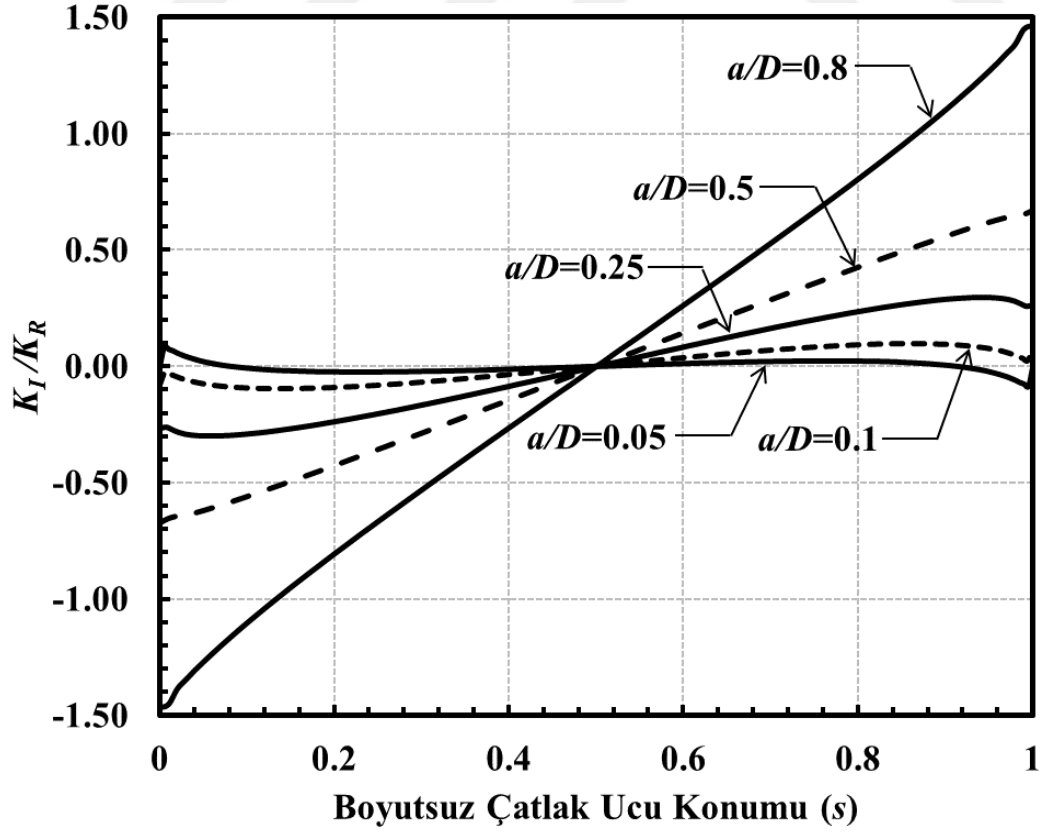
Şekil 3.276. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).



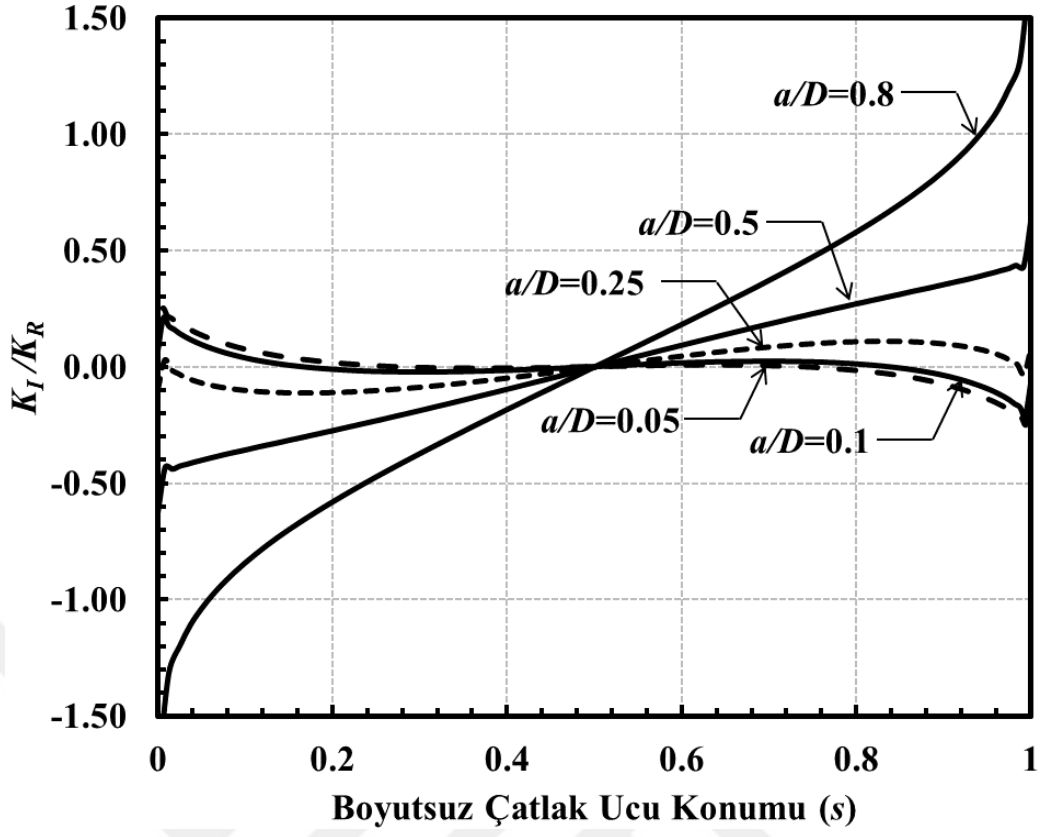
Şekil 3.277. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).



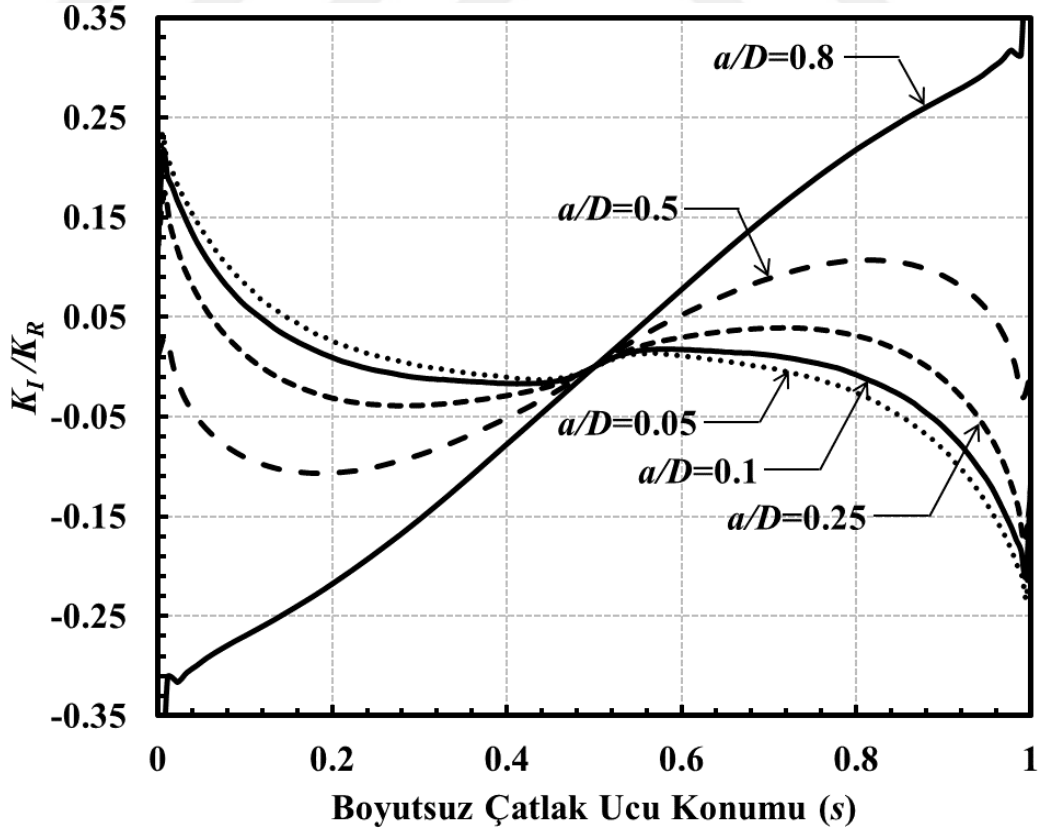
Şekil 3.278. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).



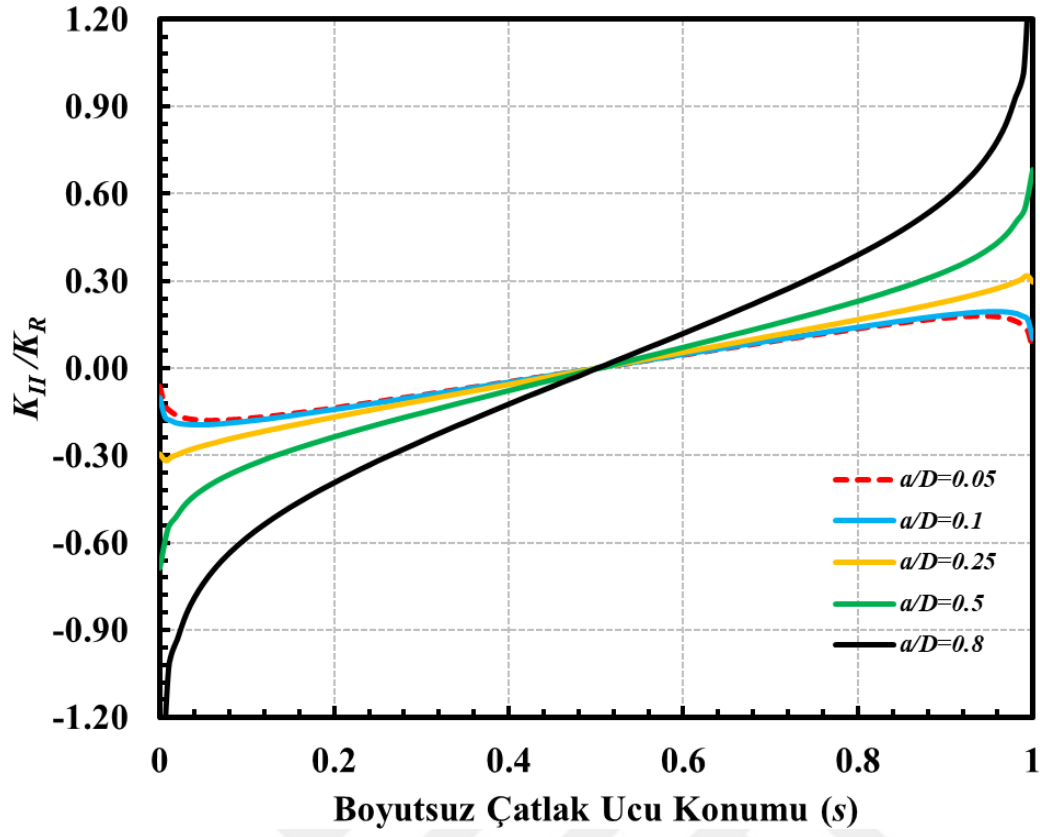
Şekil 3.279. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).



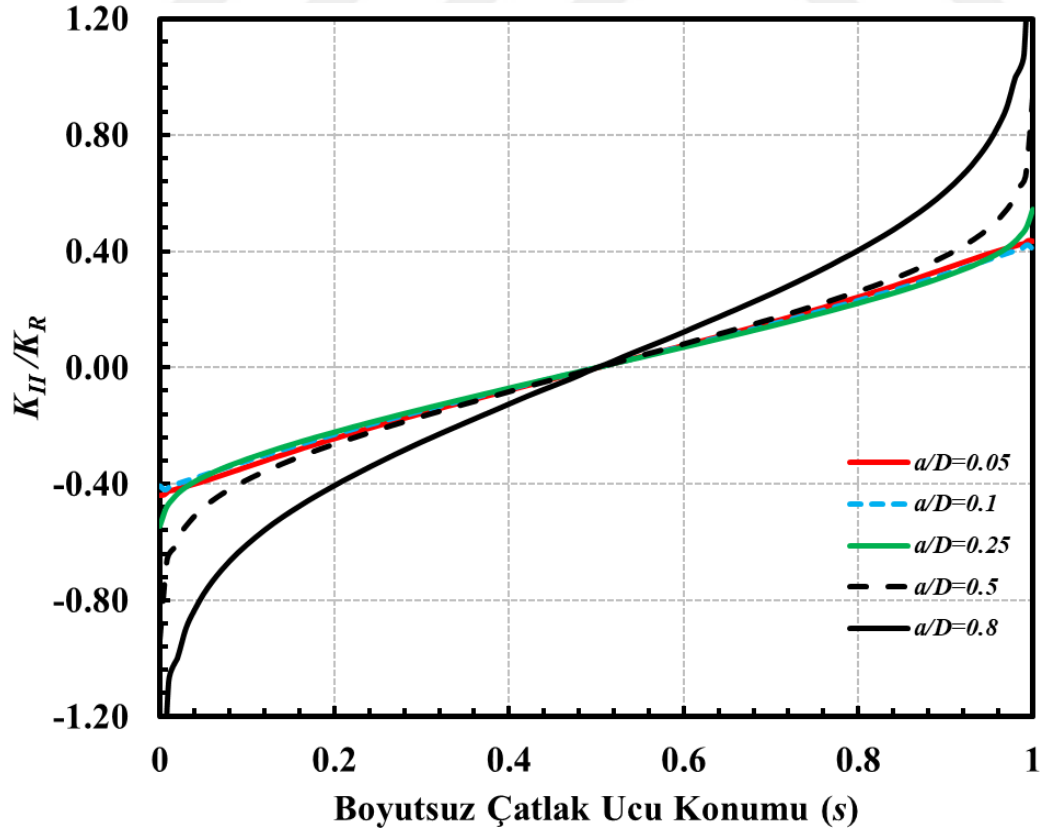
Şekil 3.280. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/c = 1$).



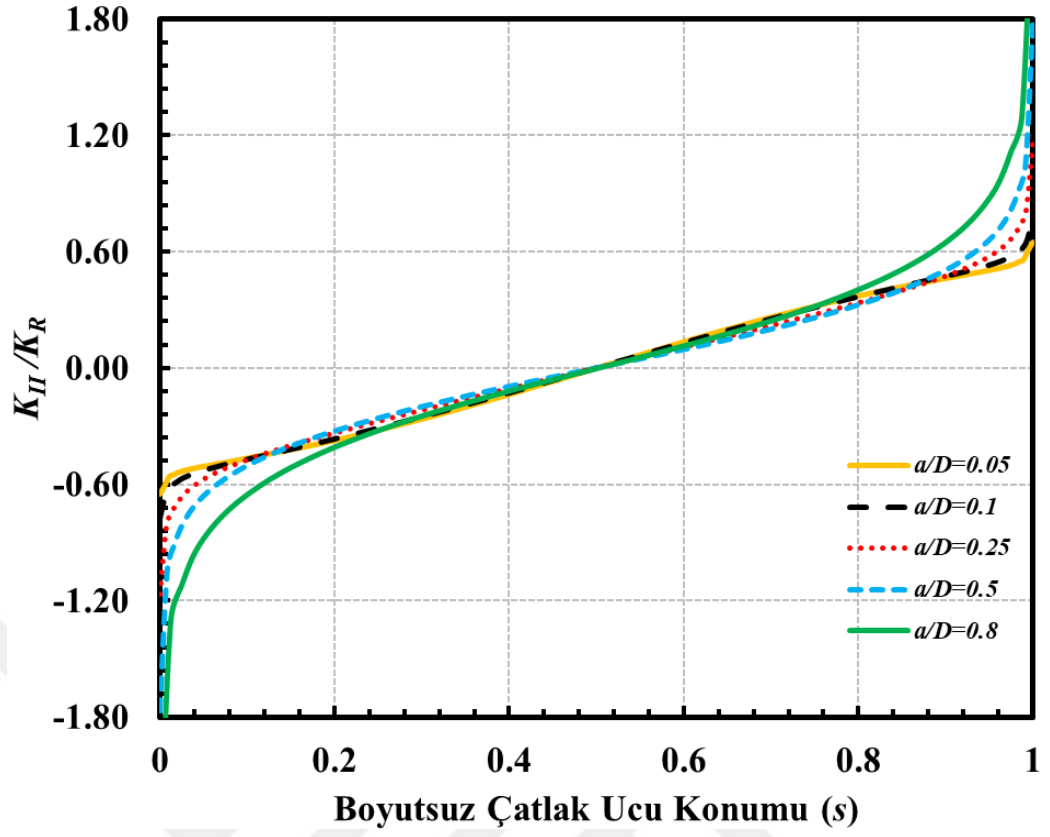
Şekil 3.281. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/c = 2$).



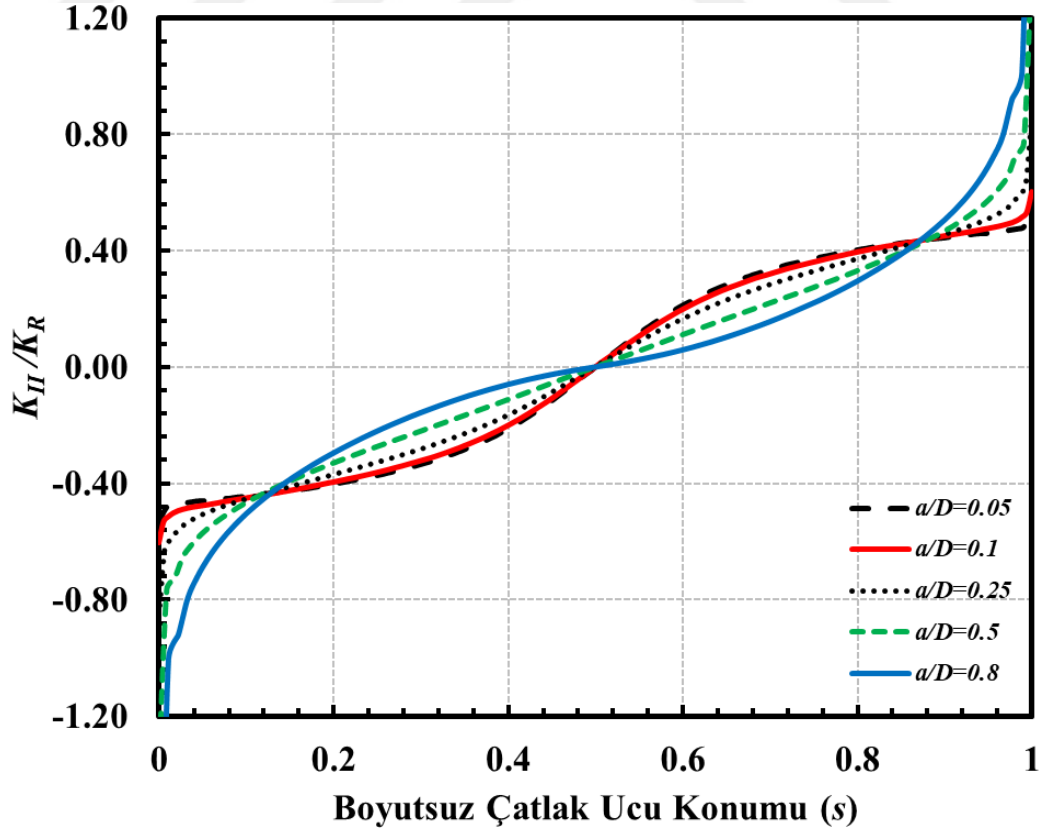
Şekil 3.282. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.25$).



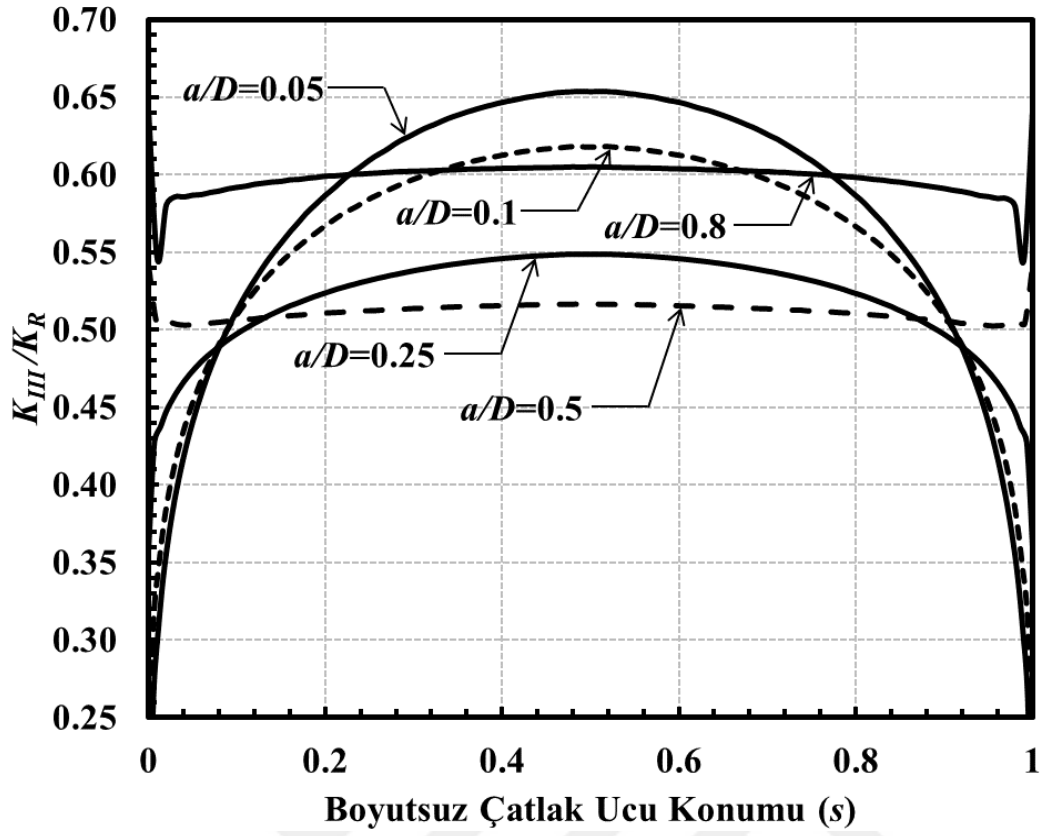
Şekil 3.283. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=0.5$).



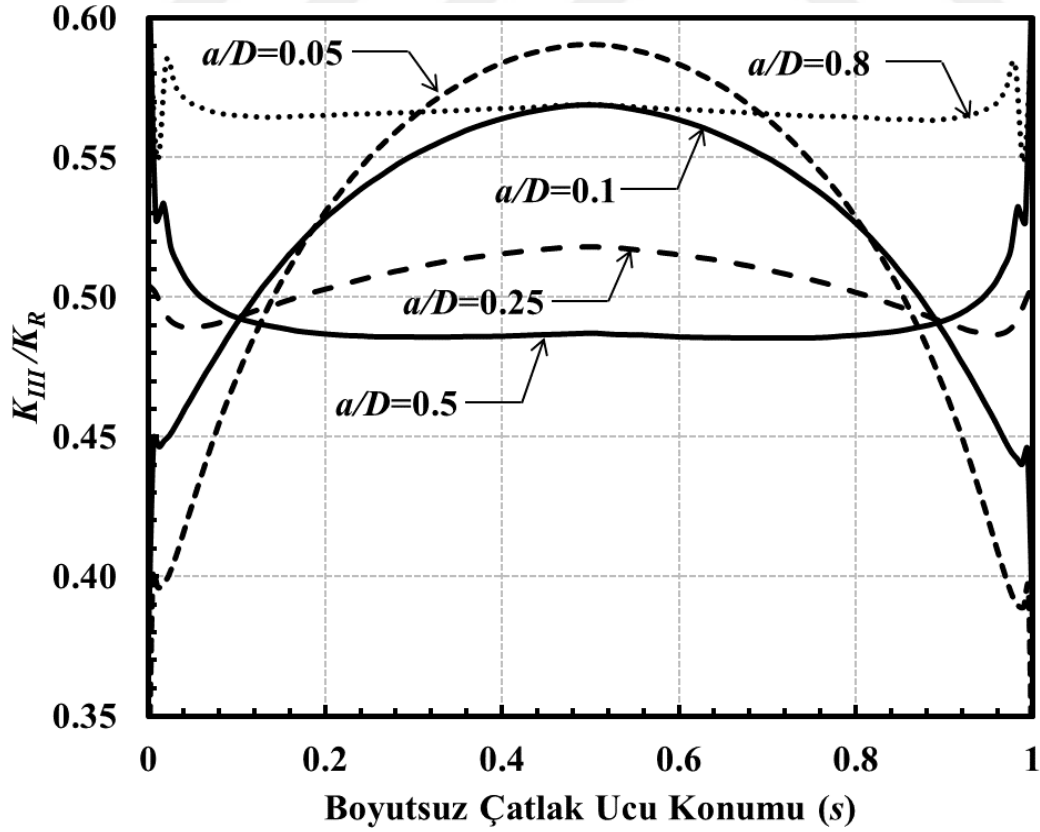
Şekil 3.284. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).



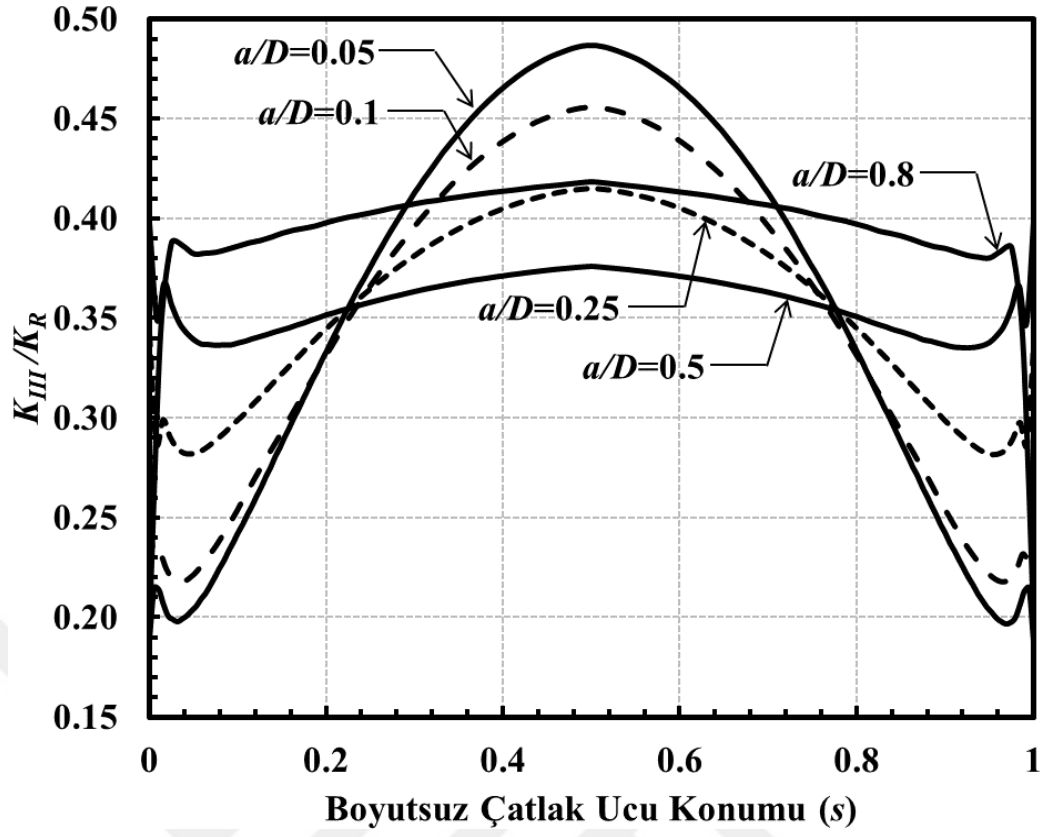
Şekil 3.285. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).



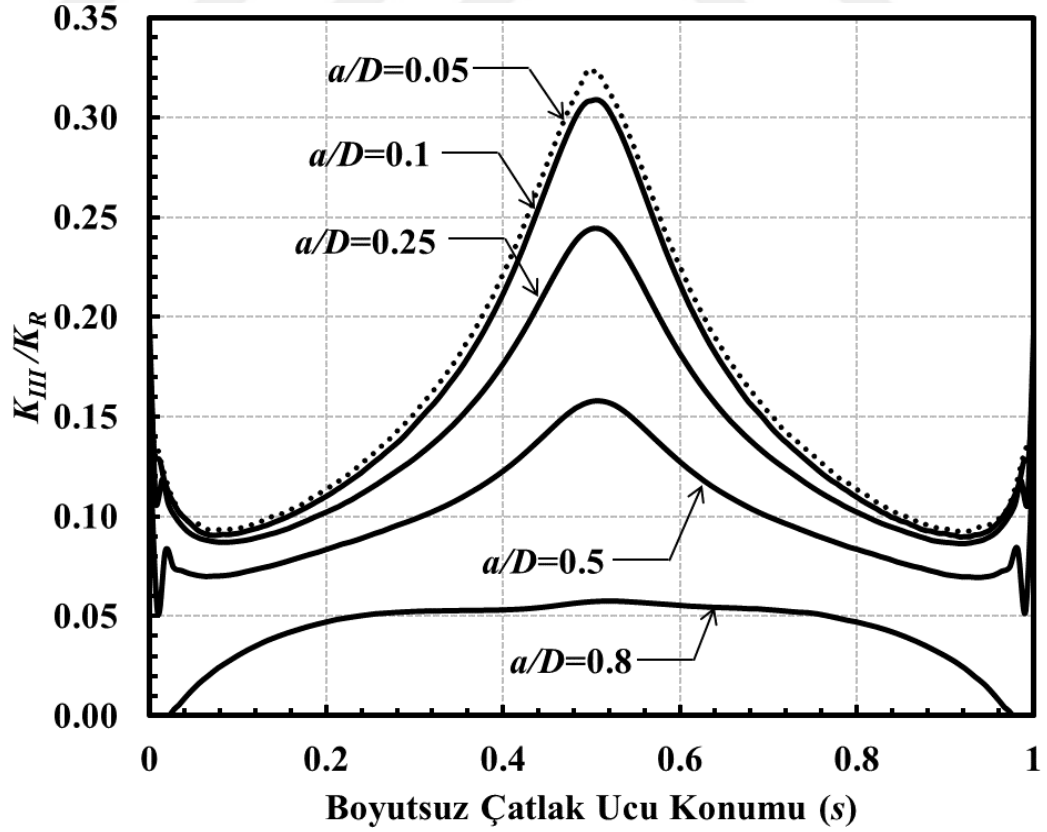
Şekil 3.286. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/c = 0.25$).



Şekil 3.287. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/c = 0.5$).



Şekil 3.288. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=1$).



Şekil 3.289. Sabit a/c için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/c=2$).

3.6. Çatlak Şekil Oranı (a/c) Parametresinin Etkileri

Çatlak şekil oranı parametre etkilerinde her bir grafikte farklı a/D (0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8) oranı sabit tutularak $\alpha = 45^\circ$ için farklı a/c (0.25, 0.5, 1.0, 2.0) oranlarında boyutsuz K dağılımları mukayese edilmiştir.

3.6.1. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak

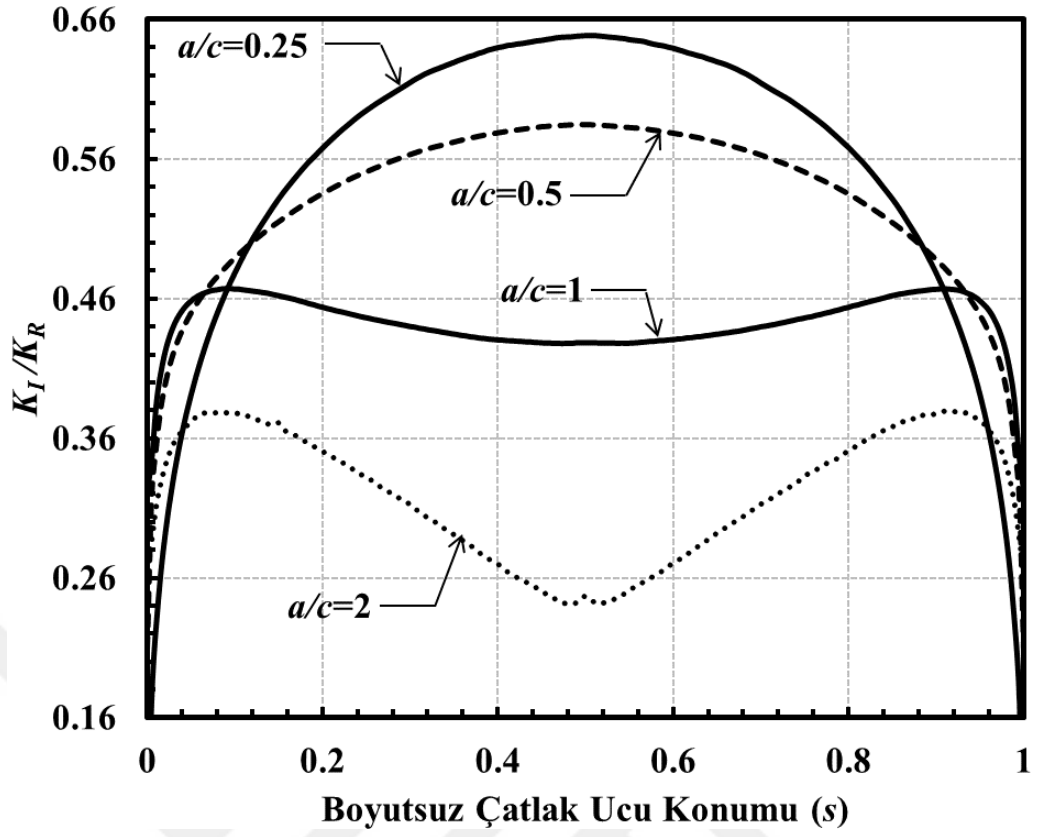
Eksenel gerilme yükü altında boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} dağılımlarının, a/D oranı sabit tutularak farklı çatlak şekil oranları (a/c) değerleri için kıyaslamaları sırasıyla Şekil 3.290-3.304'te gösterilmiştir. a/c değeri arttıkça derinlik noktasındaki boyutsuz K_I değerleri azalmaktadır. Boyutsuz K_{II} değerlerinin şiddeti, a/c değeri arttıkça negatif yönde azalmaktadır. Boyutsuz K_{III} dağılımları da, sırasıyla Şekil 3.300–3.304'te görülmektedir.

3.6.2. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak

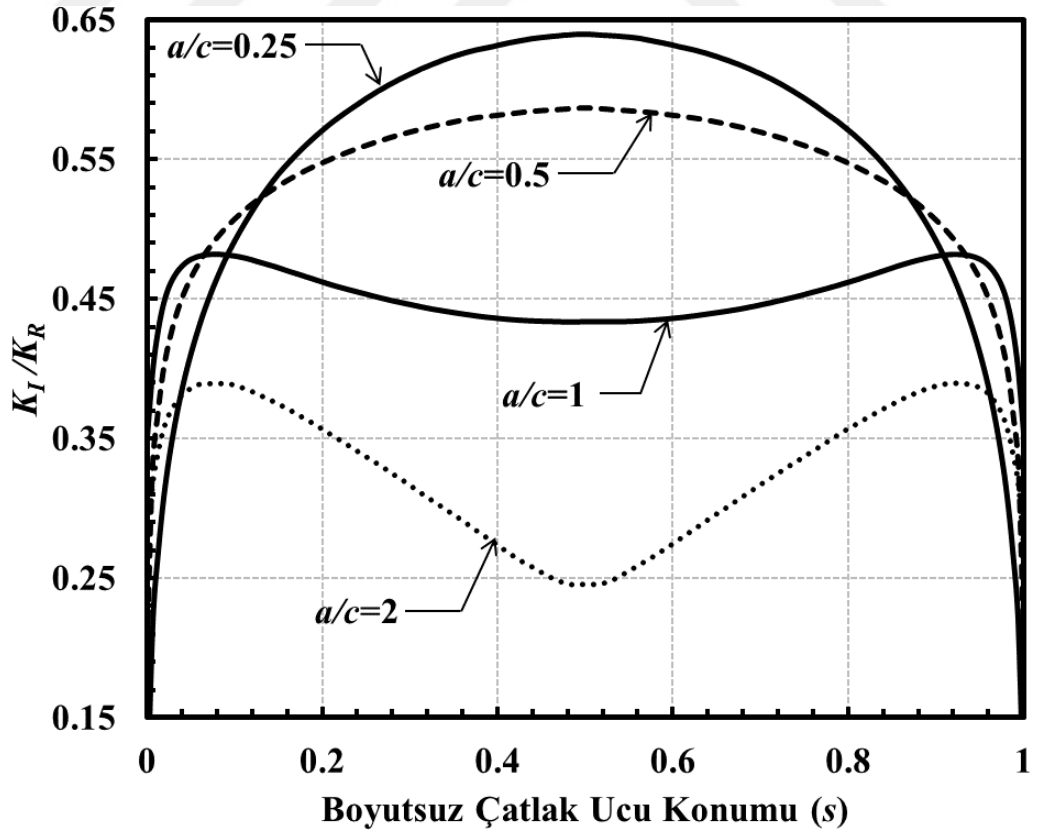
Eğilme yükü altında boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} dağılımlarının, a/D oranı sabit tutularak farklı çatlak şekil oranları (a/c) için kıyaslamaları sırasıyla Şekil 3.305 –3.319 'da verilmiştir. a/c değeri arttıkça derinlik noktasındaki boyutsuz K_I değerleri azalmaktadır. a/c değeri arttıkça derinlik noktasındaki boyutsuz K_{II} değerlerinin şiddeti azalmaktadır. Boyutsuz K_{III} dağılımları da, sırasıyla Şekil 3.315 –3.319'da görülmektedir.

3.6.3. Burulma yüküne maruz dönmüş çatlak

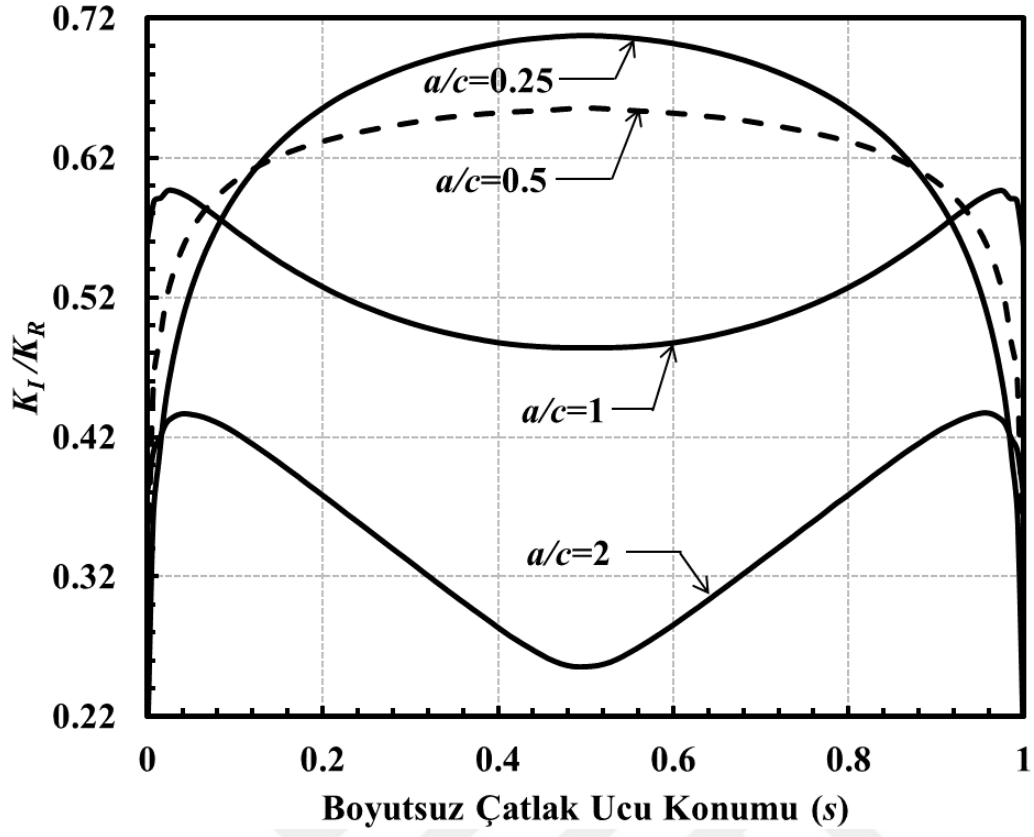
Burulma yükü altında boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} dağılımları a/D oranı sabit tutularak farklı çatlak şekil oranları (a/c) için kıyaslamaları sırasıyla Şekil 3.320-3.334'te verilmiştir. Derinlik noktasındaki boyutsuz K_{III} değerlerinin şiddeti a/c değeri arttıkça azalmaktadır.



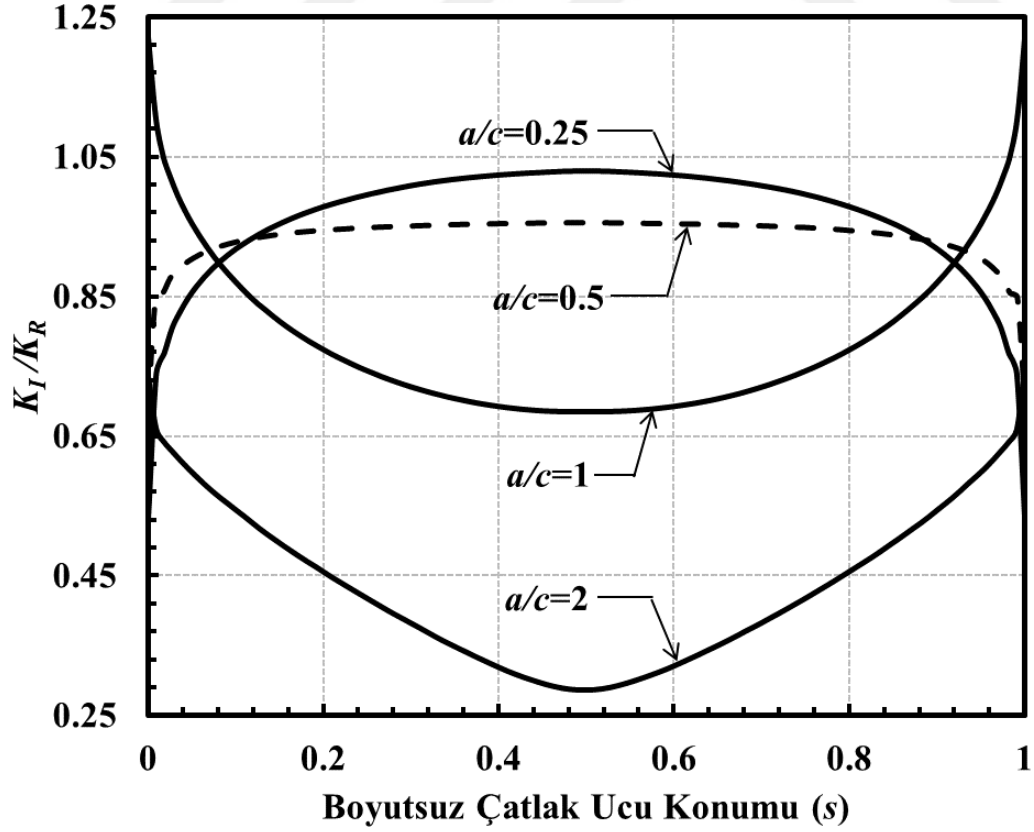
Şekil 3.290. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).



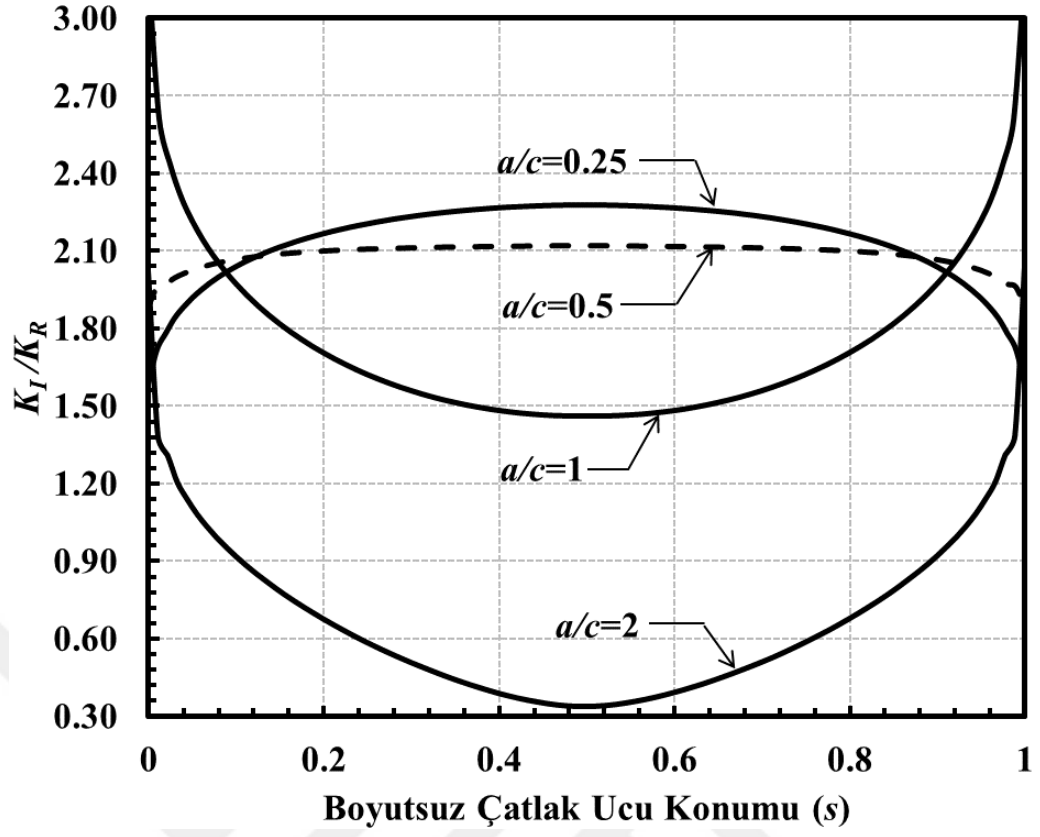
Şekil 3.291. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).



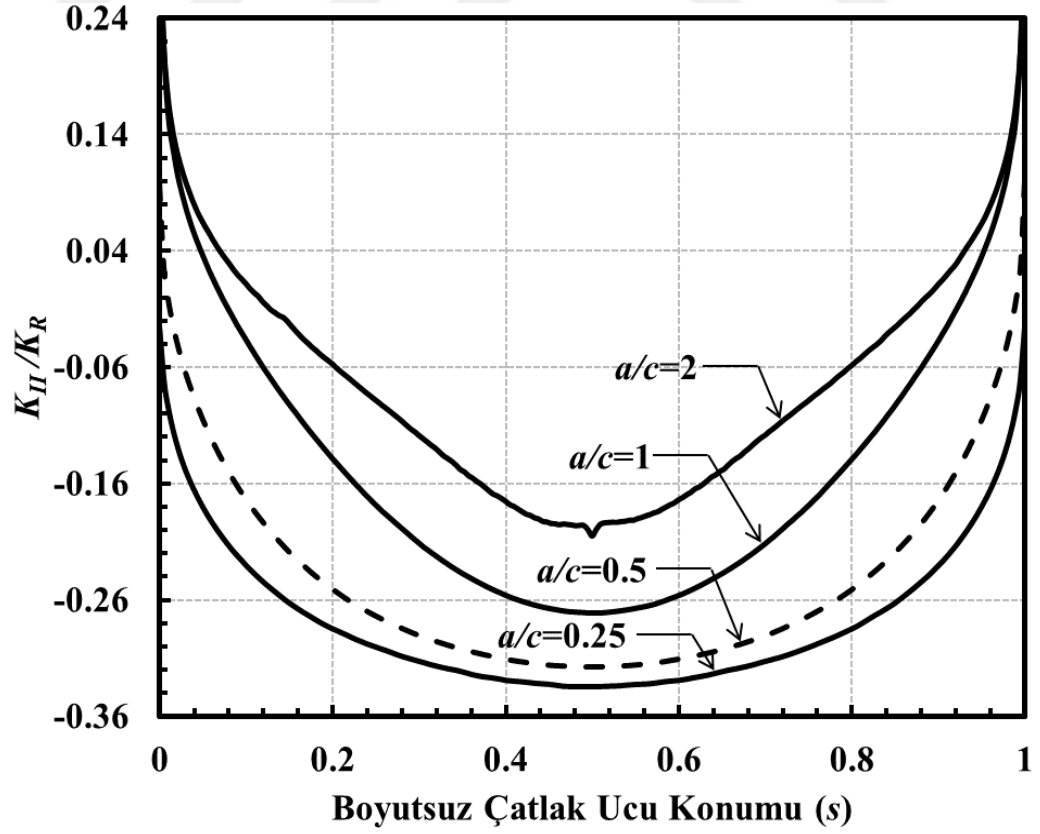
Şekil 3.292. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.25$).



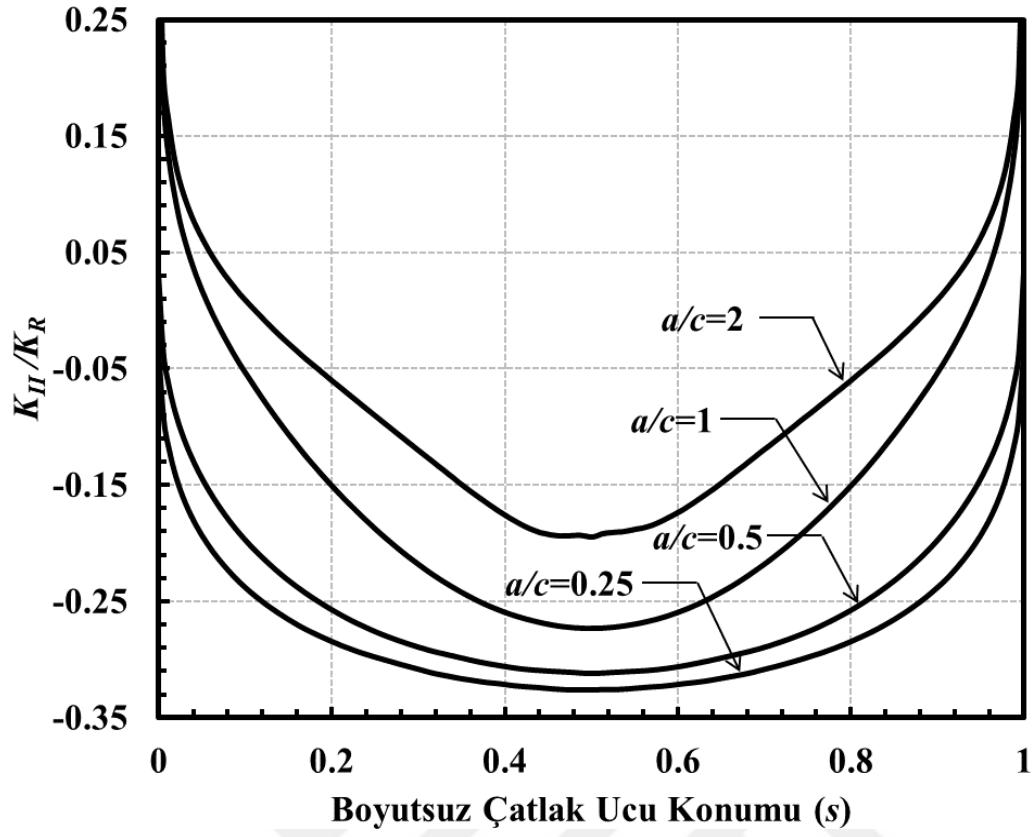
Şekil 3.293. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.5$).



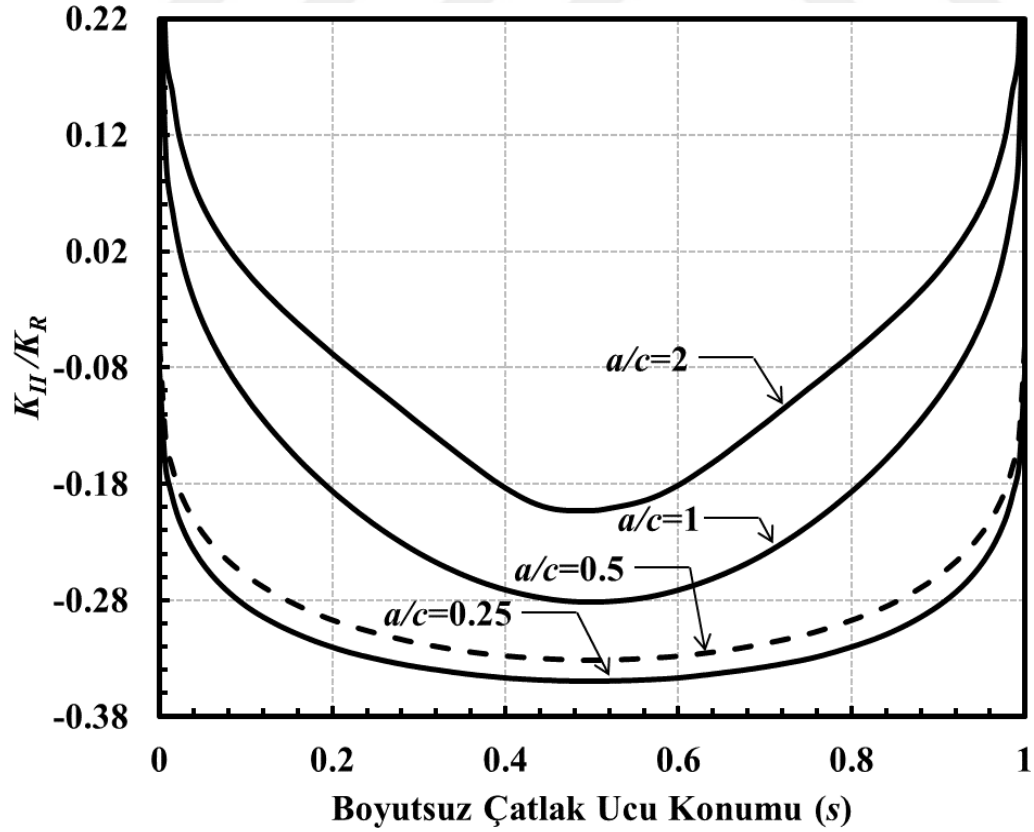
Şekil 3.294. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).



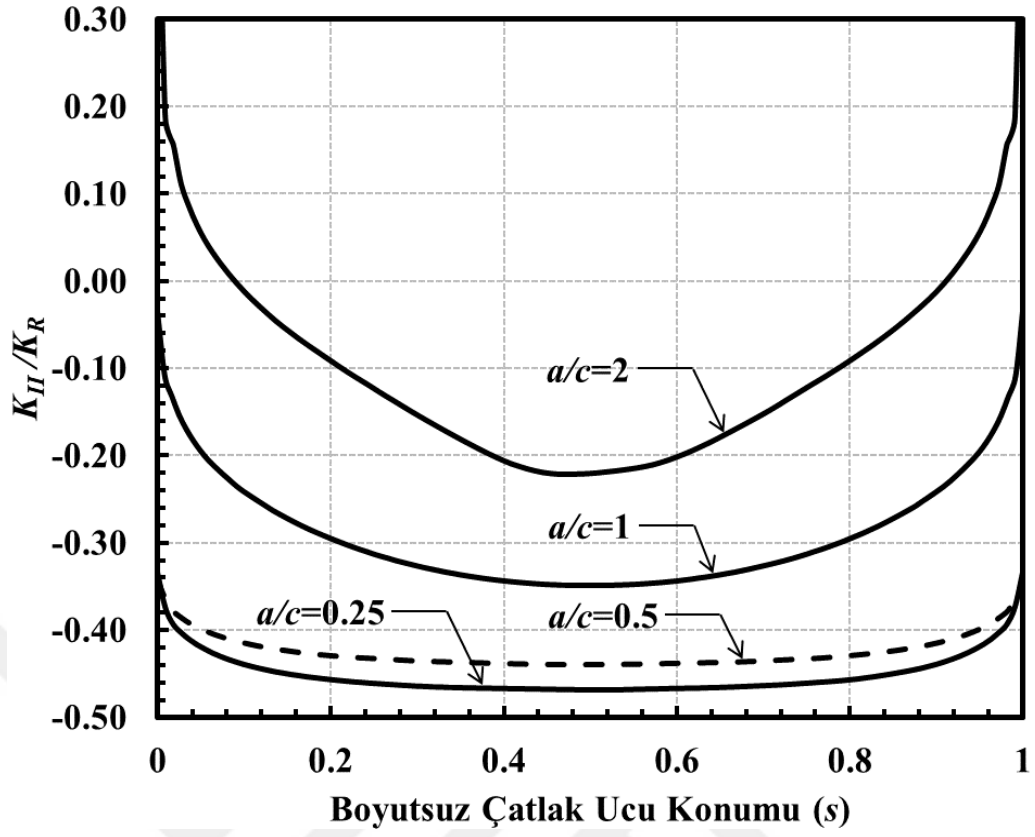
Şekil 3.295. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).



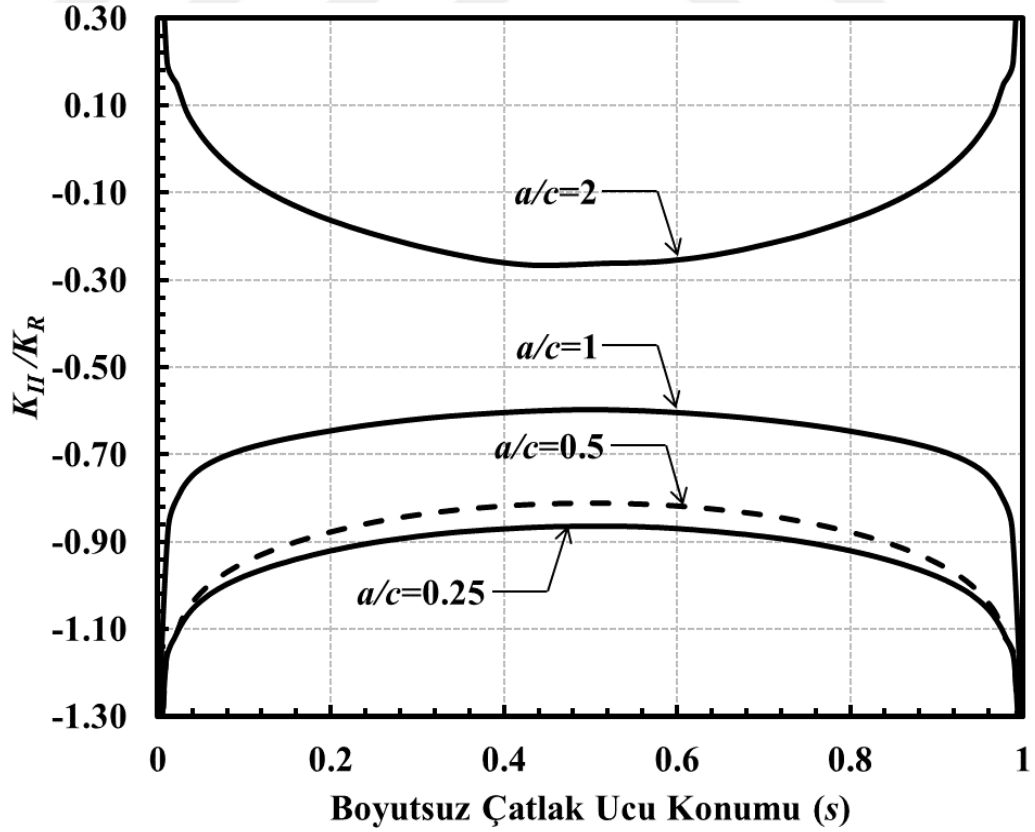
Şekil 3.296. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D=0.1$).



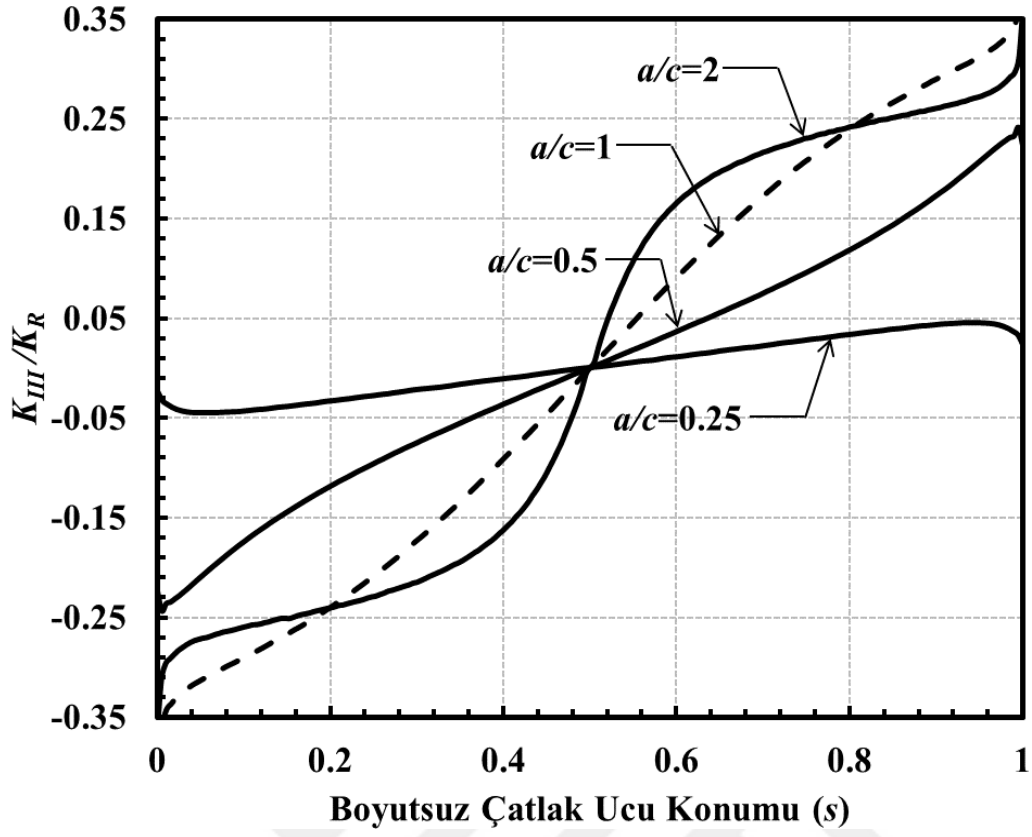
Şekil 3.297. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D=0.25$).



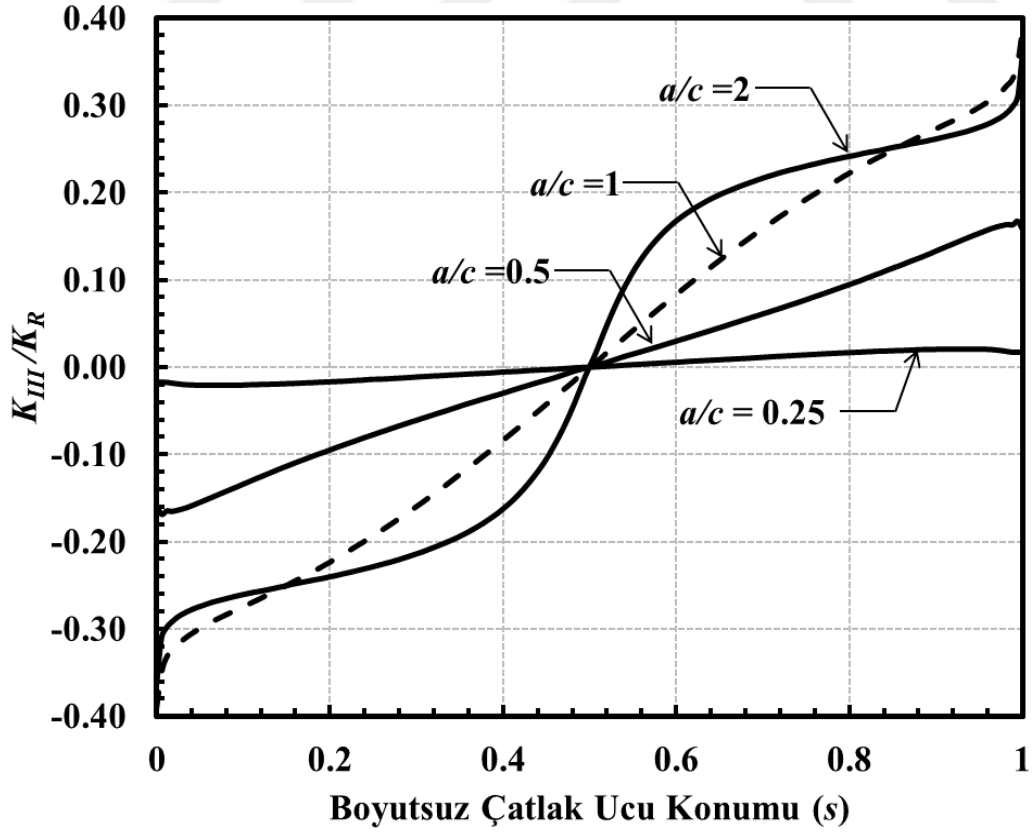
Şekil 3.298. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.5$).



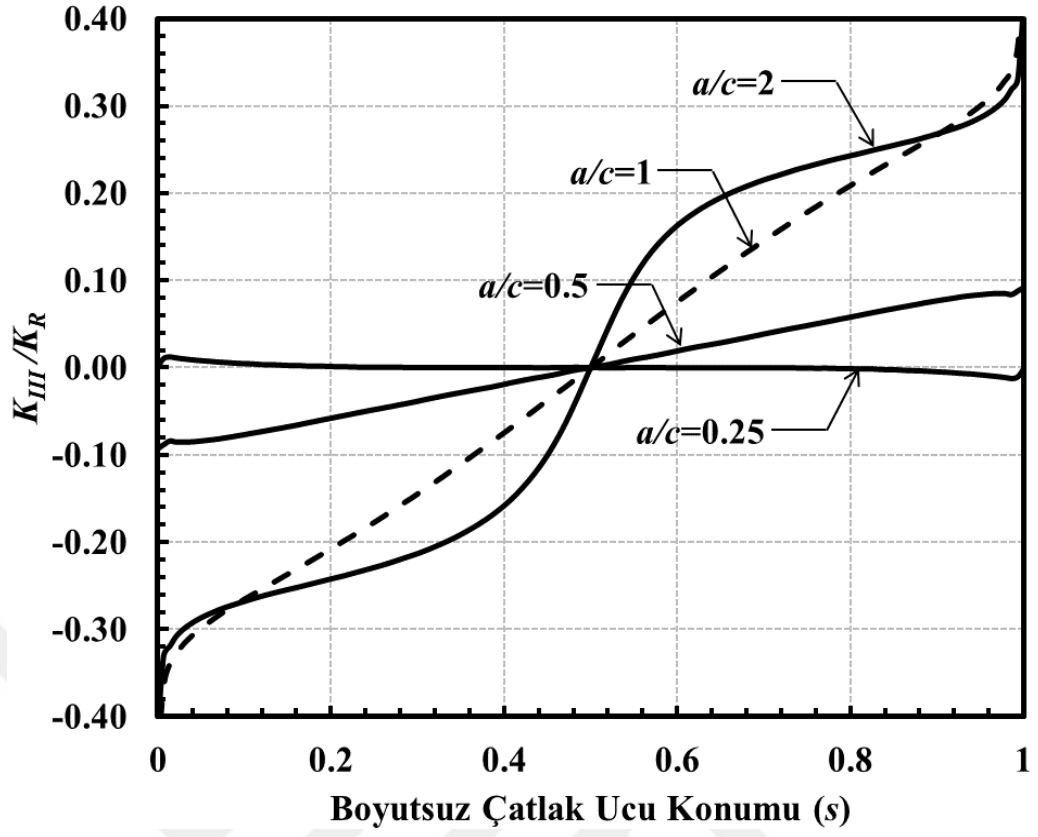
Şekil 3.299. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.8$).



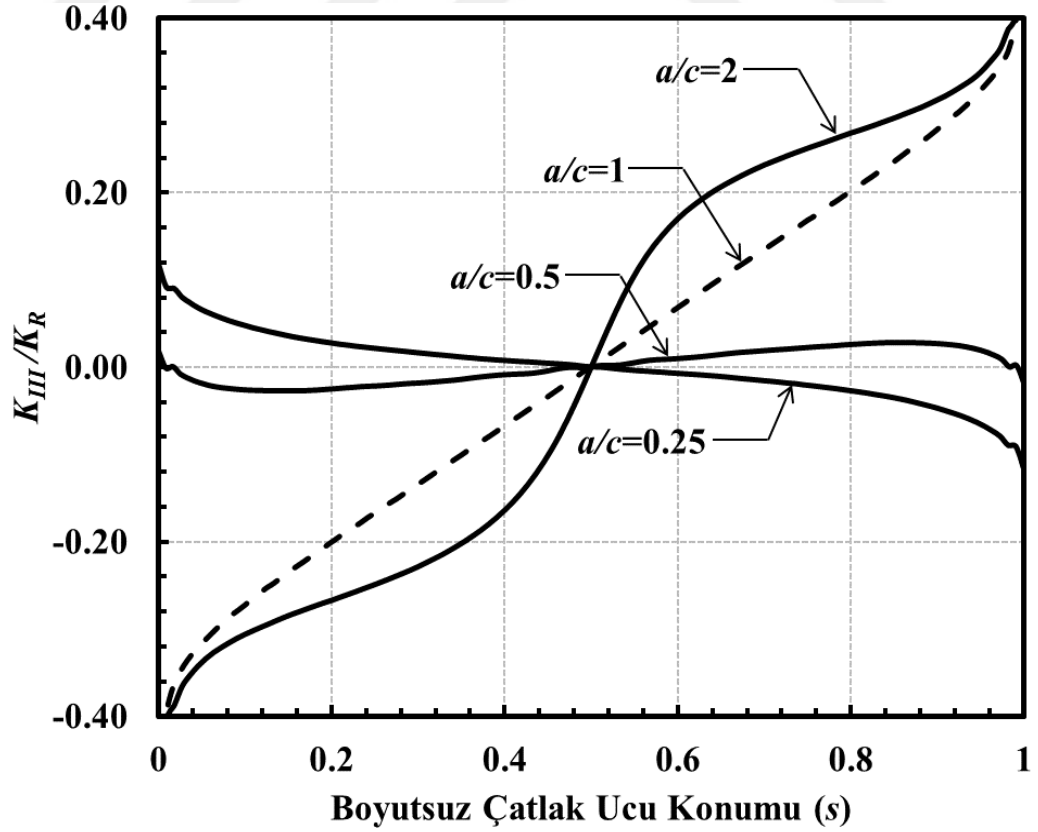
Şekil 3.300. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.05$).



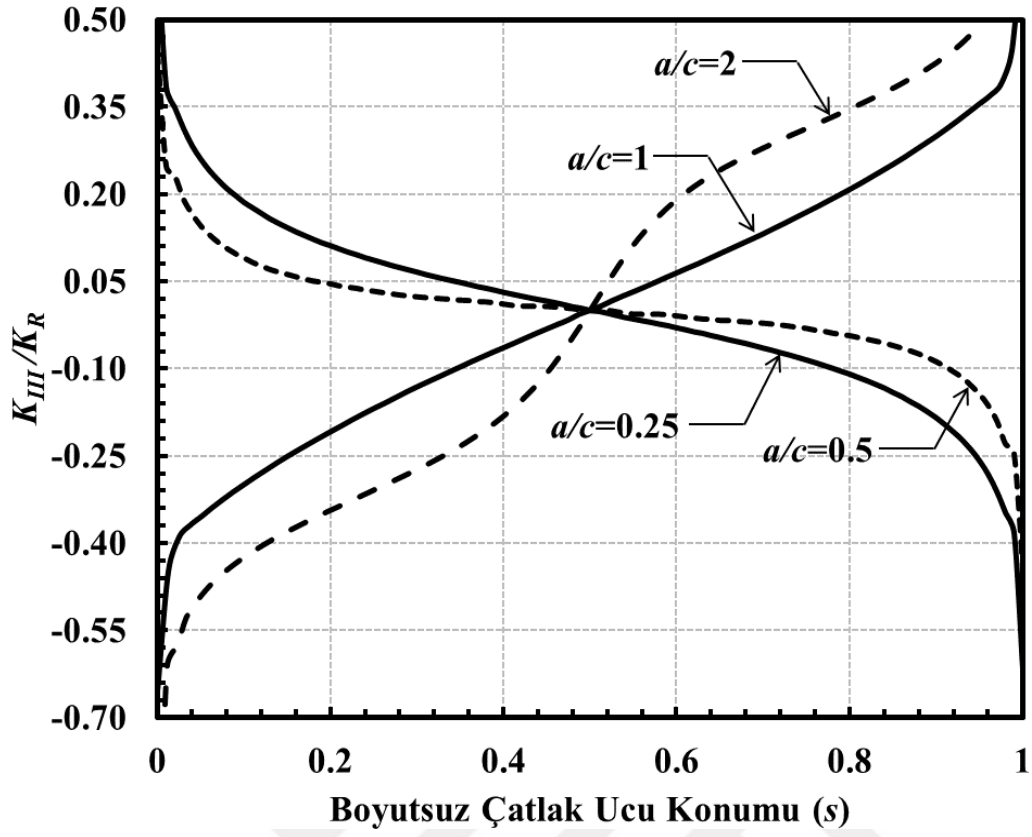
Şekil 3.301. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.1$).



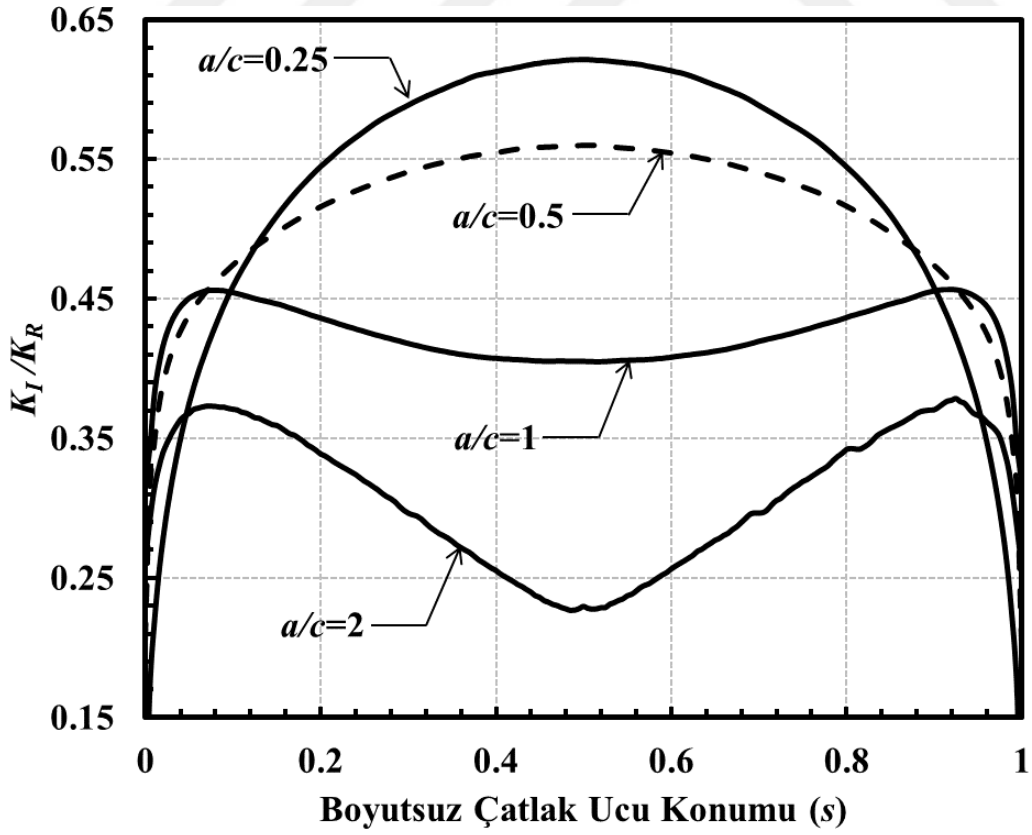
Şekil 3.302. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).



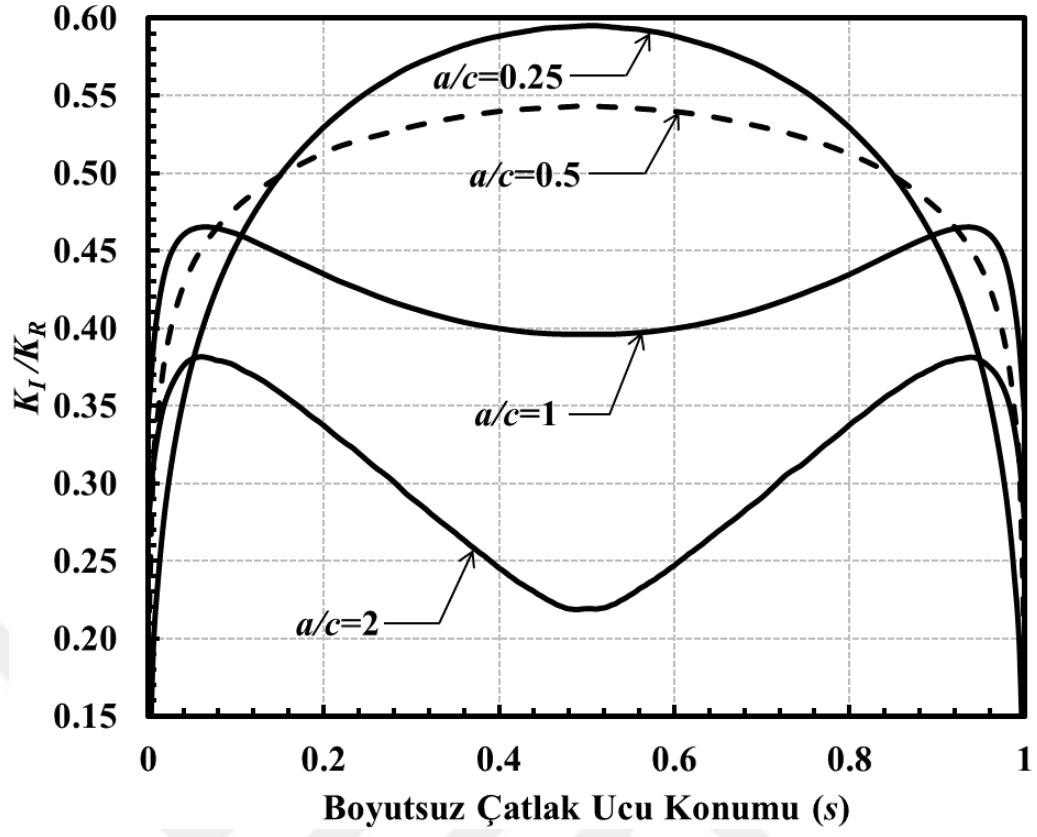
Şekil 3.303. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).



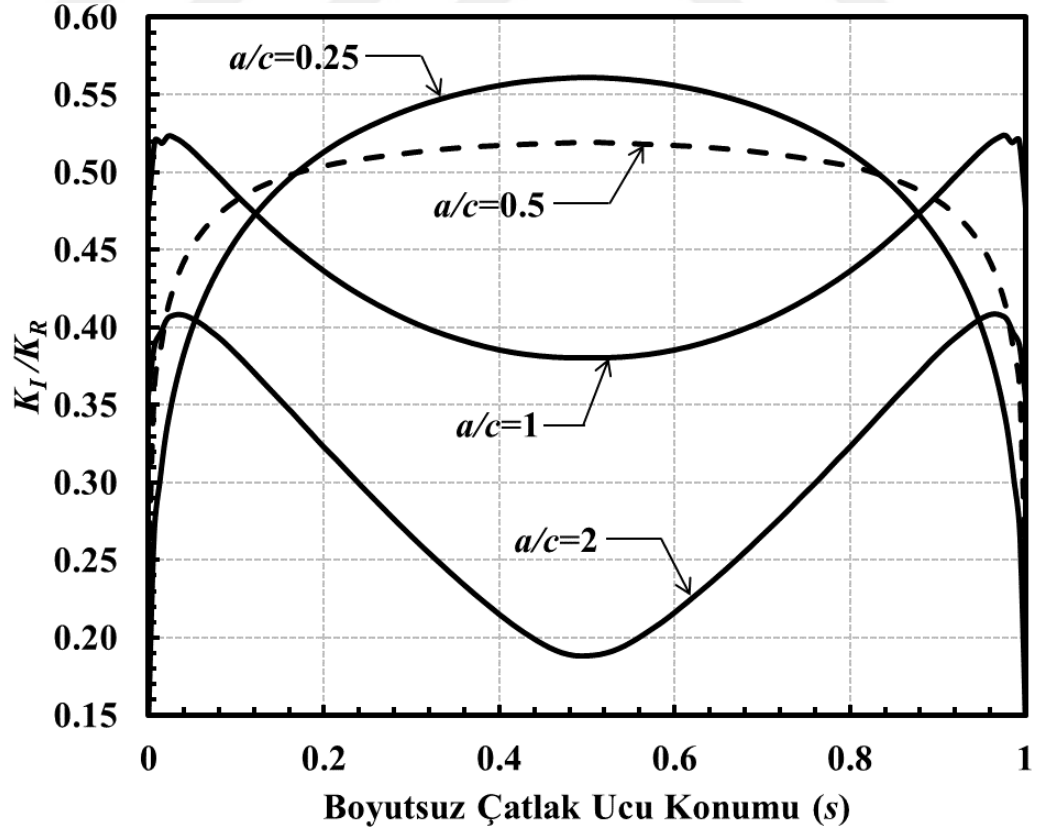
Şekil 3.304. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eksenel gerilme) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).



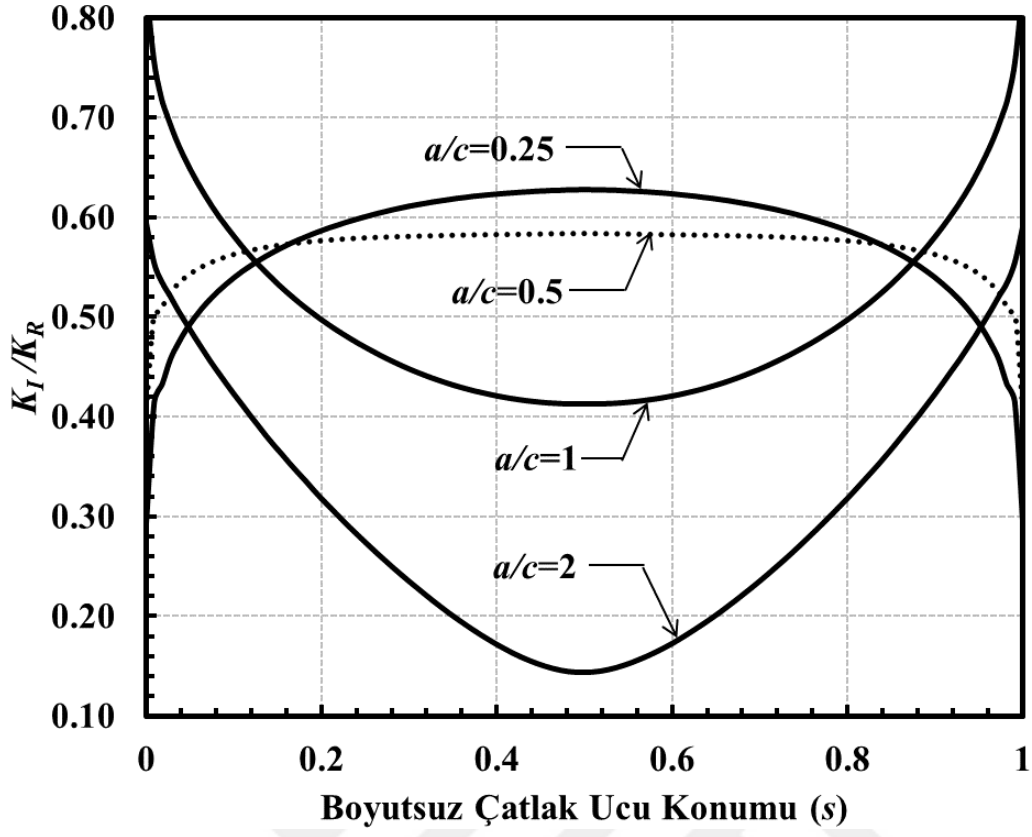
Şekil 3.305. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).



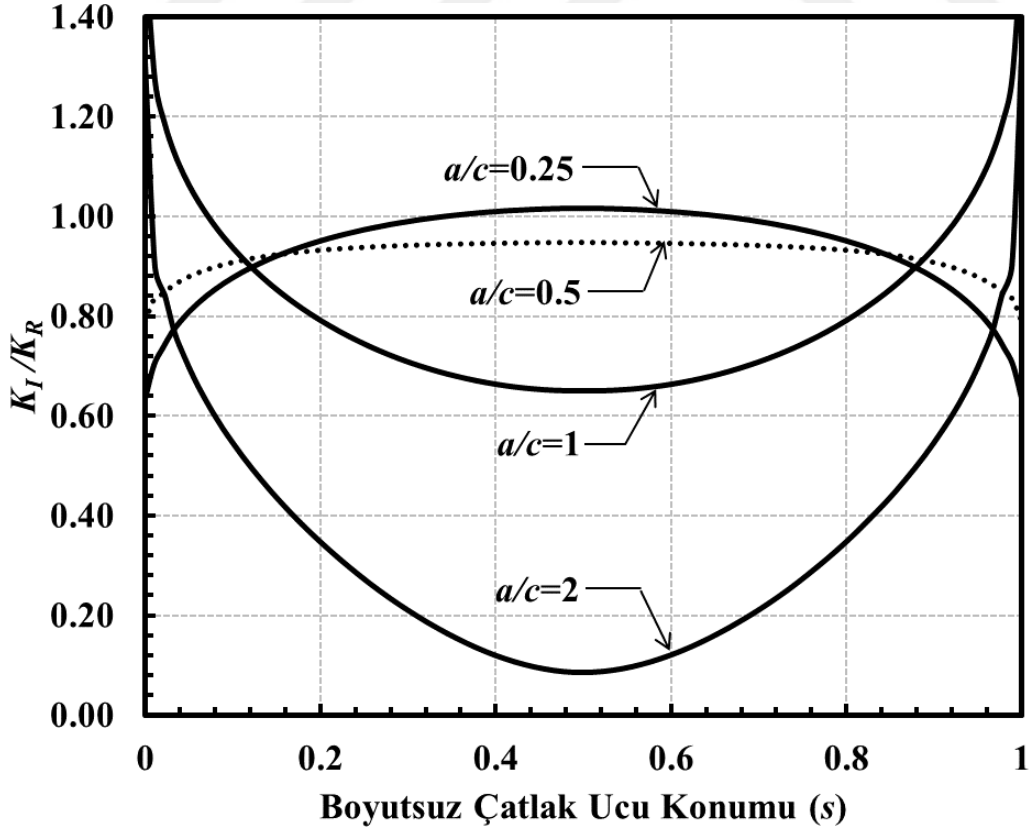
Şekil 3.306. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.1$).



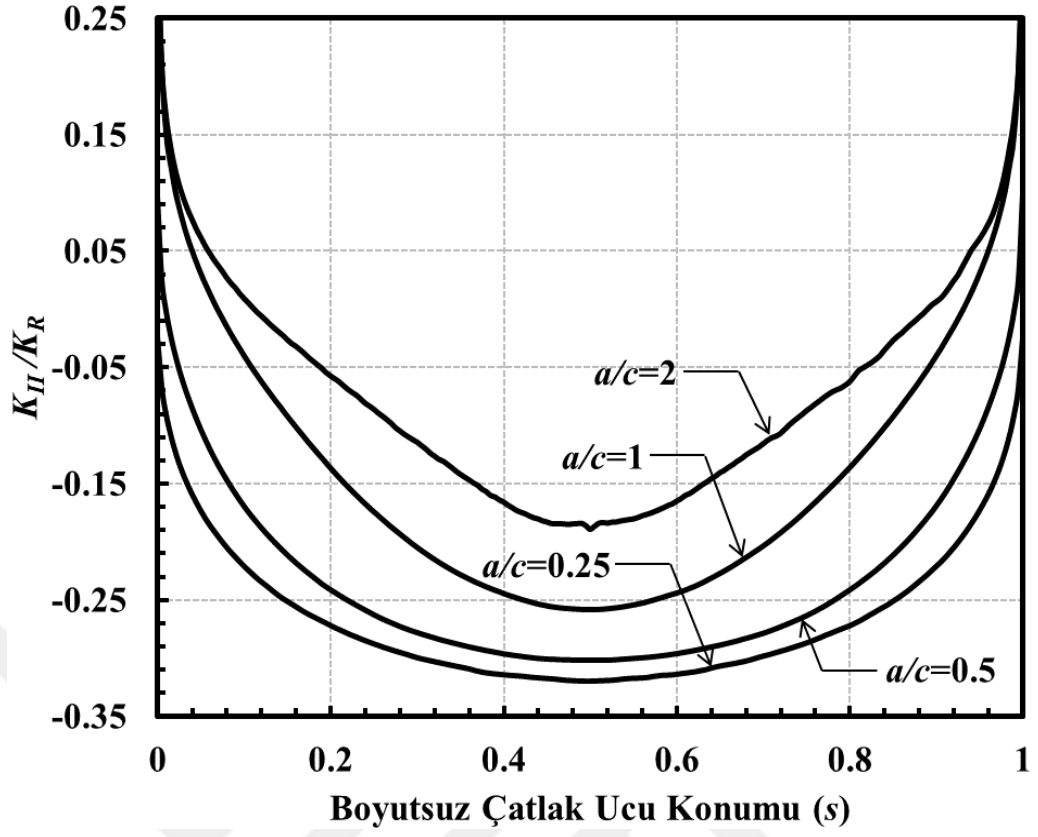
Şekil 3.307. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.25$).



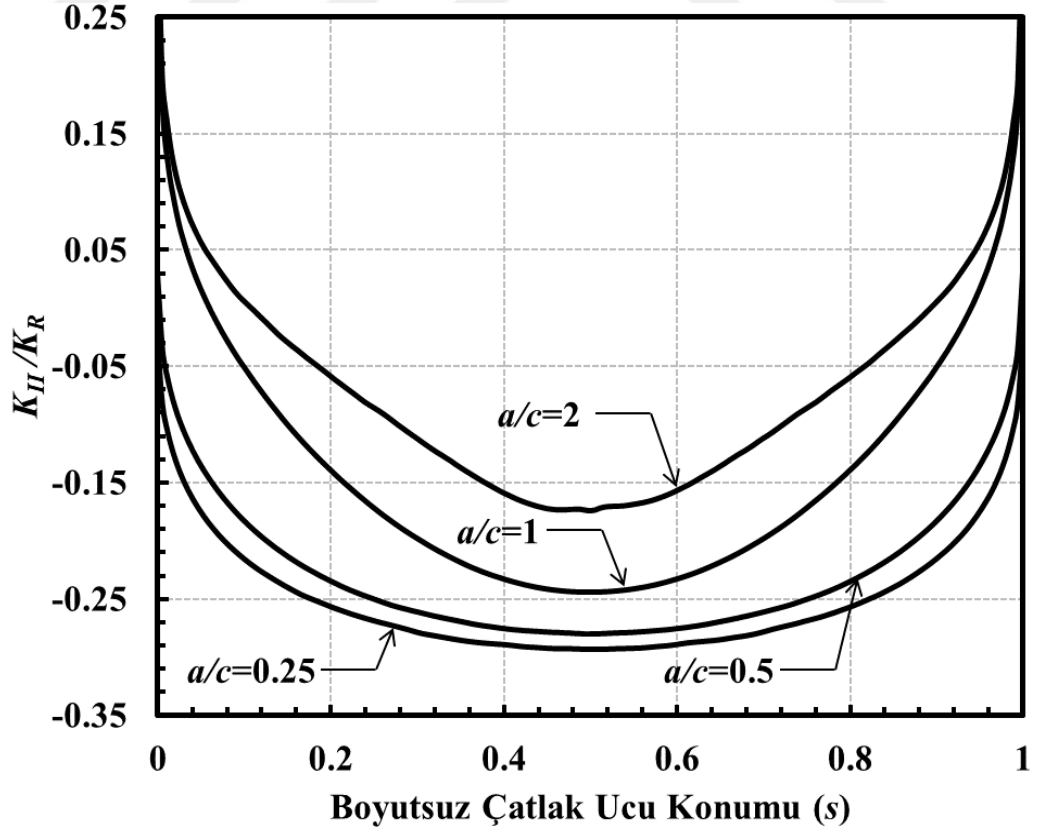
Şekil 3.308. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).



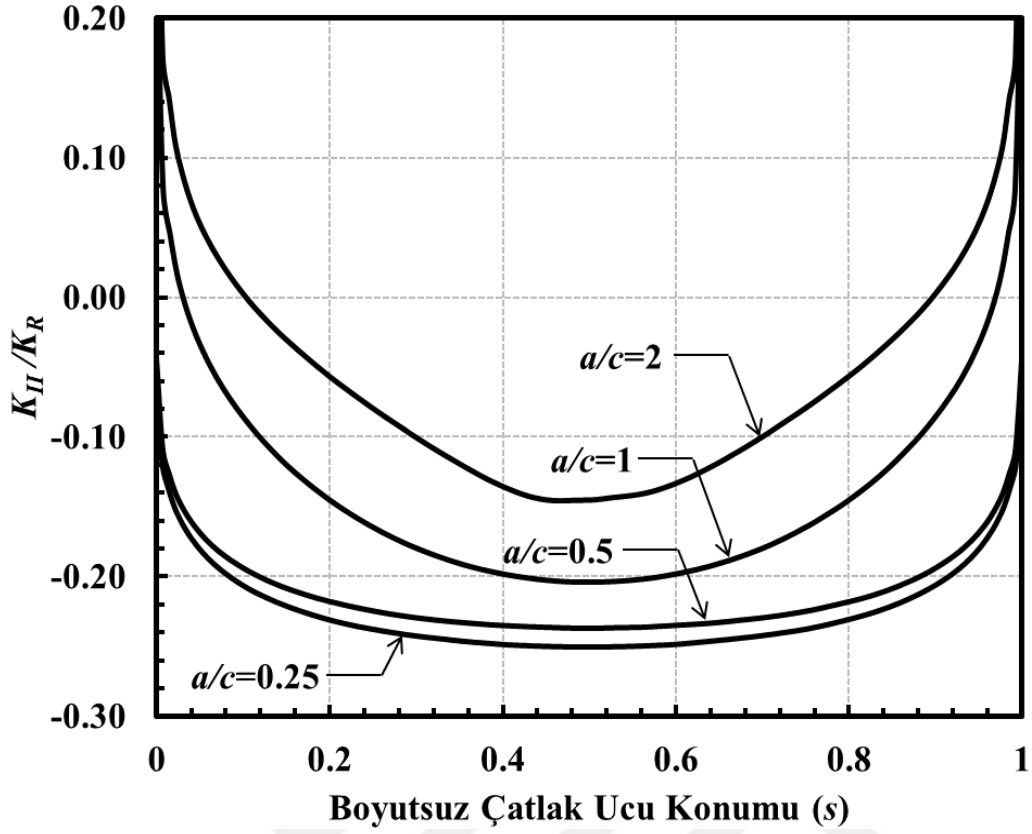
Şekil 3.309. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).



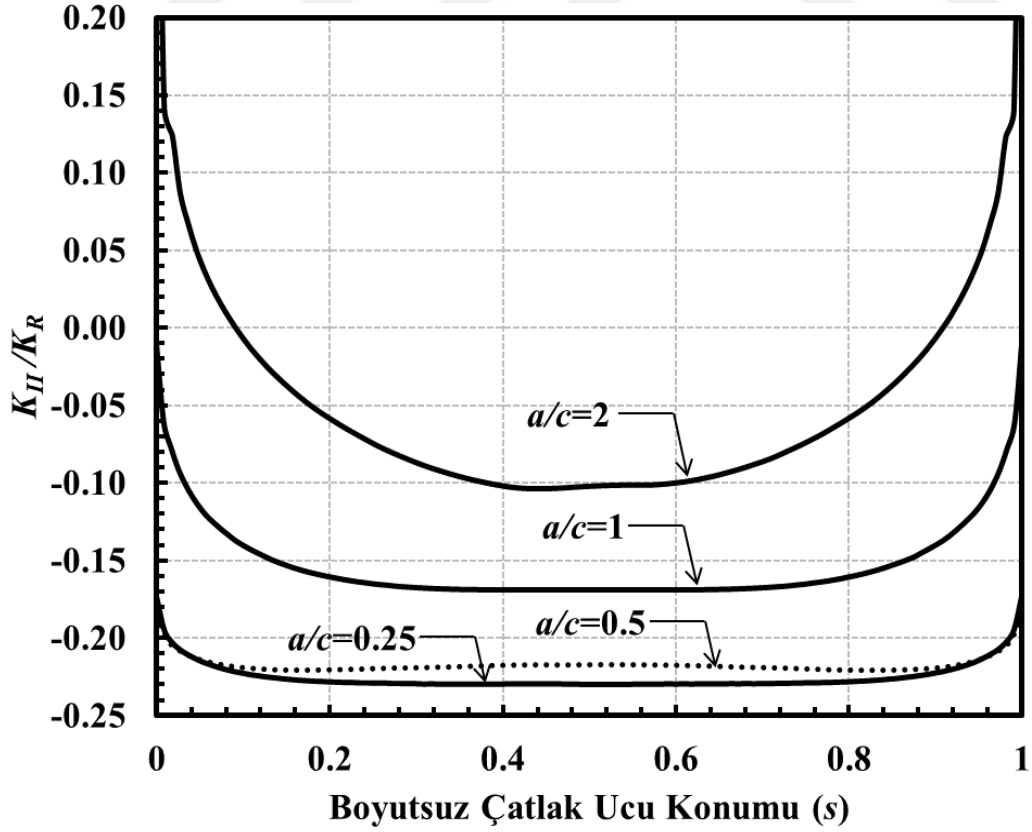
Şekil 3.310. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D=0.05$).



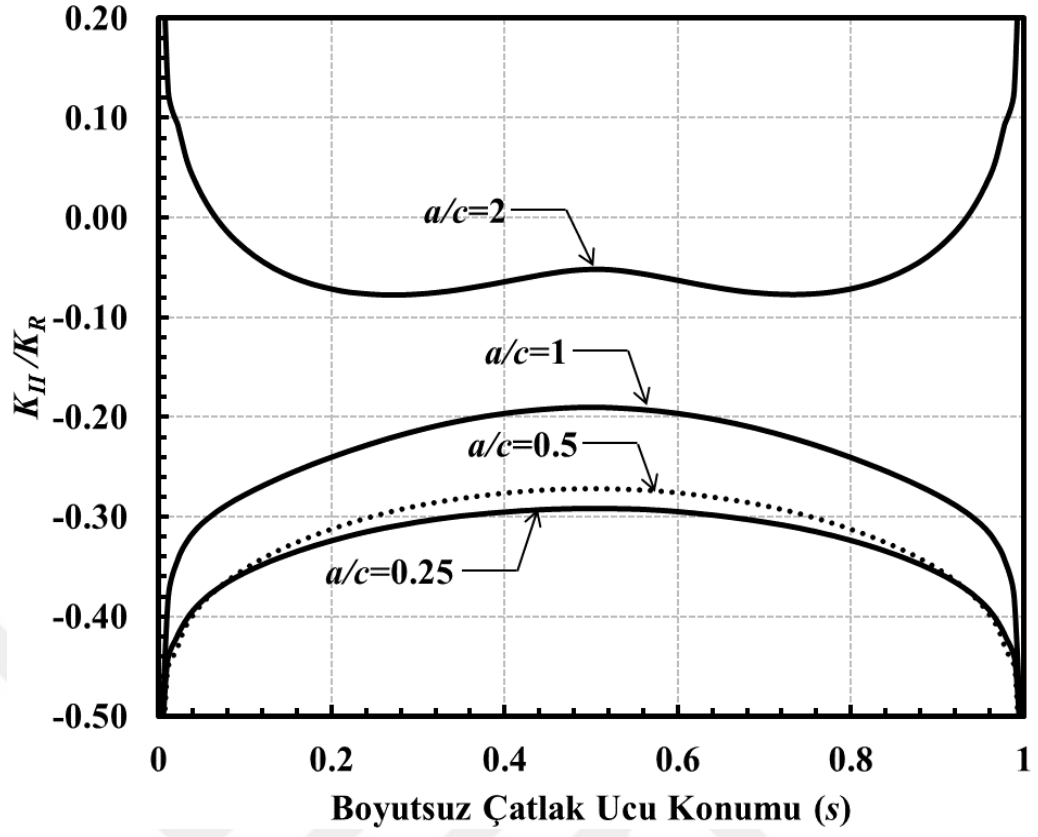
Şekil 3.311. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D=0.1$).



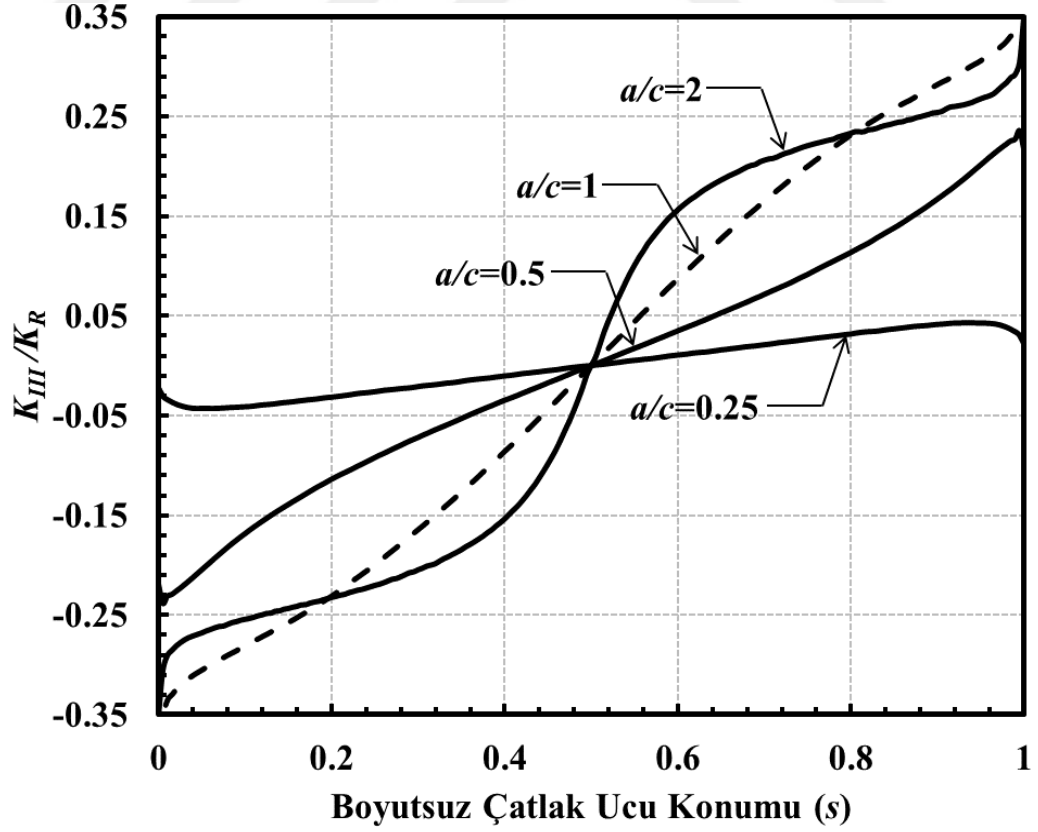
Şekil 3.312. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.25$).



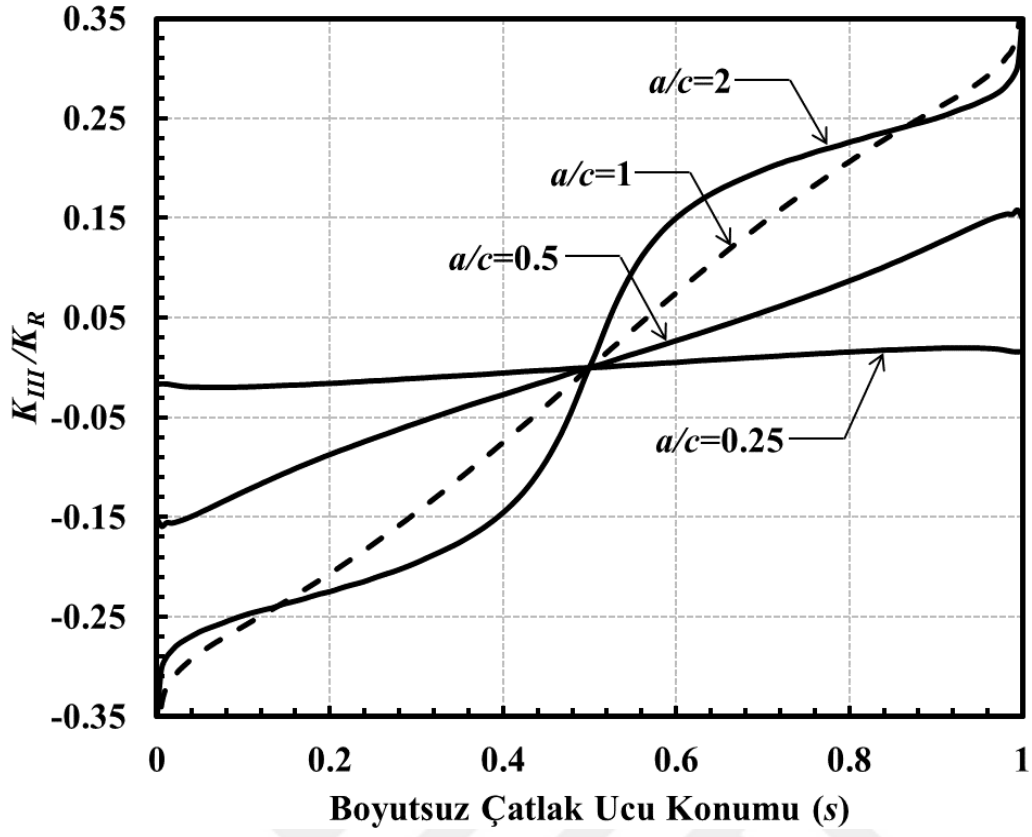
Şekil 3.313. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.5$).



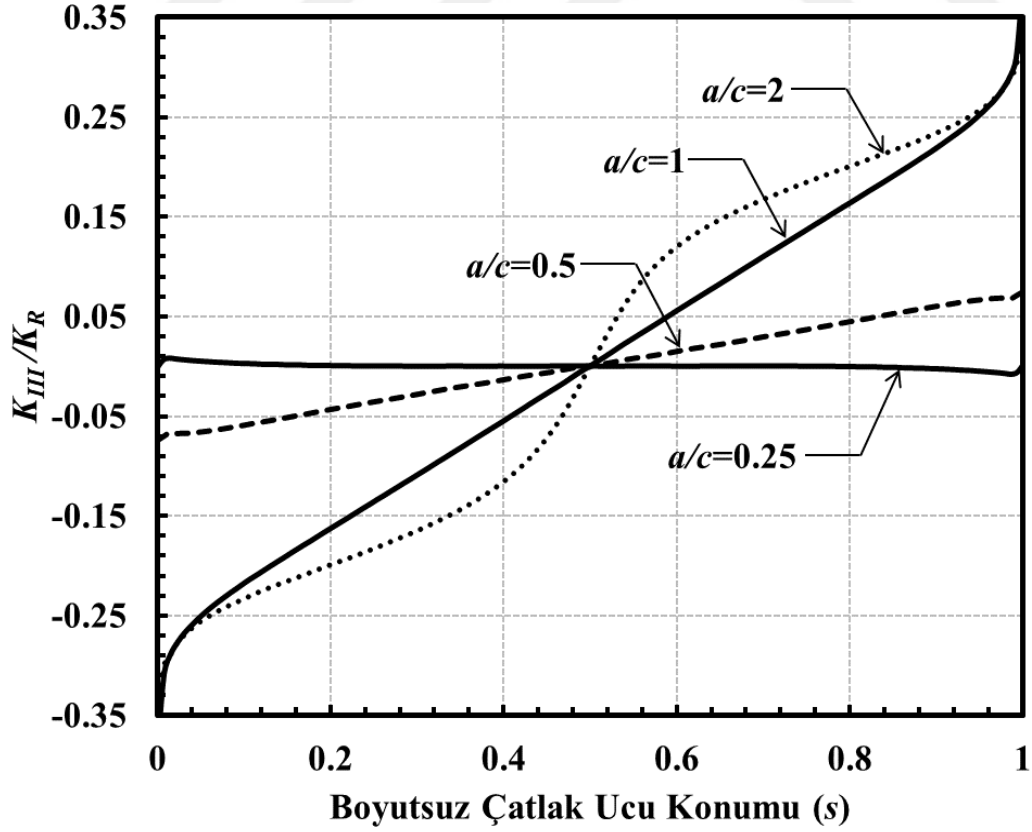
Şekil 3.314. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).



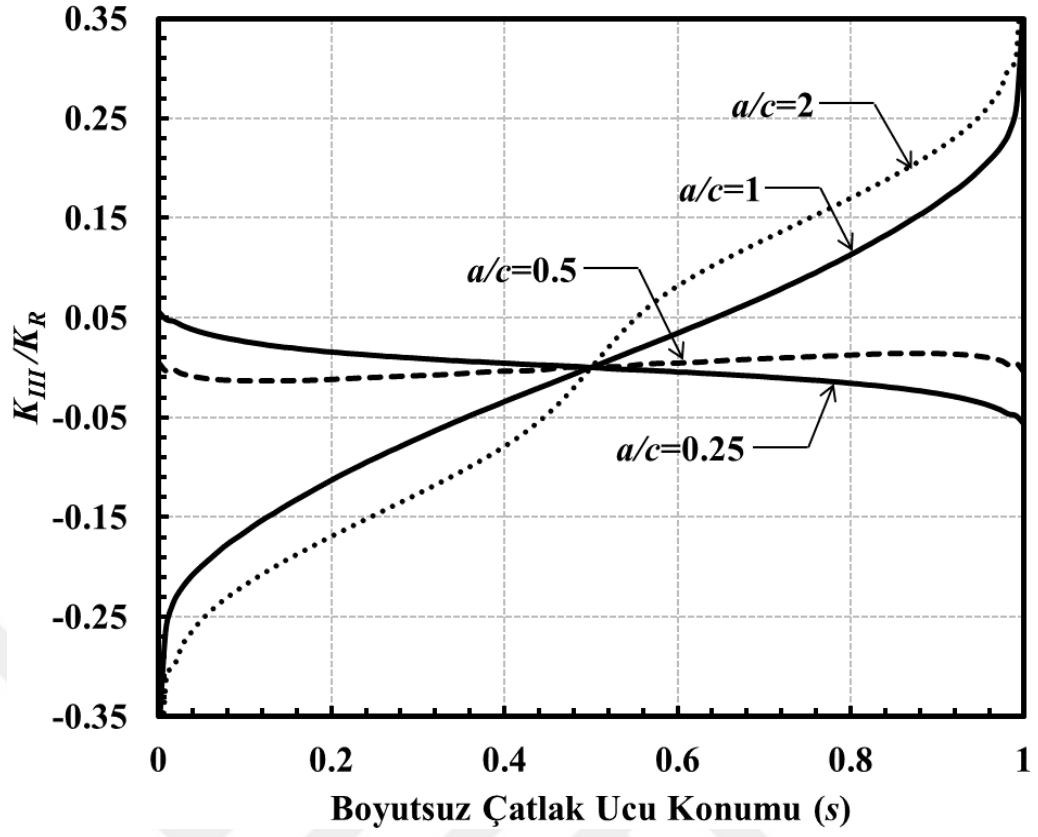
Şekil 3.315. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).



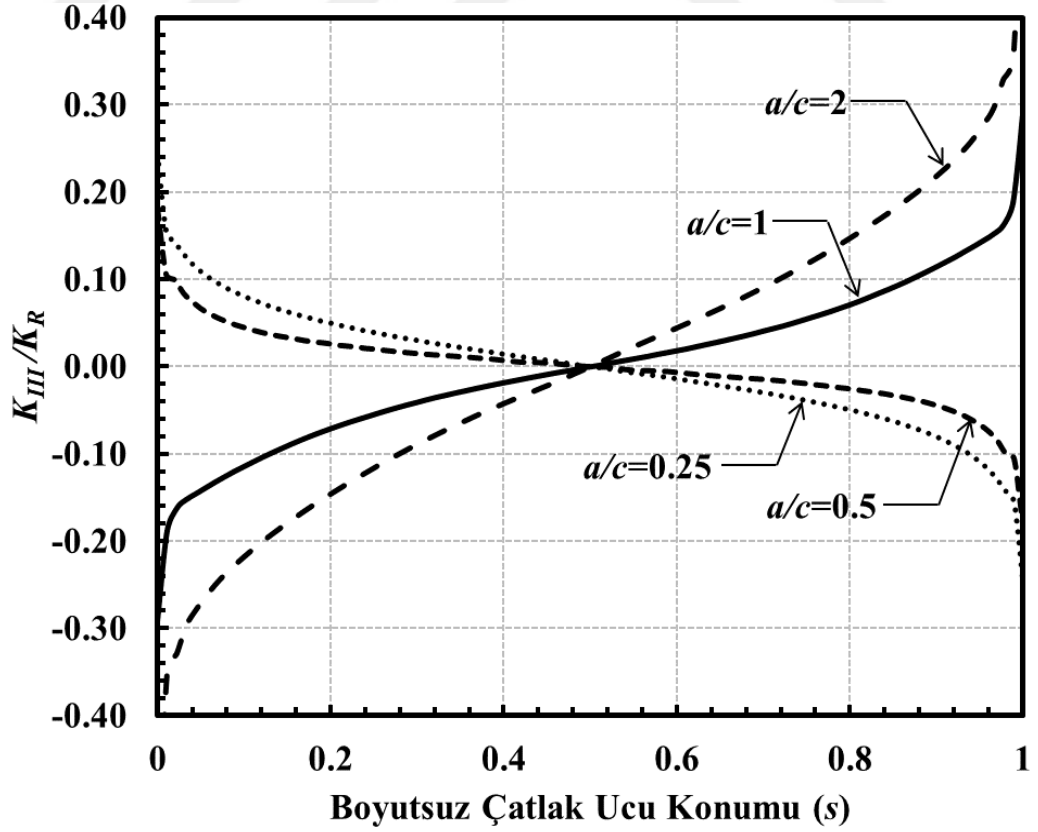
Şekil 3.316. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).



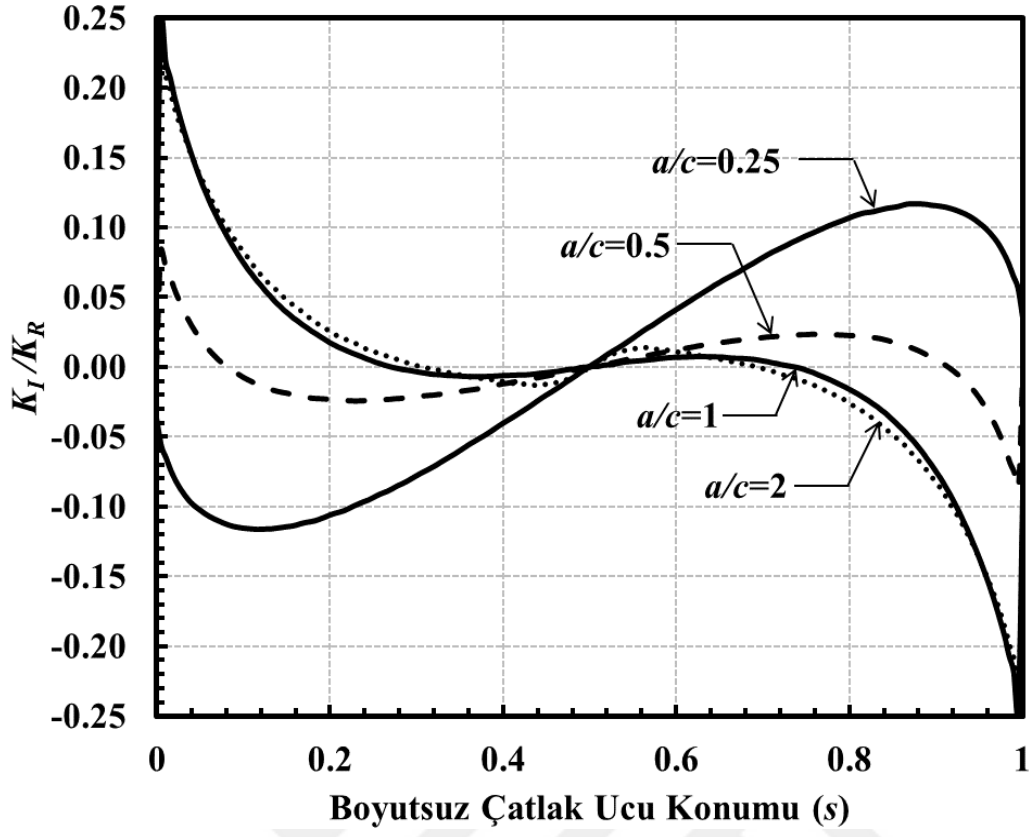
Şekil 3.317. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).



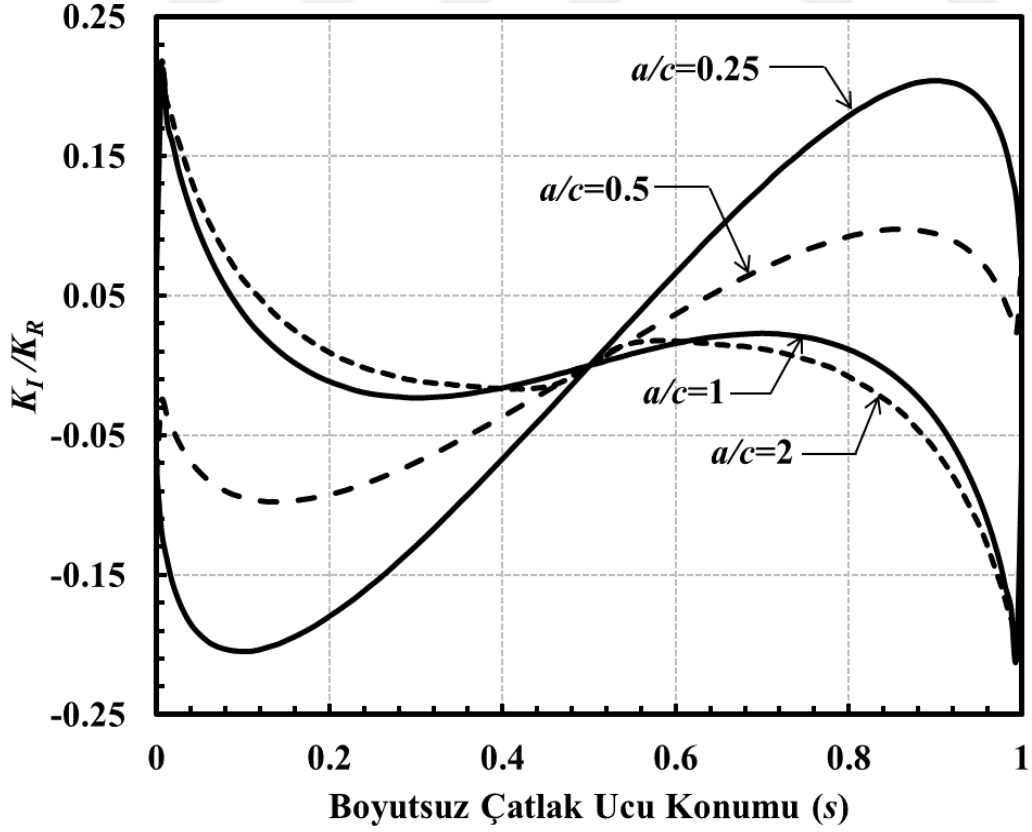
Şekil 3.318. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.5$).



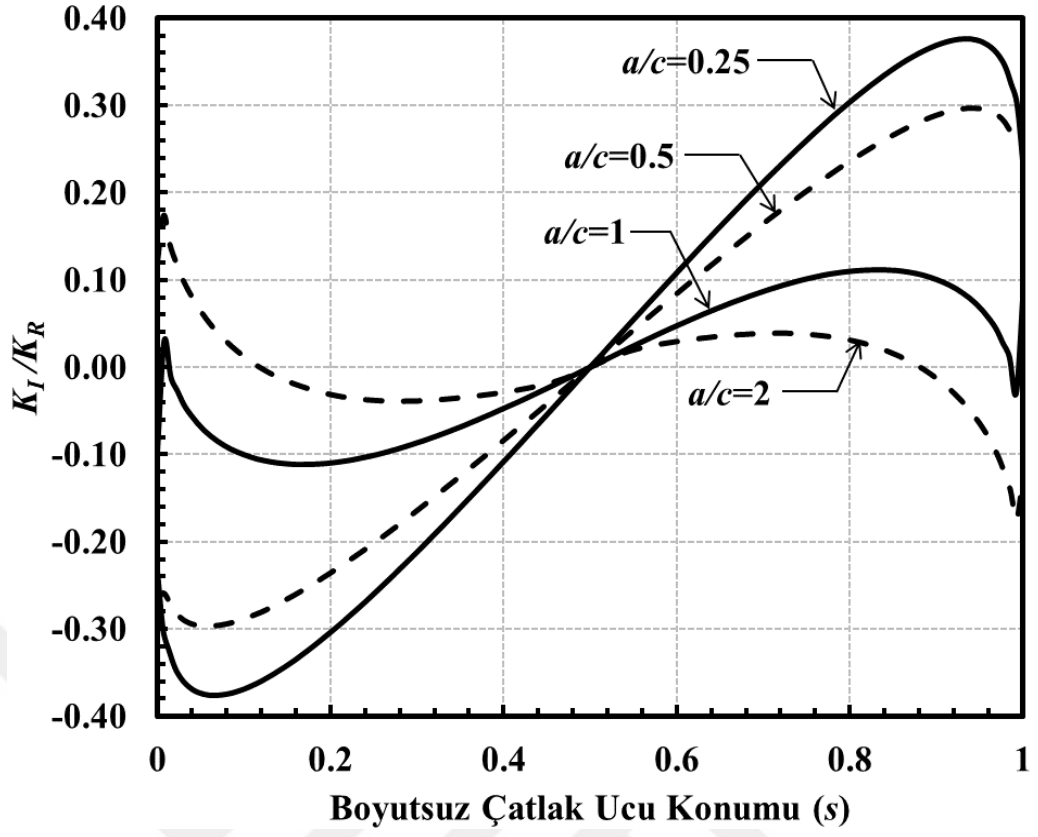
Şekil 3.319. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Eğilme gerilmesi) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.8$).



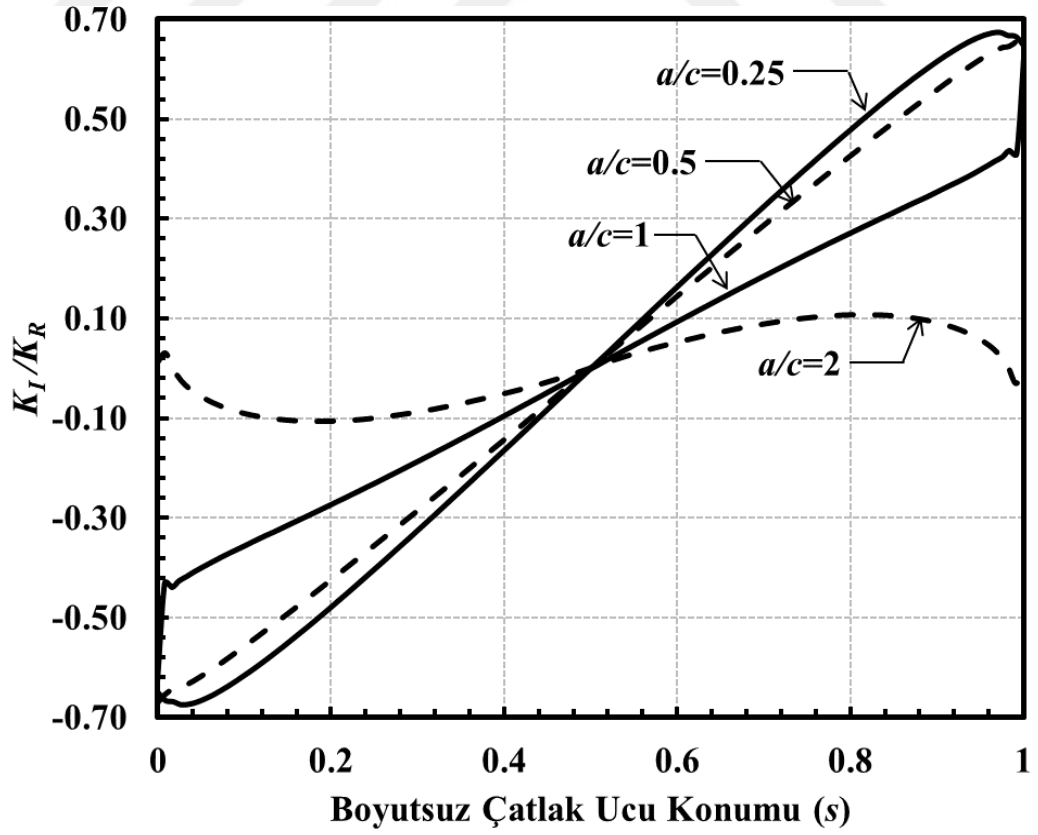
Şekil 3.320. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).



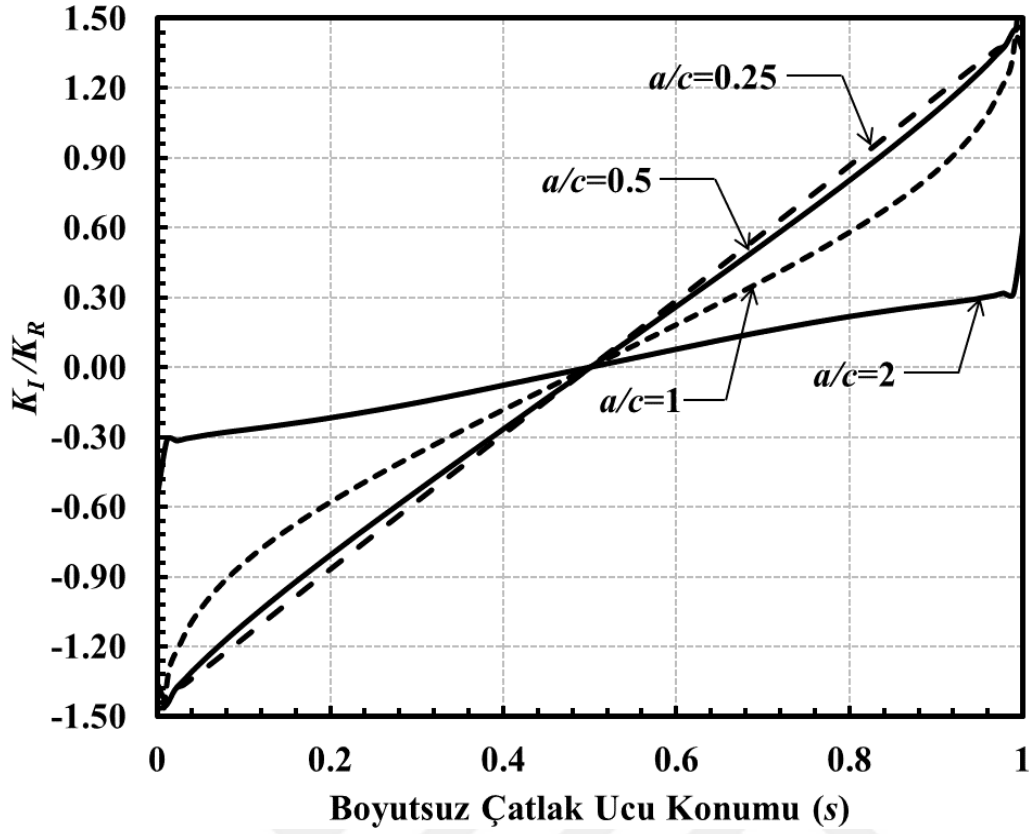
Şekil 3.321. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.1$).



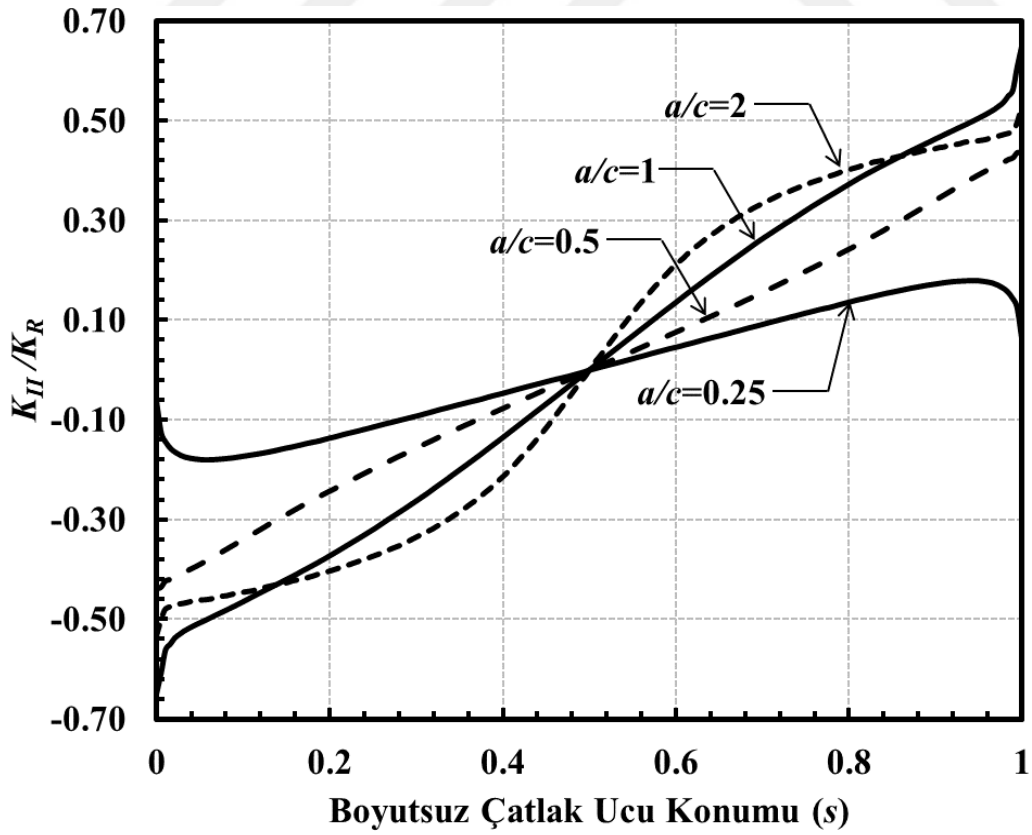
Şekil 3.322. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.25$).



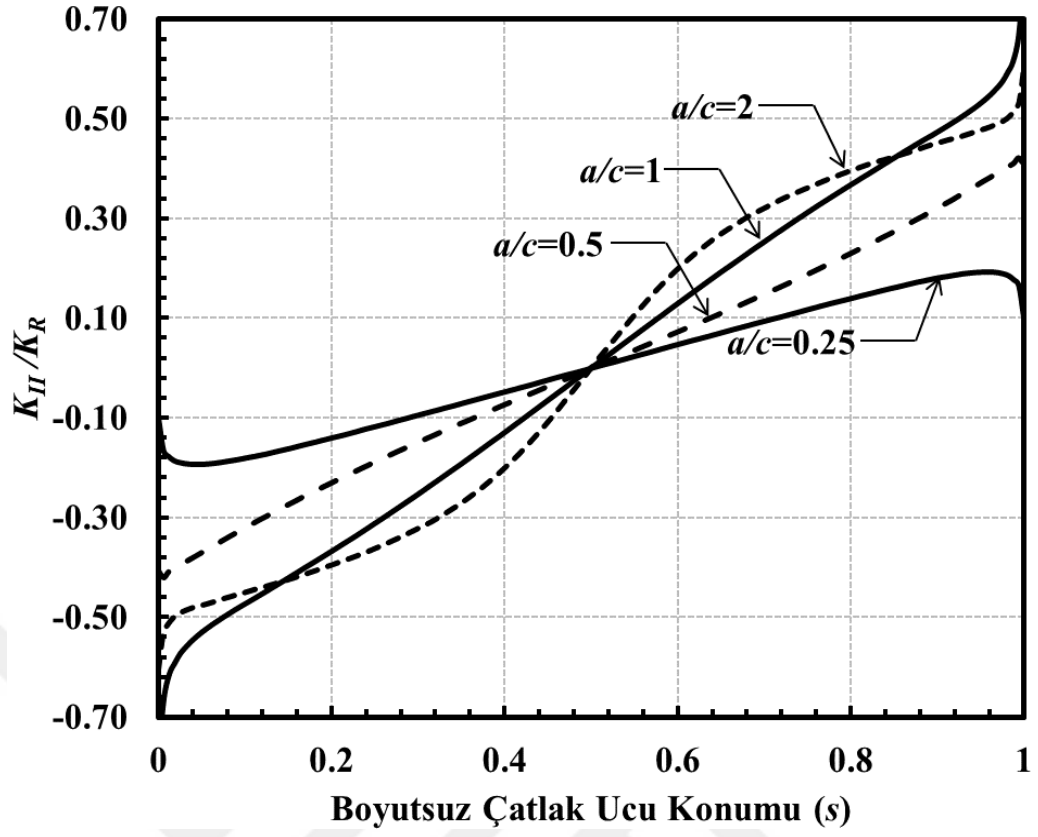
Şekil 3.323. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.5$).



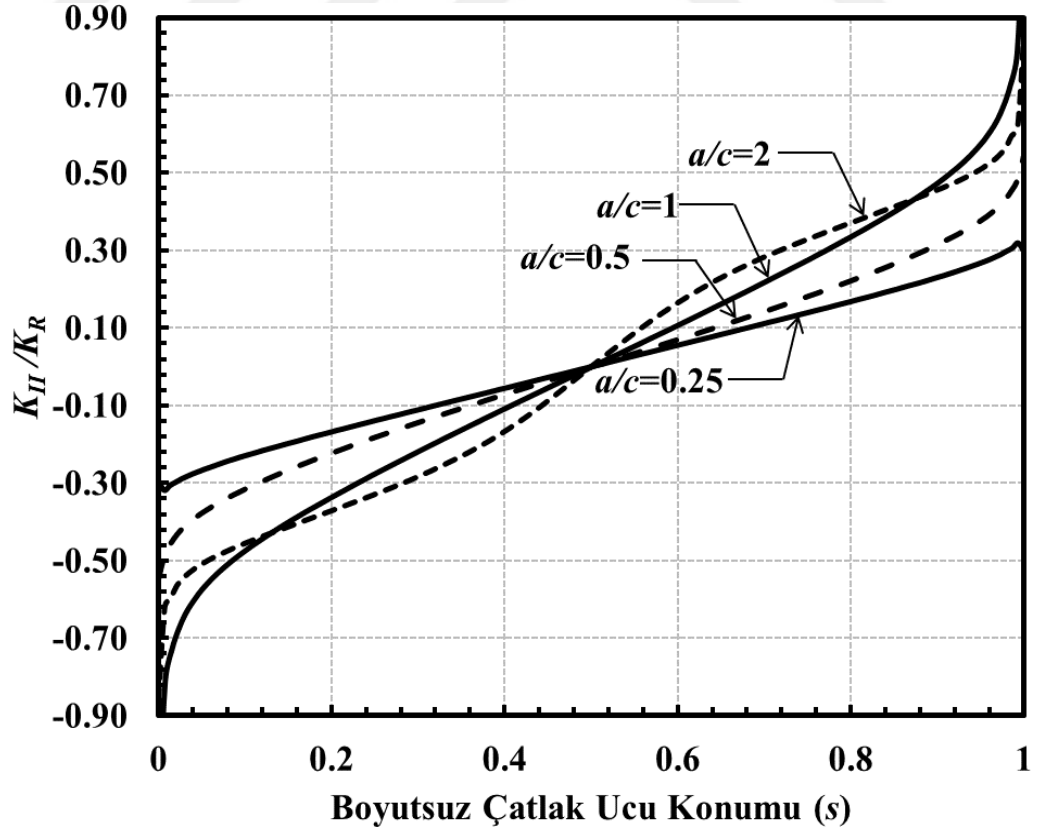
Şekil 3.324. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_I dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).



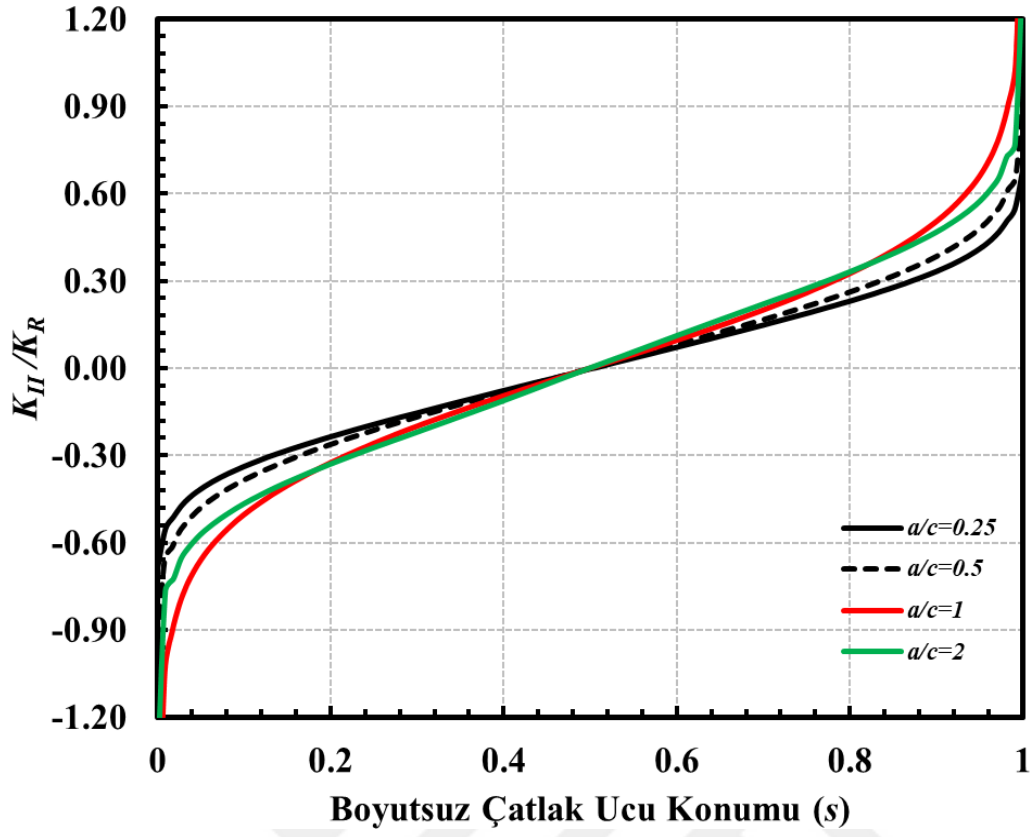
Şekil 3.325. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.05$).



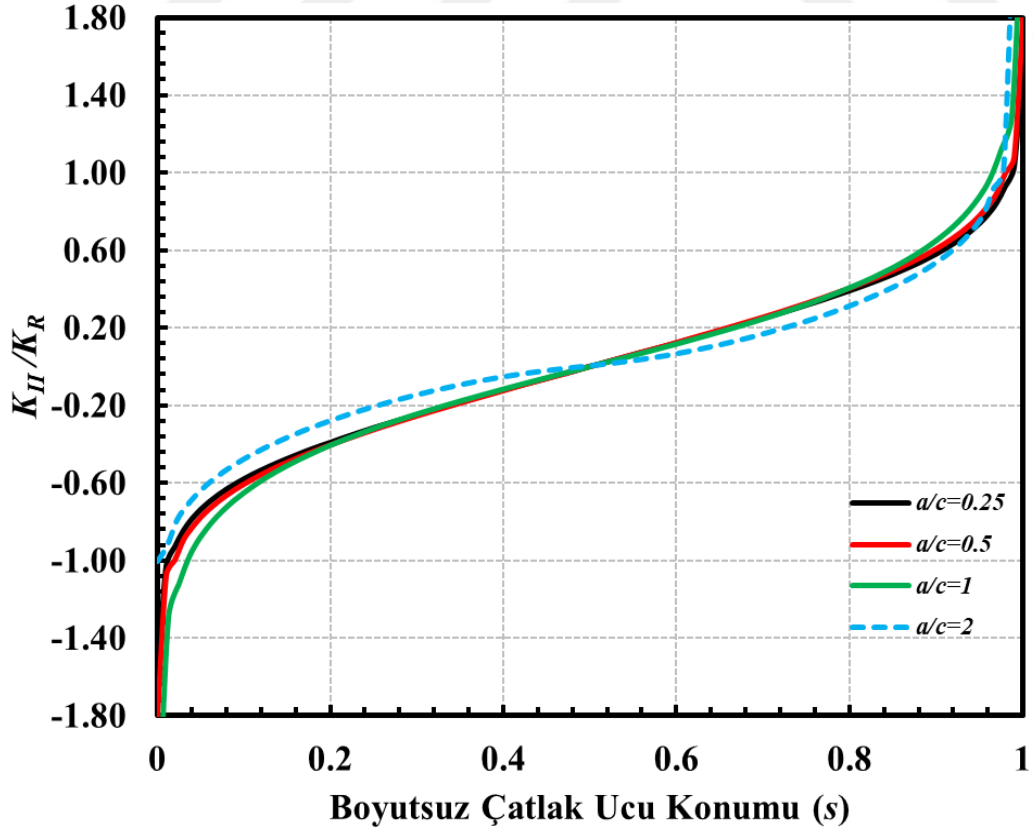
Şekil 3.326. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.1$).



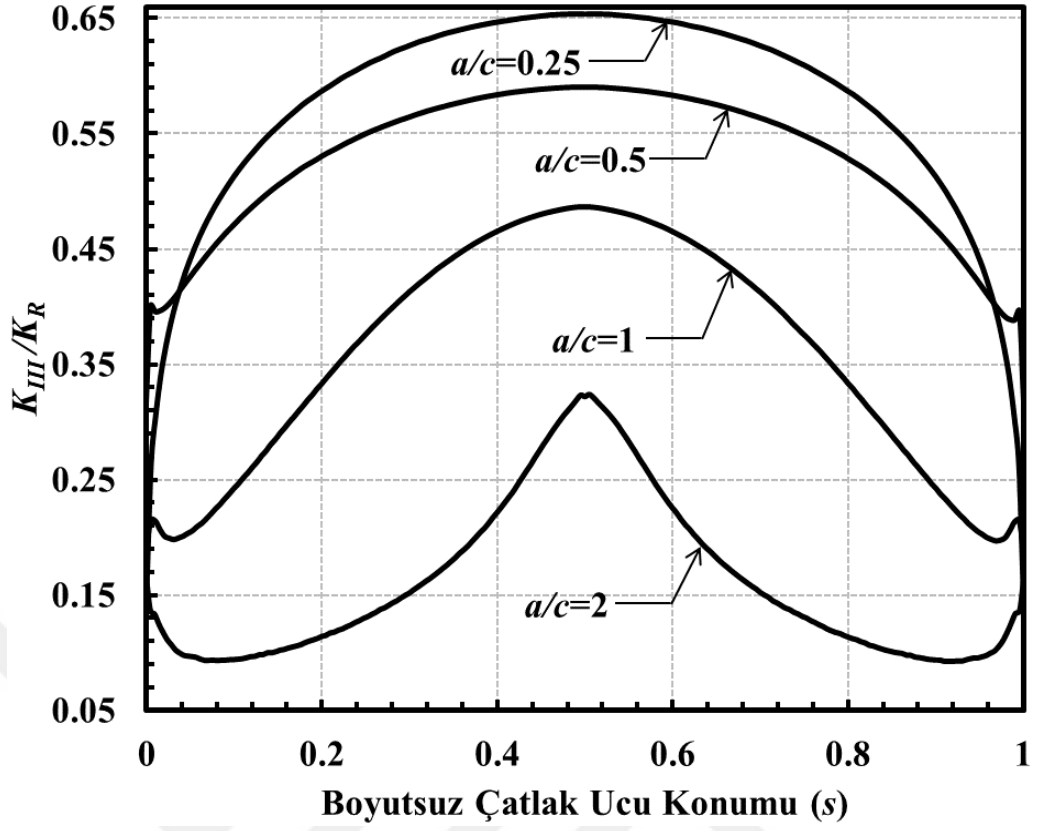
Şekil 3.327. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.25$).



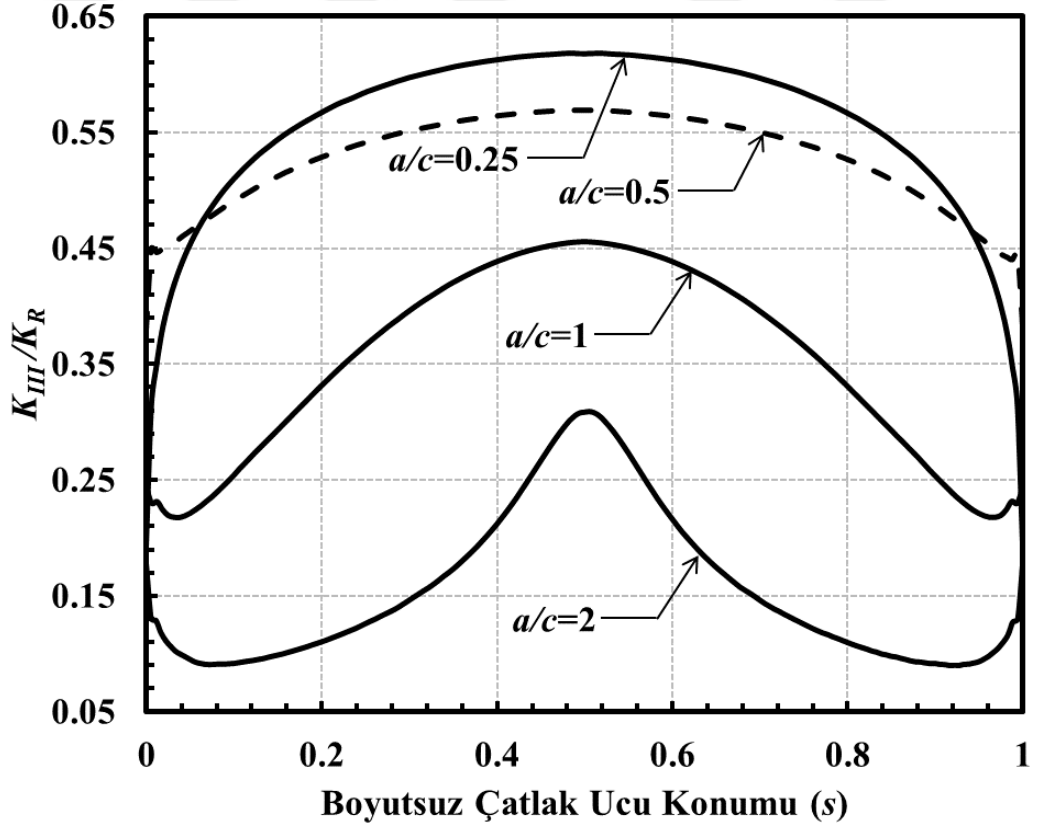
Şekil 3.328. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).



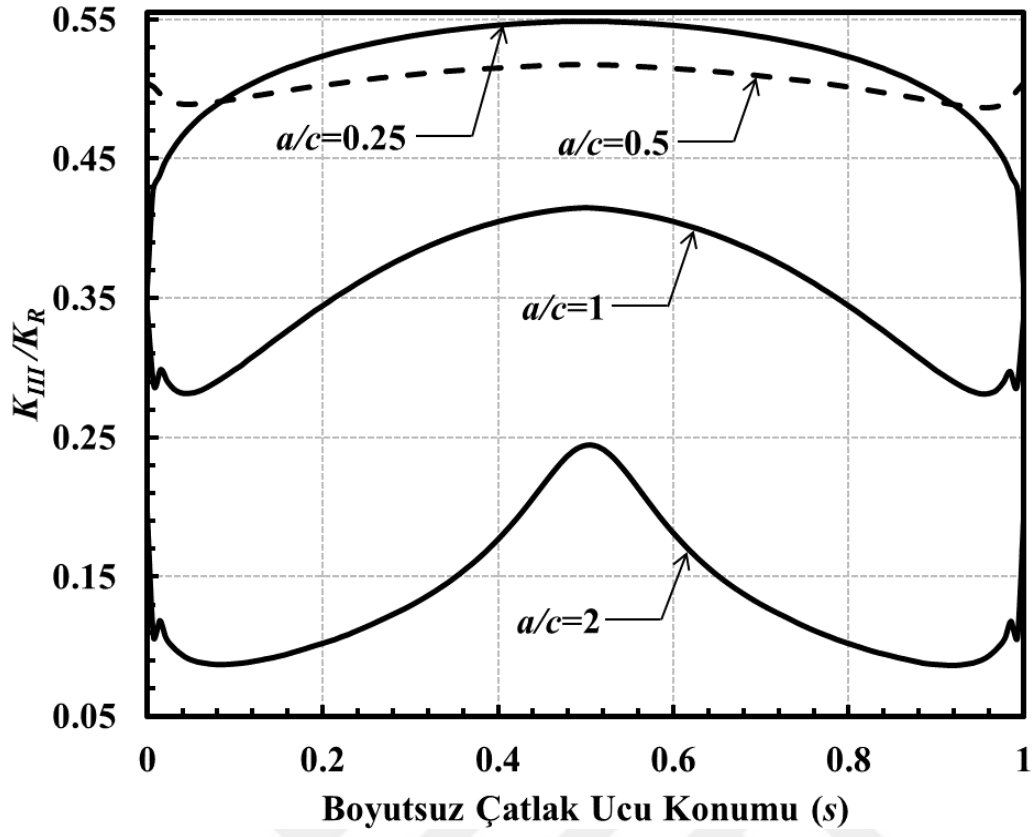
Şekil 3.329. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{II} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).



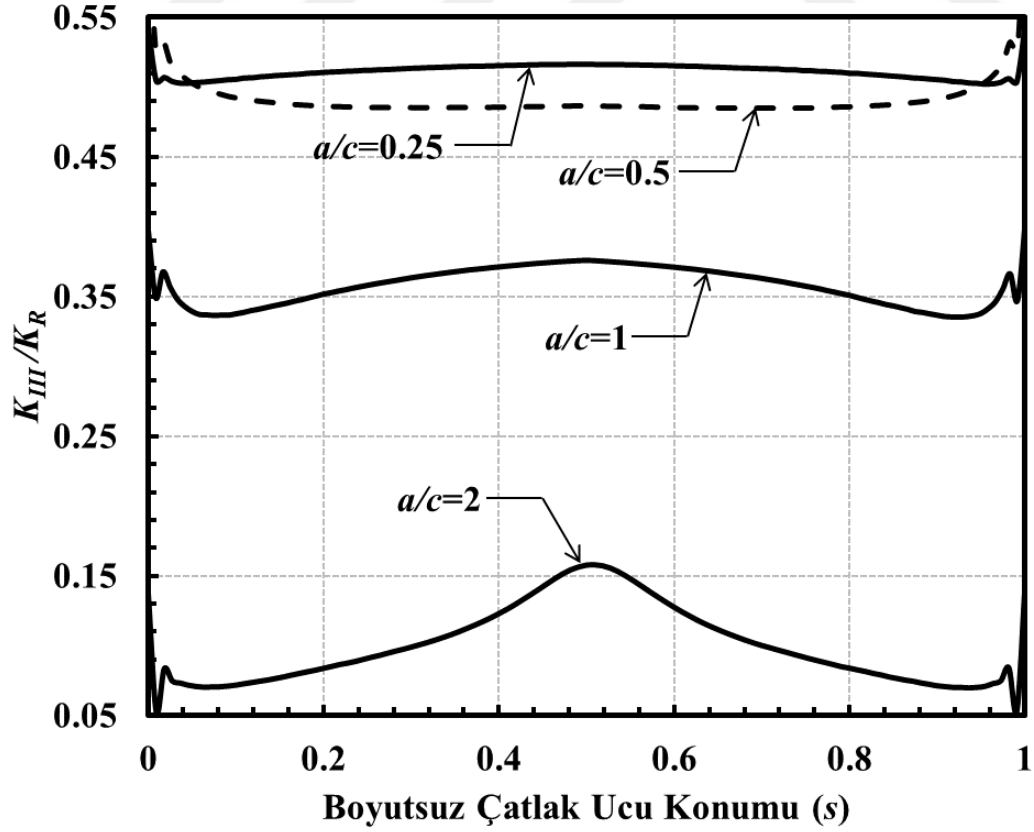
Şekil 3.330. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.05$).



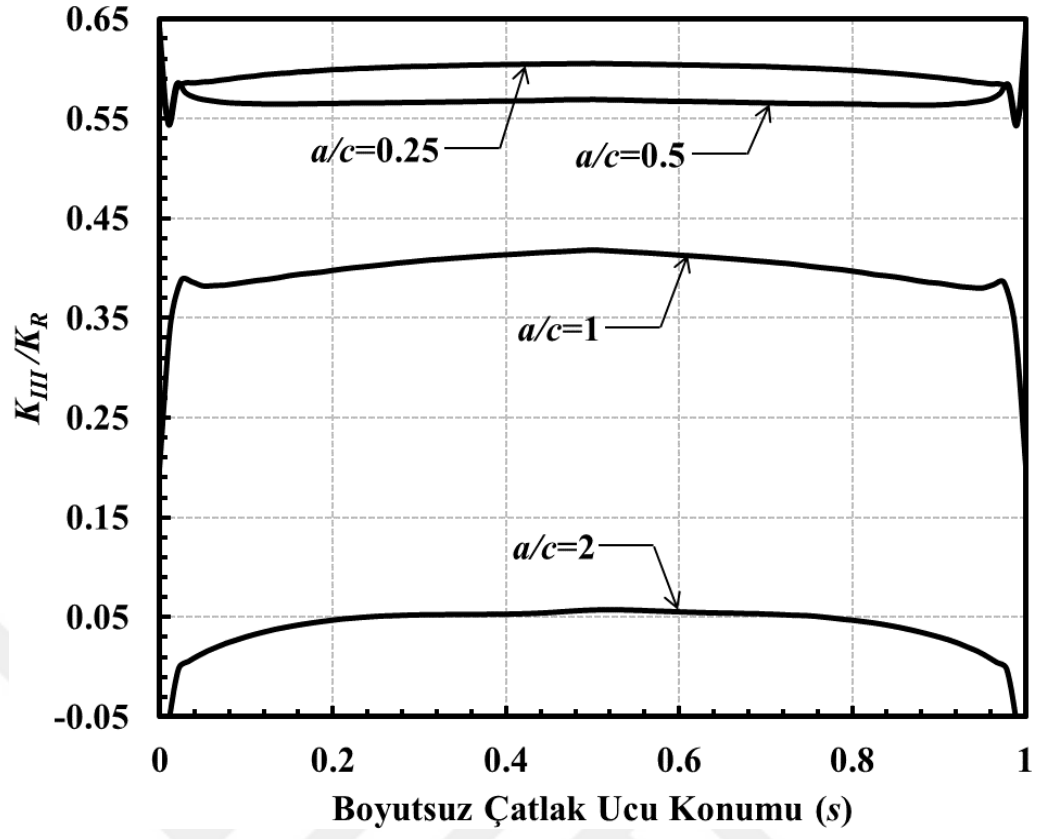
Şekil 3.331. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha = 45^\circ$, $a/D = 0.1$).



Şekil 3.332. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.25$).



Şekil 3.333. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.5$).



Şekil 3.334. Sabit a/D için çatlak önü boyunca boyutsuz K_{III} dağılımları (Burulma yükü) ($\alpha=45^\circ$, $a/D=0.8$).

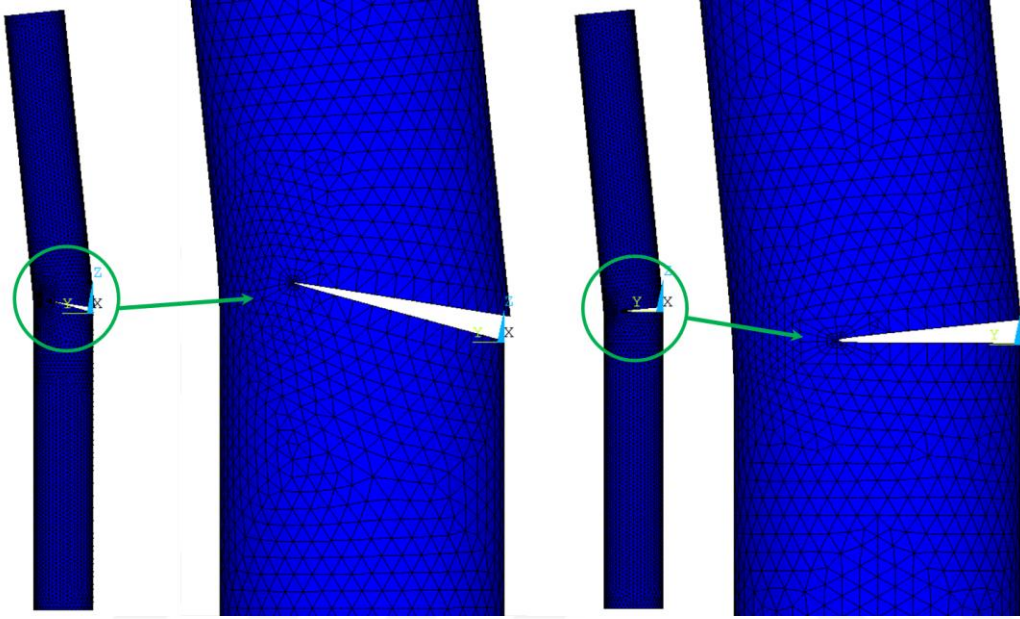


4. KARIŞIK MOD GERİLME ŞİDDET FAKTÖRLERİ İÇİN EMİRİK DENKLEM GELİŞTİRİLMESİ

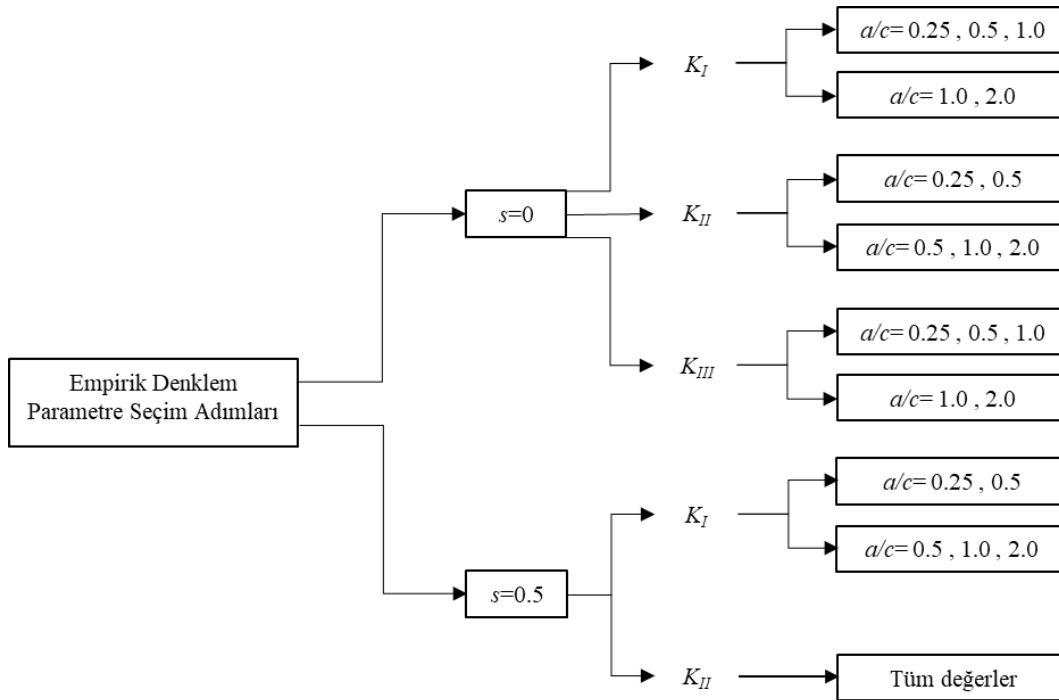
Önceki bölümde verilen grafiklerde çatlak önü boyunca karışık mod gerilme şiddet faktörü dağılımları gösterilmişti. Çözümleri verilen toplam $120 \times 3 = 360$ adet durum dışında, analiz kütüphanesinde yer almayan ve parametrelerin ara değerlerini içeren problemler için karışık mod gerilme şiddet faktörü dağılımlarını grafiklerden okuyarak tahmin edebilmek zor bir durumdur. Bunun için, bu noktaya kadar sunulan çözümlerden serbest yüzey ve derinlik noktalarında hesaplanan değerler ve çoğul-parametre regresyon analizleri kullanılarak, GŞF mod-I, mod-II ve mod-III bileşenleri için ele alınan parametrelerin fonksiyonları olarak emirik (deneysel) denklemler geliştirilmiş olup, bu bölümde sunulmaktadır. Bu denklemler sayesinde, problemi tanımlayan parametrelerin herhangi ara değerler kombinasyonu için istenilen K değerleri doğru ve tekrarlanabilir şekilde hesaplanabilmektedir.

Denklem oluşturulurken seçilen parametreler a/c , a/D ve çatlağın yatay eksenle yaptığı açı α olarak belirlenmiştir. Çatlak derinliği/çatlak uzunluğu için 4 adet (0.25, 0.5, 1.0, 2.0), çatlak derinliği/katı silindir çapı için 4 adet (0.05, 0.1, 0.25, 0.5), çatlağın yatay eksenle yaptığı açı için 6 adet (0, 15, 30, 45, 60, 75) ve çatlağın serbest yüzey ve derinlik noktası için 2 adet ($s=0$ ve $s=0.5$ konumu) parametre değerleri dikkate alınmıştır. $a/D=0.8$ değeri için yapılan ANSYS Structural [25] çözümlerinde Şekil 4.1’de görüldüğü gibi çatlak derinlik noktası katı silindirin oldukça derinine ulaşmakta olup, pratikteki çoğu uygulamalarda çatlak derinliğinin bu boyutlara ulaşmasına müsaade edilmeyeceğinden $a/D=0.8$ için hesaplanan karışık mod gerilme şiddet faktörü değerleri regresyon işlemlerine dahil edilmemiştir. Ayrıca, burulma yükü için Bölüm 3.4’te açılma modu boyutsuz K_I dağılımları verilmişti. Bir serbest yüzey bölgesinde çatlak yüzeyleri temasına bağlı olarak ve analizlerde temas mekaniği modellenemediği için bu bölgede boyutsuz K_I dağılımlarının negatif oldukları ilgili grafiklerde gösterilmişti. Bir bölgenin negatif olması durumu çatlak kapanmasını, pozitif olması durumu ise çatlak açılmasını temsil etmektedir. Gerçek hayatta, yüzey çatlağı içeren bir silindir numunesine burulma yükü uygulandığında çatlak kapanması gibi bir durum söz konusu olamayacağı ve ilgili bölgeler için grafiklerde verilen

çözümler tam olarak gerçekte deformasyonu temsil etmediğinden dolayı, burulma yükü için serbest yüzey ve derinlik noktalarındaki değerler alınıp regresyon işlemi yapılmamıştır. Ayrıca, empirik denklemlerin doğruluk seviyelerini artırmak amacıyla, çatlak şekil oranı aralığının 0.25 ve 2.0 arasında değişen değerleri iki bölüme ayrılmış ve Şekil 4.2’de gösterildiği üzere, bu iki aralıktaki a/c değerleri için farklı denklem takımları geliştirilmiştir.

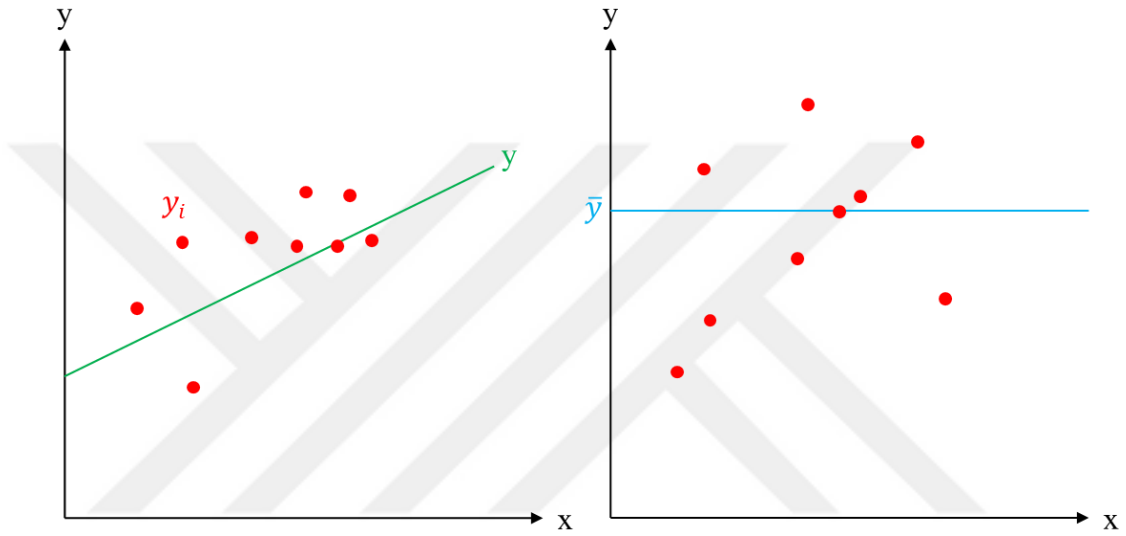


Şekil 4.1. $a/c=0.5$, $\alpha=15^\circ$ (solda), $a/c=1$, $\alpha=0^\circ$ (sağda) için eksenel gerilme yükü altında meydana gelen yapısal deformasyonlar [25].



Şekil 4.2. Denklem takımlarını oluşturmak için kullanılan veri grupları.

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi iki değişken arasındaki ilişkiyi incelemek için basit regresyon analizi kullanılır. Modellemek veya tahmin etmekle ilgilenilen değişkene bağımlı veya yanıt değişkeni denir. Bağımlı değişkeni tahmin etmek için kullanılan değişkene bağımsız veya öngörücü değişken denir. Basit doğrusal regresyon analizi, tek bir sürekli yanıt değişkeni (y) ile tek bir sürekli öngörücü değişken (x) arasındaki doğrusal ilişkiyi tahmin eden bir model geliştirmek için kullanılabilen istatistiksel bir tekniktir. Genellikle, birden fazla öngörücü (x) değişkeninin belirli bir yanıt (y) değişkeni üzerinde etkisi olduğu durumlarda da çoklu regresyon analizi kullanılır [29].



Şekil 4.3. Veri noktalarının oluşturulan eğriye ve ortalama değere olan uzaklıkları.

Basit bir doğrusal regresyon analizi için y'nin ortalama değerini tahmin etmede model ortalama $\bar{y}$ kullanılır. Eğer y'yi tahmin etmek için sadece ortalama $\bar{y}$ kullanılacaksa, her gözlem için y ile gözlenen $\bar{y}$ değeri arasındaki farkların karelerinin toplamı olan KTM, denklem 4.2'de verilmiştir. Ancak, y'yi tahmin etmek için yalnızca $\bar{y}$ 'yi kullanmak, x değişkeninin y üzerinde sahip olabileceği herhangi bir etkiyi anlaşılır biçimde gösteremez. Tahmin değişkeni x'in yanıt değişkeni y üzerinde bir etkisinin olup olmadığı, regresyon modelinin y'yi ne kadar iyi tahmin ettiği ile ilgilidir. Bu, x içeren modelin y'yi ne kadar iyi tahmin ettiği ile $\bar{y}$ kullanımının y'yi ne kadar iyi tahmin ettiği karşılaştırılarak, R^2 olarak gösterilen belirleme katsayısı parametresiyle yapılır ve denklem 4.1 yardımıyla hesaplanmaktadır. Denklem 4.3'te verilen KHM, her bir y değeri ile tahmin edilen (veya uydurulan) $\hat{y}_i$ değeri arasındaki farkların karelerinin toplamıdır. Denklem 4.1'deki KRM, karelerin regresyon miktarıdır. x değişkeni y hakkında herhangi bir bilgi vermiyorsa, KHM (karelerin hata miktarı) KTM'ye (karelerin toplam miktarı) eşit olacak ve R^2 değeri 0'a eşit olacaktır. Aksi takdirde, x,

y'yi mükemmel bir şekilde tahmin ederse, o zaman gözlemlenen y değeri uydurulan y değerine eşit olur ve KHM sıfırdır, dolayısıyla R^2 'nin değeri 1'e eşit olur. Bu nedenle, R^2 istatistiği, verilen regresyon modeli tarafından açıklanan y'deki değişkenliğin oranını ölçmek için kullanılır ve $0 \leq R^2 \leq 1$ aralığındadır [29].

$$R^2 = \frac{KRM}{KTM} = \frac{KTM - KHM}{KTM} \quad (4.1)$$

$$KTM = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.2)$$

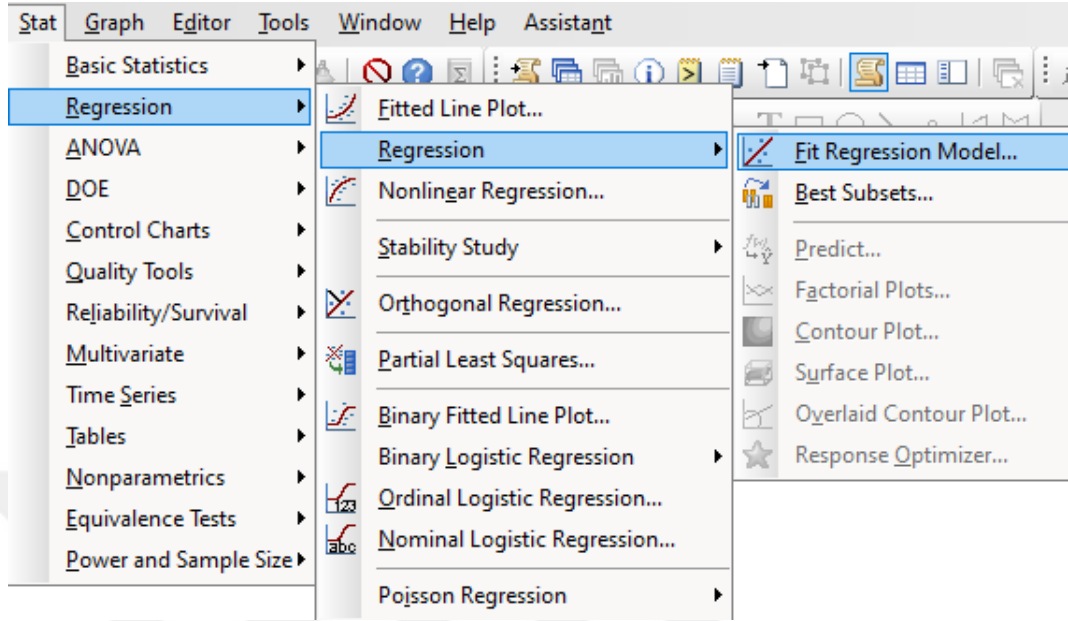
$$KHM = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.3)$$

Bir regresyon modelinde çok sayıda değişken varsa, düzeltilmiş R^2 adı verilen ve “ R^2 adj” olarak gösterilen başka bir istatistiğin kullanılması, bir regresyon modeline hangi değişkenlerin dahil edileceğini değerlendirmek için daha uygun bir ölçüdür. “ R^2 adj” istatistiği, hem modelde tahmin edilen toplam parametre sayısını hem de örneklem büyüklüğünü hesaba katmak için R^2 'nin değerini ayarlar. Bu, denklem 4.4'te görüldüğü gibi, KTM ve KHM'yi ilgili serbestlik derecelerine bölerek yapılır. Burada KTM karelerin toplam miktarı, KHM karelerin hata toplamı, n örneklem büyüklüğü ve p modelde tahmin edilen beta parametrelerinin toplam sayısıdır [29].

$$R^2_{adj} = \frac{\left(\frac{KTM}{(n-1)} - \frac{KHM}{(n-p)} \right)}{\frac{KTM}{(n-1)}} \quad (4.4)$$

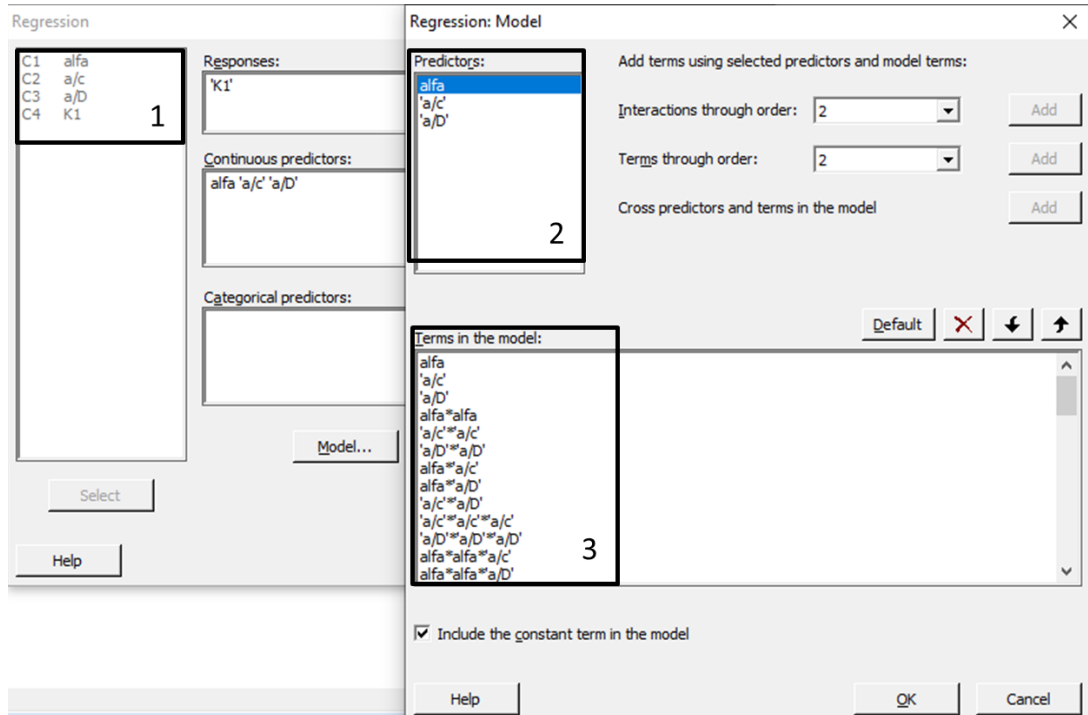
Denklemler Minitab [30] yazılımına girdi sağlayarak elde edilir. Şekil 4.4'te Minitab yazılımındaki regresyon kısmı gösterilmektedir. Şekil 4.5'te Model kısmından katsayılar sıralanarak regresyon denklem oluşturulmuştur. Denklem takımlarında tüm değerler kullanılırsa $6 (\alpha) * 4 (a/D) * 4(a/c) = 96$ katsayılı bir denklem oluşturulur. $0.25 \leq a/c \leq 0.5$ aralığı için $6 (\alpha) * 4 (a/D) * 2 (a/c) = 48$ katsayılı, $0.5 \leq a/c \leq 2.0$ aralığı için de $6 (\alpha) * 4 (a/D) * 3 (a/c) = 72$ katsayılı denklem oluşturulması gerekir. Denklem çözümü yapılırken fazla katsayı ile çözüme gitmek yerine daha pratik çözüm

yapabilmek için önemsiz katsayılar elenmiştir. Katsayıların T değerlerine bakılarak ve genelde fazla sayıda terim içeren katsayılar eleme kapsamına alınmıştır.



Şekil 4.4. Minitab yazılımında regresyon analizi bölümünün açılması [30].

Tablo 4.1-4.2’de deneysel denklemler için kullanılan azaltılmış katsayı adetleri verilmektedir. Eksenel gerilme ve eğilme yükü altındaki silindirlerde bulunan dönmüş yüzey çatlaklarının derinlik noktasında yırtılma modu boyutsuz K_{III} değerleri sıfır olduğu için bu GŞF bileşeni için denklem oluşturulmamıştır.



Şekil 4.5. Minitab yazılımında regresyon analizi aşamaları [30].

Tablo 4.1. Çatlak şekil oranlarına bağlı olarak oluşturulan empirik denklemlerin indirgenmiş katsayı adetleri (Eksenel Gerilme).

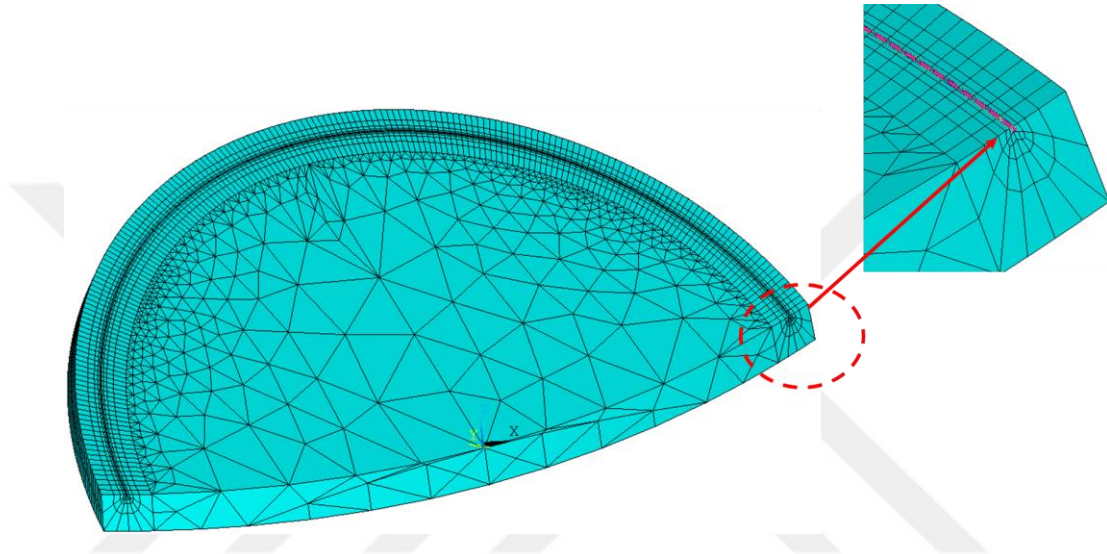
Gerilme Şiddet Faktörleri	a/c değerleri	Katsayılar
Serbest Yüzey K_I	0.25, 0.5, 1.0	21
	1.0, 2.0	14
Serbest Yüzey K_{II}	0.25, 0.5	18
	0.5, 1.0, 2.0	37
Serbest Yüzey K_{III}	0.25, 0.5, 1.0	35
	1.0, 2.0	23
Derinlik K_I	0.25, 0.5	14
	0.5, 1.0, 2.0	21
Derinlik K_{II}	Tüm değerler	34

Tablo 4.2. Çatlak şekil oranlarına bağlı olarak oluşturulan empirik denklemlerin indirgenmiş katsayı adetleri (Eğilme Yüğü).

Gerilme Şiddet Faktörleri	a/c değerleri	Katsayılar
Serbest Yüzey K_I	0.25, 0.5, 1.0	20
	1.0, 2.0	13
Serbest Yüzey K_{II}	0.25, 0.5	25
	0.5, 1.0, 2.0	35
Serbest Yüzey K_{III}	0.25, 0.5, 1.0	35
	1.0, 2.0	18
Derinlik K_I	0.25, 0.5	14
	0.5, 1.0, 2.0	21
Derinlik K_{II}	Tüm değerler	24

4.1. Çatlak Ucu Serbest Yüzey Noktaları (s=0)

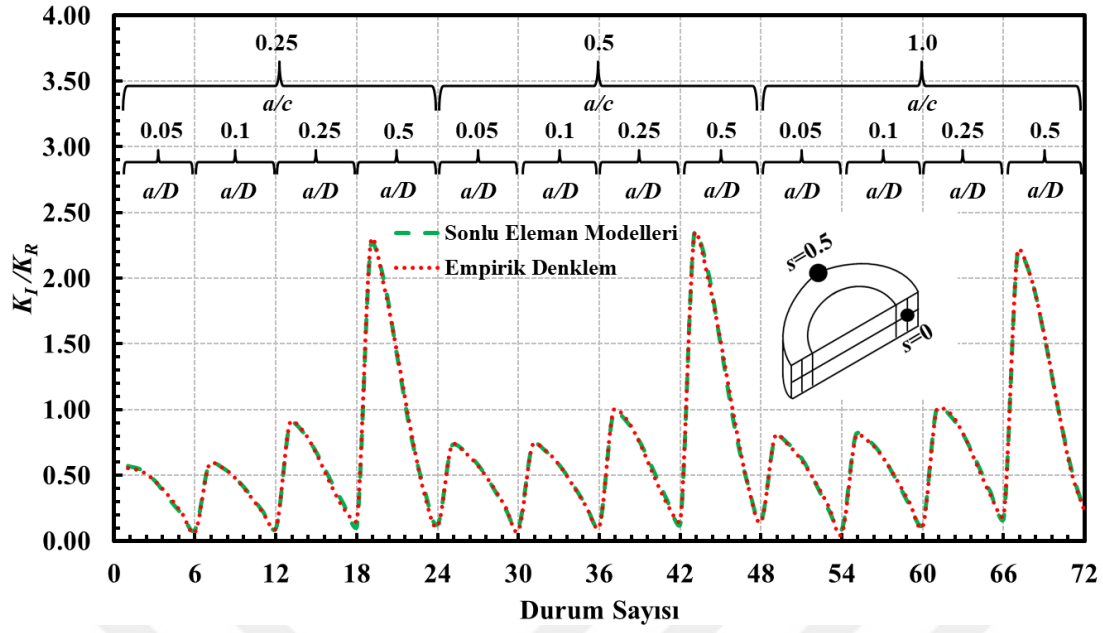
Serbest yüzey noktasında gerilme şiddet faktörü değerleri, serbest yüzey etkilerinden dolayı tam olarak bilinemez. Çatlak ucu, silindirik yanal yüzeyinde elips bölgesine temas ettiği için denklem geliştirmede kullanılacak değerler yüzeye yakın iç bölgelerden alınmıştır. İç bölgedeki boyutsuz çatlak ucu konumundaki sınır değer $s=0.03$ civarı olacak şekilde seçilerek regresyona dahil edilmiştir. Şekil 4.6'da çatlak önü serbest yüzey bölgelerinin ağ yapısı gösterilmiştir.



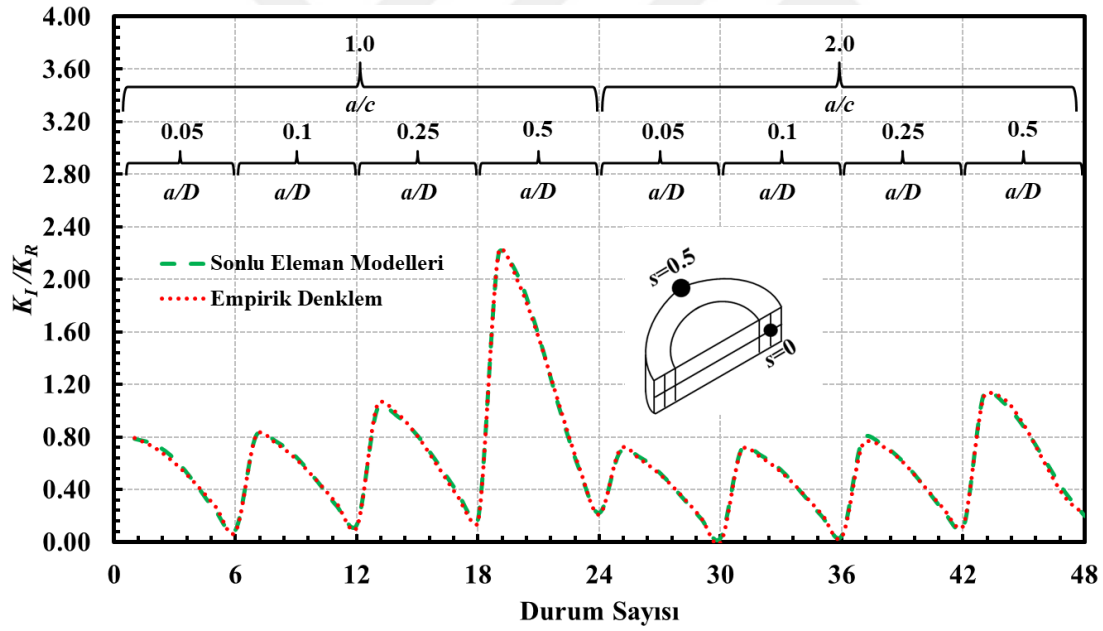
Şekil 4.6. Çatlak önü serbest yüzey bölgelerinin ağ yapıları.

4.1.1. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak

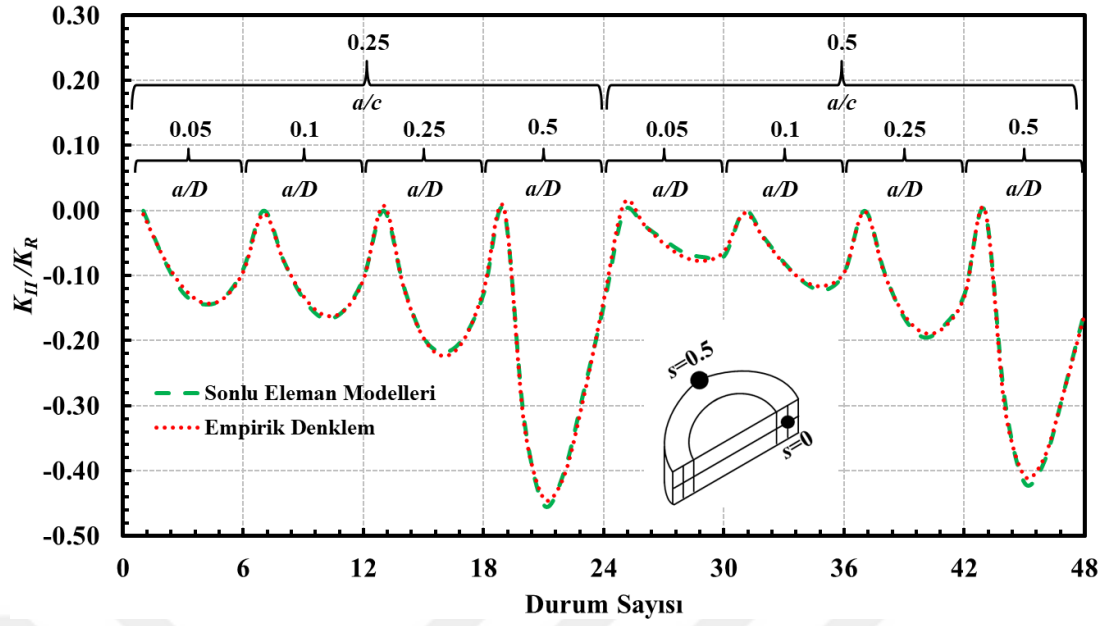
Bölüm 3.2’de verilen durumların neticelerinden faydalanılarak deneysel eşitliklerin katsayıları üretilmiştir. Çatlak önü serbest yüzey bölgesindeki boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} değerleri Minitab [30] yazılımına geçirildikten sonra eşitliklerin katsayıları için regresyon analizleri yapılmıştır. Şekil 4.7-4.12’de sırasıyla boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} değerlerinin Minitab FITS değerleri ile mukayeseleri verilmiştir. Mukayeseler aradaki fark ~%5 yakınlık içerisinde. Tablo 4.3-4.8’de sırasıyla çatlak şekil oranı aralıklarına bağlı boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} denklemlerinin parametre katsayıları verilmiştir. Tablolardan önce de denklemlerin genel polinom biçimleri tanımlanmıştır.



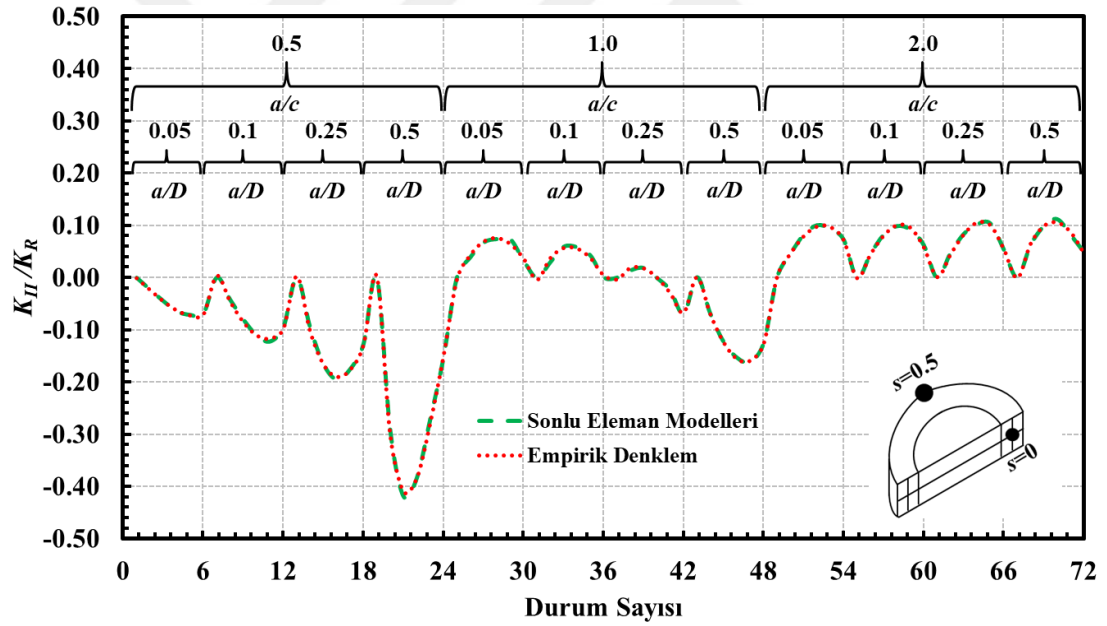
Şekil 4.7. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



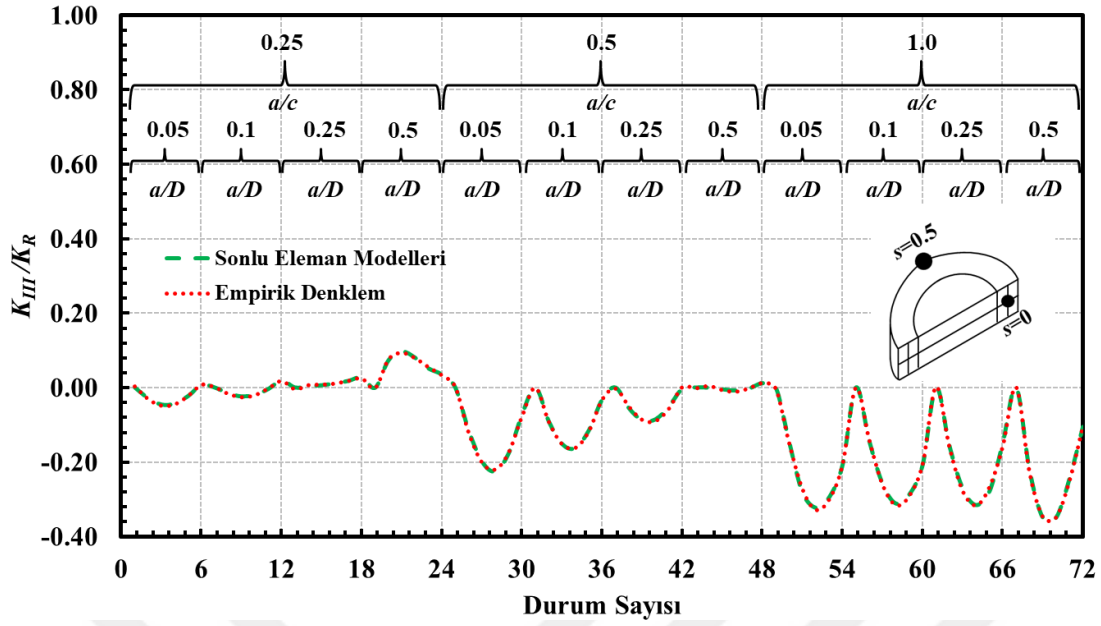
Şekil 4.8. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



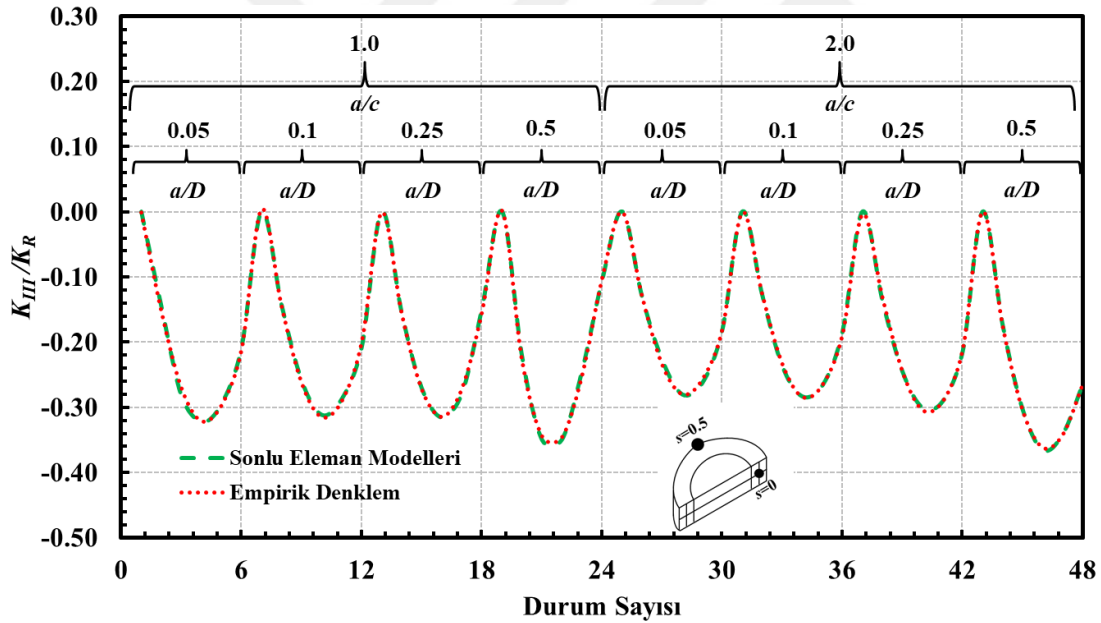
Şekil 4.9. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlığının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 4.10. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlığının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 4.11. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlığının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{III} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 4.12. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlığının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{III} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.

$$K_I = C_0^I + C_1^I \alpha + C_2^I \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^I \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{20}^I \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3 + C_{21}^I \left(\frac{a}{c}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^I = 0.2796287, C_1^I = 1.843575 \cdot 10^{-3}, C_2^I = 1.391034, C_3^I = -5.839138 \cdot 10^{-2},$$

$$C_{20}^I = 1.296189, C_{21}^I = 3.006565$$

Tablo 4.3. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	2.796287E-01	α^2*a/D	-1.308209E-03
α	1.843575E-03	$\alpha*(a/c)^2$	7.733053E-03
a/c	1.391034E+00	$\alpha*a/c*a/D$	3.902167E-02
a/D	-5.839138E-02	$\alpha*(a/D)^2$	-1.306749E-01
α^2	-7.755792E-05	$(a/c)^2*a/D$	2.793807E+00
$(a/c)^2$	-8.454171E-01	$a/c*(a/D)^2$	3.504961E+00
$(a/D)^2$	7.774317E+00	α^3*a/D	1.453495E-05
$\alpha*a/c$	-1.492276E-02	$\alpha^2*a/c*a/D$	-2.981161E-04
$\alpha*a/D$	3.470577E-02	$(a/c)^2*(a/D)^2$	-5.987609E+00
$a/c*a/D$	-3.615755E+00	$a/c*(a/D)^3$	1.296189E+00
$(a/D)^3$	-3.805603E-01	$(a/c)^2*(a/D)^3$	3.006565E+00

$$K_I = C_0^I + C_1^I \alpha + C_2^I \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^I \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{13}^I \alpha \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^2 + C_{14}^I \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^I = 0.8798016, C_1^I = -5.506626*10^{-3}, C_2^I = -7.883076*10^{-2}, C_3^I = -0.2618287,$$

$$C_{13}^I = 5.839192*10^{-2}, C_{14}^I = -2.550219$$

Tablo 4.4. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	8.798016E-01	$(a/D)^3$	6.472413E+00
α	-5.506626E-03	α^2*a/D	-1.166212E-03
a/c	-7.883076E-02	$\alpha*(a/D)^2$	-1.640912E-01
a/D	-2.618287E-01	$a/c*(a/D)^2$	-2.609561E+00
α^2	-6.287014E-05	α^3*a/D	1.027739E-05
$(a/D)^2$	6.964646E+00	$\alpha*a/c*(a/D)^2$	5.839192E-02
$\alpha*a/D$	4.987588E-02	$a/c*(a/D)^3$	-2.550219E+00
$a/c*a/D$	-9.296162E-02		

$$K_{II} = C_0^{II} + C_1^{II} \alpha + C_2^{II} \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^{II} \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{17}^{II} \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3 + C_{18}^{II} \alpha^3 \left(\frac{a}{D}\right)^2$$

$$C_0^{II} = -4.708511*10^{-2}, C_1^{II} = -7.901669*10^{-3}, C_2^{II} = 0.1727601, C_3^{II} = 0.5512688,$$

$$C_{17}^{II} = -9.738655, C_{18}^{II} = -2.605945*10^{-5}$$

Tablo 4.5. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlığının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-4.708511E-02	α^2*a/c	-1.332994E-04
α	-7.901669E-03	α^2*a/D	-7.245840E-04
a/c	1.727601E-01	$\alpha*a/c*a/D$	-4.063180E-03
a/D	5.512688E-01	$\alpha*(a/D)^2$	-1.257846E-01
α^2	8.935568E-05	$a/c*(a/D)^2$	9.184561E+00
$(a/D)^2$	-1.498453E+00	α^3*a/D	6.799202E-06
$\alpha*a/c$	1.092061E-02	$\alpha^2*(a/D)^2$	3.694455E-03
$\alpha*a/D$	1.299164E-02	$a/c*(a/D)^3$	-9.738655E+00
$a/c*a/D$	-2.518523E+00	$\alpha^3*(a/D)^2$	-2.605945E-05
$(a/D)^3$	1.212008E+00		

$$K_{II} = C_0^{II} + C_1^{II}\alpha + C_2^{II}\left(\frac{a}{c}\right) + C_3^{II}\left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{36}^{II}\alpha^3\left(\frac{a}{c}\right)^2\left(\frac{a}{D}\right)^2 + C_{37}^{II}\alpha^2\left(\frac{a}{c}\right)^2\left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^{II} = -1.506597*10^{-2}, C_1^{II} = -4.102537*10^{-3}, C_2^{II} = 1.217632*10^{-2}, C_3^{II} = 0.5257396, C_{36}^{II} = -1.687353*10^{-5}, C_{37}^{II} = 1.597305*10^{-3}$$

Tablo 4.6. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlığının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-1.506597E-02	$\alpha^2*(a/c)^2$	3.937895E-05
α	-4.102537E-03	$\alpha^2*a/c*a/D$	-1.998795E-03
a/c	1.217632E-02	$\alpha*(a/c)^2*a/D$	-6.380469E-02
a/D	5.257396E-01	$\alpha*a/c*(a/D)^2$	-5.156699E-01
α^2	2.224158E-05	$\alpha*(a/D)^3$	-6.554567E-01
$(a/c)^2$	-8.739416E-04	$(a/c)^2*(a/D)^2$	-8.342457E-01
$(a/D)^2$	-2.249027E+00	$a/c*(a/D)^3$	-3.359020E+00
$\alpha*a/c$	1.286113E-02	$\alpha^3*a/c*a/D$	-6.337435E-06
$\alpha*a/D$	-1.440738E-01	$\alpha^3*(a/D)^2$	-4.730057E-05
$a/c*a/D$	-7.331371E-01	$\alpha^2*(a/c)^2*a/D$	8.025577E-04
$(a/D)^3$	2.544784E+00	$\alpha^2*(a/D)^3$	6.822823E-03
α^2*a/c	-1.032954E-04	$\alpha*(a/c)^2*(a/D)^2$	1.527305E-01

Tablo 4.6. (Devamı) Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
α^2*a/D	1.051208E-03	$\alpha*a/c*(a/D)^3$	7.662653E-01
$\alpha*(a/c)^2$	-4.606349E-03	$(a/c)^2*(a/D)^3$	8.545575E-01
$\alpha*a/c*a/D$	2.007326E-01	$\alpha^3*a/c*(a/D)^2$	6.265249E-05
$\alpha*(a/D)^2$	3.841713E-01	$\alpha^2*a/c*(a/D)^3$	-7.327184E-03
$(a/c)^2*a/D$	2.060750E-01	$\alpha*(a/c)^2*(a/D)^3$	-1.987842E-01
$a/c*(a/D)^2$	3.084672E+00	$\alpha^3*(a/c)^2*(a/D)^2$	-1.687353E-05
α^3*a/D	7.711219E-06	$\alpha^2*(a/c)^2*(a/D)^3$	1.597305E-03

$$K_{III} = C_0^{III} + C_1^{III} \alpha + C_2^{III} \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^{III} \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{34}^{III} \alpha \left(\frac{a}{c}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^3 + C_{35}^{III} \alpha^2 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^{III} = 6.870245*10^{-3}, C_1^{III} = 9.377235*10^{-3}, C_2^{III} = 3.704222*10^{-3},$$

$$C_3^{III} = -4.392068*10^{-2}, C_{34}^{III} = -0.6114805, C_{35}^{III} = -1.447180*10^{-3}$$

Tablo 4.7. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	6.870245E-03	α^3*a/c	5.261270E-06
α	9.377235E-03	$\alpha^2*(a/c)^2$	-5.227176E-04
a/c	3.704222E-03	$\alpha^2*a/c*a/D$	-2.383188E-03
a/D	-4.392068E-02	$\alpha*(a/c)^2*a/D$	-3.052441E-01
α^2	-5.631471E-05	$\alpha*a/c*(a/D)^2$	-9.148158E-01
$(a/c)^2$	-1.553276E-02	$(a/c)^2*(a/D)^2$	-1.148938E+00
$(a/D)^2$	-1.023497E-01	$a/c*(a/D)^3$	-1.631042E+00
$\alpha*a/c$	-6.685184E-02	α^4*a/c	-2.717654E-08
$\alpha*a/D$	-3.148379E-02	$\alpha^3*(a/D)^2$	8.647047E-06
$a/c*a/D$	-1.738307E-01	$\alpha^2*(a/c)^2*a/D$	1.856950E-03
α^3	-4.470463E-07	$\alpha^2*a/c*(a/D)^2$	3.667126E-03
$(a/D)^3$	3.348032E-01	$\alpha^2*(a/D)^3$	-1.779951E-03
α^2*a/c	4.705618E-04	$\alpha*(a/c)^2*(a/D)^2$	6.477434E-01
$\alpha*(a/c)^2$	4.744614E-02	$\alpha*a/c*(a/D)^3$	8.022622E-01
$\alpha*a/c*a/D$	3.708546E-01	$(a/c)^2*(a/D)^3$	1.398062E+00

Tablo 4.7. (Devamı) Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
$\alpha^*(a/D)^2$	7.202023E-02	$\alpha^3*a/c*(a/D)^2$	-1.560124E-05
$(a/c)^2*a/D$	2.808933E-01	$\alpha^*(a/c)^2*(a/D)^3$	-6.114805E-01
$a/c*(a/D)^2$	1.100605E+00	$\alpha^2*(a/c)^2*(a/D)^3$	-1.447180E-03

$$K_{III} = C_0^{III} + C_1^{III}\alpha + C_2^{III}\left(\frac{a}{c}\right) + C_3^{III}\left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{22}^{III}\alpha^3\left(\frac{a}{c}\right)\left(\frac{a}{D}\right)^2 + C_{23}^{III}\alpha^2\left(\frac{a}{c}\right)\left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^{III} = -2.372014*10^{-2}, C_1^{III} = -1.255318*10^{-2}, C_2^{III} = 1.228292*10^{-2},$$

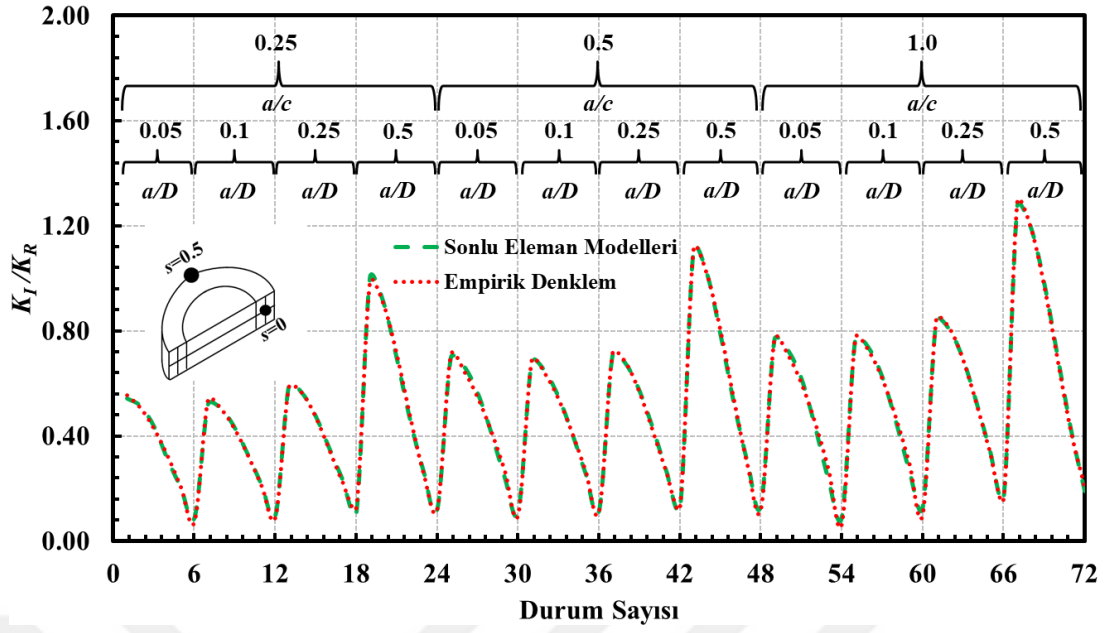
$$C_3^{III} = 0.5664887, C_{22}^{III} = 4.577214*10^{-6}, C_{23}^{III} = 4.575359*10^{-4}$$

Tablo 4.8. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

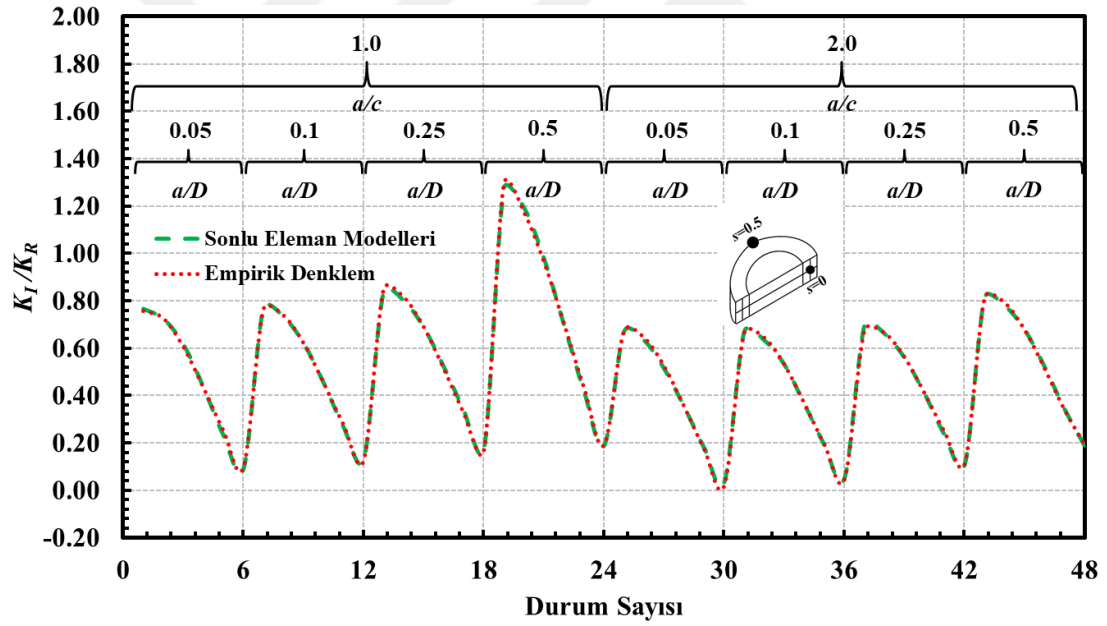
Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-2.372014E-02	$\alpha^*(a/D)^2$	-8.536253E-02
α	-1.255318E-02	$a/c*(a/D)^2$	1.272107E+00
a/c	1.228292E-02	α^4	-1.902403E-08
a/D	5.664887E-01	α^3*a/D	5.082804E-06
$(a/D)^2$	-2.659796E+00	$\alpha^2*(a/D)^2$	3.383968E-03
α^*a/c	1.639458E-03	$\alpha^*a/c*(a/D)^2$	1.843583E-02
α^*a/D	1.812253E-02	$a/c*(a/D)^3$	-1.516001E+00
$a/c*a/D$	-2.844210E-01	$\alpha^3*(a/D)^2$	-1.951825E-05
α^3	3.083524E-06	$\alpha^2*a/c*(a/D)^2$	-9.565336E-04
$(a/D)^3$	3.273423E+00	$\alpha^2*(a/D)^3$	-1.018623E-03
α^2*a/c	-1.568239E-05	$\alpha^3*a/c*(a/D)^2$	4.577214E-06
α^2*a/D	-6.532975E-04	$\alpha^2*a/c*(a/D)^3$	4.575359E-04

4.1.2. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak

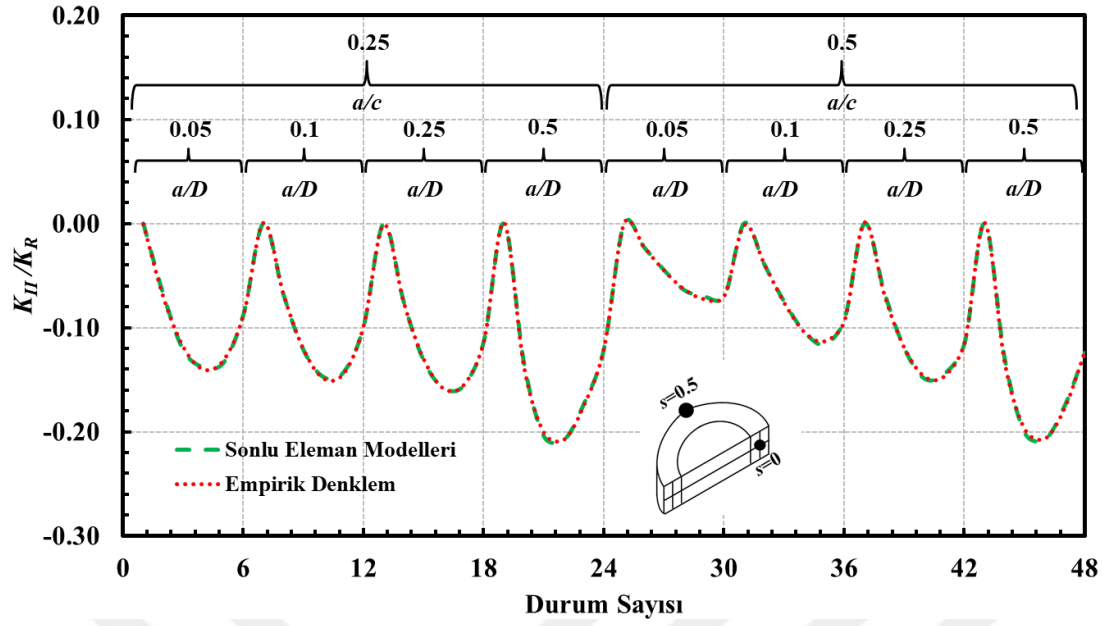
Bölüm 3.3'te verilen durumların neticelerinden faydalanılarak deneysel eşitliklerin katsayıları üretilmiştir. Şekil 4.13-4.18'de sırasıyla boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} değerlerinin Minitab FITS değerleri ile mukayeseleri verilmiştir. Mukayeseler arasındaki fark ~%5 yakınlık içerisinde. Çatlak şekil oranı aralıklarına bağlı boyutsuz K_I , K_{II} , K_{III} denklemlerinin parametre katsayıları Tablo 4.9-4.14'te verilmiştir. Tablolardan önce de denklemlerin genel polinom biçimleri tanımlanmıştır.



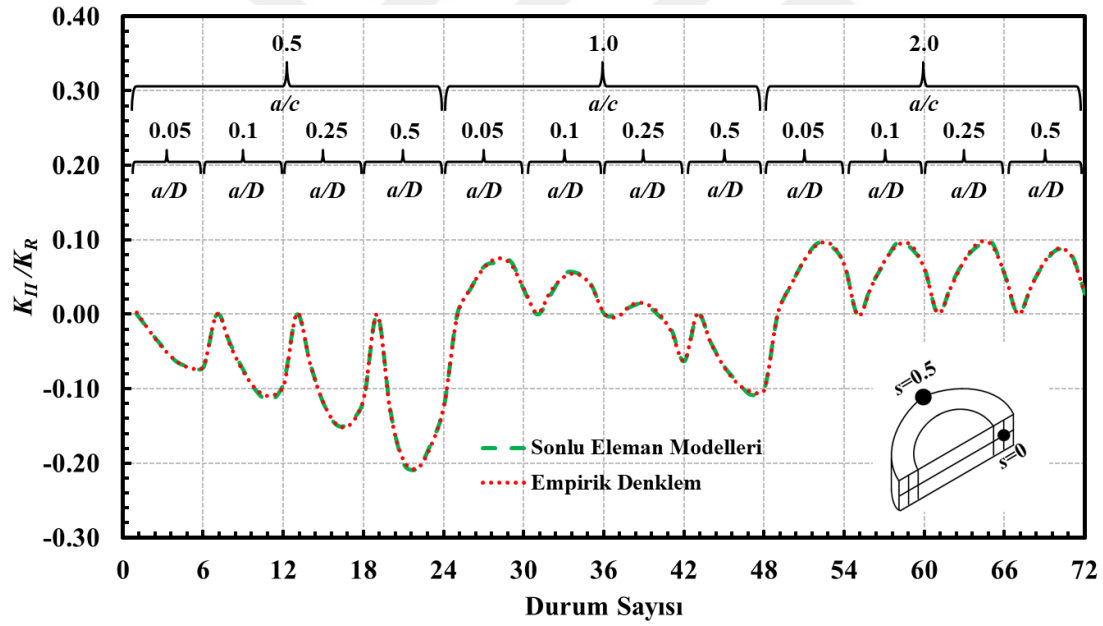
Şekil 4.13. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlığının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



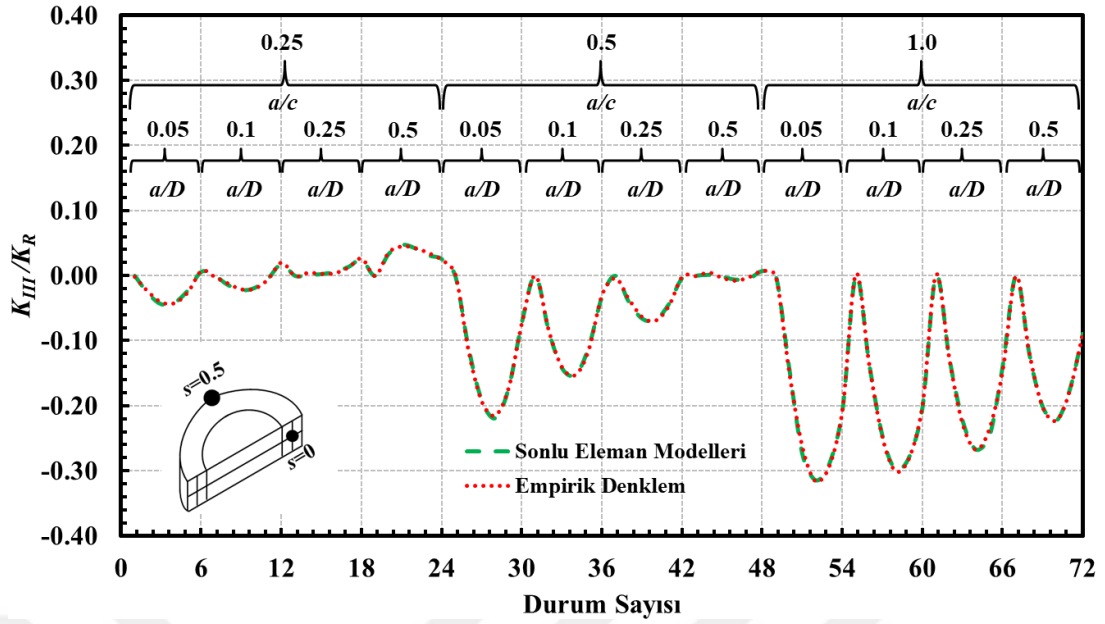
Şekil 4.14. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlığının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



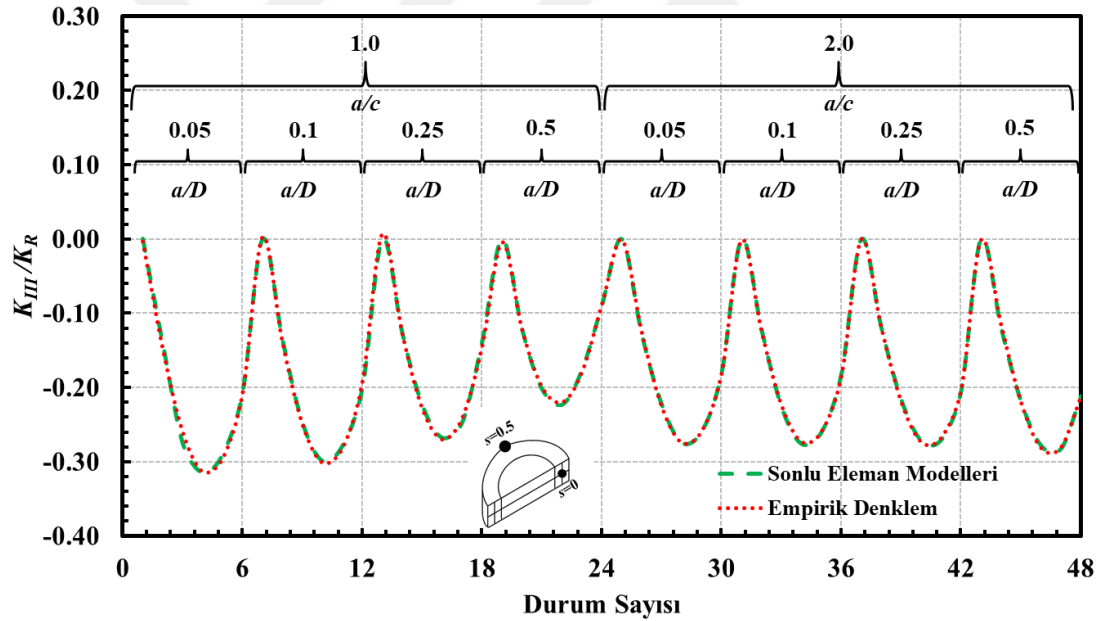
Şekil 4.15. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 4.16. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 4.17. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{III} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 4.18. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) boyutsuz K_{III} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.

$$K_I = C_0^I + C_1^I \alpha + C_2^I \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^I \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{19}^I \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3 + C_{20}^I \left(\frac{a}{c}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^I = 0.3440424, C_1^I = -2.029577 \cdot 10^{-3}, C_2^I = 1.165743, C_3^I = -0.7326561,$$

$$C_{19}^I = 8.790061, C_{20}^I = -4.166659$$

Tablo 4.9. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	3.440424E-01	α^2*a/c	-4.448378E-05
α	-2.029577E-03	α^2*a/D	-6.863163E-04
a/c	1.165743E+00	$\alpha*(a/c)^2$	5.551917E-03
a/D	-7.326561E-01	$\alpha*(a/D)^2$	-5.166692E-02
α^2	-3.658652E-05	$(a/c)^2*a/D$	1.519379E+00
$(a/c)^2$	-7.329399E-01	$a/c*(a/D)^2$	-4.491498E+00
$(a/D)^2$	4.664811E+00	α^3*a/D	6.472878E-06
$\alpha*a/c$	-7.543753E-03	$(a/c)^2*(a/D)^2$	1.202572E+00
$\alpha*a/D$	3.217195E-02	$a/c*(a/D)^3$	8.790061E+00
$a/c*a/D$	-9.868197E-01	$(a/c)^2*(a/D)^3$	-4.166659E+00
$(a/D)^3$	-2.468779E+00		

$$K_I = C_0^I + C_1^I \alpha + C_2^I \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^I \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{12}^I \alpha \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^2 + C_{13}^I \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^I = 0.8263582, C_1^I = 1.301145*10^{-3}, C_2^I = -7.027037*10^{-2}, C_3^I = 0.1864122,$$

$$C_{12}^I = 2.551676*10^{-2}, C_{13}^I = -1.675016$$

Tablo 4.10. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	8.263582E-01	$a/c*a/D$	-2.304118E-01
α	1.301145E-03	α^3	1.964662E-06
a/c	-7.027037E-02	$(a/D)^3$	3.829639E+00
a/D	1.864122E-01	$\alpha*(a/D)^2$	-7.150078E-02
α^2	-2.883388E-04	$a/c*(a/D)^2$	-3.342008E-01
$(a/D)^2$	1.496977E+00	$\alpha*a/c*(a/D)^2$	2.551676E-02
$\alpha*a/D$	1.210792E-02	$a/c*(a/D)^3$	-1.675016E+00

$$K_{II} = C_0^{II} + C_1^{II} \alpha + C_2^{II} \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^{II} \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{24}^{II} \alpha^2 \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3 + C_{25}^{II} \alpha^3 \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^{II} = -1.126264*10^{-2}, C_1^{II} = -1.124946*10^{-2}, C_2^{II} = 3.111494*10^{-2}, C_3^{II} = 0.2652936,$$

$$C_{24}^{II} = -1.116750*10^{-2}, C_{25}^{II} = 1.368192*10^{-4}$$

Tablo 4.11. Eğilme yükü altında silindirden bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-1.126264E-02	$\alpha^*(a/D)^2$	-9.706422E-02
α	-1.124946E-02	$a/c*(a/D)^2$	3.786717E+00
a/c	3.111494E-02	α^3*a/c	-6.962722E-07
a/D	2.652936E-01	α^3*a/D	4.916249E-06
α^2	1.316022E-04	$\alpha^2*(a/D)^2$	2.319980E-03
$(a/D)^2$	-1.378281E+00	$\alpha*a/c*(a/D)^2$	1.636915E-01
$\alpha*a/c$	2.104335E-02	$a/c*(a/D)^3$	-4.915029E+00
$\alpha*a/D$	4.582512E-02	$\alpha^3*a/c*a/D$	1.783803E-05
$a/c*a/D$	-7.292833E-01	$\alpha^3*(a/D)^2$	-1.370081E-05
$(a/D)^3$	1.798086E+00	$\alpha^2*a/c*(a/D)^2$	6.174974E-03
α^2*a/c	-2.050003E-04	$\alpha^3*a/c*(a/D)^2$	-9.972727E-05
α^2*a/D	-9.835174E-04	$\alpha^2*a/c*(a/D)^3$	-1.116750E-02
$\alpha*a/c*a/D$	-1.201850E-01	$\alpha^3*a/c*(a/D)^3$	1.368192E-04

$$K_{II} = C_0^{II} + C_1^{II}\alpha + C_2^{II}\left(\frac{a}{c}\right) + C_3^{II}\left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{34}^{II}\alpha^2\left(\frac{a}{c}\right)\left(\frac{a}{D}\right)^3 + C_{35}^{II}\alpha^3\left(\frac{a}{c}\right)^2\left(\frac{a}{D}\right)^2$$

$$C_0^{II} = 3.849105*10^{-2}, C_1^{II} = -6.080006*10^{-3}, C_2^{II} = -7.875084*10^{-2}, C_3^{II} = -0.7479887, C_{34}^{II} = -1.174261*10^{-3}, C_{35}^{II} = -7.841331*10^{-6}$$

Tablo 4.12. Eğilme yükü altında silindirden bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	3.849105E-02	α^3*a/D	5.752118E-06
α	-6.080006E-03	$\alpha^2*a/c*a/D$	-1.061325E-03
a/c	-7.875084E-02	$\alpha*(a/c)^2*a/D$	-2.215712E-02
a/D	-7.479887E-01	$\alpha*a/c*(a/D)^2$	-1.592028E-01
$(a/c)^2$	3.144389E-02	$\alpha*(a/D)^3$	-2.099316E-01
$(a/D)^2$	3.784436E+00	$(a/c)^2*(a/D)^2$	3.276833E+00
$\alpha*a/c$	1.413039E-02	$a/c*(a/D)^3$	1.049421E+01
$\alpha*a/D$	-6.946829E-02	$\alpha^3*(a/c)^2$	4.773300E-07
$a/c*a/D$	1.575110E+00	$\alpha^3*a/c*a/D$	-3.798316E-06

Tablo 4.12. (Devamı) Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
α^3	5.243525E-07	$\alpha^3*(a/D)^2$	-2.260465E-05
$(a/D)^3$	-4.903226E+00	$\alpha^2*(a/c)^2*a/D$	4.516134E-04
α^2*a/D	4.412403E-04	$\alpha^2*(a/D)^3$	1.972794E-03
$\alpha*(a/c)^2$	-4.899290E-03	$\alpha*(a/c)^2*(a/D)^2$	3.275661E-02
$\alpha*a/c*a/D$	7.919727E-02	$\alpha*a/c*(a/D)^3$	1.184140E-01
$\alpha*(a/D)^2$	1.726574E-01	$(a/c)^2*(a/D)^3$	-4.269847E+00
$(a/c)^2*a/D$	-6.386224E-01	$\alpha^3*a/c*(a/D)^2$	2.829068E-05
$a/c*(a/D)^2$	-8.058382E+00	$\alpha^2*a/c*(a/D)^3$	-1.174261E-03
α^3*a/c	-1.366787E-06	$\alpha^3*(a/c)^2*(a/D)^2$	-7.841331E-06

$$K_{III} = C_0^{III} + C_1^{III}\alpha + C_2^{III}\left(\frac{a}{c}\right) + C_3^{III}\left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{34}^{III}\alpha^2\left(\frac{a}{c}\right)^2\left(\frac{a}{D}\right)^2 + C_{35}^{III}\alpha\left(\frac{a}{c}\right)^2\left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^{III} = -1.585956*10^{-2}, C_1^{III} = 1.322662*10^{-2}, C_2^{III} = 7.533197*10^{-2},$$

$$C_3^{III} = 0.1215706, C_{34}^{III} = -3.931391*10^{-3}, C_{35}^{III} = -0.6677494$$

Tablo 4.13. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-1.585956E-02	α^3*a/c	3.482834E-06
α	1.322662E-02	$\alpha^2*(a/c)^2$	-6.295155E-04
a/c	7.533197E-02	$\alpha^2*a/c*a/D$	-4.303991E-03
a/D	1.215706E-01	$\alpha*(a/c)^2*a/D$	-4.172777E-01
α^2	-1.424446E-04	$\alpha*a/c*(a/D)^2$	-1.046062E+00
$(a/c)^2$	-6.661959E-02	$(a/c)^2*(a/D)^2$	-2.073039E+00
$(a/D)^2$	-8.693397E-02	$a/c*(a/D)^3$	-3.672723E-01
$\alpha*a/c$	-7.823356E-02	α^4*a/c	-1.930450E-08
$\alpha*a/D$	-6.383923E-02	$\alpha^3*(a/D)^2$	1.801537E-06
$a/c*a/D$	-7.773265E-01	$\alpha^2*(a/c)^2*a/D$	3.531871E-03
$(a/D)^3$	-1.864758E-01	$\alpha^2*a/c*(a/D)^2$	5.351334E-03
α^2*a/c	7.213296E-04	$\alpha^2*(a/D)^3$	-1.474779E-03
α^2*a/D	4.826912E-04	$\alpha*(a/c)^2*(a/D)^2$	8.946644E-01

Tablo 4.13. (Devamı) Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-1.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
$\alpha^*(a/c)^2$	5.469779E-02	$\alpha^*a/c*(a/D)^3$	7.311663E-01
$\alpha^*a/c*a/D$	4.995065E-01	$(a/c)^2*(a/D)^3$	1.409758E+00
$\alpha^*(a/D)^2$	9.133990E-02	$\alpha^3*a/c*(a/D)^2$	-3.624281E-06
$(a/c)^2*a/D$	8.200903E-01	$\alpha^2*(a/c)^2*(a/D)^2$	-3.931391E-03
$a/c*(a/D)^2$	1.429189E+00	$\alpha^*(a/c)^2*(a/D)^3$	-6.677494E-01

$$K_{III} = C_0^{III} + C_1^{III} \alpha + C_2^{III} \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^{III} \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{17}^{III} \alpha^3 \left(\frac{a}{D}\right)^3 + C_{18}^{III} \alpha^3 \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^{III} = -2.441522*10^{-2}, C_1^{III} = -1.161292*10^{-2}, C_2^{III} = 1.219082*10^{-2},$$

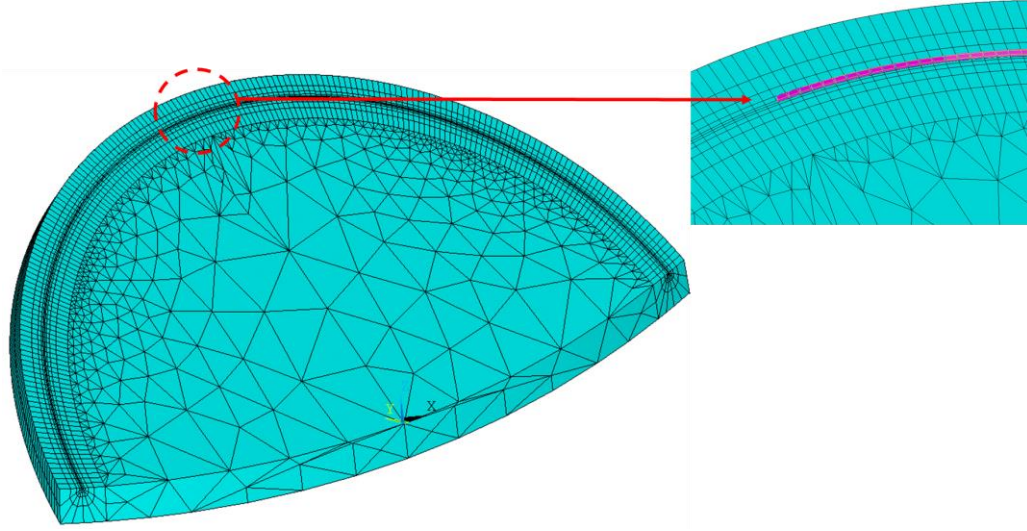
$$C_3^{III} = 0.4550427, C_{17}^{III} = -9.719747*10^{-6}, C_{18}^{III} = 6.215084*10^{-6}$$

Tablo 4.14. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=1.0-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının serbest yüzey noktası için ($s=0$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-2.441522E-02	α^2*a/c	-1.574762E-05
α	-1.161292E-02	α^2*a/D	-3.799951E-05
a/c	1.219082E-02	$a/c*(a/D)^2$	8.226557E-01
a/D	4.550427E-01	α^4	-1.174395E-08
$(a/D)^2$	-1.548045E+00	$\alpha^2*(a/D)^2$	5.574871E-04
α^*a/c	1.564598E-03	$a/c*(a/D)^3$	-7.767718E-01
α^*a/D	3.073376E-03	$\alpha^2*a/c*(a/D)^2$	-3.439675E-04
$a/c*a/D$	-2.349256E-01	$\alpha^3*(a/D)^3$	-9.719747E-06
α^3	2.383753E-06	$\alpha^3*a/c*(a/D)^3$	6.215084E-06
$(a/D)^3$	1.412742E+00		

4.2. Çatlak Ucu Derinlik Noktaları ($s=0.5$)

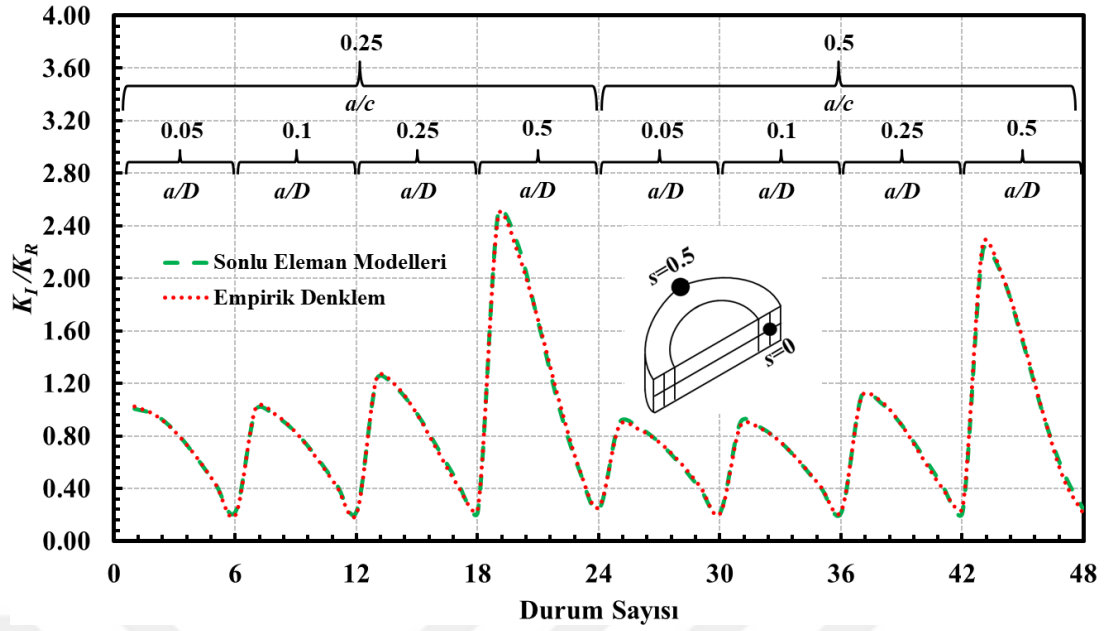
Serbest yüzeyler için boyutsuz K_I , K_{II} ve K_{III} denklemleri oluşturulduktan sonra çatlak ucu derinlik noktası için de ilgili denklemler oluşturulmuştur. Şekil 4.19'da çatlak ucu derinlik noktasının sonlu öğeler ağ yapısı gösterilmektedir.



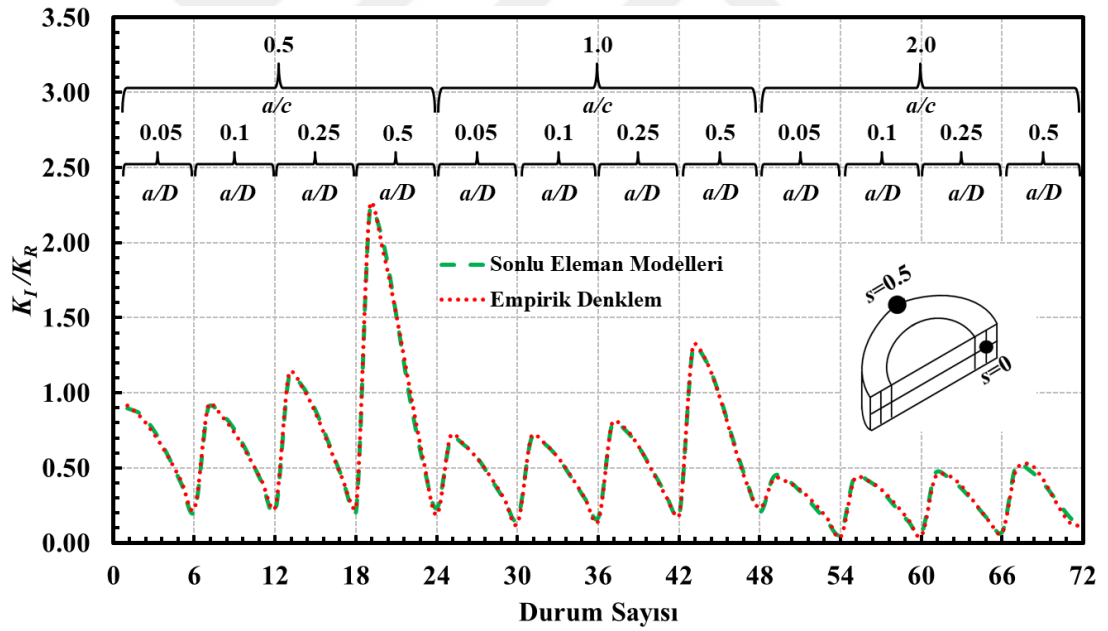
Şekil 4.19. Sonlu ögeler ağ modeli üzerinde çatlak önü derinlik noktasının görünümü.

4.2.1. Eksenel gerilmeye maruz dönmüş çatlak

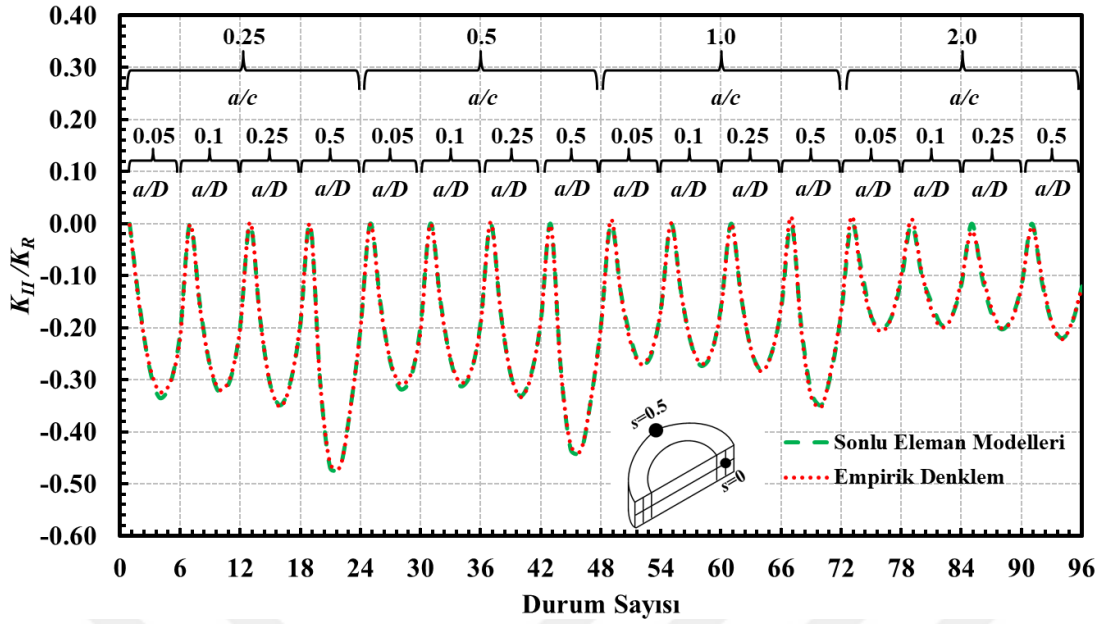
Bölüm 3.2’de verilen analiz sonuçlarından $s=0.5$ konumundaki değerler Minitab [30] yazılımına aktararak denklemlerin katsayıları oluşturulmuştur. Boyutsuz K_I denklemlerini elde edebilmek için çatlak şekil oranı değerleri dikkate alınmıştır. Boyutsuz K_I değerlerinin Minitab FITS değerleri ile mukayeseleri Şekil 4.20-4.21’de verilmiştir. Denklemler Tablo 4.15-4.16’da gösterilmektedir. Boyutsuz K_{II} denklemi tüm analiz sonuçları regresyona dahil edilerek oluşturulmuştur. Boyutsuz K_{II} değerlerinin Minitab FITS değerleri ile mukayeseleri de Şekil 4.22’de verilmiştir. Mukayeseler arasındaki fark $\sim 5\%$ yakınlık içerisindeydir. Empirik denklem de Tablo 4.17’de gösterilmiştir. Tablolardan önce de denklemlerin genel polinom biçimleri tanımlanmıştır. Eksenel gerilme yükü altındaki dönmüş çatlak için derinlik noktasında boyutsuz K_{III} değerleri 0 olduğu için denklem oluşturulmamıştır.



Şekil 4.20. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 4.21. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



Şekil 4.22. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan dönmüş yüzey çatlaklarının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) boyutsuz K_{II} değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.

$$K_I = C_0^I + C_1^I \alpha + C_2^I \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^I \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{13}^I \alpha^3 \left(\frac{a}{D}\right) + C_{14}^I \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^I = 1.246614, C_1^I = -5.938120 \cdot 10^{-3}, C_2^I = -0.6607970, C_3^I = -2.135992,$$

$$C_{13}^I = 1.475396 \cdot 10^{-5}, C_{14}^I = 8.356518$$

Tablo 4.15. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.246614E+00	$a/c \cdot a/D$	2.014634E+00
α	-5.938120E-03	$(a/D)^3$	-3.507292E+00
a/c	-6.607970E-01	$\alpha^2 \cdot a/D$	-1.465016E-03
a/D	-2.135992E+00	$\alpha \cdot (a/D)^2$	-1.172728E-01
α^2	-1.068121E-04	$a/c \cdot (a/D)^2$	-8.922089E+00
$(a/D)^2$	1.174225E+01	$\alpha^3 \cdot a/D$	1.475396E-05
$\alpha \cdot a/c$	8.327675E-03	$a/c \cdot (a/D)^3$	8.356518E+00
$\alpha \cdot a/D$	5.039937E-02		

$$K_I = C_0^I + C_1^I \alpha + C_2^I \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^I \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{20}^I \alpha \left(\frac{a}{c}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^2 + C_{21}^I \left(\frac{a}{c}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^I = 1.216626, C_1^I = -6.891708 \cdot 10^{-3}, C_2^I = -0.5761242, C_3^I = -1.780665,$$

$$C_{20}^I = -4.377849 \cdot 10^{-2}, C_{21}^I = -0.5365369$$

Tablo 4.16. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlaklarının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.216626E+00	α^2*a/D	-8.816751E-04
α	-6.891708E-03	$\alpha*a/c*a/D$	-1.114701E-02
a/c	-5.761242E-01	$\alpha*(a/D)^2$	-1.861160E-01
a/D	-1.780665E+00	$(a/c)^2*a/D$	-3.778291E-01
α^2	-5.842451E-05	$a/c*(a/D)^2$	-1.281575E+01
$(a/c)^2$	9.034999E-02	α^3*a/D	8.239716E-06
$(a/D)^2$	1.247869E+01	$\alpha*a/c*(a/D)^2$	1.789666E-01
$\alpha*a/c$	3.048974E-03	$(a/c)^2*(a/D)^2$	3.387215E+00
$\alpha*a/D$	4.410796E-02	$a/c*(a/D)^3$	7.938311E-01
$a/c*a/D$	1.625400E+00	$\alpha*(a/c)^2*(a/D)^2$	-4.377849E-02
$(a/D)^3$	4.081858E-01	$(a/c)^2*(a/D)^3$	-5.365369E-01

$$K_{II} = C_0'' + C_1''\alpha + C_2''\left(\frac{a}{c}\right) + C_3''\left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{33}''\alpha\left(\frac{a}{c}\right)^3\left(\frac{a}{D}\right)^2 + C_{34}''\left(\frac{a}{c}\right)^3\left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$C_0'' = 1.506247*10^{-3}$, $C_1'' = -1.376953*10^{-2}$, $C_2'' = -3.939851*10^{-2}$, $C_3'' = -8.002188*10^{-2}$,
 $C_{33}'' = 1.089256*10^{-2}$, $C_{34}'' = 1.716060$

Tablo 4.17. Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan dönmüş yüzey çatlaklarının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.

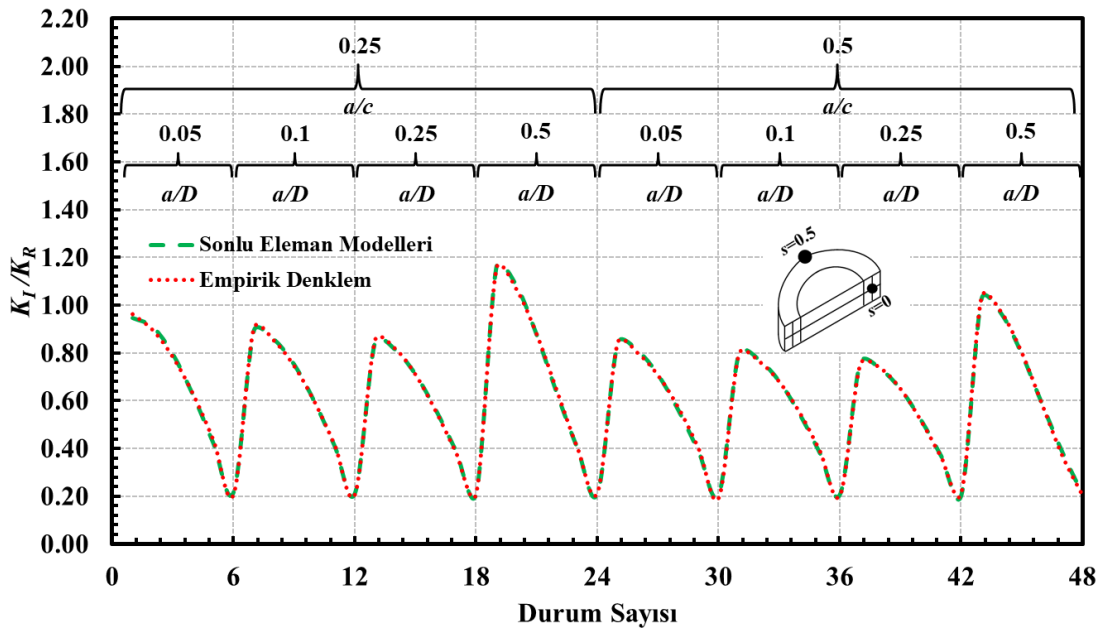
Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.506247E-03	$\alpha^2*(a/D)^2$	2.623768E-03
α	-1.376953E-02	$\alpha*(a/c)^2*a/D$	1.633085E-02
a/c	-3.939851E-02	$\alpha*a/c*(a/D)^2$	3.904421E-02
a/D	-8.002188E-02	$\alpha*(a/D)^3$	5.642262E-02
α^2	1.343198E-04	$(a/c)^3*a/D$	5.568195E-01
$(a/c)^2$	9.160344E-02	$(a/c)^2*(a/D)^2$	4.790739E+00
$(a/D)^2$	4.210100E-01	$a/c*(a/D)^3$	1.012653E+00
$\alpha*a/c$	1.225218E-03	α^4*a/D	-6.322464E-08
$\alpha*a/D$	2.959905E-02	$\alpha^3*(a/D)^2$	-1.965533E-05
$a/c*a/D$	6.444362E-01	$\alpha*(a/c)^3*a/D$	-5.167273E-03
$(a/c)^3$	-3.432615E-02	$\alpha*(a/c)^2*(a/D)^2$	-3.361774E-02
$(a/D)^3$	-4.087344E-01	$(a/c)^3*(a/D)^2$	-2.057161E+00
α^2*a/D	-9.793649E-04	$(a/c)^2*(a/D)^3$	-3.408301E+00

Tablo 4.17. (Devamı) Eksenel gerilme yükü altında silindirde bulunan dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.

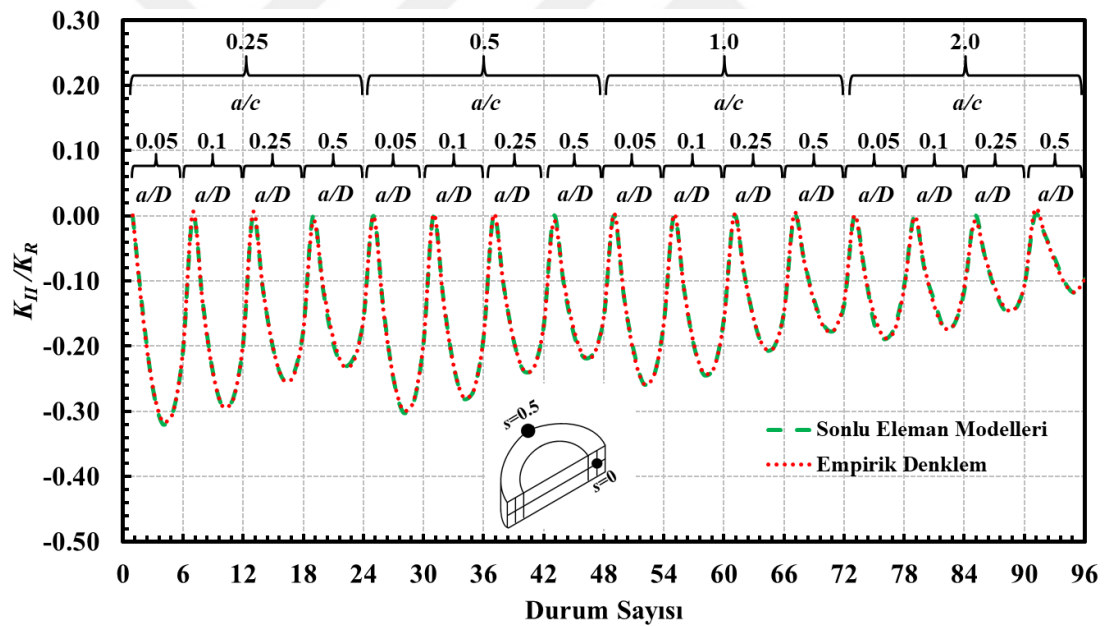
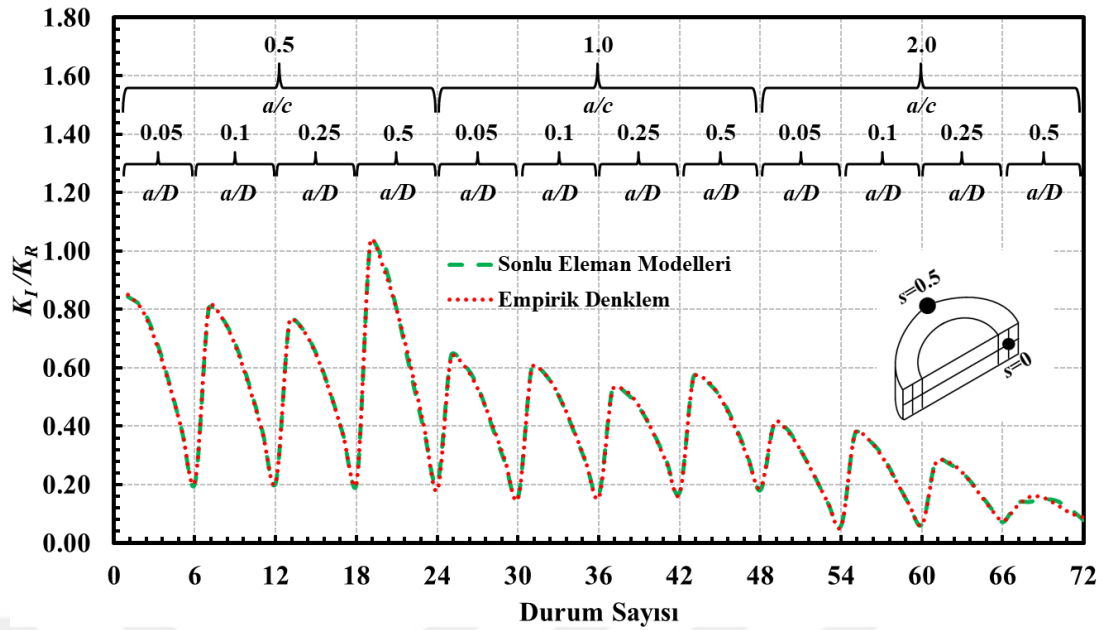
Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
$\alpha^*(a/D)^2$	-1.412321E-01	$\alpha^3*a/c*(a/D)^2$	4.942067E-06
$(a/c)^2*a/D$	-1.409711E+00	$\alpha^2*a/c*(a/D)^3$	-6.563128E-04
$a/c*(a/D)^2$	-2.056686E+00	$\alpha^*(a/c)^3*(a/D)^2$	1.089256E-02
α^3*a/D	1.521225E-05	$(a/c)^3*(a/D)^3$	1.716060E+00
$\alpha^2*a/c*a/D$	-2.987901E-04		

4.2.2. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlak

Bölüm 3.3'te verilen analiz sonuçlarındaki $s=0.5$ konumundaki değerler Minitab [30] yazılımına aktarılarak denklemlerin katsayıları oluşturulmuştur. Boyutsuz K_I denklemlerini elde edebilmek için çatlak şekil oranı değerleri dikkate alınmıştır. Boyutsuz K_I değerlerinin Minitab FITS değerleri ile mukayeseleri Şekil 4.23-4.24'te verilmiştir. Denklemler Tablo 4.18-4.19'da gösterilmektedir. Boyutsuz K_{II} denklemi tüm analiz sonuçları regresyona dahil edilerek oluşturulmuştur. Boyutsuz K_{II} değerlerinin Minitab FITS değerleri ile mukayeseleri Şekil 4.25'te verilmiştir. Mukayeseler arasındaki fark $\sim\%5$ yakınlık içerisindeydir. Denklem de Tablo 4.20'de gösterilmiştir. Eğilme gerilmesine maruz dönmüş çatlakta analiz sonuçlarında derinlik noktasında boyutsuz K_{III} değerleri 0 olduğu için denklem oluşturulmamıştır.



Şekil 4.23. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) boyutsuz K_I değerleri ile empirik denklem sonucunun karşılaştırılması.



$$K_I = c_0^I + c_1^I \alpha + c_2^I \left(\frac{a}{c}\right) + c_3^I \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + c_{13}^I \alpha^3 \left(\frac{a}{D}\right) + c_{14}^I \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$\mathbf{C}_0^I = 1.175555, \mathbf{C}_1^I = -5.576283 \times 10^{-3}, \mathbf{C}_2^I = -0.5384427, \mathbf{C}_3^I = -2.201881,$$

$$C_{13}^I = 4.828539 \times 10^{-6}, C_{14}^I = 5.573885$$

Tablo 4.18. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.25-0.5$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.175555E+00	$a/c*a/D$	1.622365E+00
α	-5.576283E-03	$(a/D)^3$	-2.089469E+00
a/c	-5.384427E-01	α^2*a/D	-4.658187E-04
a/D	-2.201881E+00	$\alpha*(a/D)^2$	-5.145879E-02
α^2	-9.123545E-05	$a/c*(a/D)^2$	-5.774428E+00
$(a/D)^2$	5.839689E+00	α^3*a/D	4.828539E-06
$\alpha*a/c$	5.527227E-03	$a/c*(a/D)^3$	5.573885E+00
$\alpha*a/D$	3.059650E-02		

$$K_I = C_0^I + C_1^I \alpha + C_2^I \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^I \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{20}^I \left(\frac{a}{c}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^3 + C_{21}^I \alpha \left(\frac{a}{c}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^I = 1.190817, C_1^I = -3.288545*10^{-3}, C_2^I = -0.6566494, C_3^I = -1.221718,$$

$$C_{20}^I = 1.544886, C_{21}^I = -2.963943*10^{-2}$$

Tablo 4.19. Eğilme yükü altında silindirde bulunan $a/c=0.5-2.0$ şekil oranlarına sahip dönmüş yüzey çatlağının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.

Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	1.190817E+00	$(a/D)^3$	5.409490E+00
α	-3.288545E-03	α^2*a/c	2.758367E-05
a/c	-6.566494E-01	$\alpha*(a/c)^2$	-1.611648E-03
a/D	-1.221718E+00	$(a/c)^2*a/D$	-1.346971E-01
α^2	-1.772999E-04	$a/c*(a/D)^2$	-1.275837E+00
$(a/c)^2$	1.420214E-01	$\alpha*(a/D)^3$	-1.090106E-01
$(a/D)^2$	1.604620E+00	$(a/c)^2*(a/D)^2$	2.242739E-01
$\alpha*a/c$	4.479075E-03	$a/c*(a/D)^3$	-5.651780E+00
$\alpha*a/D$	1.051858E-02	$\alpha*a/c*(a/D)^3$	1.116490E-01
$a/c*a/D$	5.359534E-01	$(a/c)^2*(a/D)^3$	1.544886E+00
α^3	8.404605E-07	$\alpha*(a/c)^2*(a/D)^3$	-2.963943E-02

$$K_{II} = C_0^{II} + C_1^{II} \alpha + C_2^{II} \left(\frac{a}{c}\right) + C_3^{II} \left(\frac{a}{D}\right) + \dots + C_{23}^{II} \left(\frac{a}{c}\right)^2 \left(\frac{a}{D}\right)^3 + C_{24}^{II} \left(\frac{a}{c}\right)^3 \left(\frac{a}{D}\right)^3$$

$$C_0^{II} = -9.128614*10^{-3}, C_1^{II} = -1.304313*10^{-2}, C_2^{II} = -4.584825*10^{-3}, C_3^{II} = 0.3625235,$$

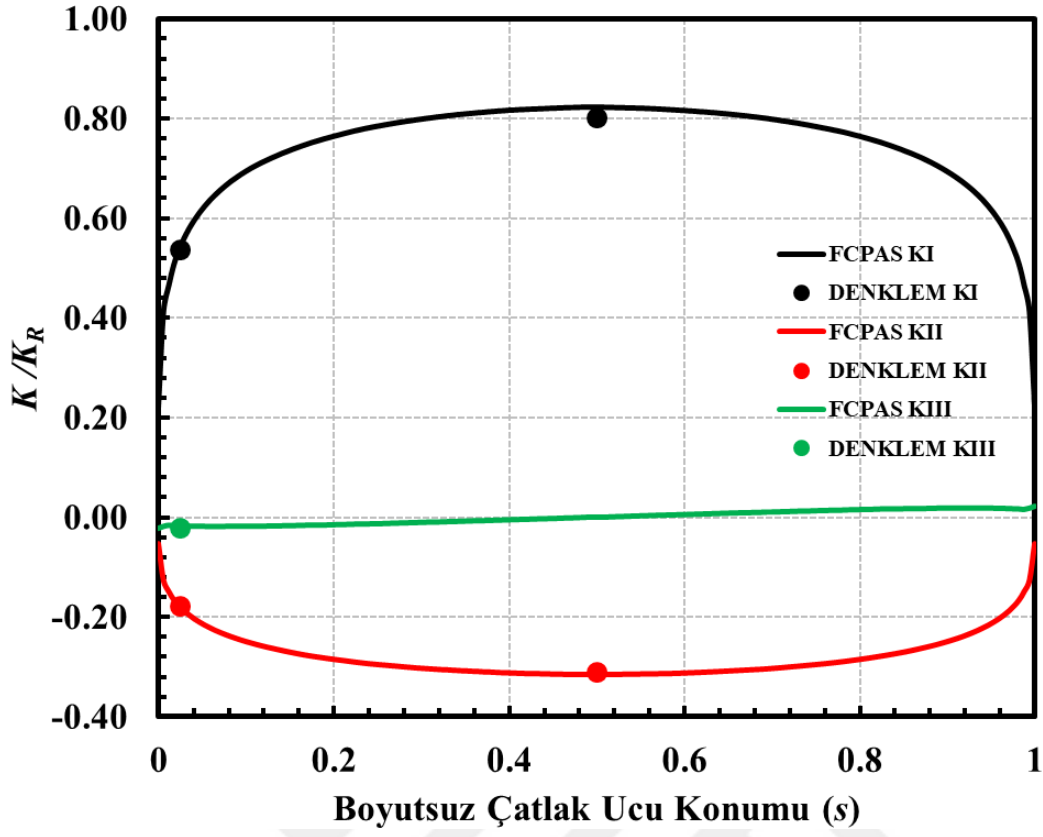
$$C_{23}^{II} = 2.552628, C_{24}^{II} = -0.4182244$$

Tablo 4.20. Eğilme yükü altında silindirde bulunan dönmüş yüzey çatlaklarının çatlak ucu derinlik noktası için ($s=0.5$) terimler ve katsayıları.

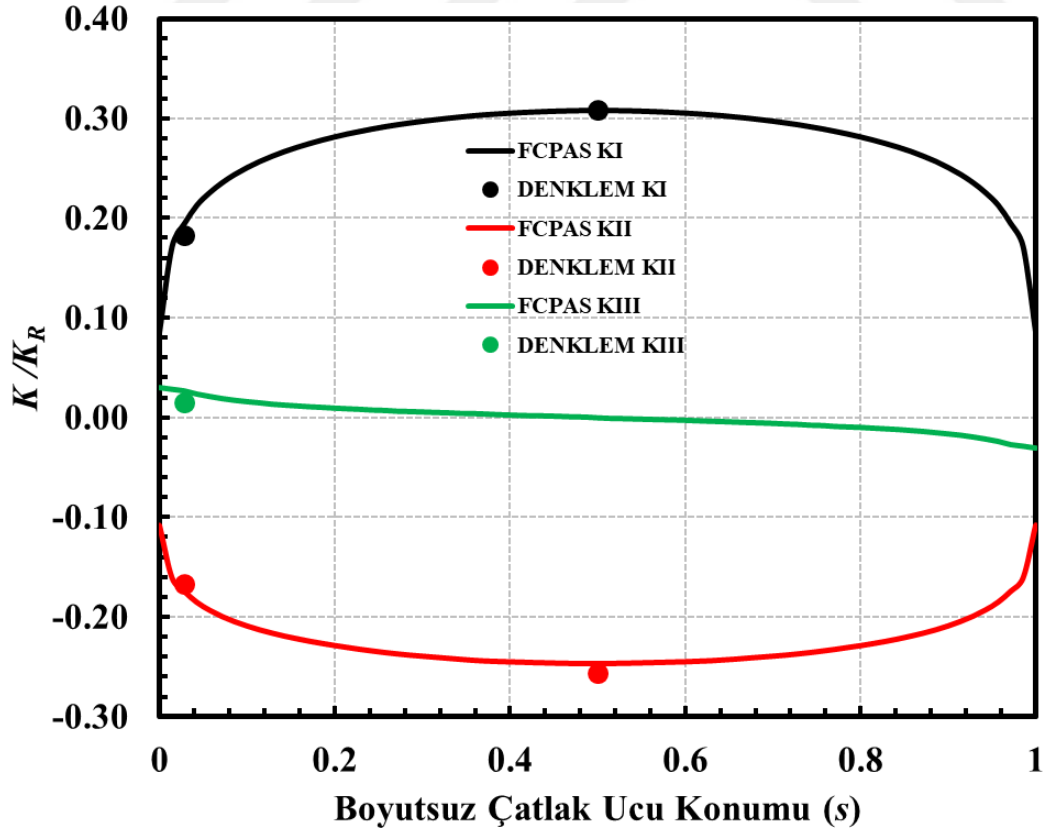
Terim	Katsayı	Terim	Katsayı
sabit	-9.128614E-03	α^2*a/c	-2.883559E-05
α	-1.304313E-02	α^2*a/D	-2.450314E-04
a/c	-4.584825E-03	$\alpha*(a/D)^2$	-2.003088E-02
a/D	3.625235E-01	$(a/c)^2*a/D$	2.194865E-01
α^2	8.776759E-05	$a/c*(a/D)^2$	3.067585E+00
$(a/c)^2$	3.331952E-02	$\alpha^2*(a/D)^2$	2.709648E-04
$(a/D)^2$	-1.553874E+00	$(a/c)^2*(a/D)^2$	-1.486249E+00
$\alpha*a/c$	2.933850E-03	$a/c*(a/D)^3$	-4.035171E+00
$\alpha*a/D$	2.012335E-02	$\alpha^2*a/c*(a/D)^2$	-2.219023E-05
$a/c*a/D$	-6.349029E-01	$(a/c)^3*(a/D)^2$	1.472197E-01
α^3	6.015433E-07	$(a/c)^2*(a/D)^3$	2.552628E+00
$(a/c)^3$	-1.408979E-02	$(a/c)^3*(a/D)^3$	-4.182244E-01
$(a/D)^3$	1.746799E+00		

4.3. Empirik Denklemlerin Doğrulama Çalışmaları

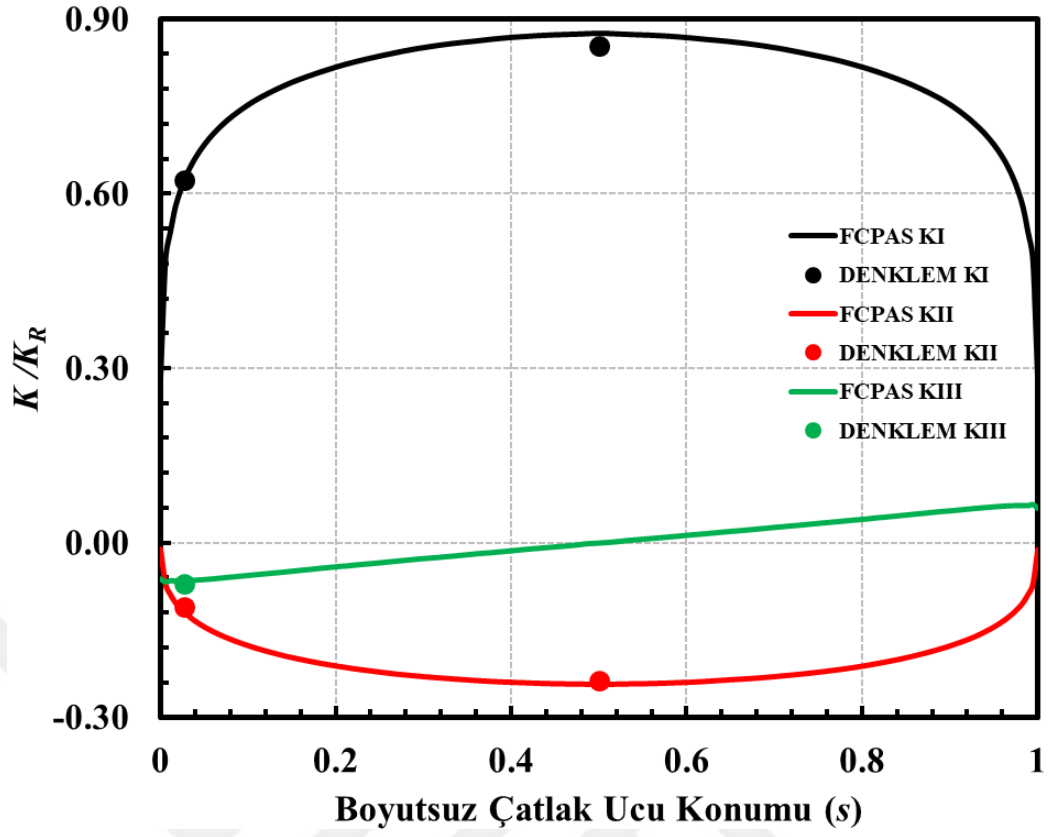
Empirik denklemler oluşturulduktan sonra bu denklemlerin doğruluğunu ispatlamak için analiz kütüphanesinde yer almayan ve parametrelerin ara değerlerini içeren problemler tanımlanarak çeşitli doğrulama analizleri yapılmıştır. Aşağıda verilen tüm problemler için ilgili değerleri içeren spesifik sonlu eleman modelleri oluşturulmuş, FCPAS ve FRAC3D ile elde edilen sonlu eleman bazlı GŞF dağılımları ile yukarıda detayları verilen empirik denklem sonuçları serbest yüzey ve derinlik noktaları için aynı grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Bazı doğrulama sonuçlarında özellikle serbest yüzey değerlerinde sapmalar olduğu görülmüştür. Daha önce de açıklandığı üzere, tüm serbest yüzey sonuçlarında tam bir GŞF tahmini yapılamamaktadır. Çatlak önü derinlik noktaları için ise genel olarak daha yakın tahminler elde edilmiştir. Eksenel gerilme yükü için ilgili karşılaştırma grafikleri Şekil 4.26-4.45'te, eğilme yükü için ise Şekil 4.46-4.65'te verilmiştir. İlgili grafiklerden görüldüğü üzere, hem derinlik noktası için, hem de serbest yüzey noktası için empirik denklem sonuçları ile sonlu eleman analiz sonuçları çoğunlukla $\sim 10\%$ yakınlık içerisinde. Böylece, geliştirilmiş olan empirik denklemlerin doğruluğu ispatlanmış ve pratikte karşılaşılabilecek benzeri herhangi bir problem için kullanılabilirliği gösterilmiştir.



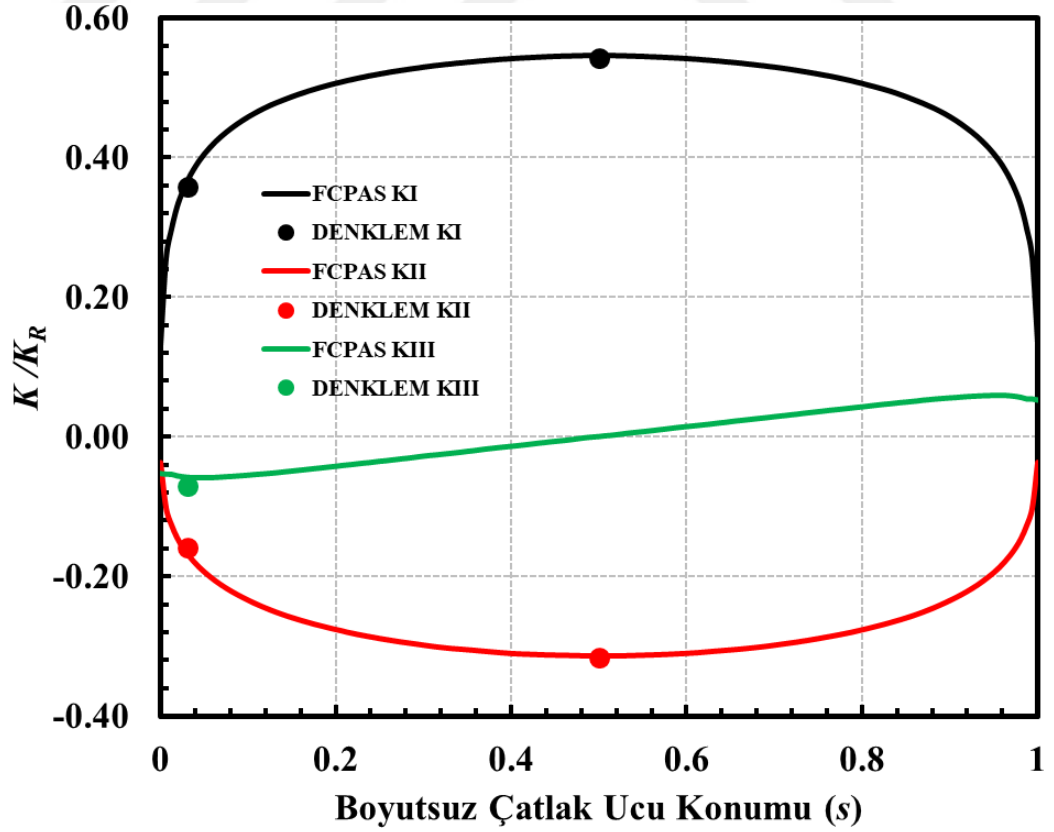
Şekil 4.26. $a/c=0.3$, $a/D=0.2$, $\alpha=35^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



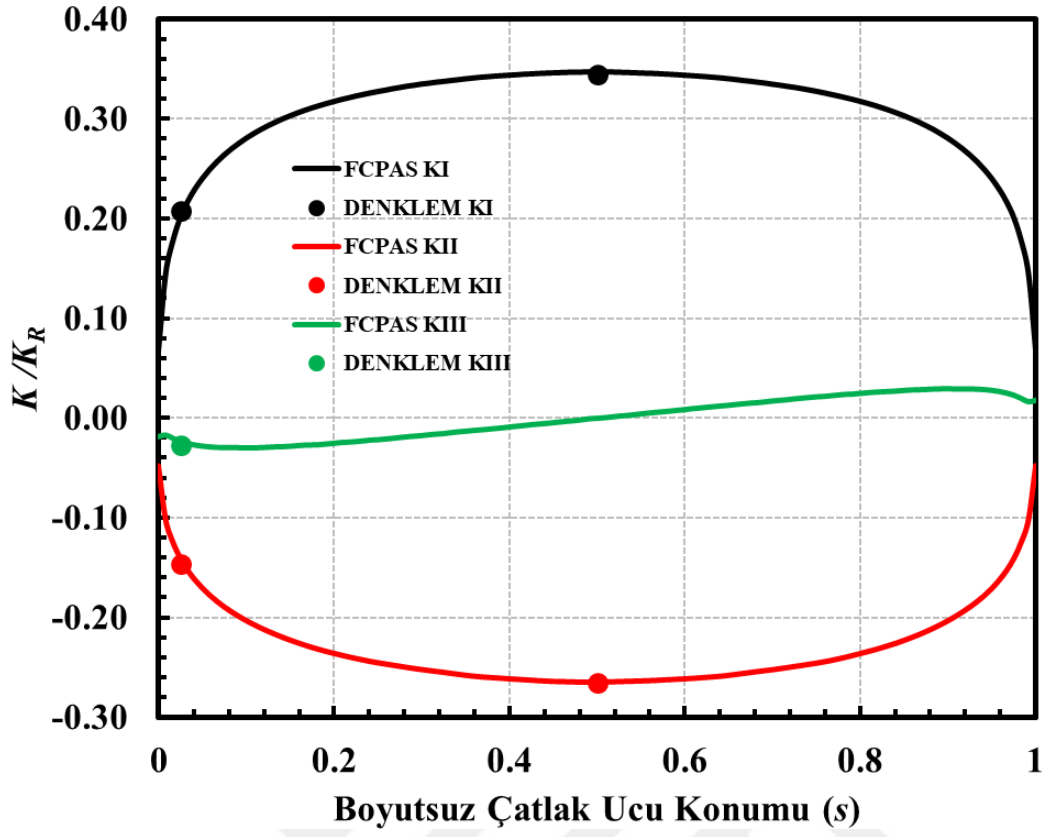
Şekil 4.27. $a/c=0.3$, $a/D=0.4$, $\alpha=70^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



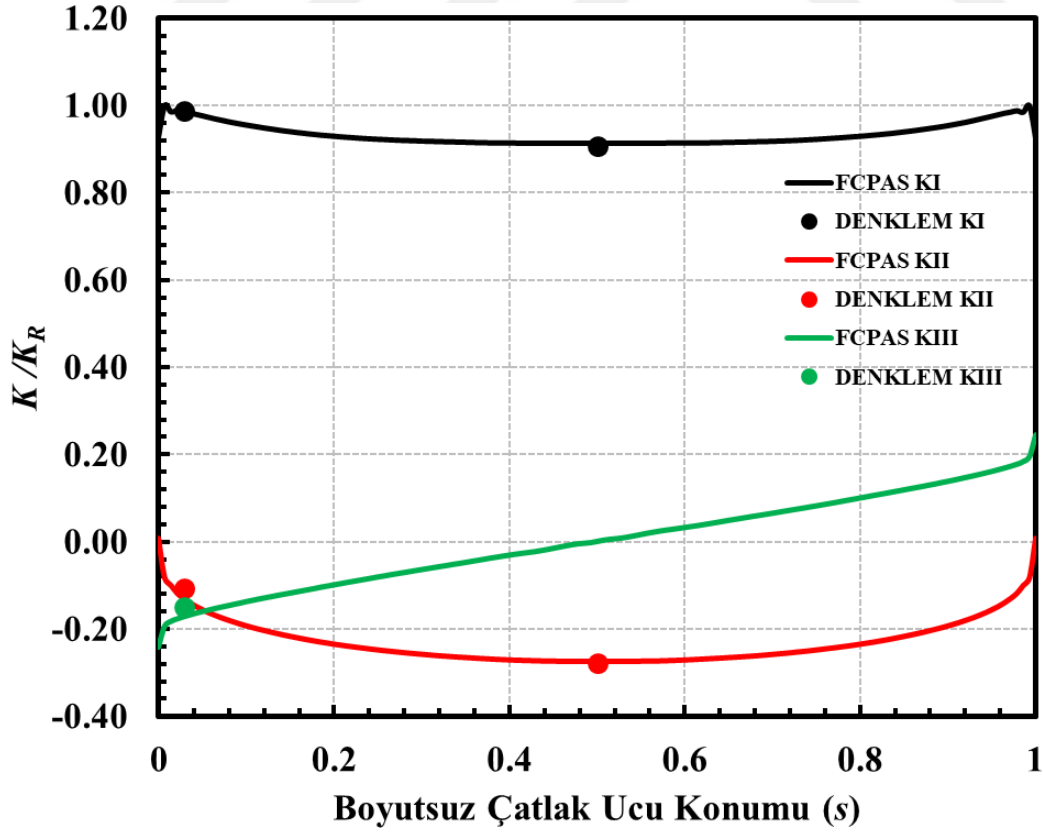
Şekil 4.28. $a/c=0.4$, $a/D=0.15$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



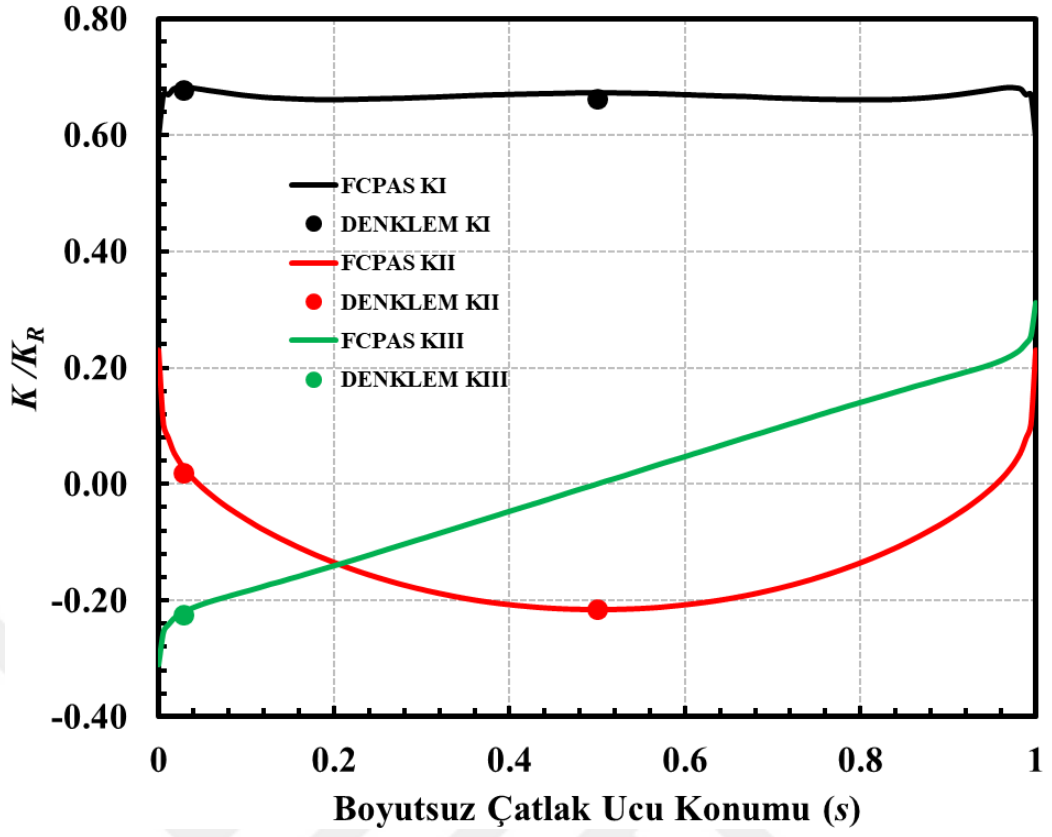
Şekil 4.29. $a/c=0.4$, $a/D=0.15$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



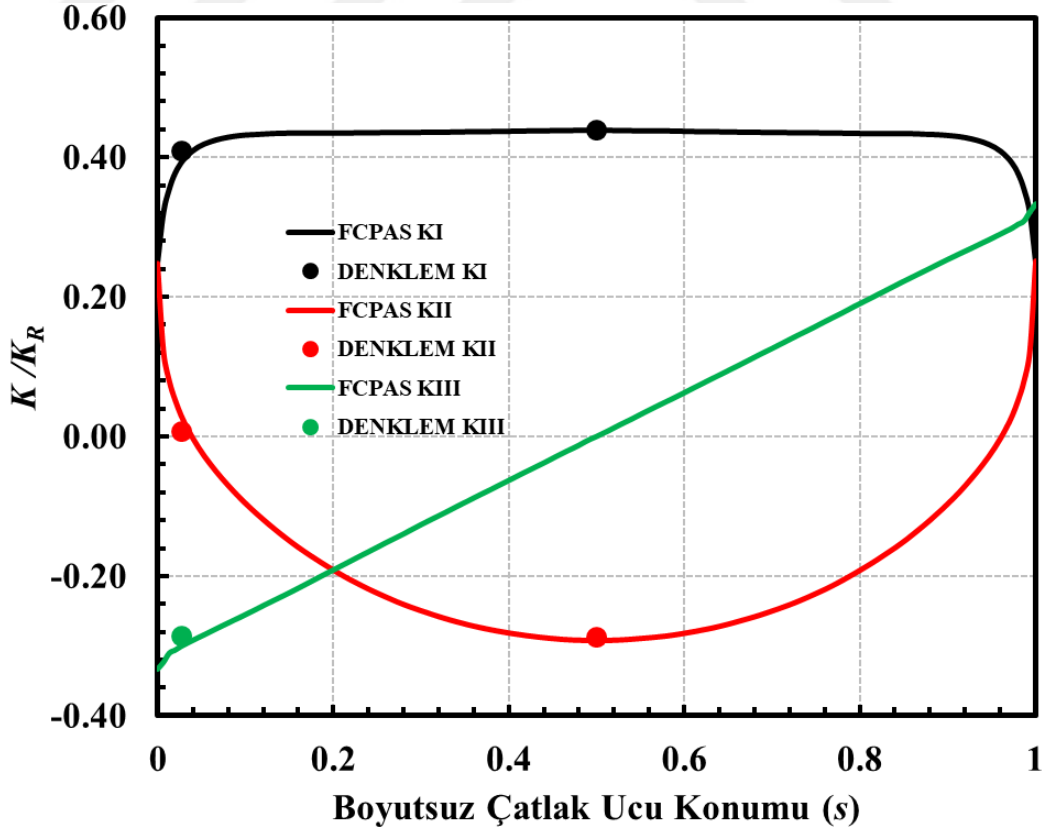
Şekil 4.30. $a/c=0.4$, $a/D=0.15$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



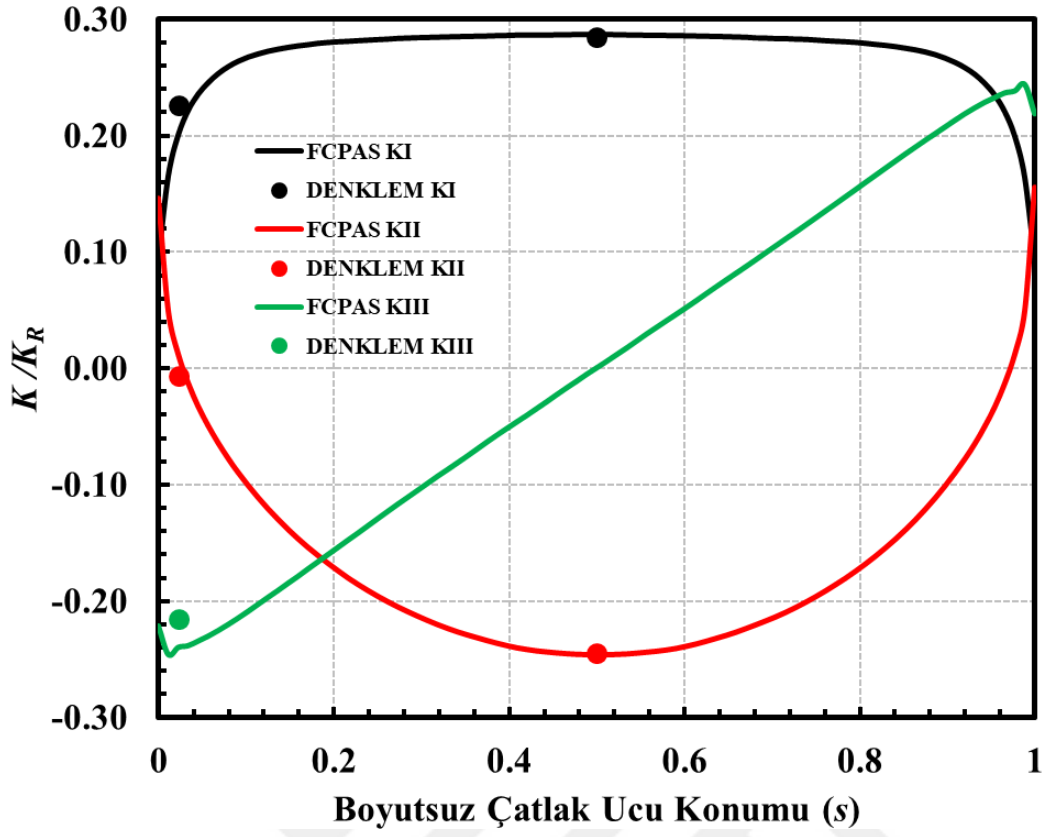
Şekil 4.31. $a/c=0.7$, $a/D=0.32$, $\alpha=27^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



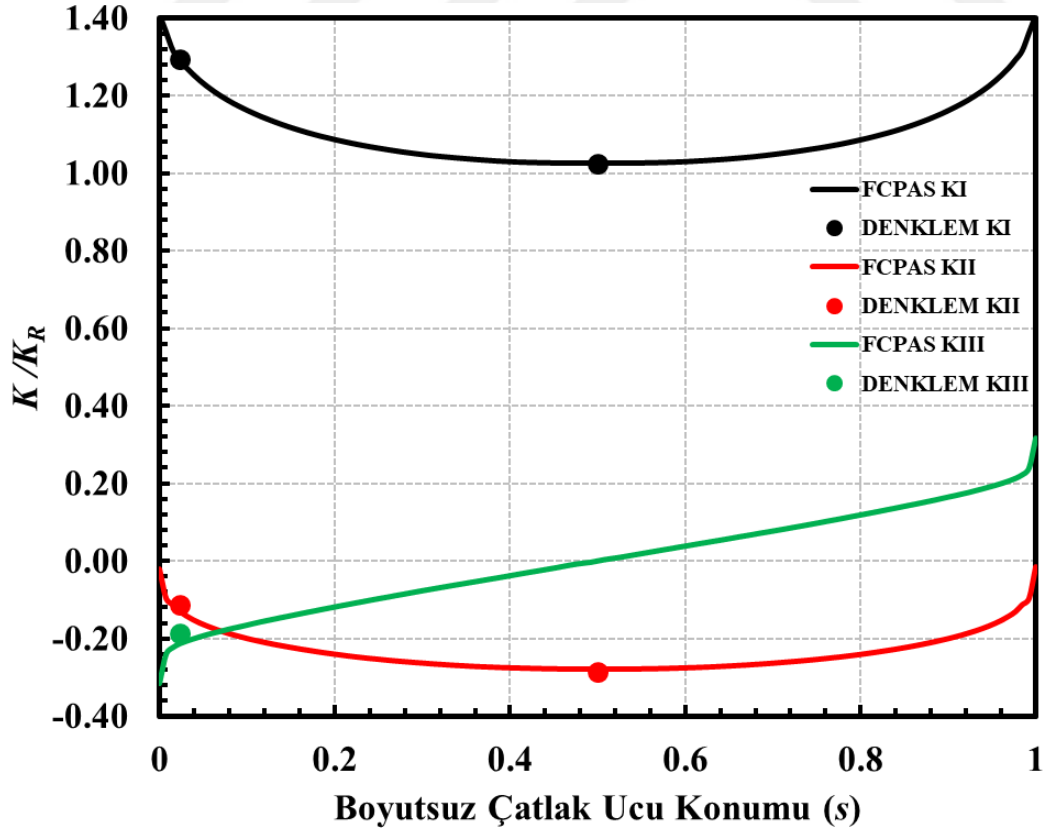
Şekil 4.32. $a/c=0.8$, $a/D=0.08$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



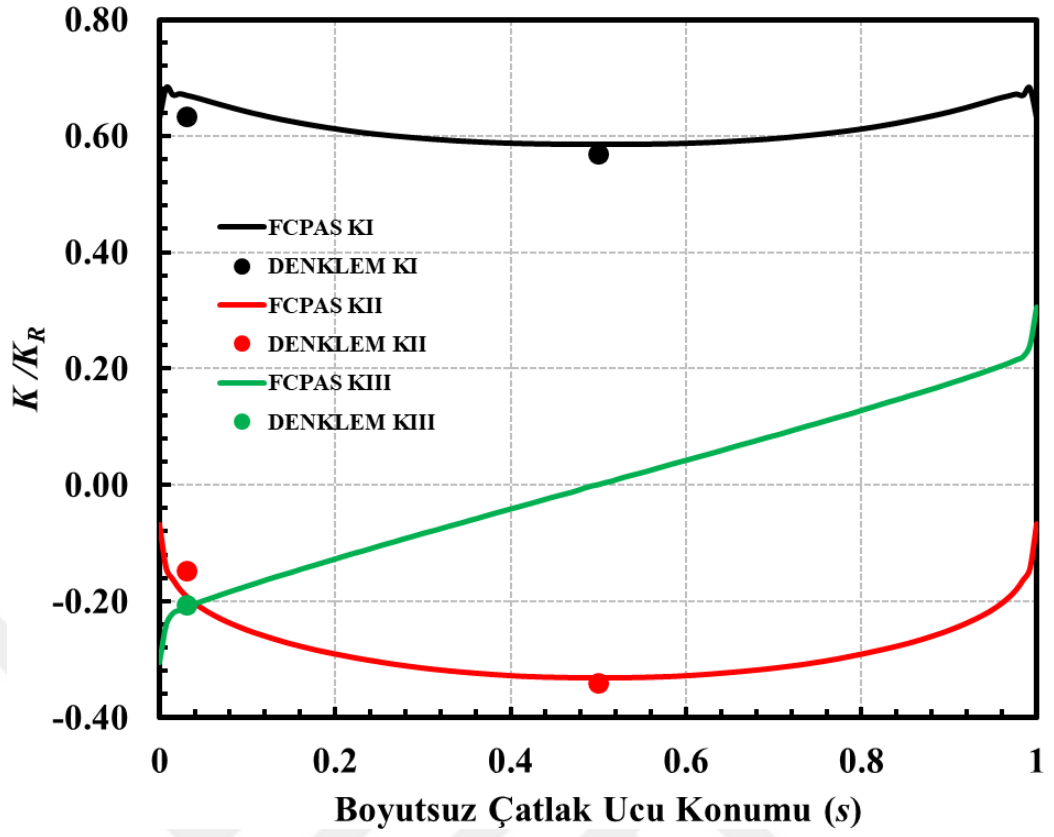
Şekil 4.33. $a/c=0.8$, $a/D=0.08$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



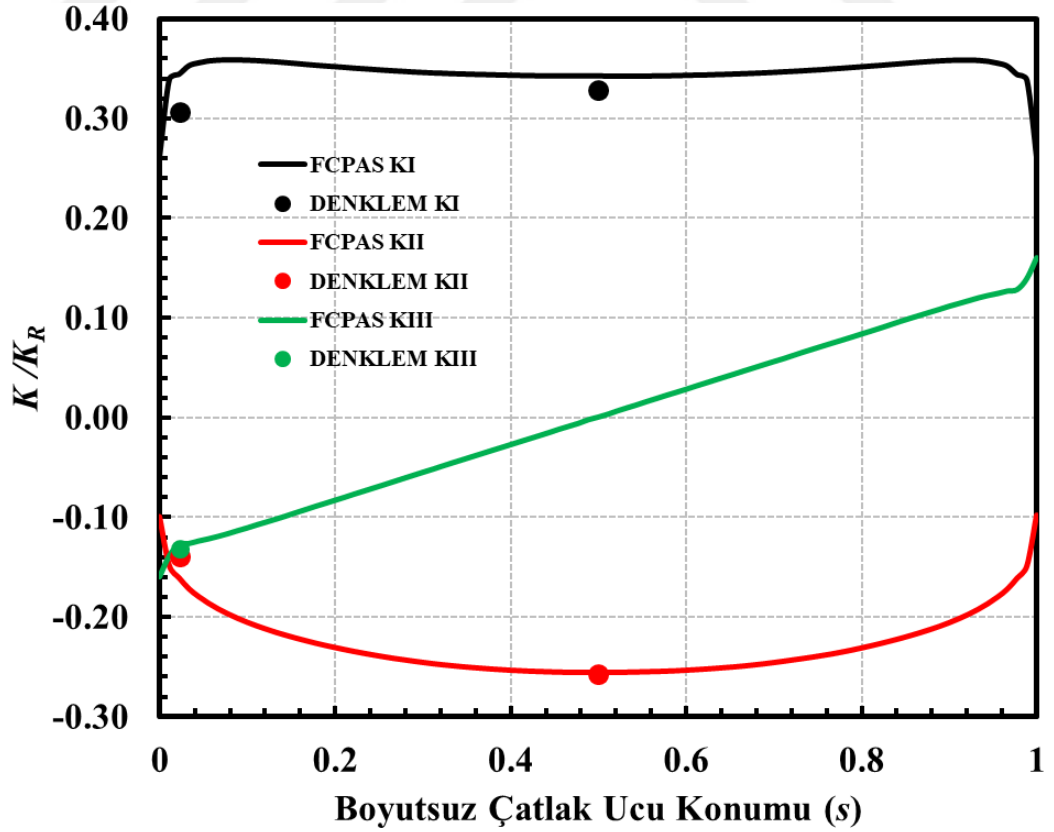
Şekil 4.34. $a/c=0.8$, $a/D=0.08$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



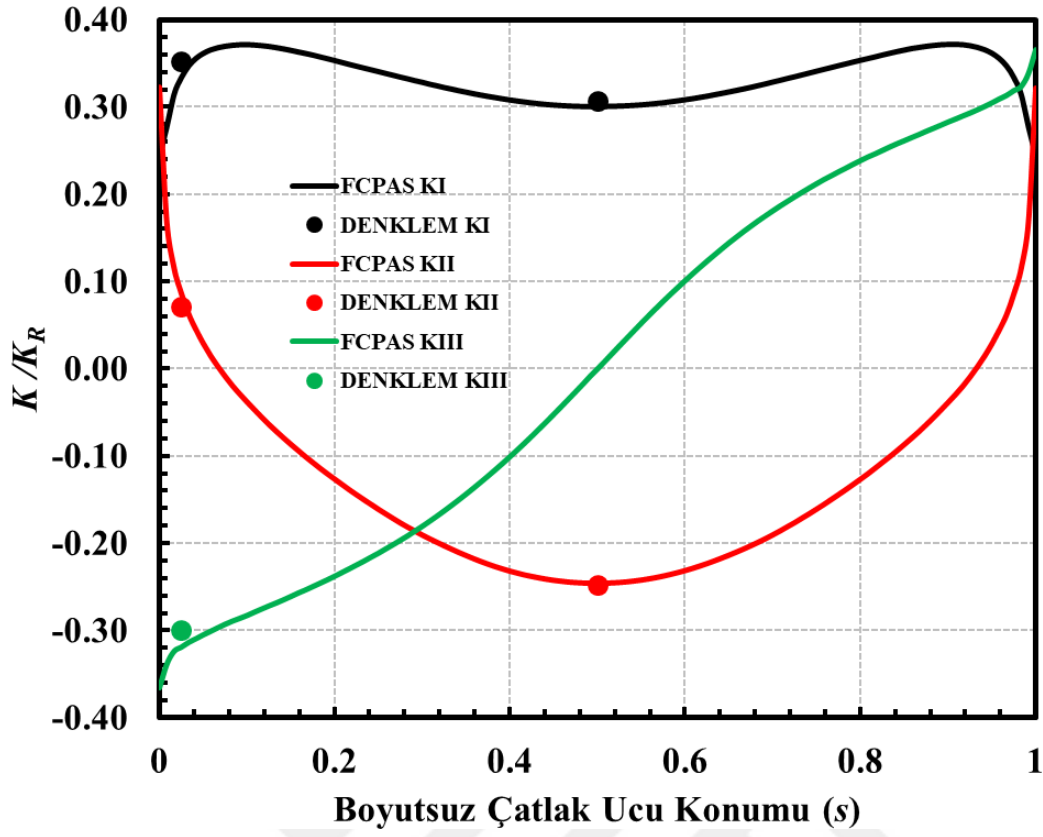
Şekil 4.35. $a/c=0.8$, $a/D=0.4$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



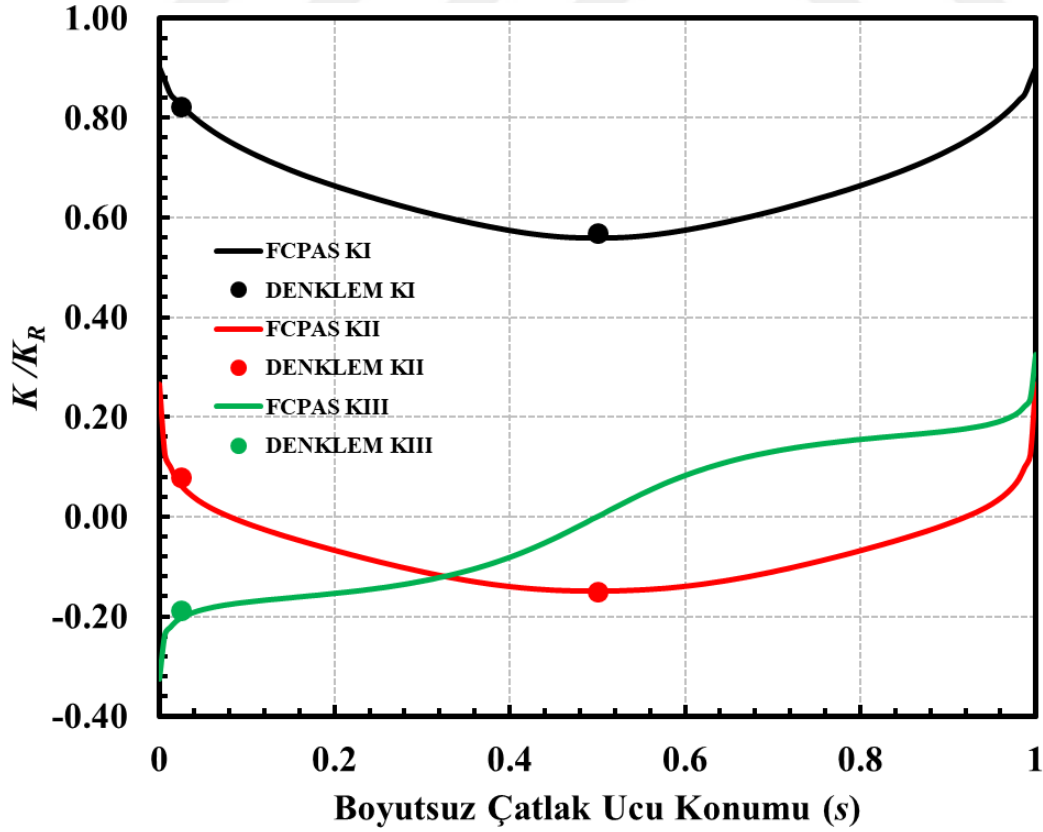
Şekil 4.36. $a/c=0.8$, $a/D=0.4$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



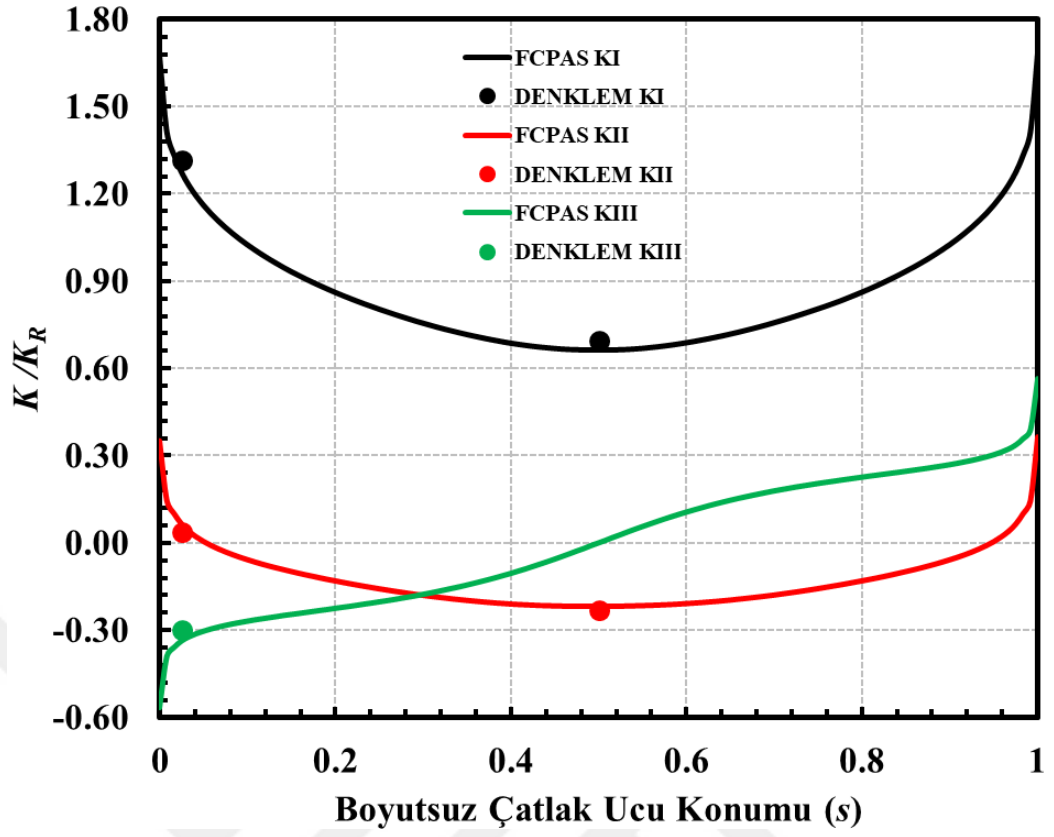
Şekil 4.37. $a/c=0.8$, $a/D=0.4$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



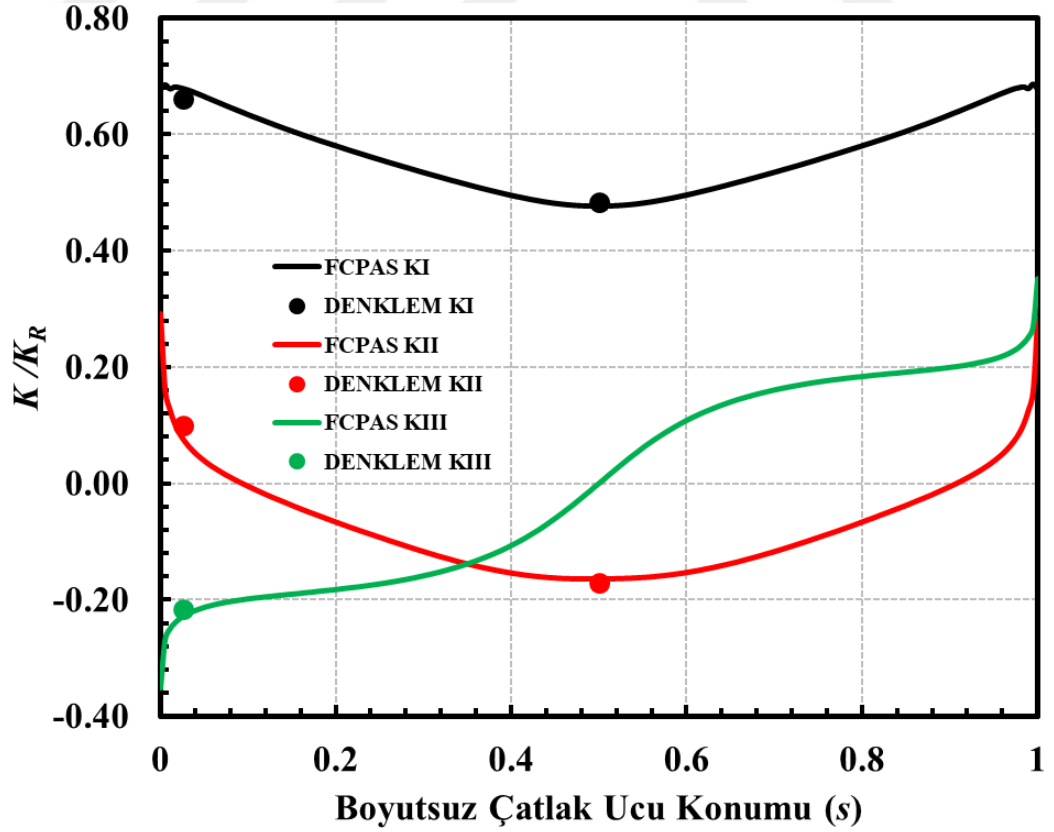
Şekil 4.38. $a/c=1.2$, $a/D=0.14$, $\alpha=55^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



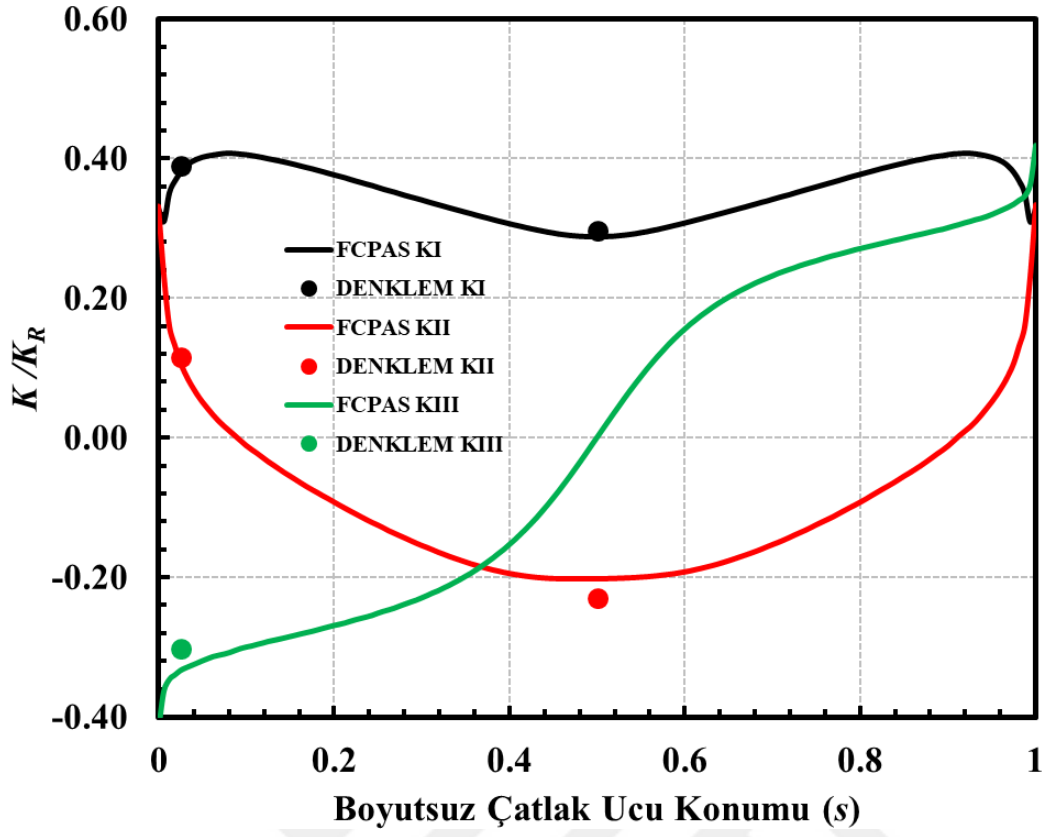
Şekil 4.39. $a/c=1.4$, $a/D=0.24$, $\alpha=20^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



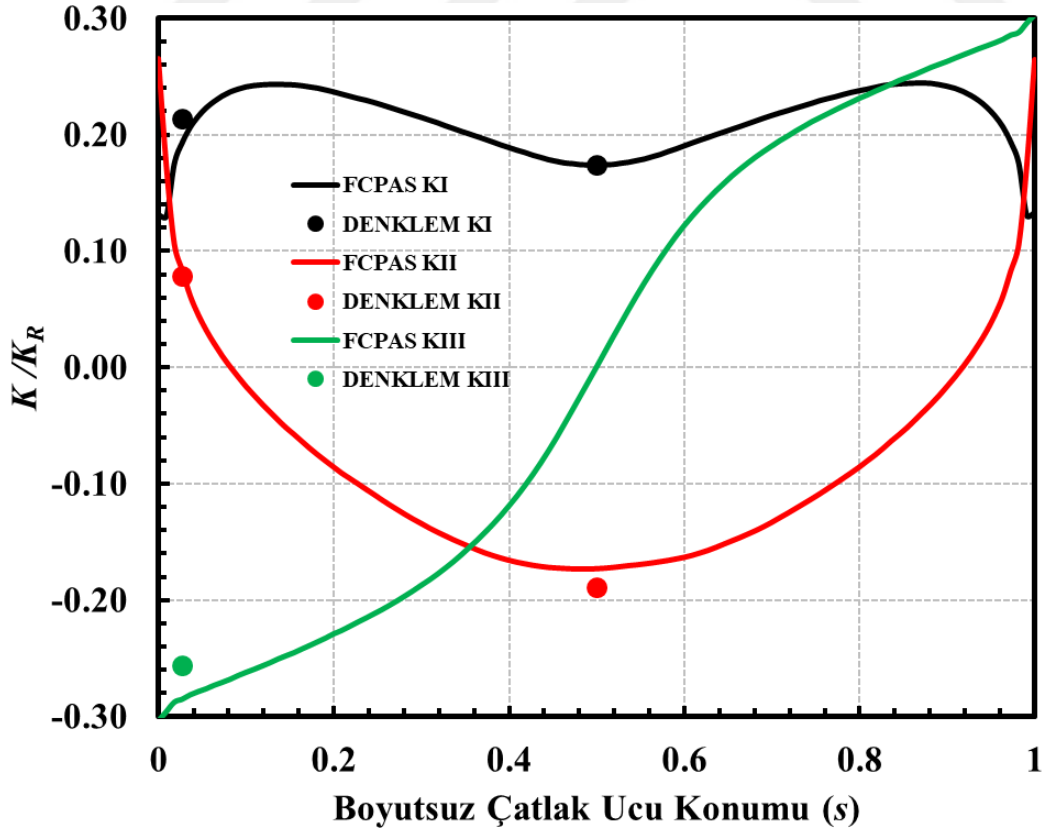
Şekil 4.40. $a/c=1.4$, $a/D=0.48$, $\alpha=26^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



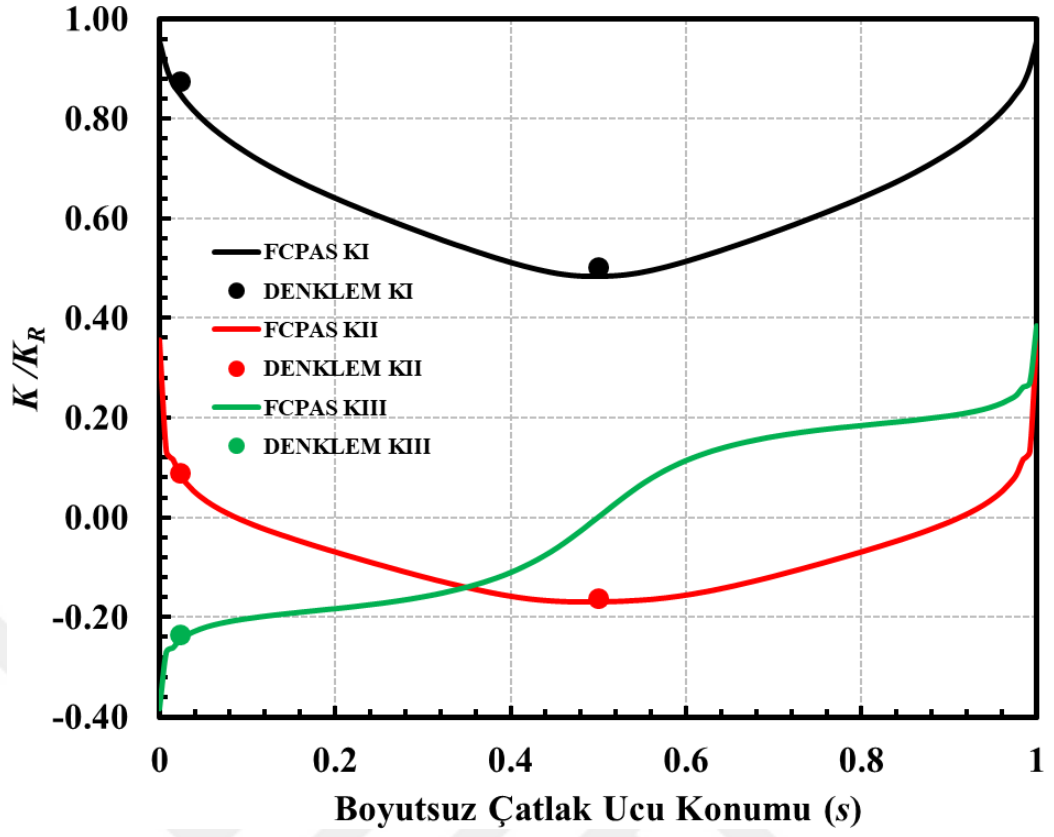
Şekil 4.41. $a/c=1.5$, $a/D=0.15$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



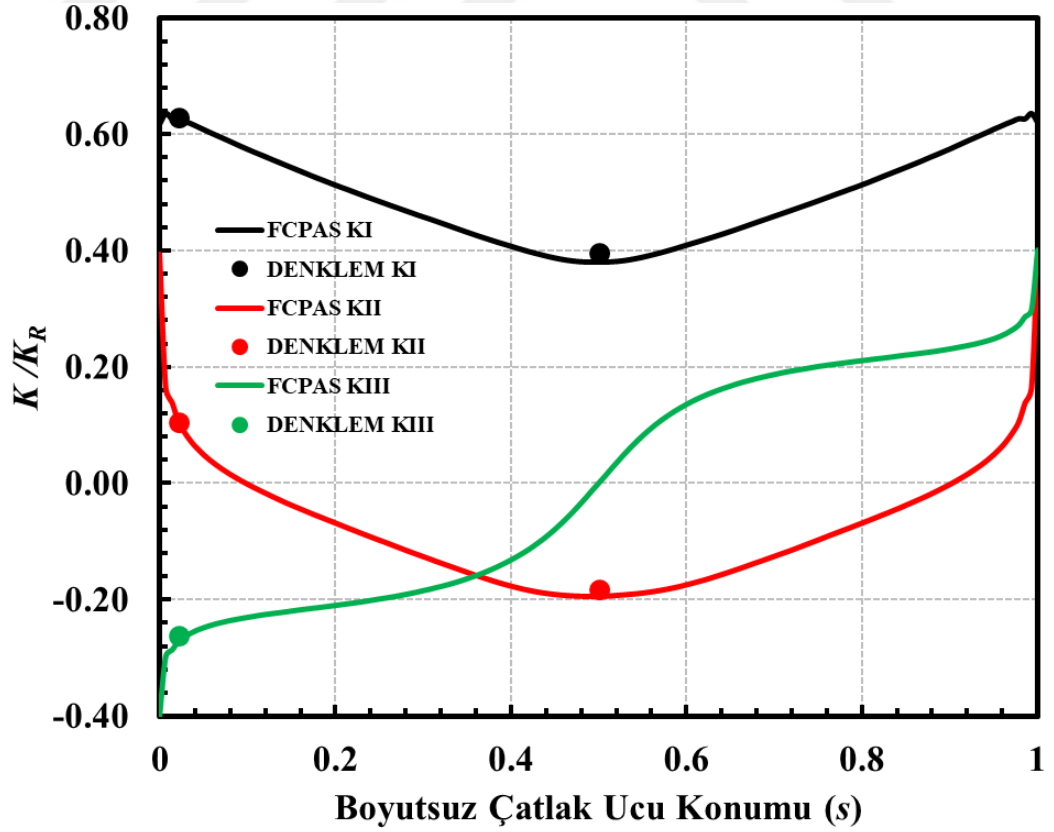
Şekil 4.42. $a/c=1.5$, $a/D=0.15$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



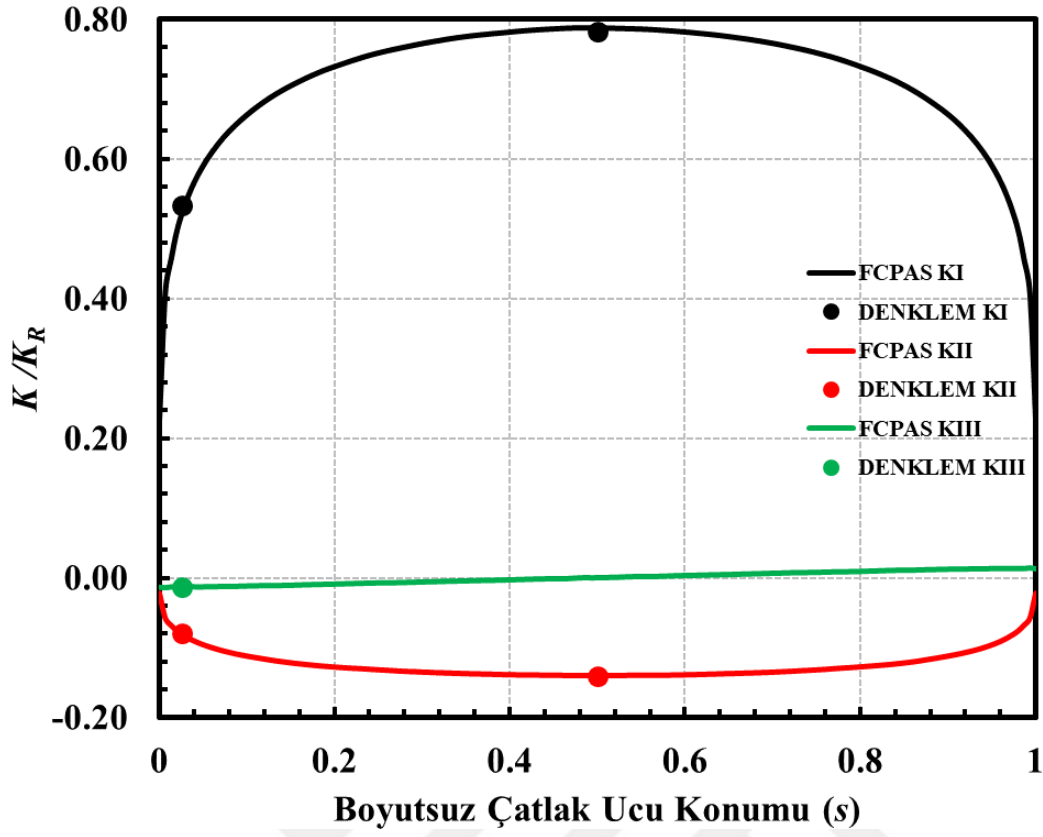
Şekil 4.43. $a/c=1.5$, $a/D=0.15$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



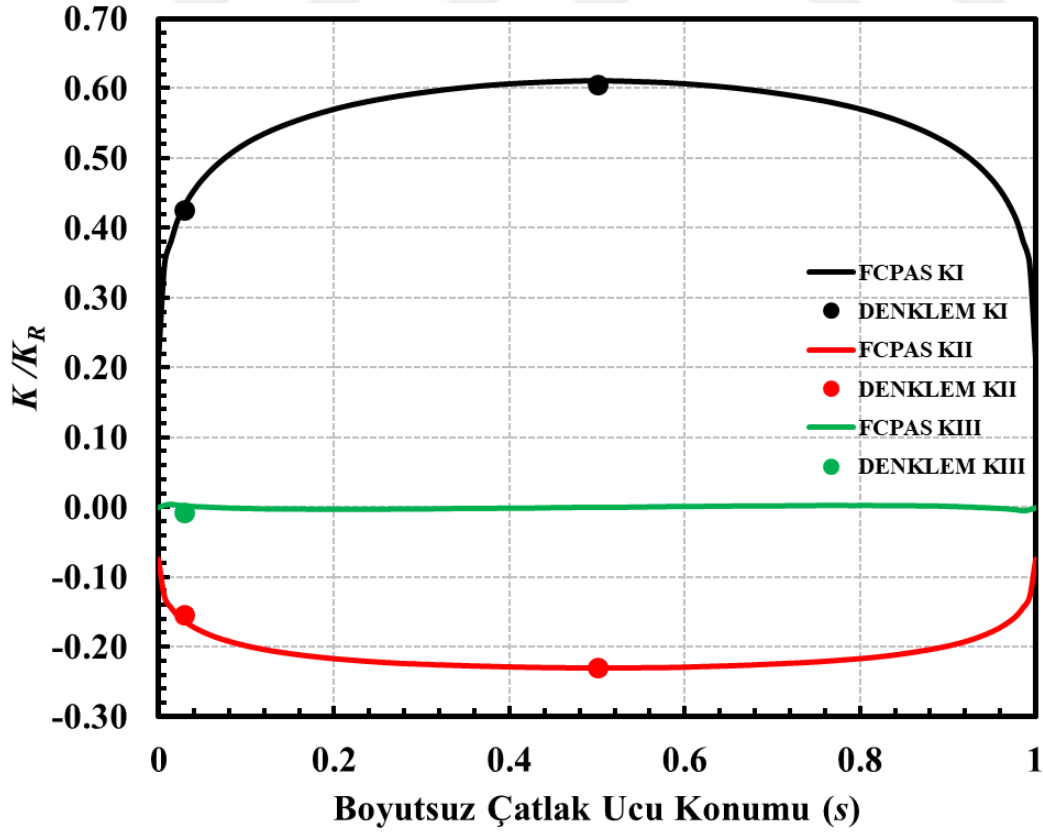
Şekil 4.44. $a/c=1.7$, $a/D=0.35$, $\alpha=24^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



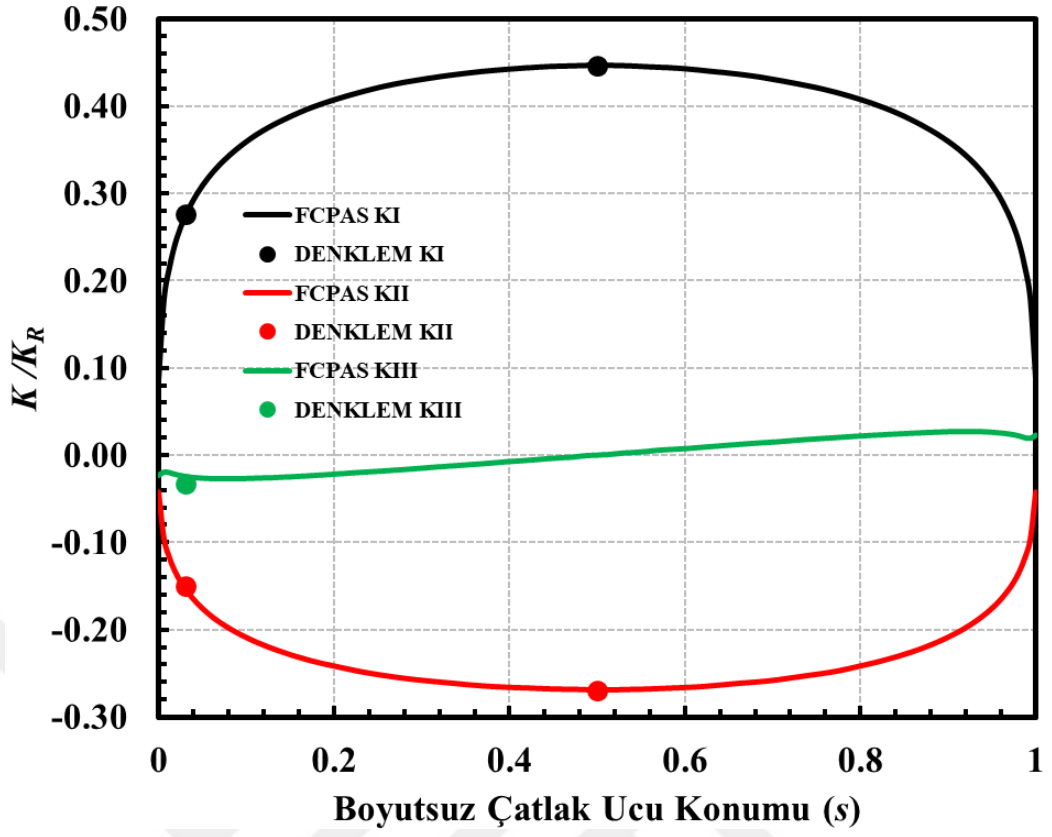
Şekil 4.45. $a/c=1.8$, $a/D=0.25$, $\alpha=32^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eksenel gerilme).



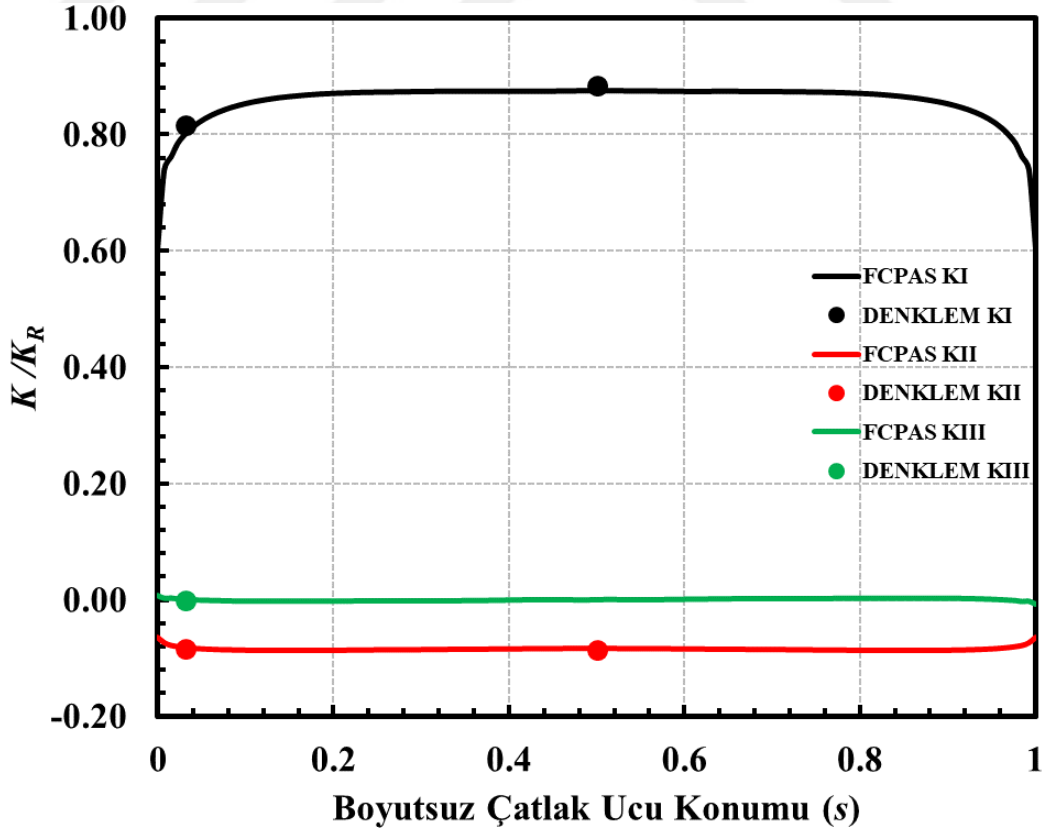
Şekil 4.46. $a/c=0.3$, $a/D=0.18$, $\alpha=18^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



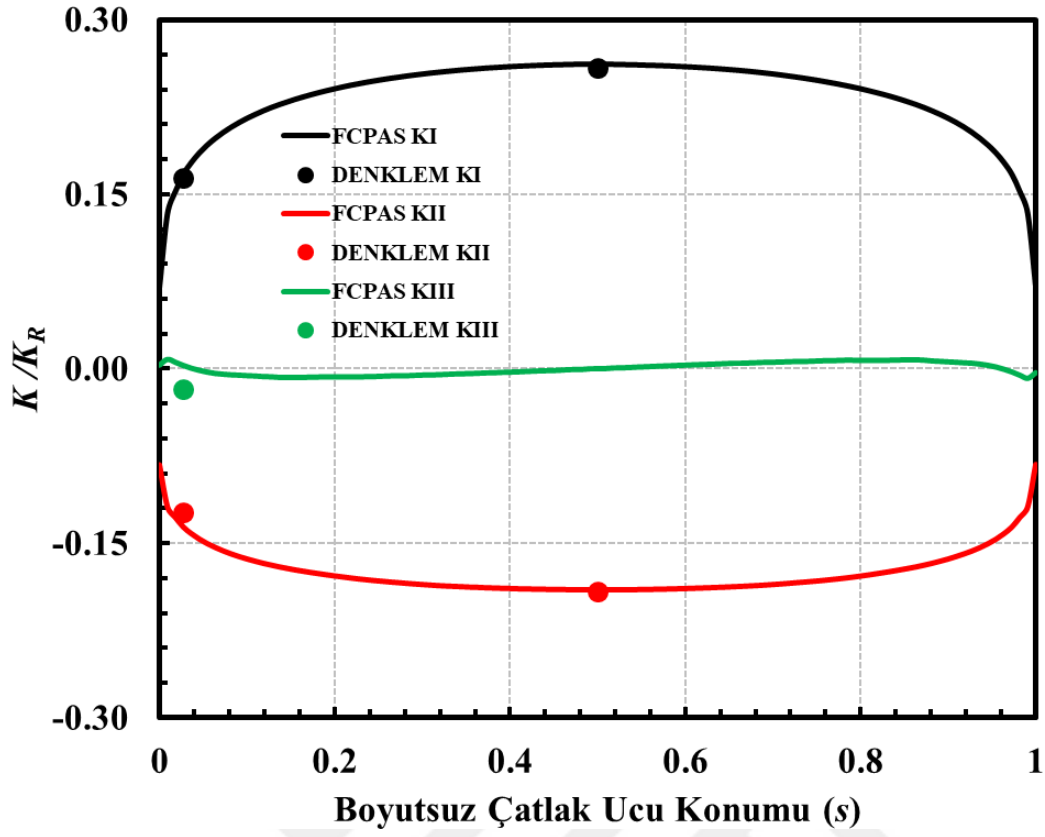
Şekil 4.47. $a/c=0.3$, $a/D=0.3$, $\alpha=40^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



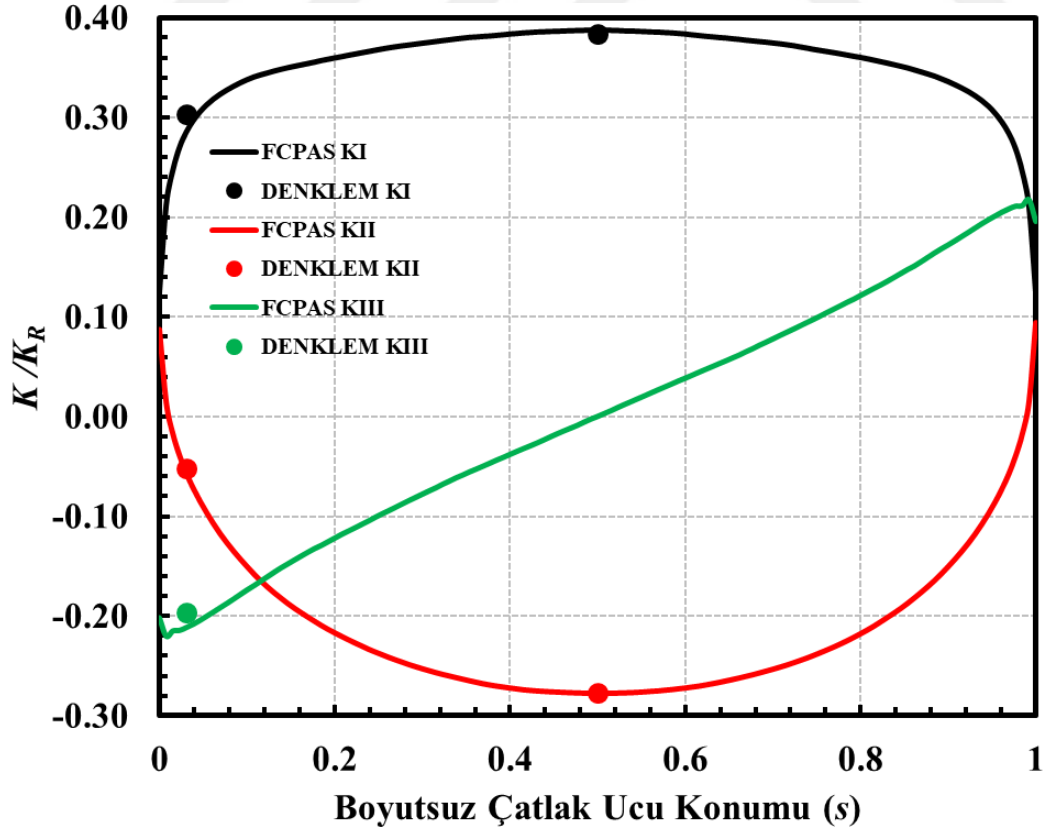
Şekil 4.48. $a/c=0.35$, $a/D=0.16$, $\alpha=55^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



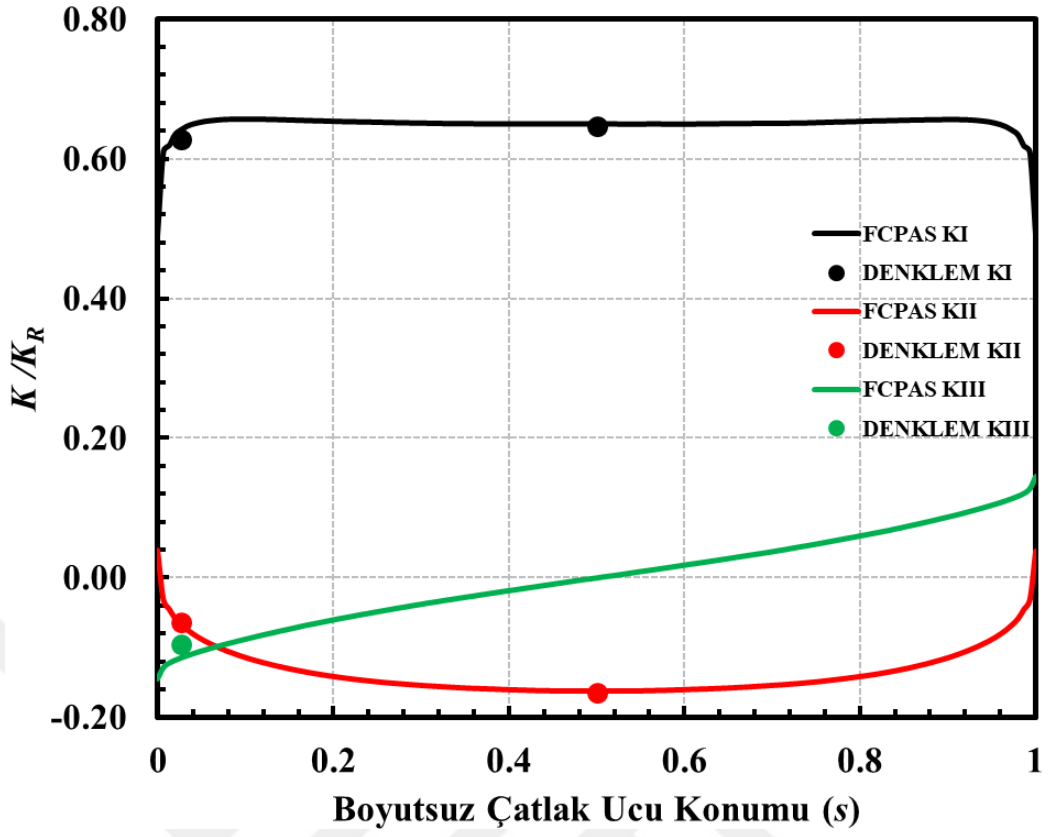
Şekil 4.49. $a/c=0.4$, $a/D=0.4$, $\alpha=12^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



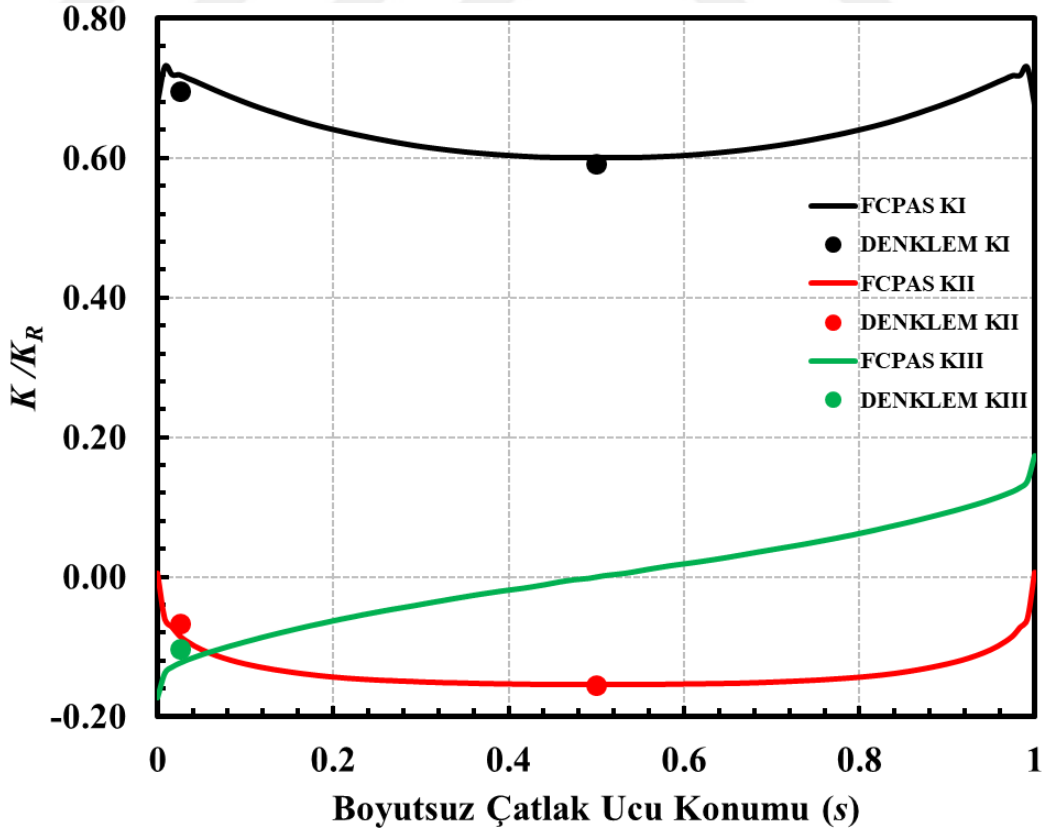
Şekil 4.50. $a/c=0.45$, $a/D=0.36$, $\alpha=70^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



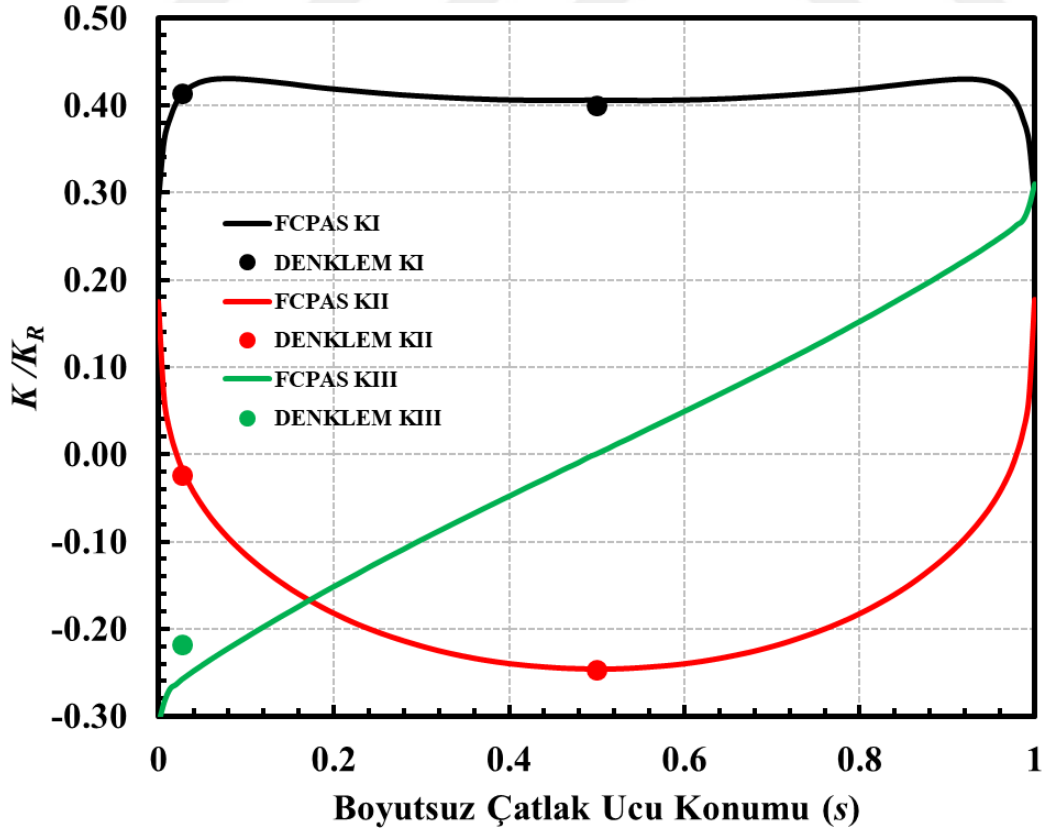
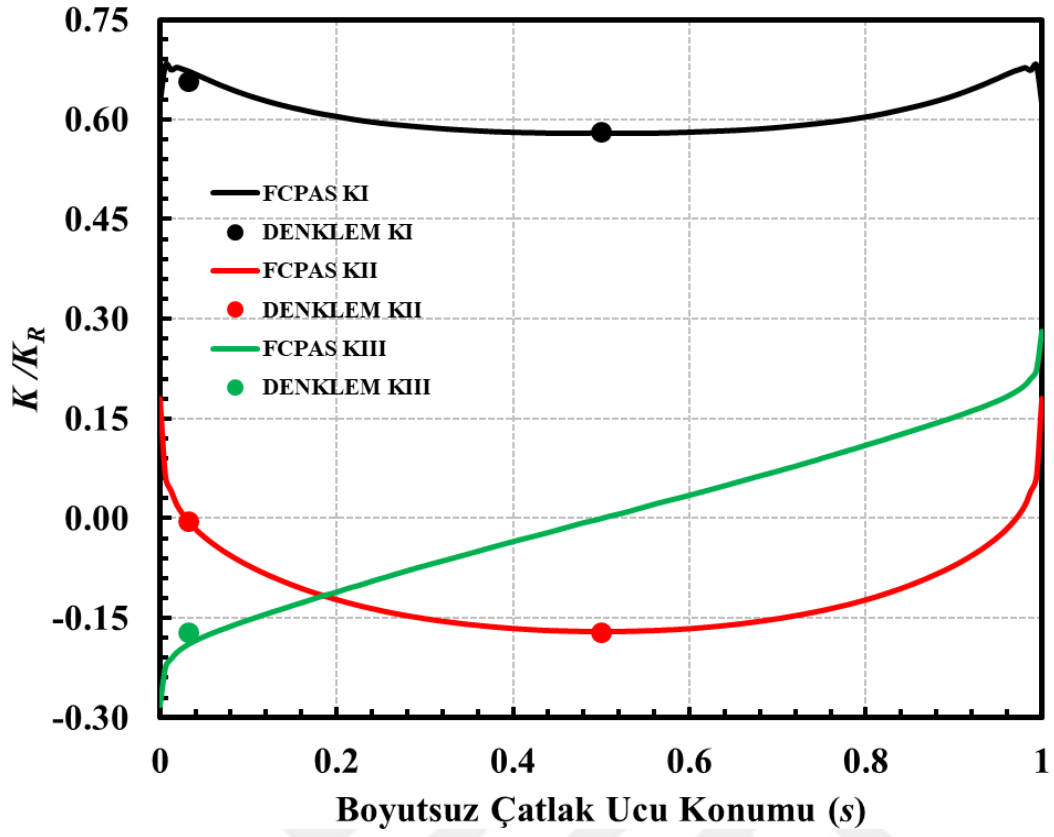
Şekil 4.51. $a/c=0.6$, $a/D=0.07$, $\alpha=58^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).

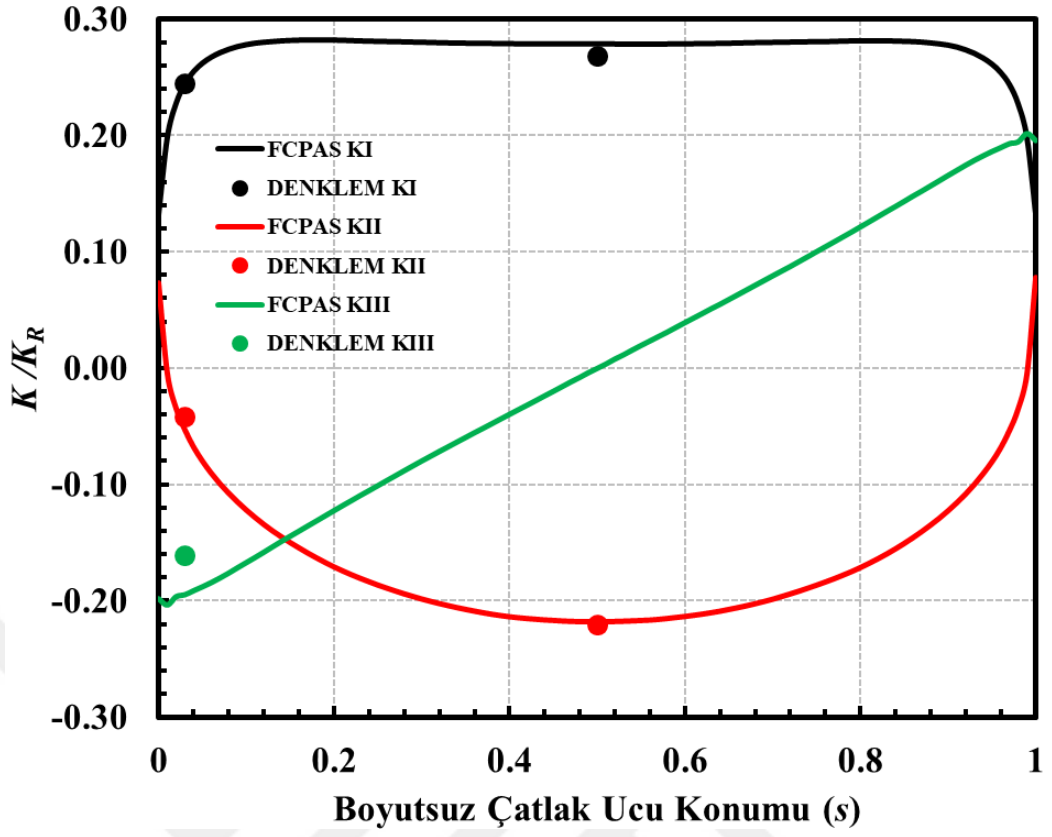


Şekil 4.52. $a/c=0.6$, $a/D=0.2$, $\alpha=24^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).

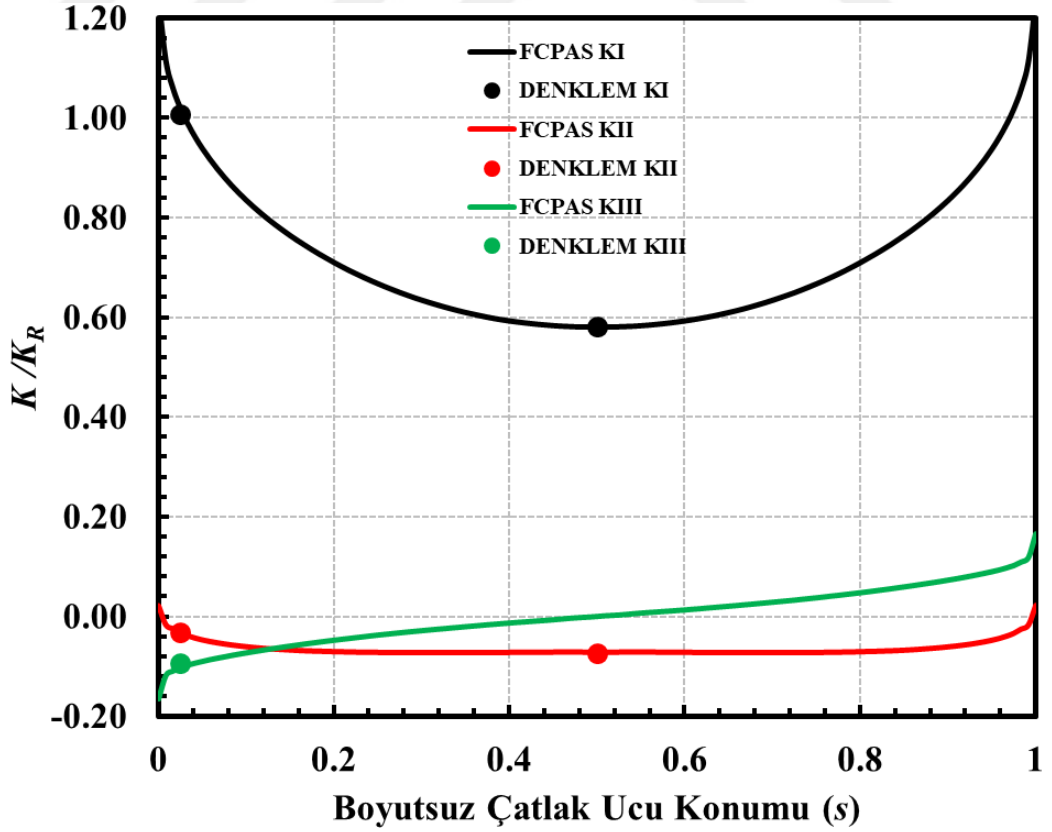


Şekil 4.53. $a/c=0.7$, $a/D=0.32$, $\alpha=27^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).

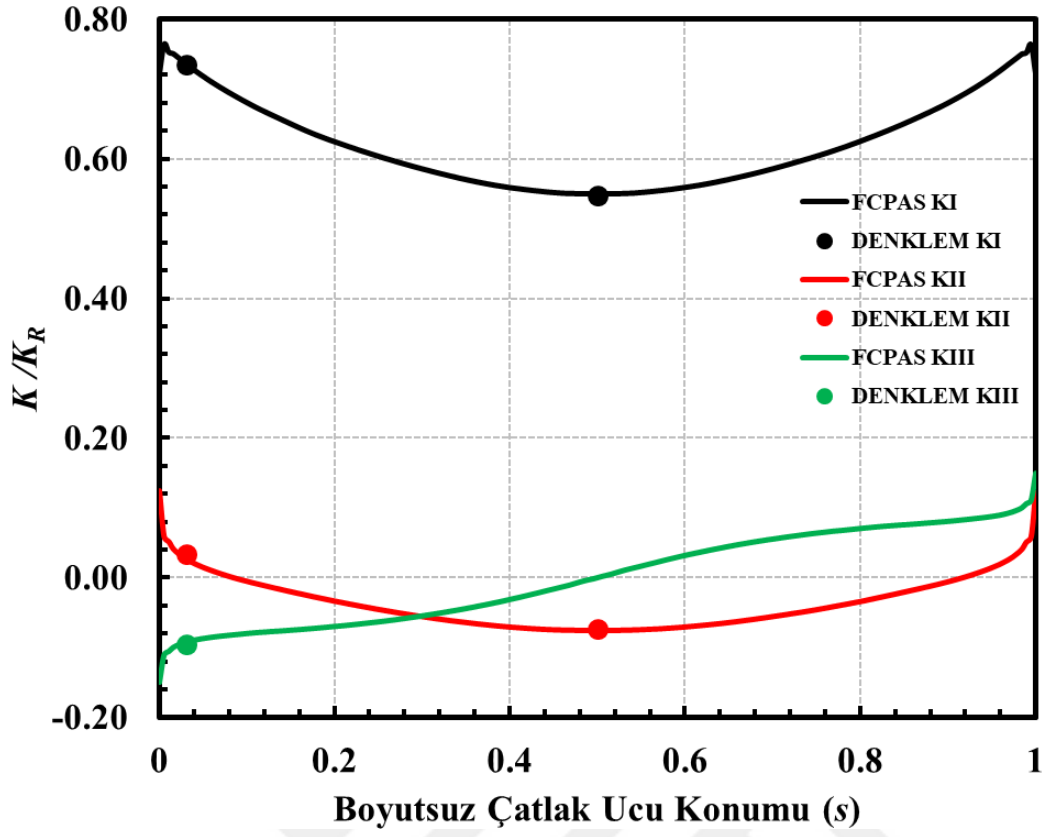




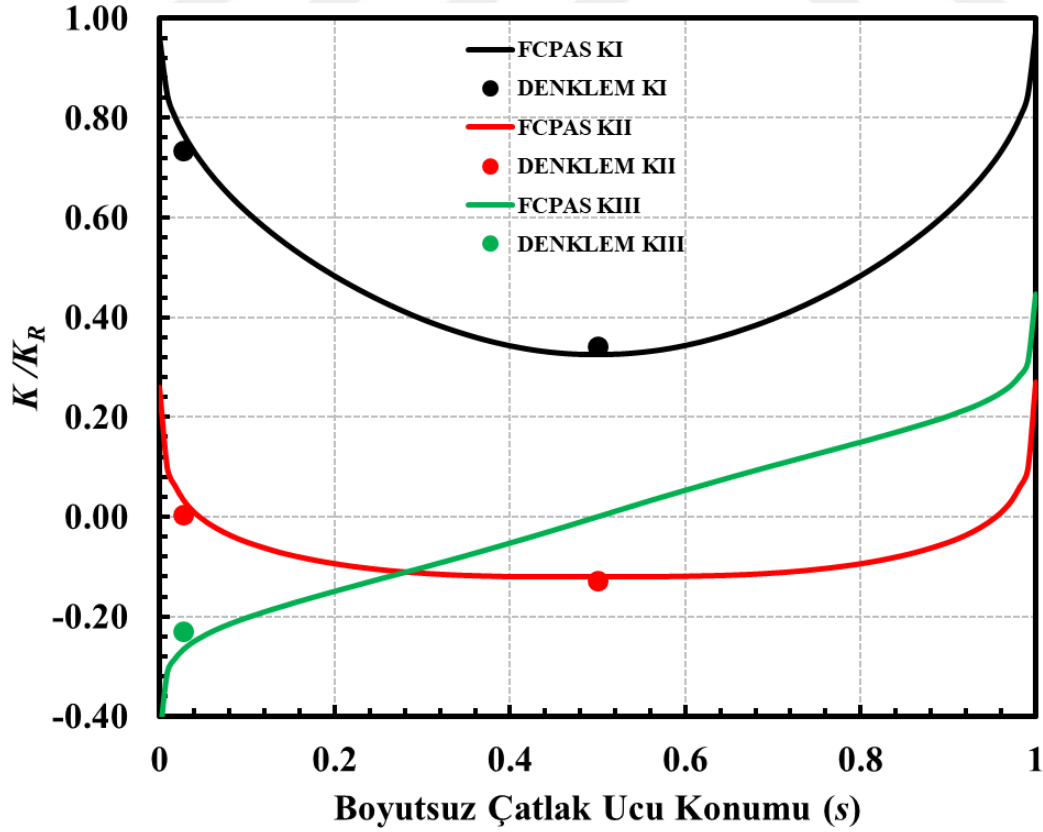
Şekil 4.56. $a/c=0.8$, $a/D=0.15$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



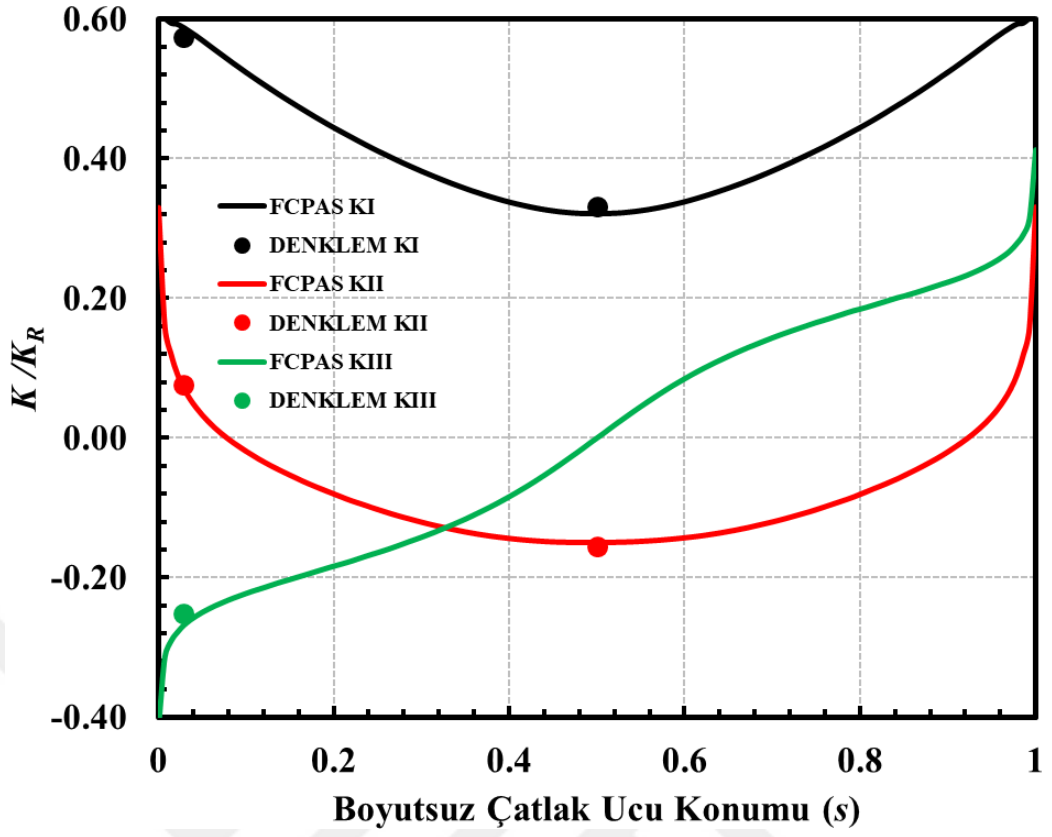
Şekil 4.57. $a/c=0.9$, $a/D=0.42$, $\alpha=14^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



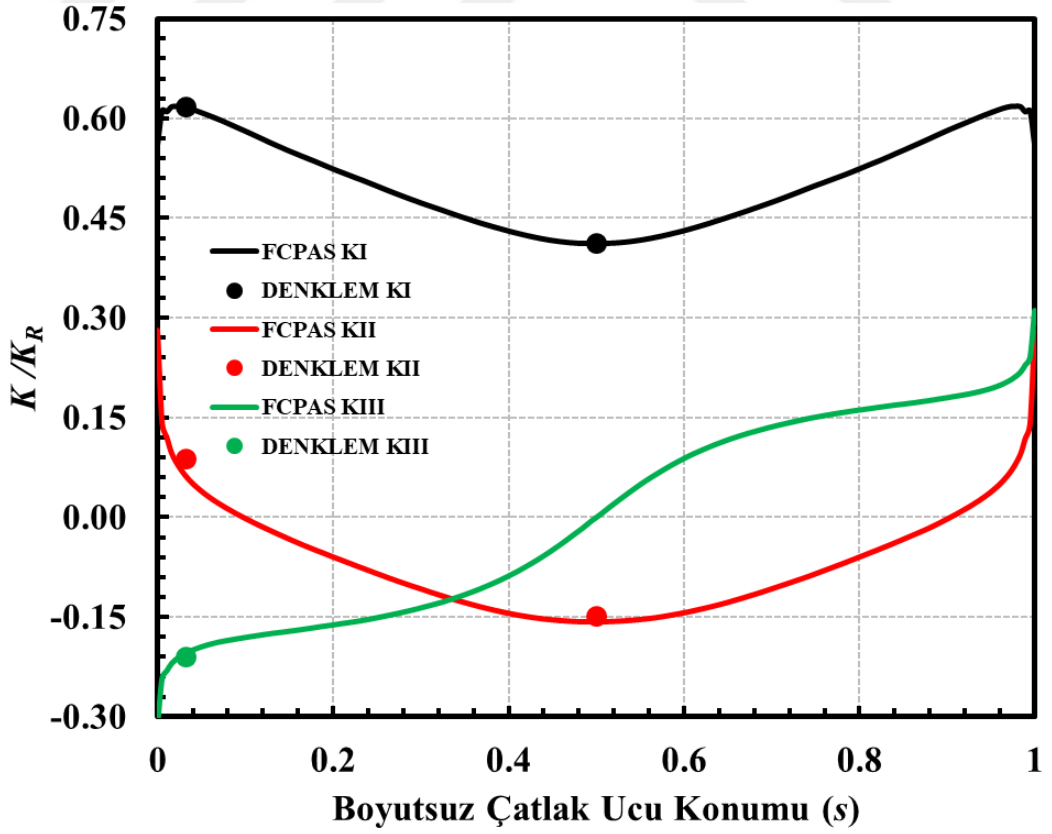
Şekil 4.58. $a/c=1.2$, $a/D=0.07$, $\alpha=10^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



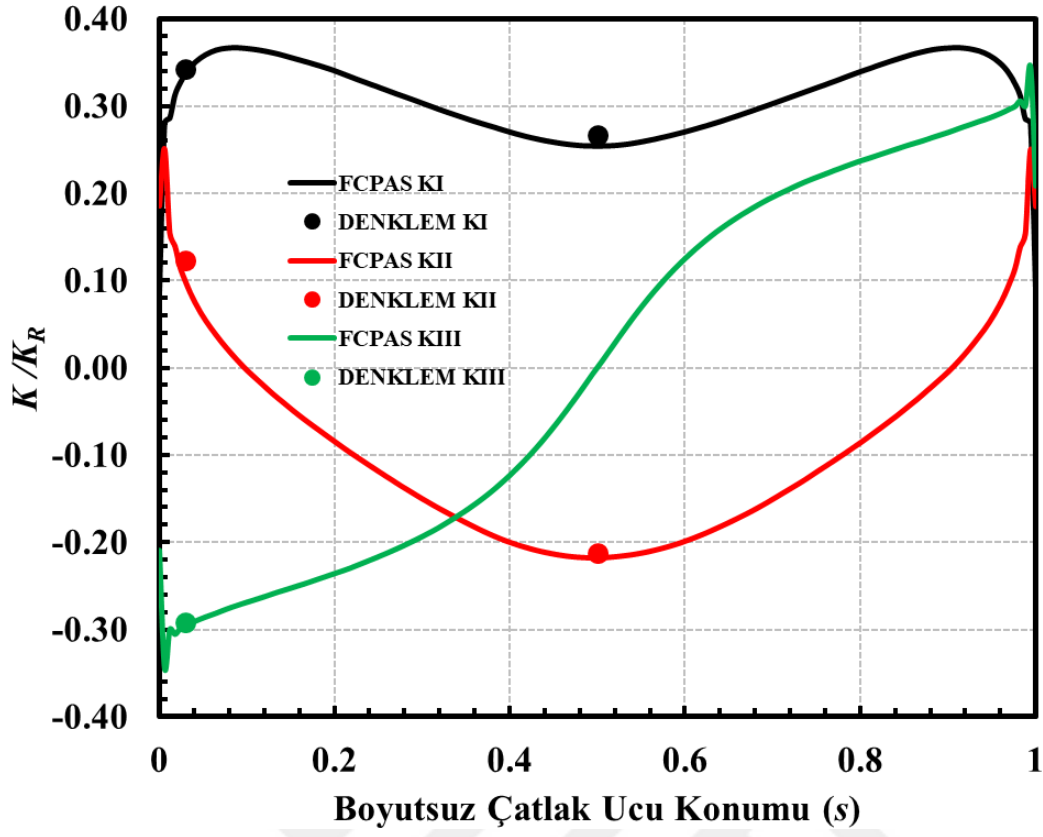
Şekil 4.59. $a/c=1.3$, $a/D=0.44$, $\alpha=35^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



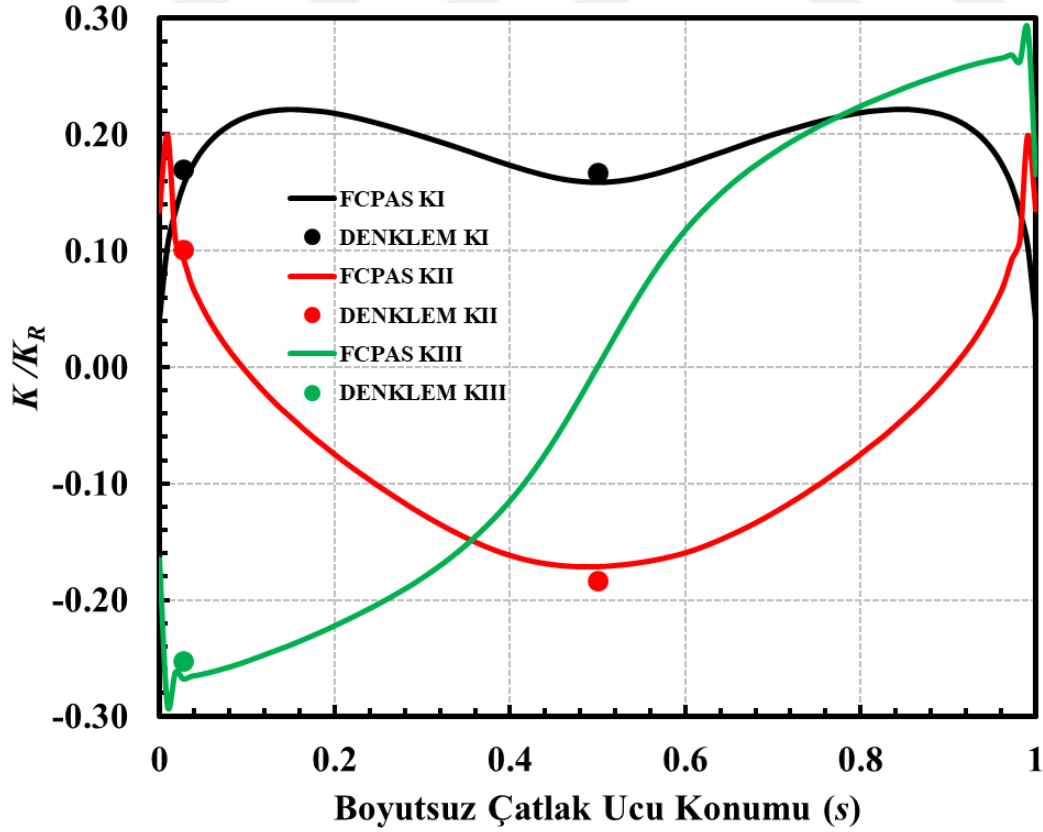
Şekil 4.60. $a/c=1.4$, $a/D=0.25$, $\alpha=36^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



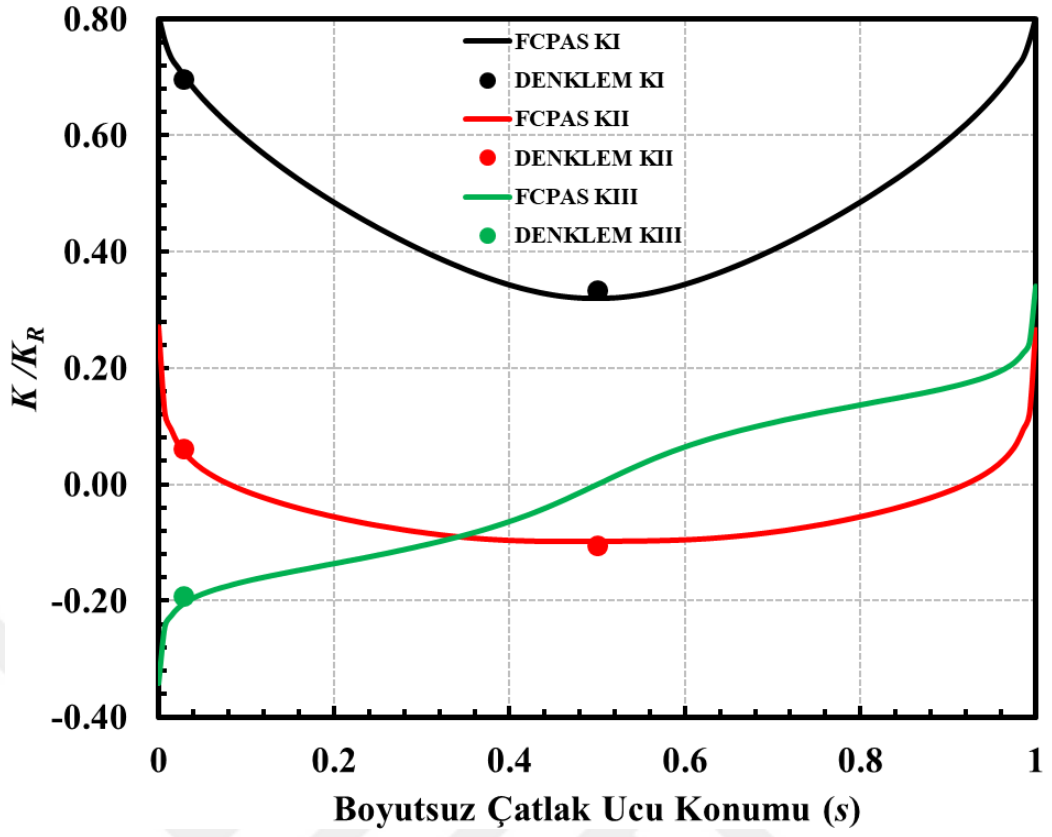
Şekil 4.61. $a/c=1.5$, $a/D=0.08$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



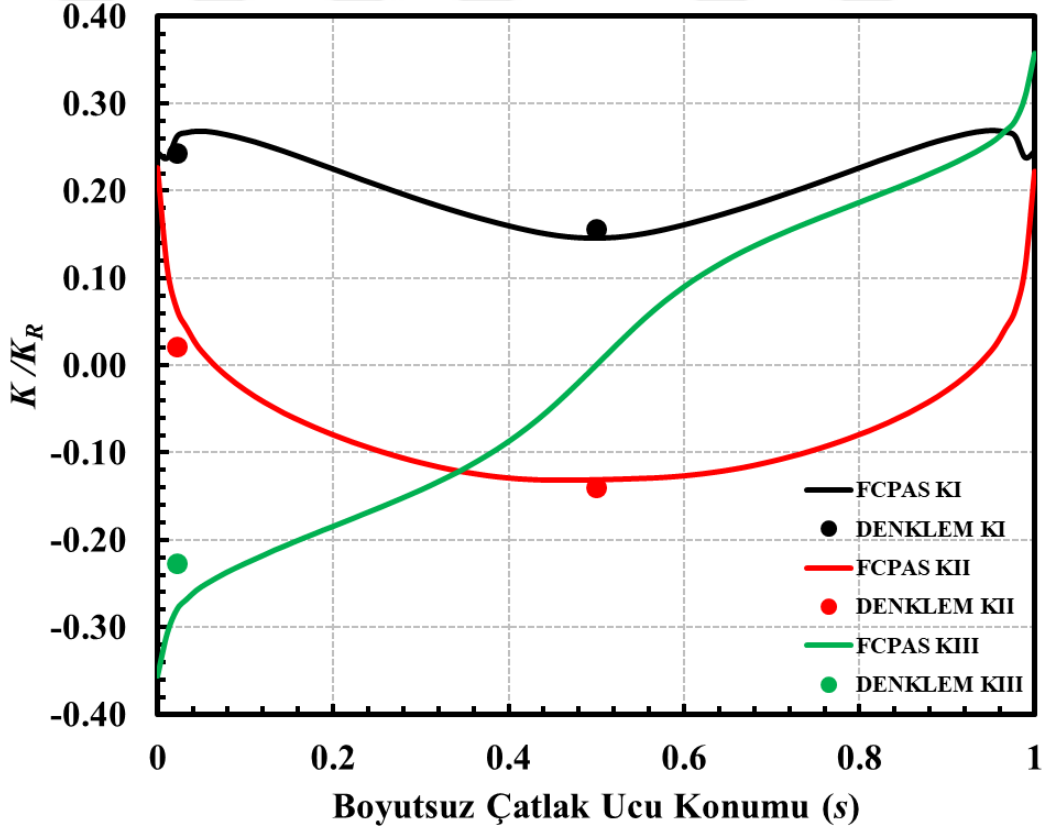
Şekil 4.62. $a/c=1.5$, $a/D=0.08$, $\alpha=50^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



Şekil 4.63. $a/c=1.5$, $a/D=0.08$, $\alpha=65^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



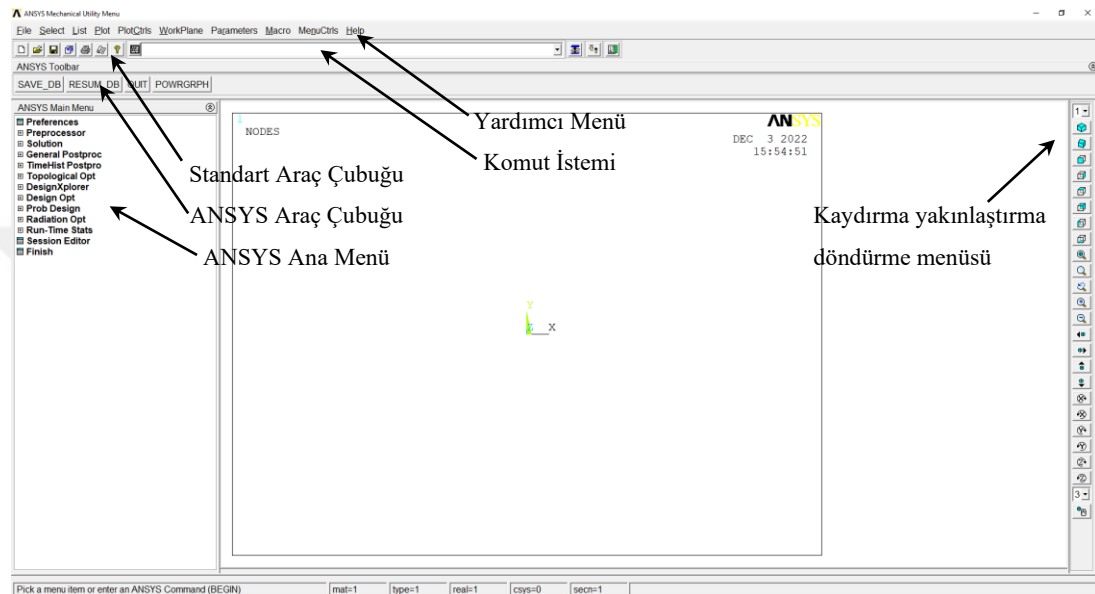
Şekil 4.64. $a/c=1.5$, $a/D=0.3$, $\alpha=25^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



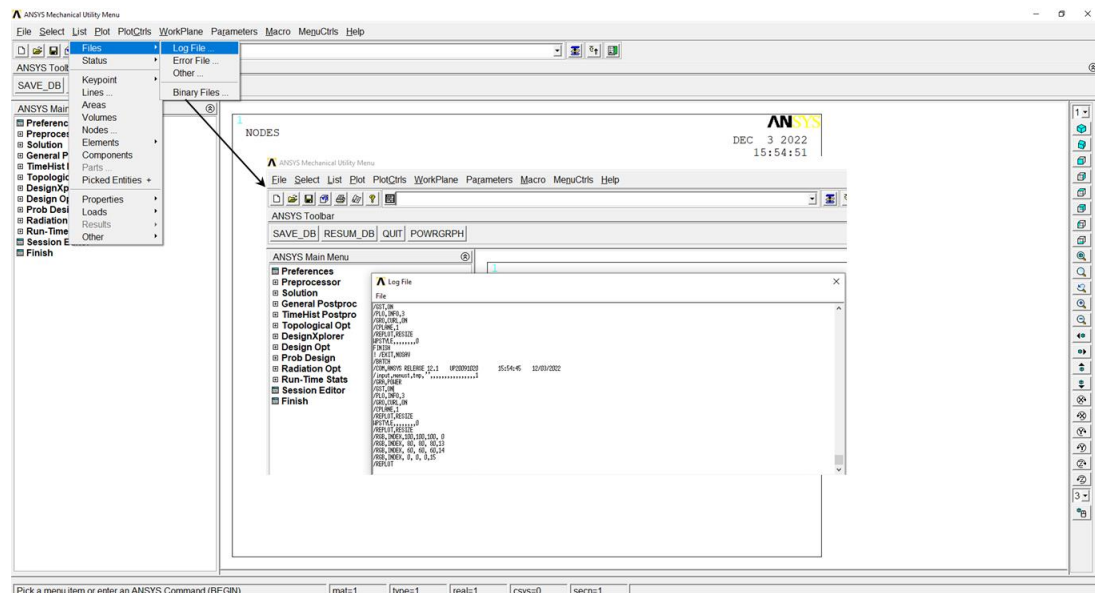
Şekil 4.65. $a/c=1.6$, $a/D=0.35$, $\alpha=66^\circ$ için boyutsuz K dağılımları ile empirik denklem sonuçları (Eğilme gerilmesi).



Bu bölümde ANSYS Mechanical APDL [25] kullanıcı arayüzü, modellemede kullanılan komutlar ve programdan alınan makrolar kısaca anlatılacaktır.



Şekil 5.1. ANSYS Mechanical APDL (Parametrik Tasarım Dili) kullanıcı arayüzü.



Şekil 5.2. Makroların görülebildiği komutlar.

Prof. Dr. Ali Osman Ayhan'ın geliştirmiş olduğu çatlak hacmi makrosu çatlak derinliği ve uzunluğu düzenlenerek hazır biçimde Şekil 5.1'de görülen komut istemine girilmektedir. Çatlak hacmi makroları Şekil 5.3-5.7'de sırasıyla gösterilmiştir.

A=1	/prep7	WPCSYS,-1
TT=1/10	numcmp,kp	k,10001,0.,0.,0.
A0=A-TT	numcmp,line	k,10002,A0,0.,0.
A1=A+TT	numcmp,area	k,10003,0.,A0,0.
C=2	→ /com local,77,0,0.,0.,0.,0.,45.0,0.	→ cm,kkkk,kp
C0=C-TT	/com local,77,0,0.19000,-0.73617,35.35,-	k,10006,A,0.,0.
C1=C+TT	15.500,0.000,0.000	k,10007,0.,A,0.
	vsel,none	k,10008,-A,0.,0.
SCALE=C/A	asel,none	k,10009,0.,-A,0.
SCALE0=C0/A0	lsel,none	k,10010,A1,0.,0.
SCALE1=C1/A1	ksel,none	k,10011,0.,A1,0.
		k,10012,-A1,0.,0.
		k,10013,0.,-A1,0.

Şekil 5.3. Derinlik, uzunluk, tüp kesiti, ölçek ve daire çizgilerinin belirlendiği noktaların tanımı.

lsel,none	lsel,none
LARC,10002,10003,10001,A0,	LARC,10008,10009,10001,A,
cm,ll1,line	cm,ll7,line
lsel,none	lsel,none
LARC,10003,10004,10001,A0,	LARC,10009,10006,10001,A,
cm,ll2,line	cm,ll8,line
lsel,none	lsel,none
LARC,10004,10005,10001,A0,	LARC,10010,10011,10001,A1,
cm,ll3,line	cm,ll9,line
lsel,none	lsel,none
LARC,10005,10002,10001,A0,	LARC,10011,10012,10001,A1,
cm,ll4,line	cm,ll10,line
lsel,none	lsel,none
LARC,10006,10007,10001,A,	LARC,10012,10013,10001,A1,
cm,ll5,line	cm,ll11,line
lsel,none	lsel,none
LARC,10007,10008,10001,A,	LARC,10013,10010,10001,A1,
cm,ll6,line	cm,ll12,line

Şekil 5.4. Çatlak elipsi için daire çizgilerinin tanımlanması.

cmsel,,ll1		lssel,none		lssel,none
cmsel,a,ll2		LSTR, 10001, 10002		LSTR, 10001, 10004
cmsel,a,ll3		cm,ll13,line		cm,ll19,line
cmsel,a,ll4		lssel,none		lssel,none
LSSCALE,all, , ,SCALE0,1,1, ,1,1		LSTR, 10002, 10006		LSTR, 10004, 10008
cmsel,,ll5		cm,ll14,line		cm,ll20,line
cmsel,a,ll6		lssel,none		lssel,none
cmsel,a,ll7	→	LSTR, 10006, 10010	→	LSTR, 10008, 10012
cmsel,a,ll8		cm,ll15,line		cm,ll21,line
LSSCALE,all, , ,SCALE,1,1, ,1,1		lssel,none		lssel,none
cmsel,,ll9		LSTR, 10001, 10003		LSTR, 10001, 10005
cmsel,a,ll10		cm,ll16,line		cm,ll22,line
cmsel,a,ll11		lssel,none		lssel,none
cmsel,a,ll12		LSTR, 10003, 10007		LSTR, 10005, 10009
LSSCALE,all, , ,SCALE1,1,1, ,1,1		cm,ll17,line		cm,ll23,line
		lssel,none		lssel,none
		LSTR, 10007, 10011		LSTR, 10009, 10013
		cm,ll18,line		cm,ll24,line

Şekil 5.5. Dairesel çizgileri elipse dönüştürme ve elipsleri çoğaltmak için çizgilerin tanımı.

cmsel,,ll13		cmsel,,ll14		cmsel,,ll15
cmsel,a,ll1		cmsel,a,ll5		cmsel,a,ll9
cmsel,a,ll16		cmsel,a,ll17		cmsel,a,ll18
al,all		cmsel,a,ll1		cmsel,a,ll5
cm,area1,area		al,all		al,all
cmsel,,ll16		cm,area5,area		cm,area9,area
cmsel,a,ll2		cmsel,,ll17		cmsel,,ll18
cmsel,a,ll19		cmsel,a,ll6		cmsel,a,ll10
al,all		cmsel,a,ll20		cmsel,a,ll21
cm,area2,area		cmsel,a,ll2		cmsel,a,ll6
cmsel,,ll19	→	al,all	→	al,all
cmsel,a,ll3		cm,area6,area		cm,area10,area
cmsel,a,ll22		cmsel,,ll20		cmsel,,ll21
al,all		cmsel,a,ll7		cmsel,a,ll11
cm,area3,area		cmsel,a,ll23		cmsel,a,ll24
cmsel,,ll22		cmsel,a,ll3		cmsel,a,ll7
cmsel,a,ll4		al,all		al,all
cmsel,a,ll13		cm,area7,area		cm,area11,area
al,all		cmsel,,ll23		cmsel,,ll24
cm,area4,area		cmsel,a,ll8		cmsel,a,ll12
		cmsel,a,ll14		cmsel,a,ll15
		cmsel,a,ll4		cmsel,a,ll8
		al,all		al,all
		cm,area8,area		cm,area12,area

Şekil 5.6. Elipsin çizgilerinin kesişiminden alan tanımları.

```

allsel
aslv
asel,invert
cm,areas,area
AGEN,2,all, , , , , , 1

```

```

cmsel,u,areas
cm,areas2,area
vsel,none
cmsel,,areas
VEXT,all, , , 0,0,-TT,,,,
cm,disk1,volu
vsel,none
cmsel,,areas2
VEXT,all, , , 0,0,TT,,,,
cm,disk2,volu
cmsel,,disk1
cmsel,a,disk2
aslv
allsel
vplot

```

Elips alanlarına hacim ekstrüzyon işlemleri.

Şekil 5.7. Çatlak disk hacminin oluşturulması.

/PREP7	<u>Eleman tiplerinin girilmesi</u>
ET,1,SOLID95	Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete
ET,2,SHELL93	<u>Silindir orta hacim model komutu</u>
CYL4, .2, .90,2,450,4	Preprocessor>Modelling>Create>Volumes>Cylinder>Partial Cylinder
FLST,2,1,5,ORDE,1	Alt ve üst alanlarından -Z ve +Z yönünde ekstrüzyon işlem komutu
FITEM,2,1	Preprocessor>Modelling>Operate>Extrude>Areas>By XYZ Offset
VEXT,P51X, , , 0,0,-18,,,,	Tüm hacimleri seçerek -Z yönünde çatlağın yerleştirileceği merkeze taşıma komutu
FLST,2,1,5,ORDE,1	Preprocessor>Modelling>Move/Modify>Volumes
FITEM,2,2	<u>Çatlağın yatay eksenle yaptığı açığı oluşturmak için yardımcı menüden</u>
VEXT,P51X, , , 0,0,18,,,,	Workplane>Offset WP By Increments>+X yönünde 30
FLST,3,3,6,ORDE,2	<u>Silindir yüzey merkezine yerel koordinat sistemi atamak için</u>
FITEM,3,1	Workplane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>
FITEM,3,-3	At WP Origin>Cartesian 0
VGEN, ,P51X, , , , -2, , , 1	
wpro,,30.000000,	
CSWPLA,11,0,1,1,	

Şekil 5.8. Eksenel gerilme ve burulma yükü için modellemenin ilk adımları.

Eğilme yükünde FRAC3D'nin çözüm yapabilmesi için üst ve alt alandan +Z ve -Z yönüne kısa bir hacim ekstrüzyonu yapılır (Şekil 5.9).


```

/PREP7
ET,1,SOLID95
ET,2,SHELL93
CYL4, ,2, ,90,2,450,4
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,2
VEXT,P51X, , ,0,0,17.75,,,,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,5
VEXT,P51X, , ,0,0,0.25,,,,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
VEXT,P51X, , ,0,0,-17.75,,,,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,15
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.25,,,,
FLST,3,5,6,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-5
VGEN, ,P51X, , , , -2, , ,1
wpro,,30.000000,
CSWPLA,11,0,1,1,

```

Preprocessor>Modelling>Operate>Extrude>Areas>
By XYZ Offset

Şekil 5.9. Eğilme yükü için modellemenin ilk adımları.

Çatlak hacmi makroları hazır olarak girilir.

```

FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,3
FITEM,3,-4
AGEN,4,P51X, , , , , ,0

```

Silindir orta hacim yüzeylerinin kopyalanması
Preprocessor>Modelling>Copy>Areas

```

FLST,2,24,6,ORDE,2
FITEM,2,4
FITEM,2,-27
FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,3
FITEM,3,-4
VSBA,P51X,P51X

```

Tüm çatlak hacimlerinin seçilmesi ve kopyalanan alanların seçilmesi
Preprocessor>Modelling>Operate>Booleans>
Divide>Volume By Area

Şekil 5.10. Silindir orta hacim yüzey alanlarının kopyalanması ve kopyalanan alanların silindirin dışındaki çatlak hacmini kesmesini sağlaması.

FLST,2,24,6,ORDE,22
 FITEM,2,10
 FITEM,2,-11
 FITEM,2,14
 FITEM,2,-15
 FITEM,2,18
 FITEM,2,-19
 FITEM,2,22
 FITEM,2,-23
 FITEM,2,26
 FITEM,2,-27
 FITEM,2,30
 FITEM,2,-31
 FITEM,2,34
 FITEM,2,-35
 FITEM,2,38
 FITEM,2,-39
 FITEM,2,42
 FITEM,2,-45
 FITEM,2,50
 FITEM,2,-51
 FITEM,2,54
 FITEM,2,-55
 VDELE,P51X, , ,1

Silindir dış kısmında kalan çatlak hacimlerinin silinmesi

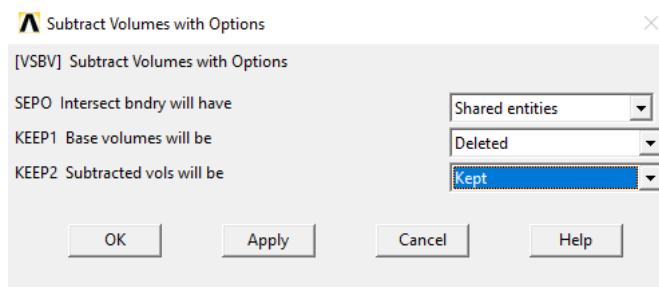
→ Preprocessor>Modelling>Delete>Volume and Below

Şekil 5.11. Silindirin dışında kalan çatlak hacimlerini temizleme işlemi.

FLST,2,3,6,ORDE,2
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-3
 FLST,3,14,6,ORDE,12
 FITEM,3,28
 FITEM,3,-29
 FITEM,3,32
 FITEM,3,-33
 FITEM,3,36
 FITEM,3,-37
 FITEM,3,40
 FITEM,3,-41
 FITEM,3,46
 FITEM,3,-49
 FITEM,3,52
 FITEM,3,-53
 VSBV,P51X,P51X, ,DELETE,KEEP

Silindir içine yerleştirilen çatlağın hacmini boşaltmak için önce bu komutla silindir seçilir ardından tüm çatlak hacimleri seçilir.

Preprocessor>Modelling>Operate>Booleans>Subtract>With Options>Volumes



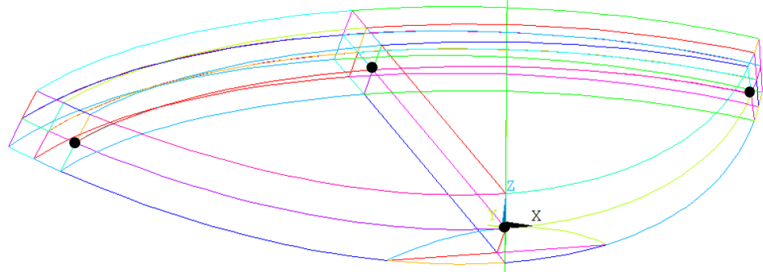
Şekil 5.12. Silindir içine yerleştirilen çatlak hacimlerini boşaltma işlemi.

```

FLST,5,8,3,ORDE,8
FITEM,5,18
FITEM,5,-19
FITEM,5,83
FITEM,5,85
FITEM,5,87
FITEM,5,90
FITEM,5,10001
FITEM,5,10003
KSEL,U, , ,P51X
nummrg,all

```

Çatlağın başlayacağı noktaları seçmek için önce lplot ardından ksel,u,p komut istemine girilir. Noktalar seçildikten sonra nummrg,all komutu girilir.



Şekil 5.13. Çatlağın başlayacağı noktalar haricindeki noktaları tek noktaya birleştirme işlemi.

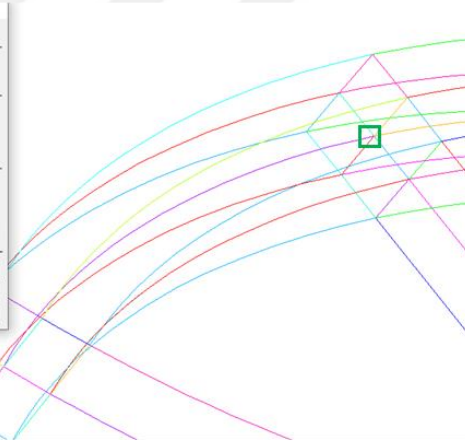
```

FLST,5,1,3,ORDE,1
FITEM,5,22
CM,_Y,KP
KSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,KP
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
KESIZE,ALL,1/200
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y

```

Çatlak ucundaki eleman boyutu değeri girilir.

Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>Manuel Size> Keypoints>Picked KPs



```

FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,222
FITEM,5,227
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , , ,70, , , , ,1

```

Serbest yüzeyden diğer serbest yüzeye kadar olan iki çizgi seçilir.

Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>Manuel Size>Lines>Picked Lines

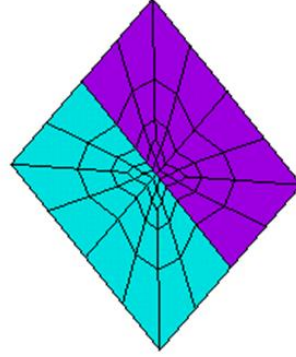
Şekil 5.14. Analiz sonuçlarına önemli etkisi bulunan kesize ve lesize değerlerinin girilmesi.

```

esize
MSHKEY,0
FLST,5,4,5,ORDE,4
FITEM,5,52
FITEM,5,64
FITEM,5,88
FITEM,5,100
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

Derinlik noktasındaki kare alan seçilir.
Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Free



Şekil 5.15. Çatlak tünel hacmini oluşturmak için ağ oluşturulan alan.

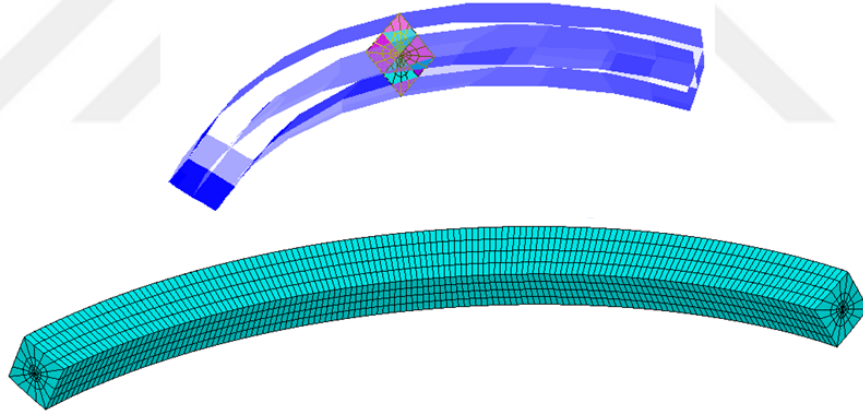
Seçilen alan hacim boyunca süpürülerek çatlak tüneli oluşturulur.

```

FLST,5,8,6,ORDE,6
FITEM,5,40
FITEM,5,-41
FITEM,5,46
FITEM,5,-49
FITEM,5,52
FITEM,5,-53
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

Preprocessor>Meshing>Mesh>Volume Sweep>Sweep



Şekil 5.16. Çatlak tünel hacminin oluşturulması.

Modellerde piramit eleman kullanılmadığı için bu seçenek kapatılmıştır.

```

MOPT,AMESH,DEFA
MOPT,QMESH,DEFA
MOPT,VMESH,DEFA
MOPT,TIMP,1
MOPT,PYRA,OFF
MOPT,AORD,0
MOPT,SPLIT,1
MSHKEY,0
MSHMID,0
MSHPATTERN,0
KEYW,ACCEPT,0
MSHAPE,0,2D
MSHAPE,1,3D

```

Preprocessor>Meshing>Meshing Options>No Pyramids> Quad

Şekil 5.17. Tünel hacmi ile önündeki hacim arasında kullanılan piramit elemanların kapatılması.

Çatlak tünel hacminin önünde yer alan hacime ağ bölüntülenmesi yapılmıştır.

```

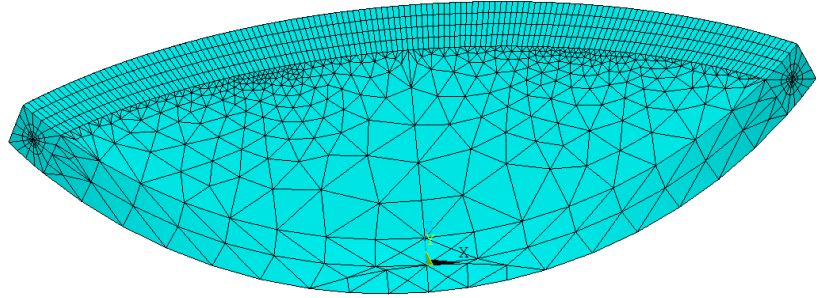
MOPT,TETEXPND,2,
esize,0.2
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
FLST,5,6,6,ORDE,6
FITEM,5,28
FITEM,5,-29
FITEM,5,32
FITEM,5,-33
FITEM,5,36
FITEM,5,-37
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

Tetrahedron elemanların hacimsel eleman genişleme faktörüdür. 0.5 ile 2 arasında olması önerilir.

Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>Manual Size> Global> Volu Cntrl

Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free



Şekil 5.18. Tünel hacminin önündeki hacimlere ağ oluşturma işlemi.

```

MOPT,TETEXPND,1,
esize,0.35
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , 4
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

Çatlağın bulunduğu hacime ağ bölüntülenmesi yapılmıştır.

Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free

Şekil 5.19. Çatlağın yerleştirildiği orta kısımda yer alan hacime ağ oluşturma işlemi.

```

MOPT,TETEXPND,1,
esize,0.35
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,-3
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

Ekstrüzyon yapılan hacimlere ağ bölüntülenmesi yapılmıştır.

Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free

Alan ağları silindikten sonra eleman ve düğüm numaralarının dizilişinde oluşan boşlukları silmek için kullanılır.

aclear,all

numcmp,node

numcmp,elem

Şekil 5.20. Ağ oluşturma işlemlerinin tamamlanması.

Sınır şartlarını tanımlamak için uygulanacak çekme yükü bilgisi girilir. Silindirin alt ve üst alanı seçilir, -1 basınç yükü uygulanır (Şekil 5.21).

```

FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,5
FITEM,2,10
SFA,P51X,1,PRES,-1

```

Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>
Pressure>On Areas

Şekil 5.21. Eksenel gerilme yükünün tanımlanması.

Şekil 5.22’de yer alan 3 adet ok eksenel gerilmedeki mantıkla aynı işlemleri göstermektedir. esize,0.4 komutu FRAC3D eğilme analizinin gerçekleşmesi için alt ve üst kısa hacimlerinin ağ oluşturma eleman boyutudur.

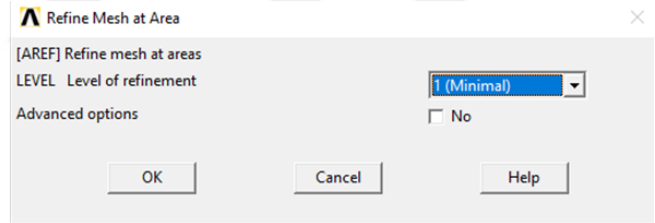
MOPT,TETEXPND,1,2, esize,0.25 MSHKEY,0 MSHAPE,1,3d FLST,5,6,6,ORDE,6 FITEM,5,30 FITEM,5,-31 FITEM,5,34 FITEM,5,-35 FITEM,5,38 FITEM,5,-39 CM,_Y,VOLU VSEL,, , ,P51X CM,_Y1,VOLU CHKMSH,'VOLU' CMSEL,S,_Y VMESH,_Y1 CMDELE,_Y CMDELE,_Y1 CMDELE,_Y2	MOPT,TETEXPND,1, esize,0.35 MSHKEY,0 MSHAPE,1,3d CM,_Y,VOLU VSEL,, , , 6 CM,_Y1,VOLU CHKMSH,'VOLU' CMSEL,S,_Y VMESH,_Y1 CMDELE,_Y CMDELE,_Y1 CMDELE,_Y2	MOPT,TETEXPND,1, esize,0.35 MSHKEY,0 MSHAPE,1,3d FLST,5,2,6,ORDE,2 FITEM,5,2 FITEM,5,4 CM,_Y,VOLU VSEL,, , ,P51X CM,_Y1,VOLU CHKMSH,'VOLU' CMSEL,S,_Y VMESH,_Y1 CMDELE,_Y CMDELE,_Y1 CMDELE,_Y2	MOPT,TETEXPND,1, esize,0.4 MSHKEY,0 MSHAPE,1,3d FLST,5,2,6,ORDE,2 FITEM,5,3 FITEM,5,5 CM,_Y,VOLU VSEL,, , ,P51X CM,_Y1,VOLU CHKMSH,'VOLU' CMSEL,S,_Y VMESH,_Y1 CMDELE,_Y CMDELE,_Y1 CMDELE,_Y2
---	---	--	---

Şekil 5.22. Eğilme yükü için silindirin tüm hacim kısımlarına ağ oluşturma işlemi.

```
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,10
FITEM,5,20
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
AREFINE,_Y1, , ,1,0,1,1
CMDELE,_Y1
```

Kısa hacimlerde daha sıkı eleman boyutuyla ağ oluşturmak için üst ve alt alanlardan daha fazla sıklık verilir.

Preprocessor>Meshing>Modify Mesh>Refine At> Areas

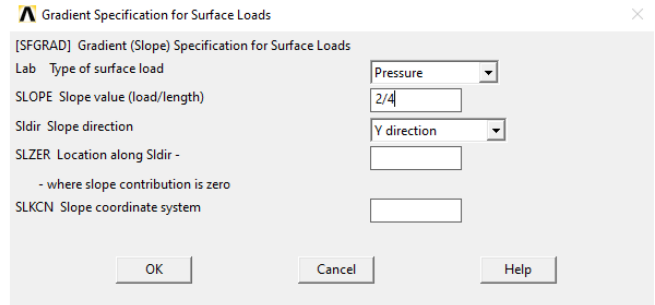


```
aclear,all
numcmp,node
numcmp,elem

SFGRAD,PRES, ,Y, ,0.5,

FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,10
FITEM,2,20
SFA,P51X,1,PRES,-1
```

Preprocessor>Loads>Define Loads>Settings>For Surface Ld>Gradient



Şekil 5.23. Eğilme yükünde ağ oluşturma işleminin bitirilmesi ve doğrusal yayılı basınç yükü komutları.

Eğilme momentinde silindir merkezinde sıfır olmak koşuluyla verilecek doğrusal yayılı basınç yükünü tanımlamak için yüzeylere eğim atanır. SFGRAD komutunda

yüzey eğimi, +1 doğrusal çekme yükünden -1 doğrusal basma yükü çıkarılıp sonuç çap boyutuna bölünerek belirlenir (Şekil 5.23).

```
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,9
DK,P51X, ,0, ,0,UX,UY,UZ, , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,12
DK,P51X, ,0, ,0,UY,UZ, , , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,10
DK,P51X, ,0, ,0,UZ, , , , , ,
```

Silindiri sabitlemek için yer değiştirme bilgisi girilir. Alt alanda bulunan 3 anahtar noktası seçilir.

Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints

Şekil 5.24. Eksenel gerilme yükü altında rijit cisim hareketini kısıtlamak için kullanılan komutlar.

```
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,222
FITEM,5,227
LSEL,S, , ,P51X
nsl,,1
```

FCPAS verilerini almak için çatlak ucu çizgileri seçilir.

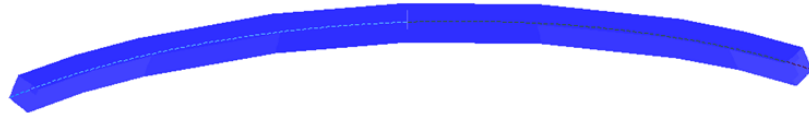
Komut satırına önce lplot ardından lsel,,p yazılır.

Şekil 5.25. Çatlak ucu çizgilerinin tanımlanması.

```
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,48
FITEM,5,-49
VSEL,S, , ,P51X
```

Çatlak çizgisi önündeki hacimler seçilir. Sırasıyla diğer komutlar girilir ve CSWPLA ile eleman ve düğüm noktalarını sıralamak için yerel silindirik koordinat sistemi tanımlanır.

```
eslv
esln,r
EPLOT
CSWPLA,11,1,1,1,
dsys,11
```

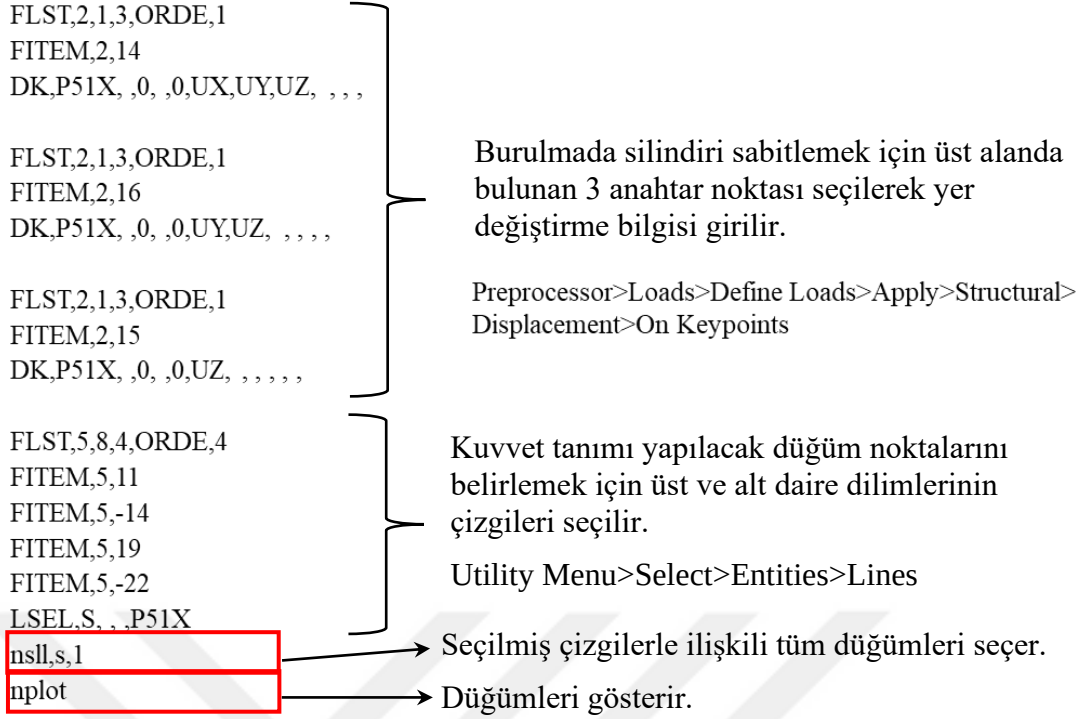


Şekil 5.26. Çatlak çizgisi önündeki hacimlerin seçimi.

Eslv: Seçilen hacimlerle ilişkili öğeleri seçer.

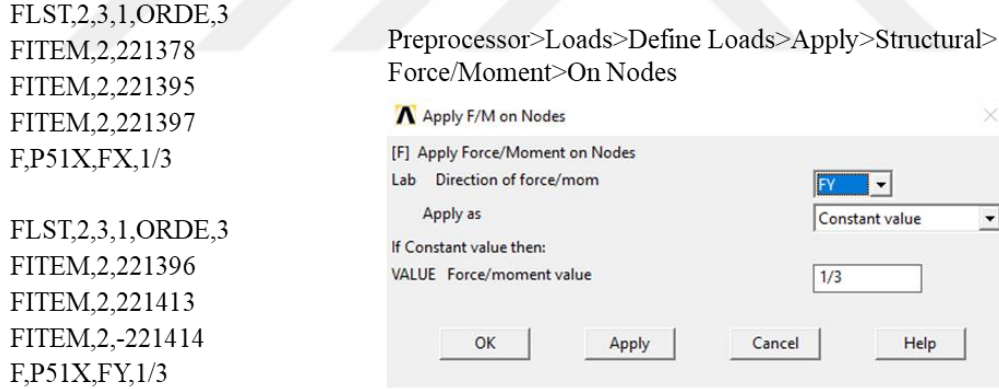
Esln,r: Mevcut gruptan bir grubu yeniden seçerek seçilen düğümlerle ilişkili öğeleri seçer.

Dsys,11: Tanımlanan silindirik koordinat sistemini aktif eder.



Şekil 5.27. Burulma yükü için rijit cisim hareketinin kısıtlanması, kuvvet tanımının yapılacağı düğümlerin seçimi.

Merkeze teğet çizgi üzerinde yer alan düğümlere kuvvet tanımı yapılır.



Şekil 5.28. Burulma yükü için düğümlerden kuvvet tanımlanması.

FCPAS [26] verilerini almak için sırasıyla aşağıdaki makrolar komut istemine girilir.

Nlist: çatlak ucu düğümleri listesini FCPAS'e aktarmak için *.crnodes uzantısı ile kaydedilir.

Elist: çatlak ucu elemanları listesini FCPAS'e aktarmak için *.crelems uzantısı ile kaydedilir.

Dsys,0: Tüm geometriyi gösteren kartezyen koordinat sistemini aktifleştirir.

Allsel: Tek bir komutla tüm varlıklar seçilir.

Eplot: Bir öge görüntüsünü oluşturur.

Sbct: Katı model yüklerini ve sınır koşullarını sonlu elemanlar modeline transfer eder. Ayrıca seçilmemiş anahtar noktaları, çizgiler, alanlar ve hacimler üzerindeki yük ve sınır koşulları transfer edilmez.

Dlist: Yer değiştirme sınır koşulları listesini FCPAS'e aktarmak için *.dlis uzantısı ile kaydedilir.

Sflist: Ögeler üzerindeki basınç yükü listesini FCPAS'e aktarmak için *.sflis uzantısı ile kaydedilir.

Flist: Düğümlerdeki kuvvet yükleri listesini FCPAS'e aktarmak için *.flis uzantısı ile kaydedilir.

Modmesh,deta: Mevcut katı model ve sonlu eleman modeli arasındaki tüm ilişkilendirmeyi serbest bırakır ve ilişkiyi kontrol eder.

Emid,add: Seçilmiş ögelere orta kenar düğümleri ekler ve öge sayılarını değiştirir.

Nwrite: Tüm düğüm listesini otomatik olarak çalışma klasörüne *.node uzantısı ile ekler.

Elist: Tüm elemanlar (öğeler) listesini FCPAS'e aktarmak için *.elis uzantısı ile kaydedilir.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Günlük hayatta yuvarlak çubuk ve dairesel şaft benzeri katı silindirik yapılarda çeşitli yükler altında deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu tez çalışması kapsamında dönmüş yüzey çatlaklarına sahip katı silindir modelleri aksenal gerilme, eğilme ve burulma yüklerine maruz bırakılarak çatlak önü (crack front) boyunca oluşan gerilme şiddet faktörü değerleri zenginleştirilmiş eleman formülasyonu içeren FCPAS sonlu eleman analizi yazılımıyla hesaplanmıştır. Her bir yük türü için 120 adet analizle beraber toplamda 360 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Her bir analizde ise K_I , K_{II} ve K_{III} olmak üzere toplamda $360 \times 3 = 1080$ adet gerilme şiddet dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca çatlak şekil oranı (sabit a/c için a/D değerlerinin değişimi) ve çatlak derinlik oranı (sabit a/D için a/c değerlerinin değişimi) parametrelerinin etkileri de $\alpha = 45^\circ$ durumu için gerilme şiddet faktörü grafikleri ile irdelenmiştir.

Çözümlerden elde edilen gerilme şiddet faktörlerindeki serbest yüzey ve derinlik noktalarındaki boyutsuz K değerleri kullanılarak empirik denklemler oluşturulmuş ve analiz kütüphanesinde yer almayan ara değerler ile denklemlerin doğrulukları ispat edilmiştir. Burulma yükü için hesaplanan boyutsuz K_I dağılımlarında bir bölge negatif bir bölge pozitif olmaktadır. Negatif bölgelerde çatlak yüzeyleri teması oluşmaktadır ve temas mekaniği modellenmediğinden dolayı deformasyon görüntüsü çatlak kapanması şeklinde oluşmaktadır. Pratikte böyle bir durum görülemeyeceğinden dolayı burulma yükü için empirik ifadeler geliştirilmemiştir. Empirik denklemler sayesinde analiz kütüphanesinde kullanılan parametrelerin değer aralıklarında kalmak koşuluyla parametrelerin herhangi değerleri için boyutsuz gerilme şiddet faktörleri direkt olarak hesaplanabilecektir.

Grafik dağılımlarından elde edilen sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır:

1. Aksenal gerilme ve eğilme yükü için elde edilen sonuçlarda boyutsuz K_I dağılımları dönme açısı 0° olduğunda en yüksek değeri almaktadır. a/c sabit tutulup a/D oranı arttıkça boyutsuz K_I gerilme şiddet faktörü değerleri artmaktadır. Dönme açıları arttığında ise çatlak önü boyunca K_I değerleri azalış göstermektedir. Burulma yükü için $\alpha = 0^\circ$ olduğunda K_I dağılımları 0° dır.

Sadece kayma ve yırtılma modları aktif olmaktadır. Burulma yükü altında çatlak dönme açısı arttıkça, analizlerde temas mekaniği dahil edilemediği için, bir bölgede negatif ve diğer bölgede pozitif GŞF dağılımları oluşmaktadır.

2. Eksenel gerilme ve eğilme yükü için çatlağın yatayla 0° açısı yaptığı durumda kayma ve yırtılma modu aktif olmaz. Boyutsuz K_{II} dağılımlarının en yüksek olduğu dönme açısı genellikle 45° derecedir. Genelde birbirini 90° dereceye tamamlayan 15° - 75° ve 30° - 60° durumlarında boyutsuz K_{II} dağılımları birbirine yakın değerler almaktadır. Boyutsuz K_{III} dağılımlarında ise genelde bir bölge pozitif iken diğer bölge negatiftir. Burulma yükü için de boyutsuz K_{II} dağılımlarında bir bölge pozitif diğer bölge negatiftir. Çatlak dönme açısı arttıkça genellikle boyutsuz K_{III} değerleri azalmaktadır.
3. Empirik denklem sonuçlarıyla ilgili olarak serbest yüzeylerde özellikle K_{II} ve K_{III} değerleri için tam değer tahmininin yapılamayacağı tespit edilmiştir. K_I değerleri için ara değer analiz sonuçları ile denklem sonuçları arasındaki fark %10'un altında olduğu görülmüştür. Derinlik K_{II} için de bu fark genellikle %10'un altındadır.

KAYNAKLAR

- [1] Anderson, T. L. (2017). Fracture Mechanics, s. 680.
- [2] Hetnarski, R. B. (2014). *Encyclopedia of Thermal Stresses*. Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-94-007-2739-7.
- [3] Raju, I. ve Newman, J. (1986). Stress-intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes and Rods under Tension and Bending Loads. *İçinde Fracture Mechanics: Seventeenth Volume*, J. Underwood, R. Chait, C. Smith, D. Wilhem, W. Andrews, ve J. Newman, Ed. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, ss. 789-789-17. <http://doi.org/10.1520/STP17428S>.
- [4] Carpinteri, A. (1992). ELLIPTICAL-ARC SURFACE CRACKS IN ROUND BARS. *Fat Frac Eng Mat Struct*, c. 15, sy 11, ss. 1141-1153. <http://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1992.tb00039.x>.
- [5] Levan, A. ve Royer, J. (1993). Part-circular surface cracks in round bars under tension, bending and twisting. *Int J Fract*, c. 61, sy 1, ss. 71-99. <http://doi.org/10.1007/BF00032340>.
- [6] Royer, J. ve Le VAN, A. (1994). Stress Intensity Factor Variations Along Crack Fronts under Three Modes in a Round Bar. *İçinde Advances in Fracture Resistance and Structural Integrity*, Elsevier, ss. 99-106. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-042256-5.50017-2>.
- [7] Da Fonte, M., Gomes, E. ve de Freitas, M. (1999). Stress Intensity Factors for Semi-Elliptical Surface Cracks in Round Bars Subjected to Mode I (Bending) and Mode III (Torsion) Loading. *İçinde European Structural Integrity Society*, c. 25, Elsevier, ss. 249-260. [http://doi.org/10.1016/S1566-1369\(99\)80019-3](http://doi.org/10.1016/S1566-1369(99)80019-3).
- [8] Da Fonte, M. ve de Freitas, M. (1999). Stress Intensity Factors for semi-elliptical surface cracks in round bars under bending and torsion. *International Journal of Fatigue*, c. 21, sy 5, ss. 457-463. [http://doi.org/10.1016/S0142-1123\(98\)00090-5](http://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00090-5).
- [9] Shih, Y. S. ve Chen, J. J. (2002). The stress intensity factor study of an elliptical cracked shaft. *Nuclear Engineering and Design*, c. 214, sy 1-2, ss. 137-145. [http://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00022-5](http://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00022-5).
- [10] Shin, C. S. ve Cai, C. Q. (2004). Experimental and finite element analyses on stress intensity factors of an elliptical surface crack in a circular shaft under tension and bending. *International Journal of Fracture*, c. 129, sy 3, ss. 239-264. <http://doi.org/10.1023/B:FRAC.0000047784.23236.7d>.
- [11] Ayhan, A. O. (2011). Three-dimensional fracture analysis using tetrahedral enriched elements and fully unstructured mesh. *International Journal of Solids and Structures*, c. 48, sy 3-4, ss. 492-505. <http://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.10.012>.

- [12] Ismail, A. E., Ariffin, A. K., Abdullah, S., Ghazali, M. J., ve Daud, R. (2011). Mode III Stress Intensity Factors of Surface Crack in Round Bars. *AMR*, c. 214, ss. 192-196, [http://doi.org/ 10.4028/www.scientific.net/AMR.214.192](http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.214.192).
- [13] Ismail, A. E., Ariffin, A. K., Abdullah, S. ve Ghazali, M. J. (2012). Stress intensity factors for surface cracks in round bar under single and combined loadings. *Meccanica*, c. 47, sy 5, ss. 1141-1156. <http://doi.org/10.1007/s11012-011-9500-7>.
- [14] Ismail, A. E., Ariffin, A. K., Abdullah, S. ve Ghazali, M. J., Abdulrazzaq, M. ve Daud, R. (2012). Stress intensity factors under combined bending and torsion moments. *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, c. 13, sy 1, ss. 1-8. <http://doi.org/10.1631/jzus.A1100040>.
- [15] Ismail, A. E., Tobi, A. L. M. ve Nor, N. H. M. (2015). Stress intensity factors of slanted cracks in round bars subjected to mode I tension loading. Program adı: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICS, ENGINEERING AND INDUSTRIAL APPLICATIONS 2014 (ICoMEIA 2014), Penang, Malaysia, s. 070027. <http://doi.org/10.1063/1.4915745>.
- [16] Isidoro, J. ve Martins, R. F. (2016). Calculation of Stress Intensity Factors K_I , K_{II} and K_{III} of Cracked Components Submitted to Flexural and Torsional Loads. *Procedia Engineering*, c. 160, ss. 131-136. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.872>.
- [17] Ramezani, M. K., Purbolaksono, J., Andriyana, A., Ramesh, S. ve Mardi, N. A. (2018). Analysis of surface cracks in round bars using dual boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, c. 93, ss. 112-123. <http://doi.org/10.1016/j.enganabound.2018.04.012>.
- [18] Ramezani, M. K., Purbolaksono, J., Andriyana, A., Ramesh, S. ve Putra, I. S. (2018). Empirical solutions for stress intensity factors of a surface crack in a solid cylinder under pure torsion. *Engineering Fracture Mechanics*, c. 193, ss. 122-136. <http://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2018.02.015>.
- [19] Teh, S., Andriyana, A., Ramesh, S., Putra, I. S., Kadarno, P. ve Purbolaksono, J. (2021). Tetrahedral meshing for a slanted semi-elliptical surface crack at a solid cylinder. *Engineering Fracture Mechanics*, c. 241, s. 107400. <http://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2020.107400>.
- [20] Alegre, J. M., Cuesta, I. I. ve Díaz, A. (2022). Stress-intensity factor solutions for embedded elliptical cracks in round bars subjected to tensile load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, c. 117, s. 103189. <http://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103189>.
- [21] Barrinaya, M. A., Alfiyuranda, M. N., Ramezani, M.K., Putra, I. S., Ramesh, S., Kadarno, P., Hastuty, S. ve Purbolaksono, J. (2022). Modes I-II-III stress intensity factors of a semi-elliptical surface crack at a round bar under torsion loading by FEM and DBEM. *Engineering Solid Mechanics*, c. 10, sy 4, ss. 399-406. <http://doi.org/10.5267/j.esm.2022.6.099>.
- [22] Moaveni, S. (2015). *Finite element analysis theory and application with ANSYS* (Fourth Edition). Pearson Education.

- [23] Thompson, M. K. ve Thompson, J. M. (2017). *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis* (an imprint of Elsevier). Butterworth-Heinemann Publications.
- [24] Ayhan, A. O. (2004). Mixed mode stress intensity factors for deflected and inclined surface cracks in finite-thickness plates. *Engineering Fracture Mechanics*, c. 71, sy 7-8, ss. 1059-1079. [http://doi.org/10.1016/S0013-7944\(03\)00153-X](http://doi.org/10.1016/S0013-7944(03)00153-X).
- [25] ANSYS, “Version 12.0”. Ansys Inc, Canonsburg, PA, USA, 2009.
- [26] Computational and Experimental Fracture Mechanics (CEFM) Laboratory Web Page (2022, 4 Aralık). Hesaplamalı ve Deneysel Kırılma Mekanikği. http://www.cefmlab.sakarya.edu.tr/computational_capabilities_tr.htm
- [27] Ayhan, A. O. ve Nied, H. F. (2002). Stress intensity factors for three-dimensional surface cracks using enriched finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, c. 54, sy 6, ss. 899-921. <http://doi.org/10.1002/nme.459>.
- [28] Beer, F. P., Johnston, E.R., DeWolf, J.T., Mazurek, D. F. (2011). *Mechanics of materials*. (6th ed.) New York: McGraw-Hill.
- [29] Lesik, S. A. (2010). *Applied statistical inference with MINITAB (Statistics : textbooks and monographs)*. (First Edition). Boca Raton: CRC Press.
- [30] Minitab, “I. MINITAB release 17: statistical software for windows”. Minitab Inc, USA, 2014.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Çağatay Orhun ORAL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim dalı, Makine Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Oral Ç. O. ve Ayhan A. O. (2023, 11-12 Mart)., “The Effects of Crack Aspect Ratio (a/c) and Normalized Crack Depth (a/D) On Fracture Parameters for a Deflected Surface Crack Contained in a Solid Cylinder Under Tension Loading” *16. International Scientific Research Congress - Science and Engineering*, Ankara, Turkey.