T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞİLME MOMENTİNE MARUZ İÇİ BOŞ SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ DIŞ YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet ÇALIK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

MAYIS 2023

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞİLME MOMENTİNE MARUZ İÇİ BOŞ SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ DIŞ YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet ÇALIK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali Osman AYHAN

MAYIS 2023

Muhammet ÇALIK tarafından hazırlanan "EĞİLME MOMENTİNE MARUZ İÇİ BOŞ SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ DIŞ YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ" adlı tez çalışması --.--.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** Orta Doğu Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi :	**Dr. Öğr. Üyesi Sunal Ahmet Parasız** 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 "EĞİLME MOMENTİNE MARUZ İÇİ BOŞ SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ DIŞ 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.

(……/……/20…..).

(imza)

Muhammet ÇALIK

Anneme, Babama, Kardeşime, Eşime ve Oğluma

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında kıymetli bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım, çalışmamın tüm aşamalarında yardımını esirgemeyen ve araştırmalarımda beni yönlendiren kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Ali Osman AYHAN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarıma katkılarından dolayı arkadaşlarım Mete YILDIRIM'a ve Çağatay Orhun ORAL'a teşekkür ederim.

Benim bu günlere gelmemde büyük emeği olan, beni sürekli destekleyen, öğrenim hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem Binnaz babam İbrahim ÇALIK'a ve ayrıca bu süreçte bana sabırla katlanan ve her daim destekleyen eşim Ayşegül oğlum Mustafa Kerem ÇALIK'a teşekkür ederim.

Muhammet ÇALIK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ v
TEŞEKKÜR ix
İÇİNDEKİLER xi
KISALTMALAR xiii
SİMGELER xv
TABLO LİSTESİ xvii
ŞEKİL LİSTESİ xix
ÖZET xxix
SUMMARY xxxi
1. GİRİŞ 1
1.1. Geçmişten Günümüze Kırılma Mekaniği 1
1.2. Kırılma Mekaniği 2
1.2.1. Kırılma Modları 2
1.2.2. Karışık mod yük altında gerilme şiddet faktörü elde etme yöntemleri 3
2. İÇİ BOŞ SİLİNDİRİK YAPILARDA ÜÇ BOYUTLU YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD ANALİZLERİ 7
2.1. Yüzey Çatlağı İçeren Yapılarda Karışık Mod Analizleri ile İlgili Bazı Literatür Çalışmaları 7
2.2. Problem Tanımı 8
2.3. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması 10
2.4. FCPAS ile Kırılma Analizleri 12
2.4.1. Literatürdeki gerilme şiddet faktörlerine yakınsama çalışmaları 16
2.4.2. Sonlu eleman ağ duyarlılık analizi 20
2.5. Eğilme Gerilmesine Maruz Silindirdeki Dönmüş Çatlak Analizleri 21
2.6. Problem Parametrelerinin Gerilme Şiddet Faktörlerine Etkileri 172
2.6.1. *Ri*/*Ro* parametresinin gerilme şiddet faktörlerine etkileri 172
2.6.2. *a*/*c* parametresinin gerilme şiddet faktörlerine etkileri 174
2.6.3. *a*/*t* parametresinin gerilme şiddet faktörlerine etkileri 176
3. KARIŞIK MOD GERİLME ŞİDDET FAKTÖRLERİ İÇİN EMPİRİK DENKLEM GELİŞTİRİLMESİ 179
3.1. Minitab Programı ve Empirik Denklem Çalışması 179
3.2. Serbest Yüzey Noktası ve Çatlak Ucu Derinlik Noktası İçin Denklem Geliştirme Çalışmaları 181
3.2.1. Mod- II serbest yüzey noktası (s=0.05) denklemleri 183
3.2.2. Mod- III serbest yüzey noktası (s=0.05) denklemleri 184
3.2.3. Mod-I çatlak ucu derinlik noktası (s=0.5) denklemleri 185
3.2.4. Mod-II çatlak ucu derinlik noktası (s=0.5) denklemleri 186
3.3. Empirik Denklem Doğrulama Çalışması 187
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 205
KAYNAKLAR 207
ÖZGEÇMİŞ 209

KISALTMALAR

APDL **:** Ansys Parametric Design Language

EPKM : Elastik plastik kırılma mekaniği

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
c	: Çatlak genişliği uzunluğu
D	: İçi dolu silindir çapı
H	: Silindir uzunluğu yarısı
K_r	: Normalizasyon için kullanılan GŞF sembolü
K	: Gerilme şiddet faktörü sembolü
K_1	: Mod-I gerilme şiddet faktörü
K_2	: Mod-II gerilme şiddet faktörü
K_3	: Mod-III gerilme şiddet faktörü
Q	: Eliptik çatlak için şekil faktörü
Ri	: Silindir iç yarıçapı
Ro	: Silindir dış yarıçapı
R^2 **(adj)**	: Düzeltilmiş R
s	: Boyutsuz çatlak ucu konumu
σ	: Eksenel gerilme
t	: Silindir et kalınlığı
θ	: Çatlak önü konumsal açısı
τ	: Kayma gerilmesi

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Problemi tanımlayan parametreler. 10
Tablo 2.2. I. S. Raju ve J. C. Newman çalışma sonuçları ile FCPAS çatlak ucu mod-I sonuçlarının kıyaslanması. 17
Tablo 2.3. I. S. Raju ve J. C. Newman çalışma sonuçları ile FCPAS serbest yüzey mod-I sonuçlarının kıyaslanması 17
Tablo 2.4. Çatlak ucuna temas eden eleman boyutları için eleman kenar boyutuna bağlı yakınsama çalışması. 21
Tablo 3.1. s=0.05 noktası için Mod-I denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$). 182
Tablo 3.2. s=0.05 noktası için Mod-I denklem katsayıları ($2 \geq a/c \geq 1$). 183
Tablo 3.3. s=0.05 noktası için Mod- II denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$). 183
Tablo 3.4. s=0.05 serbest yüzey noktası için Mod-II denklemi ($2 \geq a/c \geq 1$). 184
Tablo 3.5. s=0.05 noktası için Mod- III denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$). 184
Tablo 3.6. s=0.05 noktası için Mod-III denklem katsayıları ($2 \geq a/c \geq 1$). 185
Tablo 3.7. s=0.5 noktası için Mod-I denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$). 185
Tablo 3.8. s=0.5 noktası için Mod-I denklem katsayıları ($2 \geq a/c \geq 1$). 186
Tablo 3.9. s=0.5 noktası için Mod-II denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$). 186
Tablo 3.10. s=0.5 noktası için Mod-II denklem katsayıları ($2 \geq a/c \geq 1$). 187
Tablo 3.11. Ara değerler içeren doğrulama model parametreleri. 187
Tablo 3.12. Çatlak ucu serbest yüzey noktası K_1 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması. 188
Tablo 3.13. Çatlak ucu serbest yüzey noktası K_2 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması. 188
Tablo 3.14. Çatlak ucu serbest yüzey noktası K_3 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması. 189
Tablo 3.15. Çatlak ucu derinlik noktası K_1 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması. 189
Tablo 3.16. Çatlak ucu derinlik noktası K_2 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması. 190

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1.Yükleme durumuna bağlı çatlak deformasyon modları (a) Mod I (b) Mod II (c) Mod III 3
Şekil 1.2. Lineer elastik ve izotropik yapılı ve sonsuz büyüklükteki levhada 2*a* uzunluğundaki çatlak. 3
Şekil 1.3. Yapısında 2*a* uzunluğunda çatlak barındıran sonsuz bir levhaya eksenel ve kayma gerilmelerinin uygulanması durumu. 4
Şekil 1.4. Yapısında 2a uzunluğunda çatlak barındıran sonsuz bir levhaya eksenel ve kayma gerilmelerinin uygulanması durumu 5
Şekil 2.1. Eğilme yükü altında bulunan içi boş silindire yerleştirilen dönmüş yüzey çatlağı ve problemi tanımlayıcı parametreler. 9
Şekil 2.2. ANSYS APDL ile modellenmiş içi boş silindir ve yüzey çatlağı görünümü 11
Şekil 2.3. 20 düğüm noktası içeren ANSYS Solid-95 eleman. 11
Şekil 2.4. Yarım model içi boş silindirin sonlu eleman ağ yapısı. 12
Şekil 2.5. Yarım model içi boş silindire sınır şartlarının uygulanması. 12
Şekil 2.6. FCPAS v2.2 Ana ekranı 13
Şekil 2.7. Fracture Analysis Using ANSYSTM FE MODEL Arayüzey ana ekranı. 13
Şekil 2.8. FCPAS sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen kırılma analiz adımları. 14
Şekil 2.9. Zenginleştirilmiş elemanların ve geçiş elemanlarının görünümleri (a), yakınlaştırılmış görünümleri (b). 16
Şekil 2.10. *Ri*/*t*=1.1, *a*/*c*=1, *a*/*t*=0.2, *a*/*t*=0.5, *a*/*t*=0.8 için mod I karşılaştırması. 18
Şekil 2.11. *a*/*c*=1.5, *d*/*R*=0.25, *a*/*d*=0.5; dönme açısı 90°,75°,45° ve 15° için mod I karşılaştırması. 19
Şekil 2.12. *a*/*c*:1.5, *d*/*R*:0.25, *a*/*d*:0.5; dönme açısı 90°,75°,45° ve 15° için mod II karşılaştırması. 19
Şekil 2.13. *a*/*c*:1.5, *d*/*R*:0.25, *a*/*d*:0.5; dönme açısı 90°,75°,45° ve 15° için mod III karşılaştırması. 20
Şekil 2.14. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1 , *a*/*c*=0.25 , *a*/*t*=0.05. 22
Şekil 2.15. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.05. 22
Şekil 2.16. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.05. 23
Şekil 2.17. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.1. 23
Şekil 2.18. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.1. 24
Şekil 2.19. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.1. 24
Şekil 2.20. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.25. 25
Şekil 2.21. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.25. 25
Şekil 2.22. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.25. 26
Şekil 2.23. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.5. 26
Şekil 2.24. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.5. 27
Şekil 2.25. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.5. 27
Şekil 2.26. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri*/*Ro*=0.1, *a*/*c*=0.25, *a*/*t*=0.8. 28

Şekil 2.27. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8. 28
Şekil 2.28. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8. 29
Şekil 2.29. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05..... 29
Şekil 2.30. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05. 30
Şekil 2.31. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05. 30
Şekil 2.32. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1..... 31
Şekil 2.33. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 31
Şekil 2.34. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 32
Şekil 2.35. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25..... 32
Şekil 2.36. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25. 33
Şekil 2.37. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25. 33
Şekil 2.38. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5..... 34
Şekil 2.39. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 34
Şekil 2.40. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 35
Şekil 2.41. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8..... 35
Şekil 2.42. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 36
Şekil 2.43. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 36
Şekil 2.44. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.05..... 37
Şekil 2.45. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 37
Şekil 2.46. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 38
Şekil 2.47. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.1..... 38
Şekil 2.48. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 39
Şekil 2.49. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 39
Şekil 2.50. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.25..... 40
Şekil 2.51. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 40
Şekil 2.52. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 41
Şekil 2.53. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.5..... 41
Şekil 2.54. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.5. 42
Şekil 2.55. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.1, *a/t*=0.5. 42
Şekil 2.56. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.8..... 43
Şekil 2.57. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.8. 43
Şekil 2.58. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.8. 44
Şekil 2.59. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.05..... 44
Şekil 2.60. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 45
Şekil 2.61. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 45
Şekil 2.62. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.1..... 46
Şekil 2.63. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 46
Şekil 2.64. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 47
Şekil 2.65. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.25..... 47
Şekil 2.66. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 48
Şekil 2.67. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 48
Şekil 2.68. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.5..... 49
Şekil 2.69. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 49
Şekil 2.70. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 50
Şekil 2.71. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.8..... 50
Şekil 2.72. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 51
Şekil 2.73. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 51
Şekil 2.74. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05..... 52
Şekil 2.75. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05. 52
Şekil 2.76. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05. 53

Şekil 2.77. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1. 53
Şekil 2.78. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1..... 54
Şekil 2.79. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1..... 54
Şekil 2.80. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25. 55
Şekil 2.81. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25. 55
Şekil 2.82. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25..... 56
Şekil 2.83. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5. 56
Şekil 2.84. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5. 57
Şekil 2.85. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5..... 57
Şekil 2.86. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8. 58
Şekil 2.87. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8. 58
Şekil 2.88. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8..... 59
Şekil 2.89. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05. 59
Şekil 2.90. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05. 60
Şekil 2.91. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05..... 60
Şekil 2.92. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 61
Şekil 2.93. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 61
Şekil 2.94. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1..... 62
Şekil 2.95. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25. 62
Şekil 2.96. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25. 63
Şekil 2.97. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25..... 63
Şekil 2.98. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 64
Şekil 2.99. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 64
Şekil 2.100. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5..... 65
Şekil 2.101. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 65
Şekil 2.102. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 66
Şekil 2.103. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8..... 66
Şekil 2.104. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 67
Şekil 2.105. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 67
Şekil 2.106. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.05..... 68
Şekil 2.107. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 68
Şekil 2.108. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 69
Şekil 2.109. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.1..... 69
Şekil 2.110. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 70
Şekil 2.111. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 70
Şekil 2.112. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.25..... 71
Şekil 2.113. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.5. 71
Şekil 2.114. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.5. 72
Şekil 2.115. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.5..... 72
Şekil 2.116. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.8. 73
Şekil 2.117. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.8. 73
Şekil 2.118. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.8..... 74
Şekil 2.119. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 74
Şekil 2.120. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 75
Şekil 2.121. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.05..... 75
Şekil 2.122. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 76
Şekil 2.123. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 76
Şekil 2.124. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.1..... 77
Şekil 2.125. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 77
Şekil 2.126. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 78

Şekil 2.127. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 78
Şekil 2.128. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.5..... 79
Şekil 2.129. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 79
Şekil 2.130. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 80
Şekil 2.131. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.8..... 80
Şekil 2.132. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 81
Şekil 2.133. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 81
Şekil 2.134. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05..... 82
Şekil 2.135. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05. 82
Şekil 2.136. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05. 83
Şekil 2.137. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1..... 83
Şekil 2.138. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1. 84
Şekil 2.139. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1. 84
Şekil 2.140. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25..... 85
Şekil 2.141. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25. 85
Şekil 2.142. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25. 86
Şekil 2.143. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5..... 86
Şekil 2.144. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5. 87
Şekil 2.145. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5. 87
Şekil 2.146. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8..... 88
Şekil 2.147. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8. 88
Şekil 2.148. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8. 89
Şekil 2.149. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05..... 89
Şekil 2.150. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05. 90
Şekil 2.151. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05. 90
Şekil 2.152. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1..... 91
Şekil 2.153. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 91
Şekil 2.154. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 92
Şekil 2.155. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25..... 92
Şekil 2.156. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25. 93
Şekil 2.157. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25. 93
Şekil 2.158. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5..... 94
Şekil 2.159. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 94
Şekil 2.160. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 95
Şekil 2.161. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8..... 95
Şekil 2.162. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 96
Şekil 2.163. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 96
Şekil 2.164. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.05..... 97
Şekil 2.165. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 97
Şekil 2.166. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 98
Şekil 2.167. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.1..... 98
Şekil 2.168. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 99
Şekil 2.169. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 99
Şekil 2.170. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.25..... 100
Şekil 2.171. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 100
Şekil 2.172. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 101
Şekil 2.173. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.5..... 101
Şekil 2.174. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.5. 102
Şekil 2.175. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.5. 102
Şekil 2.176. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.8..... 103

Şekil 2.177. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.8. 103
Şekil 2.178. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.8..... 104
Şekil 2.179. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 104
Şekil 2.180. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 105
Şekil 2.181. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.05..... 105
Şekil 2.182. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 106
Şekil 2.183. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 106
Şekil 2.184. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.1..... 107
Şekil 2.185. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 107
Şekil 2.186. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 108
Şekil 2.187. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.25..... 108
Şekil 2.188. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 109
Şekil 2.189. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 109
Şekil 2.190. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.5..... 110
Şekil 2.191. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 110
Şekil 2.192. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 111
Şekil 2.193. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.8..... 111
Şekil 2.194. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05. 112
Şekil 2.195. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05. ... 112
Şekil 2.196. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05... 113
Şekil 2.197. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1. 113
Şekil 2.198. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1. 114
Şekil 2.199. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1..... 114
Şekil 2.200. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25. 115
Şekil 2.201. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25. ... 115
Şekil 2.202. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25... 116
Şekil 2.203. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5. 116
Şekil 2.204. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5. 117
Şekil 2.205. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5..... 117
Şekil 2.206. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8. 118
Şekil 2.207. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8. 118
Şekil 2.208. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8..... 119
Şekil 2.209. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05. 119
Şekil 2.210. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05. 120
Şekil 2.211. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05..... 120
Şekil 2.212. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 121
Şekil 2.213. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 121
Şekil 2.214. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1..... 122
Şekil 2.215. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25. 122
Şekil 2.216. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25. 123
Şekil 2.217. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25..... 123
Şekil 2.218. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 124
Şekil 2.219. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 124
Şekil 2.220. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5..... 125
Şekil 2.221. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 125
Şekil 2.222. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 126
Şekil 2.223. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.50, *a/t*=0.8..... 126
Şekil 2.224. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 127
Şekil 2.225. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 127
Şekil 2.226. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.05..... 128

Şekil 2.227. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.1..... 128
Şekil 2.228. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 129
Şekil 2.229. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 129
Şekil 2.230. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.25..... 130
Şekil 2.231. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 130
Şekil 2.232. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 131
Şekil 2.233. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.5..... 131
Şekil 2.234. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.5. 132
Şekil 2.235. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.5. 132
Şekil 2.236. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.8..... 133
Şekil 2.237. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.8. 133
Şekil 2.238. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.8. 134
Şekil 2.239. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.05..... 134
Şekil 2.240. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 135
Şekil 2.241. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 135
Şekil 2.242. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.1..... 136
Şekil 2.243. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 136
Şekil 2.244. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 137
Şekil 2.245. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.25..... 137
Şekil 2.246. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 138
Şekil 2.247. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 138
Şekil 2.248. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.5..... 139
Şekil 2.249. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 139
Şekil 2.250. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 140
Şekil 2.251. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.8..... 140
Şekil 2.252. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 141
Şekil 2.253. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 141
Şekil 2.254. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.... 142
Şekil 2.255. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05. . 142
Şekil 2.256. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05. 143
Şekil 2.257. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1..... 143
Şekil 2.258. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1. ... 144
Şekil 2.259. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1... 144
Şekil 2.260. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.... 145
Şekil 2.261. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25. . 145
Şekil 2.262. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25. 146
Şekil 2.263. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5..... 146
Şekil 2.264. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5. ... 147
Şekil 2.265. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5... 147
Şekil 2.266. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8..... 148
Şekil 2.267. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8. ... 148
Şekil 2.268. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8... 149
Şekil 2.269. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05..... 149
Şekil 2.270. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.50, *a/t*=0.05. . 150
Şekil 2.271. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05... 150
Şekil 2.272. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1..... 151
Şekil 2.273. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 151
Şekil 2.274. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1. 152
Şekil 2.275. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25..... 152
Şekil 2.276. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25. ... 153

Şekil 2.277. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25... 153
Şekil 2.278. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 154
Şekil 2.279. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5. 154
Şekil 2.280. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5..... 155
Şekil 2.281. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 155
Şekil 2.282. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8. 156
Şekil 2.283. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8..... 156
Şekil 2.284. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 157
Şekil 2.285. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.05. 157
Şekil 2.286. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.05..... 158
Şekil 2.287. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 158
Şekil 2.288. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.1. 159
Şekil 2.289. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.1..... 159
Şekil 2.290. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 160
Şekil 2.291. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.25. 160
Şekil 2.292. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.25..... 161
Şekil 2.293. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.5. 161
Şekil 2.294. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.5..... 162
Şekil 2.295. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.5..... 162
Şekil 2.296. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.8. 163
Şekil 2.297. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.8. 163
Şekil 2.298. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.8..... 164
Şekil 2.299. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 164
Şekil 2.300. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.05. 165
Şekil 2.301. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.05..... 165
Şekil 2.302. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 166
Şekil 2.303. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.1. 166
Şekil 2.304. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.1..... 167
Şekil 2.305. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 167
Şekil 2.306. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.25. 168
Şekil 2.307. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.25..... 168
Şekil 2.308. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 169
Şekil 2.309. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.5. 169
Şekil 2.310. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.5..... 170
Şekil 2.311. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 170
Şekil 2.312. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.8. 171
Şekil 2.313. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.8..... 171
Şekil 2.314. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 0.95 , *a/c*=1, *a/t*=0.25, *α*=45° 173
Şekil 2.315. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.25, *α*=45°. 173
Şekil 2.316. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 0.95 , *a/c*=1, *a/t*=0.25, *α*=45°. 174
Şekil 2.317. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *a/c*=0.25, 0.5, 1, 2; *a/t*=0.25, *Ri/Ro*=0.95, *α*=45°..... 175
Şekil 2.318. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *a/c*=0.25, 0.5, 1, 2; *a/t*=0.25, *Ri/Ro*=0.95, *α*=45°..... 175
Şekil 2.319. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *a/c*=0.25, 0.5, 1, 2; *a/t*=0.25, *Ri/Ro*=0.95, *α*=45°..... 176

Şekil 2.320. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; a/t=0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8; Ri/Ro=0.6, a/c=1, α=45°.....177
Şekil 2.321. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; a/t=0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8; Ri/Ro=0.6, a/c=1, α=45°.....177
Şekil 2.322. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; a/t=0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8; Ri/Ro=0.6, a/c=1, α=45°.....178
Şekil 3.1. Minitab Programı Regresyon analizi adımları.....180
Şekil 3.2. Çatlak ucu derinlik ve serbest yüzey noktaları. 181
Şekil 3.3. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.2, a/c=0.4, a/t=0.2, α=25°. 190
Şekil 3.4. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.2, a/c=0.4, a/t=0.2, α=55°. 191
Şekil 3.5. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.2, a/c=0.8, a/t=0.2, α=25°. 191
Şekil 3.6. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.2, a/c=0.8, a/t=0.2, α=40°. 192
Şekil 3.7. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.2, a/c=0.8, a/t=0.4, α=35°. 192
Şekil 3.8. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.2, a/c=0.8, a/t=0.4, α=50°. 193
Şekil 3.9. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.4, a/c=0.4, a/t=0.2, α=20°. 193
Şekil 3.10. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.4, a/c=0.4, a/t=0.2, α=40°. 194
Şekil 3.11. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.4, a/c=0.4, a/t=0.2, α=65°. 194
Şekil 3.12. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.4, a/c=0.4, a/t=0.4, α=25°. 195
Şekil 3.13. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.4, a/c=0.4, a/t=0.4, α=35°. 195
Şekil 3.14. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.4, a/c=0.8, a/t=0.6, α=35°. 196
Şekil 3.15. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.4, a/c=0.8, a/t=0.6, α=50°. 196
Şekil 3.16. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.4, a/c=1.25, a/t=0.2, α=25°. 197
Şekil 3.17. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.4, a/c=1.25, a/t=0.2, α=55°. 197
Şekil 3.18. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.8, a/c=0.4, a/t=0.6, α=10°. 198
Şekil 3.19. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.8, a/c=0.4, a/t=0.6, α=35°. 198
Şekil 3.20. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.8, a/c=0.4, a/t=0.6, α=65°. 199
Şekil 3.21. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.8, a/c=0.8, a/t=0.4, α=25°. 199
Şekil 3.22. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.8, a/c=0.8, a/t=0.4, α=55°. 200
Şekil 3.23. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; Ri/Ro=0.8, a/c=1.25, a/t=0.2, α=35°. 200

Şekil 3.24. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=1.25, *a/t*=0.2, α=55°. 201
Şekil 3.25. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=1.25, *a/t*=0.6, α=20°. 201
Şekil 3.26. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=1.25, *a/t*=0.6, α=40°. 202

EĞİLME MOMENTİNE MARUZ İÇİ BOŞ SİLİNDİRİK YAPILARDA DÖNMÜŞ DIŞ YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ

ÖZET

Tasarlanan mühendislik yapılarının ve makine parçalarının hasara uğraması sıklıkla karşılaşılan sorunlardan biridir. Karşılaşılan bu sorunlar çoğunlukla üretim yöntemine ve malzemenin iç yapısındaki kusurlara bağlı olarak ele almak mümkün olabilmektedir. Çoğunlukla malzemedeki bu kusurlar, yüzeyde veya iç yapıda meydana gelen mikro çatlaklar sonucu oluşabilmektedir. Bu mikro çatlaklar mühendislik yapılarının ve makine parçalarının üretim yöntemine bağlı olarak da meydana gelebilmektedir. Parçaların servis ömrü boyunca maruz kaldığı yükler altında, malzemenin iç yapısında veya yüzeyinde bulunan mikro çatlakların ilerlemesi sonucu kırılma hasarı meydana gelebilmektedir. Hasara uğramış yapıların incelenmesi sonucunda, nasıl hasara uğradığı çoğunlukla tespit edilebilmektedir. Bu tespite göre hasara uğramış parça bölgesel olarak; içinde veya yüzeyinde çatlak barındıran levha, içi boş silindir ve dolu silindir gibi daha küçük geometrik modellere indirgenebilmektedir. Elde edilen bu geometrik modeller için, kırılma mekaniği yöntemleri kullanılarak gerilme şiddet faktörleri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmaların sonucunda meydana gelebilecek hasarları en aza indirgemek mümkün olabilmektedir.

Malzemelerin yükleme durumuna bağlı olarak çatlakların üç farklı kırılma modu vardır. Karışık modlu gerilme şiddet faktörleri ; Mod-I (açılma modu), Mod-II (düzlem içi kayma modu), Mod-III (düzlem dışı kayma modu) olarak ifade edilmektedir. Karışık mod gerilme şiddet faktörlerinin elde edilme yöntemlerinden biri de zenginleştirilmiş sonlu elemanlar yöntemidir.

Bu tez çalışması kapsamında, eğilme momentine maruz içi boş silindirik yapılarda dönmüş dış yüzey çatlaklarının karışık modlu gerilme şiddet faktörlerinin problem parametrelerine olan etkisi incelenmiştir. Problemi tanımlayan parametreler şunlardır; çatlak şekil oranı (a/c), çatlak derinliği/silindir et kalınlığı (a/t), silindir iç yarıçapı/silindir dış yarıçapı (Ri/Ro), çatlak dönme açısı (α)'. ANSYS APDL'de problem parametreleri ile modeller oluşturulmuştur. Bu modellere eğilme yükü ve sınır şartları uygulanarak FCPAS programında kullanılmak üzere çıktılar elde edilmiştir. FCPAS'den elde edilen sonuçlar, normalize edilerek gerilme şiddet faktörleri elde edilmiştir. Bu elde edilen gerilme şiddet faktörleri her bir parametre için karşılaştırmalı olarak grafik halinde sunulmuştur. Gerilme şiddet faktörleri ve problem parametrelerine bağlı olarak; serbest yüzey noktası ve çatlak ucu derinlik noktası için empirik denklemler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu empirik denklemler, ara değer parametre analizlerinin sonuçları ile doğrulanarak uyum içinde olduğu sonucuna varılmıştır.

xxx

MIXED MODE FRACTURE ANALYSES OF DEFLECTED EXTERNAL SURFACE CRACKS IN HOLLOW CYLINDRICAL STRUCTURES UNDER BENDING MOMENT

SUMMARY

When the designed engineering structures and machine parts are exposed to loads above a certain critical load value, damages may occur as a result of high deformation and collapse. These problems are mostly due to the production method and the defects in the internal structure of the material. Mostly, these defects in the material can occur as a result of microcracks on the surface or in the internal structure. These micro cracks can also occur depending on the production method of engineering structures and machine parts. If the parts are exposed to lower and repetitive loads throughout their service life, fracture damage may occur after a certain time or suddenly as a result of the progression of micro cracks in the internal structure or surface of the material. Therefore, the formation and propagation of cracks in structural parts should be prevented. The part must be replaced or repaired before the crack length reaches a critical value.

In the process of examining the damaged structures, it can often be determined how they were damaged. According to this determination, the damaged piece can regionally be reduced to crack problems in more basic and smaller geometries such as plate with internal of surface cracks or solid or hollow cylinders containing surface cracks. These geometric models can be analyzed under various loads and the corresponding stress intensity factors can be calculated.

In a structural part under stress, the magnitude of the stresses occurring in the tip region of the crack, which tend to go to infinity mathematically, in other words, rapidly approaching infinity towards the crack tip, is determined by the parameter called the stress intensity factor. It is denoted by the symbol *K*. When the *K* value exceeds a critical *Kc* value, which is a material characteristic, the crack grows suddenly and fracture occurs. This critical value is called fracture toughness and is expressed with the symbol *Kc*. Cracks have three different fracture modes depending on the loading condition of the materials. Mixed-mode stress intensity factors have three components, which are mode-I (opening mode), mode-II (in-plane shear mode), mode-III (out- of-plane shear mode).

Within the scope of this thesis, the effects of different parameters on mixed-mode stress intensity factors of deflected outer surface cracks in hollow cylindrical structures subjected to bending moment were investigated. Parameters defining the problem are; crack shape ratio (a/c), crack depth/cylinder wall thickness (a/t), cylinder inner radius/cylinder outer radius (Ri/Ro), crack rotation angle (α). In all models created depending on the problem parameters in ANSYS APDL, a=1 was chosen as unit crack length. The height parameter of the cylinder ($2H$) was determined as 6 times the outer radius in all models. After these limitations are determined, the (a/c) ratios are 0.25, 0.5, 1, 2, respectively; (a/t) ratios are 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8, respectively; The (α) angle values considered are 0°, 15°, 30°, 45°,

60°, 75°, respectively, and finite element models corresponding to all combinations of these values have been created. In the meshing process, 20-noded quadratic hexahedron solid elements were used in the crack tunnel volumes, and the use of prismatic elements was not allowed. For the remaining volumes, tetrahedron elements were used. Due to the existing symmetry in the problem, half models were obtained by dividing the cylinder volume into two equal parts along the height in order to make the mesh partition thinner by dividing the crack region into smaller elements in the models and to shorten the solution time. By applying bending load and symmetry displacement boundary conditions to this half model, the finite element mesh structure has been created, and outputs to be used in the FCPAS program have been obtained.

The FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System) program calculates the stress intensity factors using the enriched finite element method. Elements adjacent to the crack tip and located along the crack front line are called the enriched elements. Elements adjacent to the enriched elements are the transition elements. Transition elements were formed by reducing the enriched element formulation from one to zero along the element thickness from the sides of enriched elements to the sides of regular elements. This yields a transition zone between enriched elements and normal elements. The fluctuations in the crack tip stress intensity factors are reduced by the transition elements and the calculation of the stress intensity factors can be made more accurate.

The obtained fracture analysis results from FCPAS in terms of mode-I, mode-II and mode-III stress intensity factors were normalized. These obtained mixed-mode stress intensity factors are presented in graphs for each parameter comparatively. According to these results, it was observed that the maximum mode-I stress intensity factor occurred at 0°, and the mode-I stress intensity factor decreased with increasing α angle value. Since in-plane and out-of-plane shear stresses do not occur at 0°, mode-II and mode-III stress intensity factors do not occur. It has been observed that the maximum absolute values of mod-II and mod-III stress intensity factors occur at inclination angle of 45°. It was observed that the absolute values of mode-II and mode-III stress intensity factors decreased at 60°, 30°, 75° and 15° angle values, respectively. As the *Ri*/*Ro* ratio increased, the mode-I stress intensity factor value increased; It was concluded that the mode-I stress intensity factor value decreased with the increase of *a*/*c* and *a*/*t* ratios.

Due to the large number of problem parameter variables, it is not possible to develop a single empirical equation that provides all the results. For this reason, a total of four equations are developed for mode-I and mode-II normalized SIFs (mode-III SIF is zero at the depth point) for the crack tip depth points, for two different ranges of $0.25 \leq a/c \leq 1$ and $2 \geq a/c \geq 1.10$. Similarly, for the same two ranges of *a*/*c*, a total of six empirical equations are developed for mode-I, mode-II and mode-III SIFs of the free surface point. These empirical equations were compared with the analysis results of the models containing 24 randomly selected intermediate values of the problem's parameters and validation studies were carried out.

It was observed that the difference between the crack tip depth point values and the empirical equation results for mode-I and mode-II remained below 10%. For mode-I, mode-II and mode-III SIFs at the free surface, it was observed that the difference between the values obtained from finite element analyses and those from the empirical equations remained below 15%, except for a few cases. Therefore, it was

concluded that the values of the models and those from the empirical equations for both crack front points were in good agreement with each other.

1. GİRİŞ

1.1. Geçmişten Günümüze Kırılma Mekaniği

Geçmişten günümüze tasarlanan yapılarda genellikle deformasyonlar ve kırılmalar ile karşılaşılmıştır. Bu hasarlar çoğunlukla malzemelerin iç yapısındaki kusurlar veya bu malzemelerin üretim yöntemine ve ortam şartlarına bağlı olarak oluşan iç ve yüzey gerilmeleri sonucu meydana gelebilmektedir.

Günümüzde kullanılan malzemelerin iç yapısında mikroskobik boyutta dahi olsa çatlak bulunduğu bilinmektedir [1]. Bu çatlaklar malzemenin maruz kaldığı yükleme, sıcaklık değişimi gibi etkenler sonucu birleşerek gözle görünür bir hasar oluşturmaktadır. Gözle görünür bir hasar oluştuktan hemen sonra veya belli bir çevrim sonrası malzeme kırılmaktadır. Bu süreci en başından sonuna kadar inceleyen bilim dalı kırılma mekaniğidir. Kırılma mekaniği, lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ve elastik-plastik kırılma mekaniği (EPKM) olmak üzere iki ana bölümde incelenmektedir.

Kırılma mekaniğinin tarihsel gelişimine bakıldığında, ilk 1920 yılında Griffith'in yapmış olduğu çalışma [2] bu bilimin yapı taşlarını oluşturmaktadır. Bu çalışmasında Griffith cam numunelerde oluşan çatlakları incelemiştir. Teorik olarak hesaplanan kopma dayanımı ile deneysel olarak bulduğu kopma dayanımı arasında büyük bir fark olmasına malzeme içinde bulunan kılcal çatlakların neden olduğunu bulmuştur. Bu kılcal çatlakların büyümesi durumunda ortaya çıkan serbest elastik enerjinin yeni çatlak yüzeyi oluşturmak için gereken enerjiye eşit veya daha büyük olması durumunda çatlağın ilerleyeceğini savunmuştur. Ortaya çıkan bu serbest elastik enerji aynı zamanda kalıcı şekil değişimi için de harcanmaktadır. Bu enerji yaklaşımı kalıcı şekil değişimleri farklılık gösteren malzemelerde doğrudan uygulanamamaktadır.1950'li yıllarda Irwin, G5riffith'in yapmış olduğu çalışmalardan yola çıkarak metalik malzemeler için kırılma esaslarını geliştirerek Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) gelişmesine öncülük etmiştir [2]. J.R. Rice çalışmalarında doğrusal olmayan kırılma problemleri çalışmıştır. 1968 yılında

çalışmalarının sonucun da çözüm geliştirerek (J-İntegrali) kırılma mekaniği çalışma alanını ileri seviyeye taşımıştır [2].

İlerleyen yıllarda kırılma mekaniğindeki çalışmalar da hız kazanmıştır. Bu alandaki çalışmalar petrol endüstrisinin gelişmesine ve nükleer santral çalışmalarının hız kazanmasını sağlamıştır [1].

Günümüzde bu çalışmalar gelişen teknolojiyle birlikte, özel geliştirilmiş paket programlar ve laboratuvarlar sayesinde ileri düzey sayısal ve deneysel yöntemler yardımıyla daha kapsamlı ele alınmaktadır.

1.2. Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniğinin alt bilim dallarından birisi Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM)'dir. Lineer elastik kırılma durumları için yapısında boşluk ya da çatlak bulunan bir yapıda yüksek gerilmeler çatlağın ucunda ve çevresinde oluşmaktadır.

Gerilme altındaki yapıda çatlağın uç bölgesinde oluşan gerilmelerin matematiksel olarak sonsuza gitme eğilimindeki büyüklüğü, bir başka deyişle çatlak ucuna doğru hızlı bir şekilde sonsuza yaklaştığını, gerilme şiddet faktörü adı verilen parametre belirlemektedir. *K* sembolü ile ifade edilir. *K* değeri, malzeme özelliği olan kritik bir *Kc* değerini aştığında ise çatlak ani şekilde büyüyerek kırılma meydana gelmektedir. Bu kritik değere ise kırılma tokluğu denir ve *Kc* sembolü ile ifade edilmektedir. LEKM'nin en temel problemlerden biri olan eksenel gerilme altındaki ve sonsuz genişlikteki bir levhayı ele alalım. Bu levhanın üstünde bulunan yüzey çatlağı için GŞF $K=\sigma\sqrt{\pi a}$ olarak ifade edilmektedir. Burada '$2a$' çatlağın uzunluğunu ifade etmektedir.

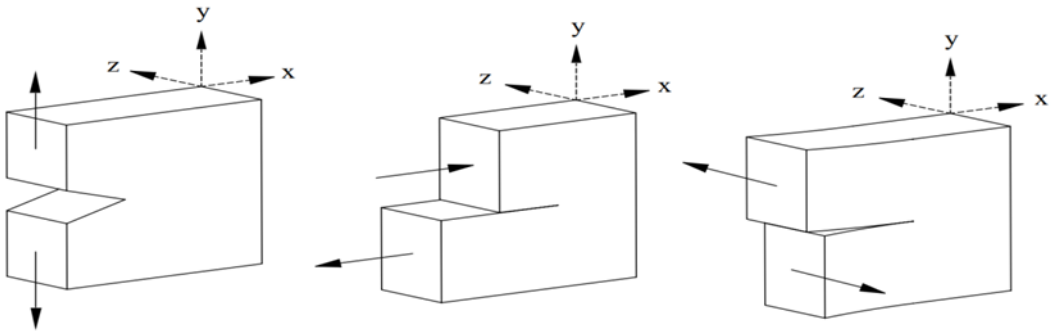
1.2.1. Kırılma Modları

Malzemelerin yükleme durumuna bağlı olarak çatlakların üç farklı kırılma modu vardır. Şekil 1.1.'de bu modlar gösterilmiştir.

Mod I – Açma veya Çekme Modu (Açılma Modu)

Mod II – Kesme veya Kayma Modu (Düzlem İçi Kayma Modu)

Mod III– Yırtma Modu (Düzlem Dışı Kayma Modu)

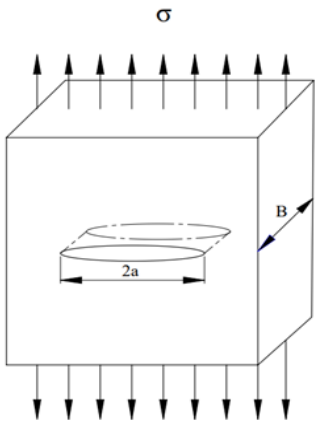


(a) (b) (c)

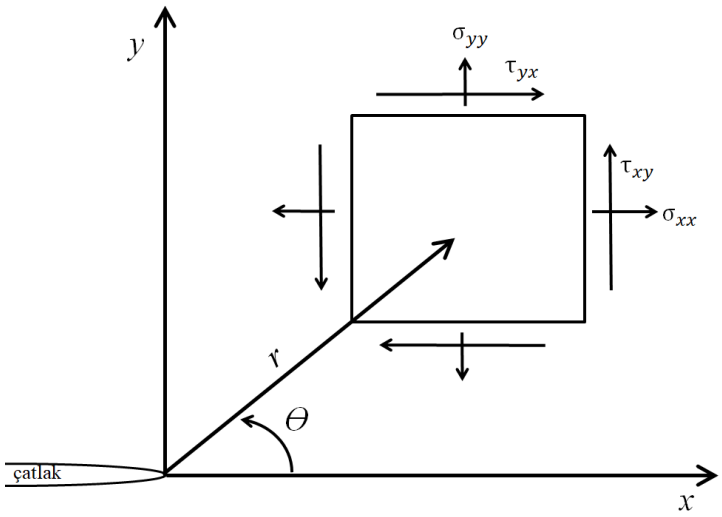
Şekil 1.1.Yükleme durumuna bağlı çatlak deformasyon modları (a) Mod I (b) Mod II (c) Mod III

1.2.2. Karışık mod yük altında gerilme şiddet faktörü elde etme yöntemleri

Gerilmeye maruz kalmış lineer elastik, izotropik yapılı, sonsuz büyüklükteki levhada 2*a* uzunluğundaki bir çatlak Şekil 1.2.'de gösterilmiştir. Bu levha eksenel gerilmeye ve kayma gerilmesine maruz bırakıldığında çatlak ucu bölgesindeki analitik gerilmeler ve yer değiştirmeler hesaplanabilmektedir[3]. Aşağıdaki denklemlerde ifade edilen K_1 , K_2 , K_3 gerilme şiddet faktörlerini, σ eksenel gerilmeyi, τ kayma gerilmesini, r çatlak ucundan ölçülen radyal mesafeyi ve θ ise yatay eksenle yapılan açıyı ifade etmektedir.



Şekil 1.2. Lineer elastik ve izotropik yapılı ve sonsuz büyüklükteki levhada 2*a* uzunluğundaki çatlak [3] .



Şekil 1.3. Yapısında $2a$ uzunluğunda çatlak barındıran sonsuz bir levhaya eksenel ve kayma gerilmelerinin uygulanması durumu [3].

Denklem 1.1-1.3, Mod I için gerilme dağılımlarını göstermektedir[3].

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

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

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

Denklem 1.4-1.6, Mod II için gerilme dağılımlarını göstermektedir [3].

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

$$\tau_{xy} = \frac{KII}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1 - sin\left(\frac{\theta}{2}\right) sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (1.5)$$

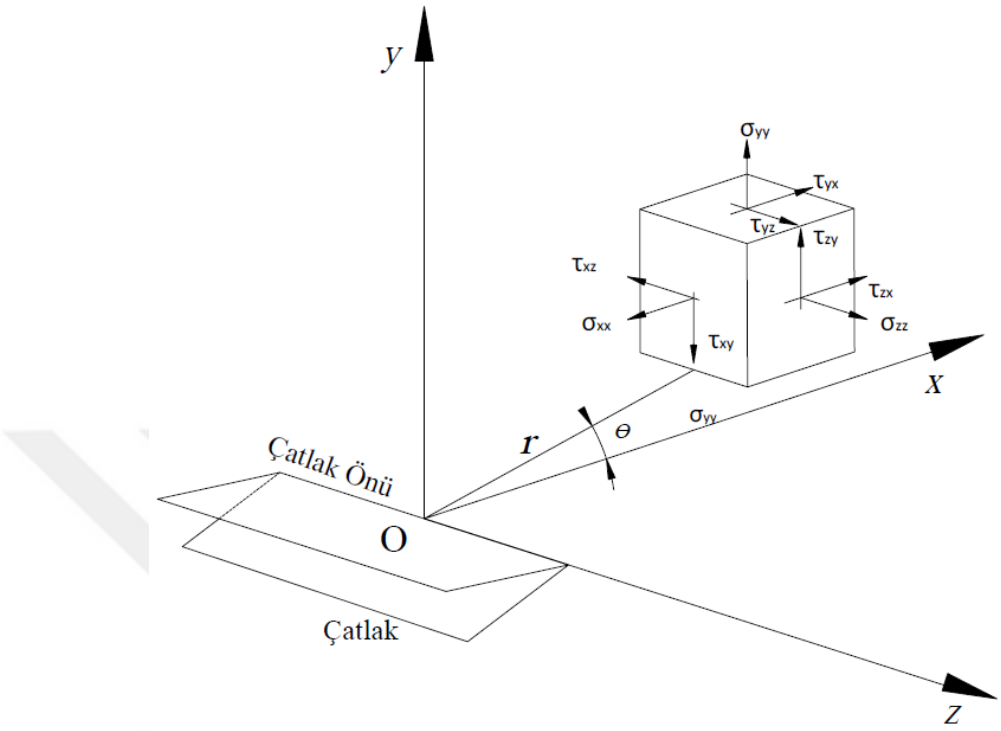
$$\sigma_{yy} = \frac{KII}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) cos\left(\frac{\theta}{2}\right) cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (1.6)$$

Denklem 1.7-1.8, Mod III için gerilme dağılımlarını göstermektedir [3].

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

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

Bu tez çalışmasında yapılan analizler üç boyutlu kırılma analizleridir. Şekil 1.4'de verilen üç boyutlu bir çatlak ucundaki noktanın gerilme şiddet faktörü dağılımları denklem 1.1-1.8'deki ifadelerin süperpozisyon yöntemi ile hesaplanabilmektedir.



Şekil 1.4. Yapısında 2*a* uzunluğunda çatlak barındıran sonsuz bir levhaya eksenel ve kayma gerilmelerinin uygulanması durumu[4].

2. İÇİ BOŞ SİLİNDİRİK YAPILARDA ÜÇ BOYUTLU YÜZEY ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD ANALİZLERİ

2.1. Yüzey Çatlağı İçeren Yapılarda Karışık Mod Analizleri ile İlgili Bazı Literatür Çalışmaları

I. S. Raju ve J. C. Newman çalışmalarında çekme ve eğilme gerilmesine maruz ve yüzey çatlağı içeren içi dolu ve içi boş silindirik yapıların GŞF'lerini incelemişlerdir [5]. İçi boş silindirik yapılarda farklı *a*/*c* (çatlak derinlik uzunluğu/ çatlak genişlik uzunluğu) oranlarında çatlak barındıran yapılar için çeşitli *a*/*t* (çatlak derinlik uzunluğu / silindir cidar kalınlığı) ve *R*/*t* (Silindir iç yarıçapı/ silindirin cidar kalınlığı) parametrelerine bağlı olarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Problem parametrelerinin normalize edilmiş gerilme şiddet faktörlerine olan etkilerini kıyaslamışlardır.

M.A. Barrinaya ve ark. çalışmalarında burulma momentine maruz, sonlu elemanlar metodu ve çift sınır eleman metodu (DBEM, (Dual Boundary element Method)) kullanarak eğik yüzey çatlağı barındıran bir silindirik yapıda *a*/*c*, *a*/*D* parametrelerine bağlı analizler gerçekleştirmişlerdir [6]. Modellerindeki çatlak yüzeyi ve etrafındaki ağ bölüntülemelerinde tetrahedral ve hexahedral elemanlar kullanarak normalize edilmiş gerilme şiddet faktörlerini kıyaslamışlardır.

G. Fu, W. Yang ve C. Q. Li çekme ve eğilme gerilmesine maruz ve eğik çatlak barındıran içi boş silindirik yapılarda *a*/*c*, *a*/*t* ve *t*/*R* (silindir et kalınlığı/silindir dış yarıçapı) parametrelerine bağlı olarak analizler gerçekleştirmişlerdir[7]. Bu analizlerde 15°'den 90°'e doğru artan eğim açısına bağlı olarak çatlak derinliği (*a*) ve çatlak genişliğinin artmasıyla normalize ettikleri mutlak mod-I, mod-II, mod-III değerlerinde artış gözlemlemişlerdir.

M. K. Ramezani ve ark. çalışmalarında burulma momentine maruz ve eğik çatlak barındıran dolu silindirik yapılarda *a*/*c* , *a*/*D* (çatlak derinlik uzunluğu/ dolu silindir çapı) parametrelerine bağlı empirik denklem sonuçlarını analitik çözümler ile kıyaslamışlardır [8].

O. M. Fakhri ve ark. çalışmalarında eğilme gerilmesine maruz ve iç yüzey çatlağı ve dış yüzey çatlağı barındıran içi boş silindirik yapılarda a/c, a/t ve t/R (silindir et kalınlığı/silindir dış yarıçapı) parametrelerine bağlı olarak mod-I gerilme şiddet faktörleri için analizler gerçekleştirmişlerdir[9]. İç basınç altında ve çekme gerilmesine maruz yapıda iç yüzeyde ve dış yüzeyde bulunan eliptik çatlakların GŞF'lerini kıyaslamışlardır.

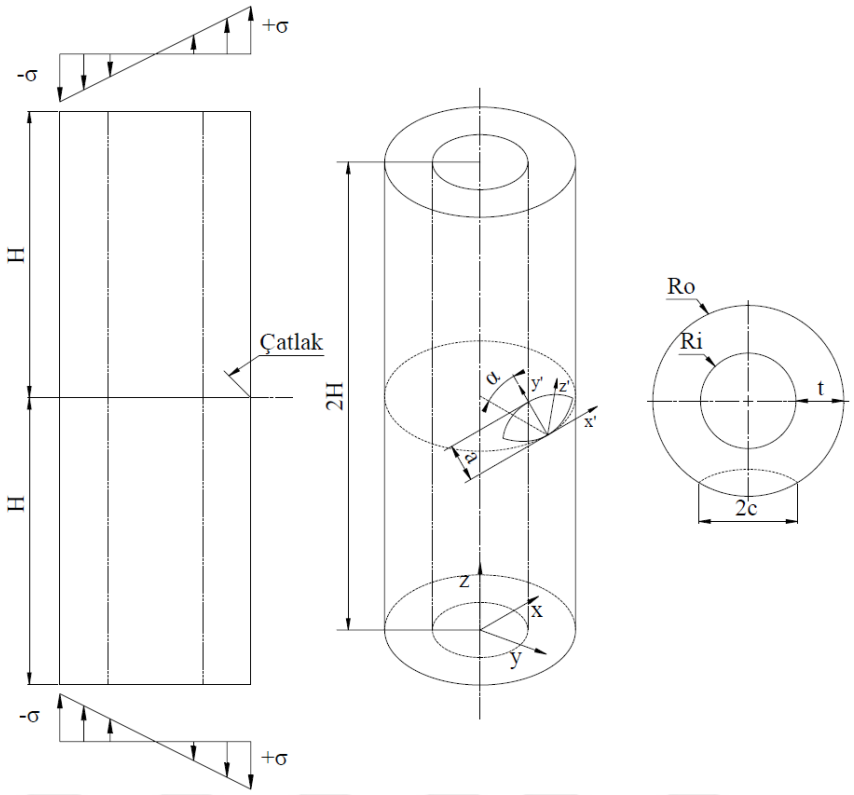
2.2. Problem Tanımı

Mühendislik yapılarında hasarlar, çoğunlukla üretim aşamasında veya üretim tamamlandıktan sonra yapısal elaman veya parçanın servis ömrü sürecinde meydana gelmektedir. Yapısal parçalar, geometrik boyutları ve kullanılan malzemeye bağlı olarak, belirli kritik yük değerinin üzerinde yüklere maruz kaldığı zaman yüksek deformasyon ve çökmeler sonucu hasara uğrayabilmektedirler. Daha düşük ve tekrarlı yük seviyelerinde de başlangıç çatlakları da oluşabilmektedir. Çatlak oluştuktan sonra ani olarak yapı kırılabilmekte ya da bu çatlak ilerleyerek kırılma belli bir zaman sonra gerçekleşebilmektedir. Dolayısıyla, yapısal parçalarda çatlak oluşumu ve ilerlemesi engellenmelidir veya çatlak uzunluğu kritik değere ulaşmadan parça yenilenmeli veya tamir edilmelidir. Bu süreç içerisinde, çeşitli modeller geliştirilip, değişik geometrik boyutlar ve yönlenme açılarındaki çatlaklar ilgili yükler altında analiz edilerek gerilme şiddet faktörleri hesaplanabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, eğilme gerilmesine maruz içi boş bir silindirin dış yüzeyinde bulunan dönmüş yüzey çatlakları için, probleme etki eden bütün geometrik parametreler göz önüne alınarak FCPAS ile yapılan kırılma analizlerinden elde edilen karışık mod gerilme şiddet faktörleri (GŞF) grafikler halinde sunulmuştur. İçi boş silindirik yapılarda yüzey çatlağı parametreleri sırasıyla çatlak derinliği a, çatlak yüzey uzunluğu $2c$ ve dönmüş yüzey çatlağının yatay eksenle yaptığı açı α olarak belirlenmiştir. Çatlak ucu bölgesindeki GŞF'lere etki eden parametreler sırasıyla; silindir et kalınlığı t (dış yarıçap-iç yarıçap, Ri-Ro=t), çatlak şekil oranı a/c, çatlak derinliği/silindir et kalınlığı a/t, çatlağın yatay eksen ile yaptığı açı α'dır. Çatlak önünü matematiksel olarak tanımlayan denklem 2.1'de ifade edilmiştir.

$$\left(\frac{x'}{c}\right)^2 + \left(\frac{y'}{a}\right)^2 = 1 \qquad (2.1)$$

Problemin örnek modeli Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Eğilme yükü altında bulunan içi boş silindire yerleştirilen dönmüş dış yüzey çatlağı ve problemi tanımlayıcı parametreler.

Problemi tanımlayan parametreler Tablo 2.1.'de gösterilmiştir. Analizi yapılan bütün modellerde a=1 birim olarak seçilmiştir. Silindirin yükseklik parametresi ($2H$) bütün analizlerde büyük yarıçapın 6 katı olarak belirlenmiştir. Bu sınırlandırmalar belirlendikten sonra (a/c) oranları sırasıyla 0.25, 0.5, 1, 2; (a/t) oranları sırasıyla 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8 değerleri ile ele alınmış ve bu değerlerin oluşturduğu tüm kombinasyon durumlarına karşılık gelen sonlu eleman modelleri oluşturularak FCPAS ile kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çatlağın yatay eksen ile yaptığı açının 0° olması durumda GŞF'nin düzlem içi kayma modu ve düzlem dışı kayma modunun sıfır olması nedeniyle sadece açılma modu (Mod-I) GŞF meydana gelmektedir. Fakat çatlağın yatay düzlemle oluşturduğu açının sıfırdan farklı olması durumunda çatlak önü boyunca düzlem içi kayma modu (Mod-II) ve düzlem dışı kayma modu (Mod-III) gerçekleşmektedir. Bu çatlağın yatay eksenle yapmış olduğu α açısı 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° olarak çalışılmış olup, yukarıda belirtilen tüm kombinasyonlar dahilinde silindir üzerine yerleştirilen bütün dönmüş yüzey çatlakları için 600 adet analiz gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.1. Problemi tanımlayan parametreler.

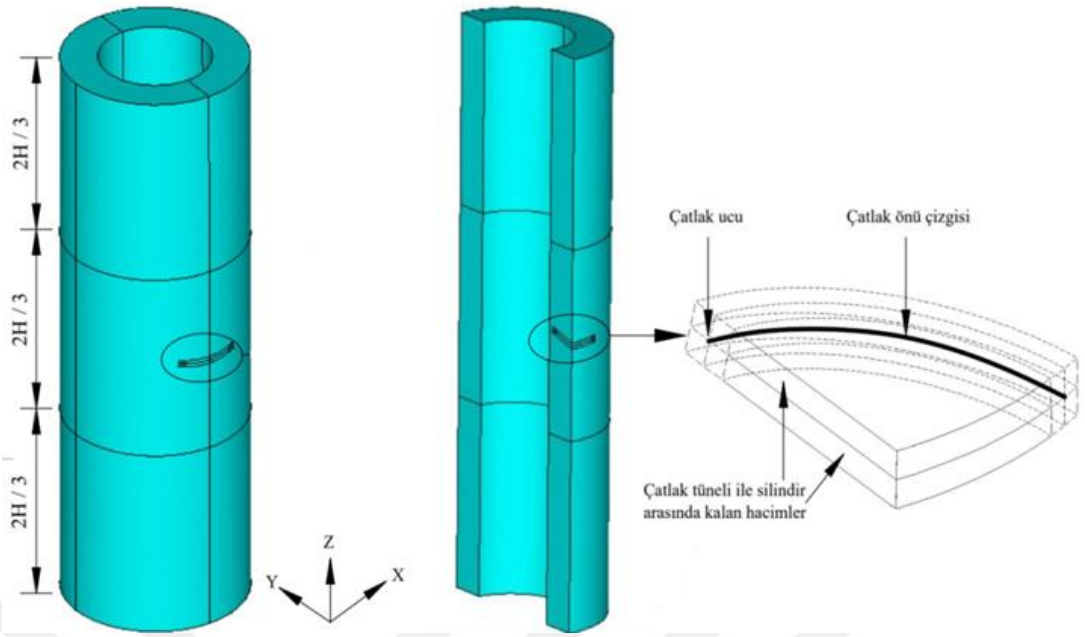
Ri / Ro	*a/c*	*a/t*	*α*	*t*	*2H*
0,1	0,25	0,05	0	*Ro -Ri*	6**Ro*
0,3	0,5	0,1	15		
0,6	1	0,25	30		
0,9	2	0,5	45		
0,95		0,8	60		
			75		

2.3. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar yöntemi, farklı mühendislik disiplinlerindeki karmaşık problemlerin sayısal çözümü için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, çoğunlukla katı cisimler mekaniği, ısı transferi, akışkanlar mekaniği, elektromanyetizma problemlerine çözüm elde etmek için kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemini daha kullanışlı hale getirmek için çeşitli programlar geliştirilmiştir. Bu programlardan bir tanesi de ANSYS Mechanical APDL'dir [10].

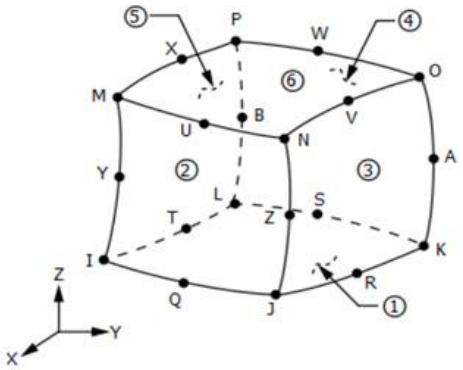
İlk olarak APDL'de Tablo 2.1.'deki problemi tanımlayan parametreler kullanılarak eğilme gerilmesine maruz içi boş silindirik yapıda bulunan dönmüş yüzey çatlağı modelin dış yüzeyine yerleştirilerek modellenmiştir. Modellemede kullanılan işlem adımları için dinamik değişkenlere bağlı bir makro elde edilmiştir. Bu makroya, problemi tanımlayan parametreler ayrı ayrı uygulanarak modeller elde edilmiştir.

Şekil 2.2.'de içi boş silindirde bulunan 30° dönmüş yüzey çatlağı bulunan bir model gösterilmektedir. Modellerde çatlak bölgesini daha küçük elemanlara bölerek ağ bölüntülemesi daha ince yapmak ve çözüm zamanını kısaltmak amacıyla silindir hacmi yükseklik boyunca iki eşit parçaya bölünmüş ve kesilen yüzeylerinden yarım model üzerinde simetri yer değiştirme sınır şartları uygulanmıştır.

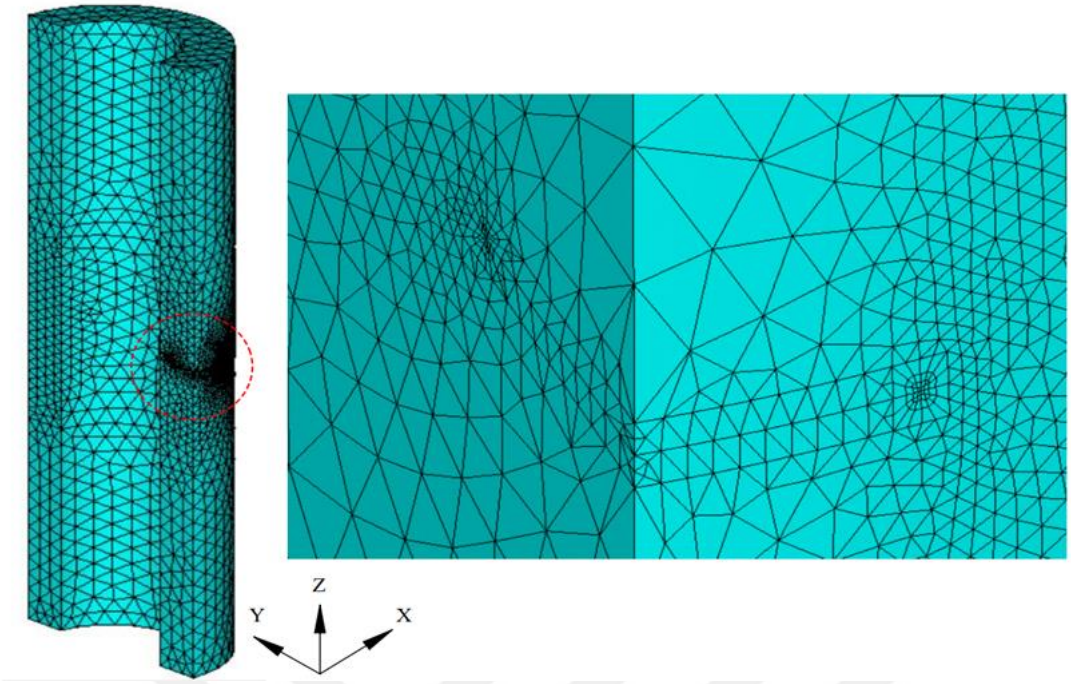


Şekil 2.2. ANSYS APDL ile modellenmiş içi boş silindir ve yüzey çatlağı görünümü.

Bölüntüleme işleminde çatlak tüneli hacimlerinde Şekil 2.3.'te gösterilen 20 düğüm noktalı 2.dereceden altı yüzlü (hexahedron) solid elemanlar kullanılmış olup prizmatik eleman kullanımına izin verilmemiştir. Geriye kalan diğer hacimler için altı yüzlü elemanların indirgenmesi sonucu oluşan dört yüzlü (tetrahedron) elemanlar kullanılmış olup, sonlu eleman ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 2.4.'te örnek bir model gösterilmiştir.

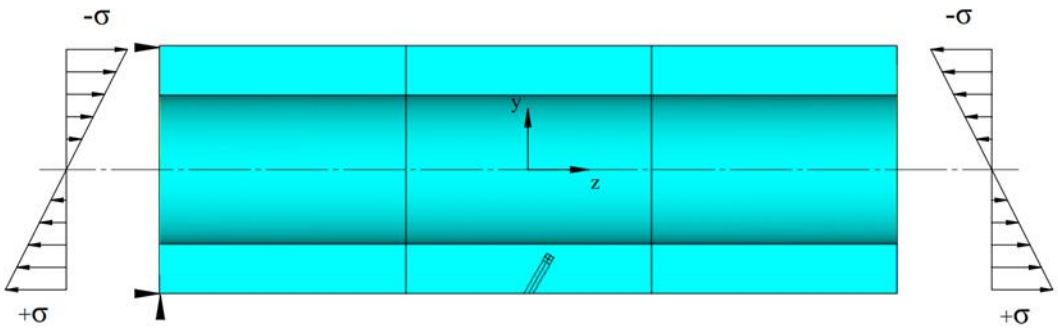


Şekil 2.3. 20 düğüm noktası içeren ANSYS Solid-95 eleman [10].



Şekil 2.4. Yarım model içi boş silindirin sonlu eleman ağ yapısı.

İçi boş silindir modele alt ve üst yüzeylerinden 1 birim maksimum eğilme gerilmesi uygulanmıştır. Modelin taban yüzeyindeki noktalardan biri z ve y ekseninde diğeri ise z ekseninde sabitlenmiştir. Modelin simetri yüzeyleri ise x ekseni doğrultusunda sabitlenmiş olup modellemenin bitmiş hali Şekil 2.5.'te gösterilmiştir.

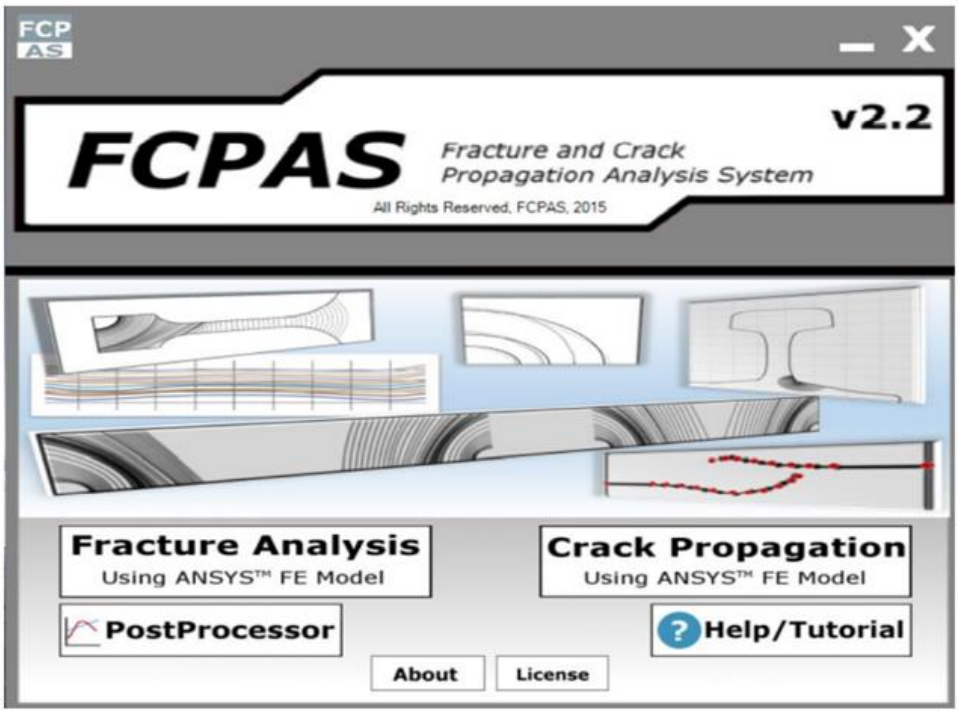


Şekil 2.5. Yarım model içi boş silindire sınır şartlarının uygulanması.

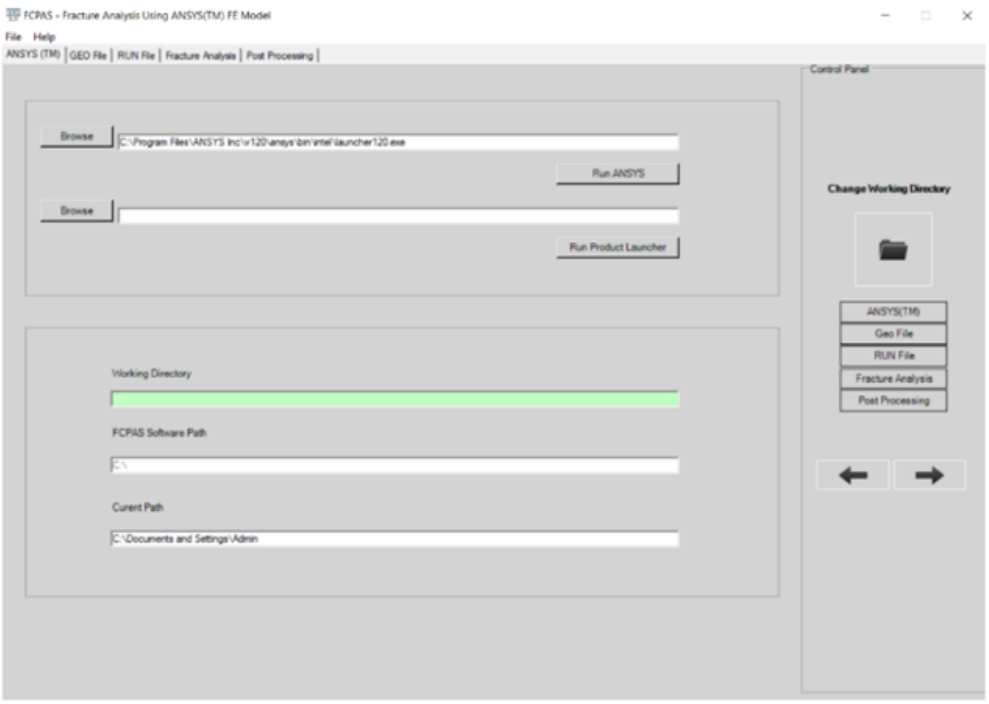
2.4. FCPAS ile Kırılma Analizleri

FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System – Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi) yazılımı [11], üç boyutlu modellerde kırılma ve çatlak ilerleme analizlerini gerçekleştirebilmek için yazılmış bir sonlu elemanlar programıdır. Program açılış ekranı ve kırılma analizlerinin yapılarak gerilme şiddet

faktörülerinin hesaplandığı ara yüzey ekranı, sırasıyla, Şekil 2.6. ve Şekil 2.7.'de gösterilmiştir.

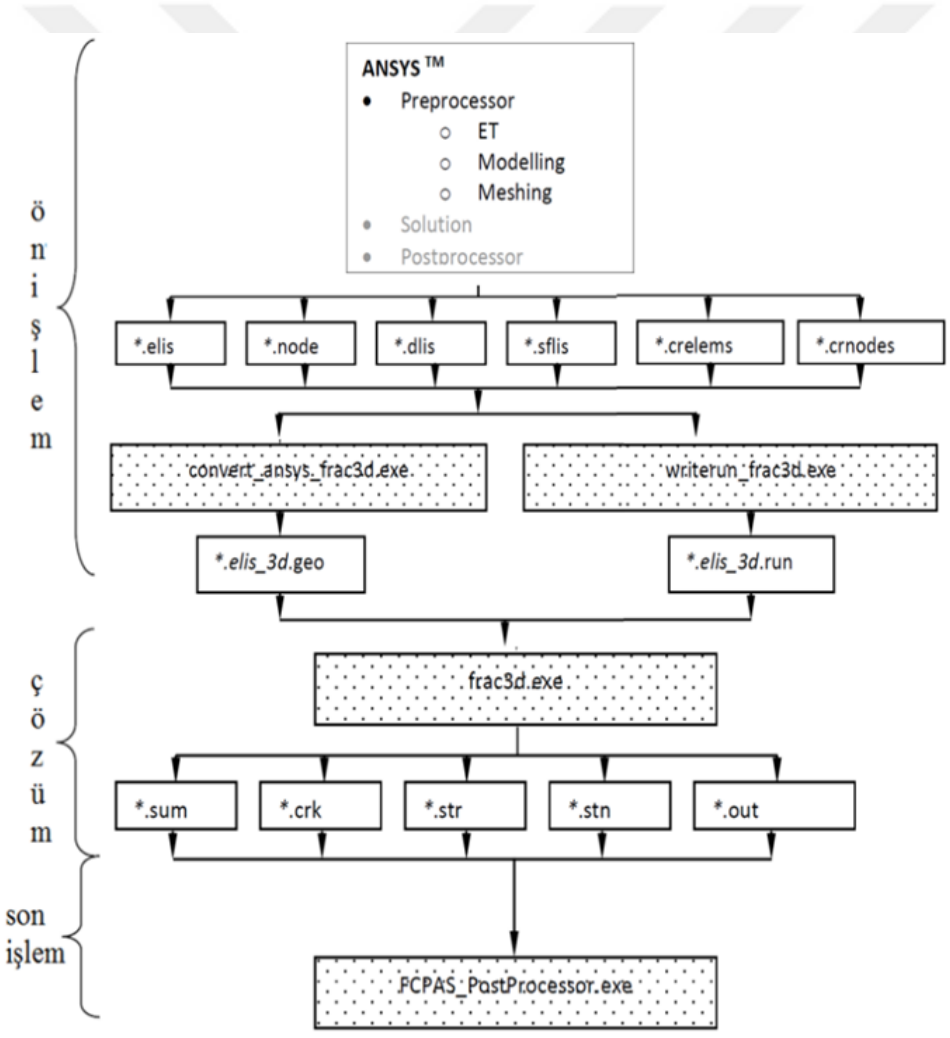


Şekil 2.6. FCPAS v2.2 Ana ekranı [11].



Şekil 2.7. Fracture Analysis Using ANSYSTM FE MODEL Arayüzey ana ekranı.

Sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra Ansys APDL'den çıktı dosyaları alınmaktadır. Bu çıktı dosyaları FCPAS arayüzünde kullanılacak dosya uzantılarına göre kaydedilerek program için girdi haline getirilmektedir. Bu girdi dosyaları program arayüzünde birleştirilerek bir *.geo uzantılı bir dosya oluşturulmaktadır. Bir sonraki aşama olan Run sekmesinde analiz tipi ve malzeme özellikleri ilgili yerlere girilerek *.run uzantılı bir dosya oluşturulmaktadır. Fracture Analysis sekmesine gelindiğinde, ilgili yerlere önceki aşamalarda oluşturulmuş *.geo ve *.run uzantılı dosyalar girilerek çözüm aşamasına geçilmektedir. Çözüm işlemi sona erdikten sonra elde edilen çıktılar Post Processing modülünde mod-I, mod-II, mod-III GŞF dağılımlarını içeren bir grafiğe dönüştürülmektedir. Şekil 2.8.'de FCPAS programının işlem adımları detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. FCPAS sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen kırılma analiz adımları [11].

FCPAS, gerilme şiddet faktörlerini zenginleştirilmiş sonlu elemanlar metodu ile hesaplamaktadır[10]. Bu yöntemde, sonlu elemanlar çözümündeki deplasman fonsiyonuna ek olarak düğüm noktasındaki yer değiştirmelere $\left(u_j^k\right)$, $\left(K_I^i\right)$, $\left(K_{II}^i\right)$, $\left(K_{III}^i\right)$ terimleri eklenerek denklem 2.2 elde edilmiştir.

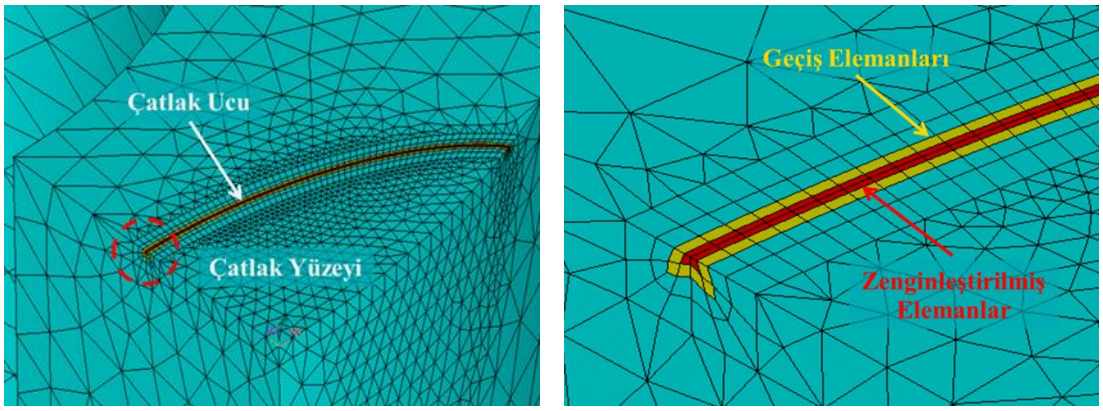
$$u^k(\xi,\eta,\rho) = \sum_{j=1}^{m} N_j(\xi,\eta,\rho)\, u_j^k \tag{2.2}$$

$$+Z_0\,(\xi,\eta,\rho)\Big(\, f^k(\xi,\eta,\rho) - \textstyle\sum_{j=1}^{m} N_j\,(\xi,\eta,\rho) f_j^k\Big)\Big(\textstyle\sum_{i=1}^{ntip} N_i\,(\Gamma)\, K_I^i\Big)$$

$$+Z_0\,(\xi,\eta,\rho)\Big(\, g^k(\xi,\eta,\rho) - \textstyle\sum_{j=1}^{m} N_j\,(\xi,\eta,\rho) g_j^k\Big)\Big(\textstyle\sum_{i=1}^{ntip} N_i\,(\Gamma)\, K_{II}^i\Big)$$

$$+Z_0\,(\xi,\eta,\rho)\Big(\, h^k(\xi,\eta,\rho) - \textstyle\sum_{j=1}^{m} N_j\,(\xi,\eta,\rho) h_j^k\Big)\Big(\textstyle\sum_{i=1}^{ntip} N_i\,(\Gamma)\, K_{III}^i\Big)$$

Düğüm noktasındaki yer değiştirmelere $\left(u_j^k\right) K_I^i$, K_{II}^i ve K_{III}^i gerilme şiddet faktörü formülasyonları da eklenmiştir. Burada Z_0 zenginleştirilmiş eleman fonsiyonunun uygulanacağı mertebeyi belirleyen bir sıfırlama fonksiyonudur. 0 veya 1 değerini alabilir. Geçiş elemanlarının zenginleştirilmiş elemanlara komşu düğüm noktalarında ve zenginleştirilmiş elemanlarda 1, geçiş elemanlarının normal elemanlara komşu düğüm noktalarında ise 0 değerlerini almaktadır. Düğüm noktalarındaki deplasmanlar u_j^k, normal elamanların şekil fonksiyonları N_j terimleri ile gösterilmektedir. f_j^k, g_j^k ve h_j^k terimleri, bölgesel koordinat sisteminden global koordinat sistemine dönüştürülmesiyle elde edilen mod-I, mod-II ve mod-III deplasman bileşenleri olup asimptotik çatlak ucu deplasman ifadelerinden elde edilebilmektedir. m, eleman türüne göre 10 veya 20 olabilir ve ntip quadratik elemanlar (kenarında bir adet kenar ortası düğüm noktası bulunduran elemanlar) için 3'tür. Γ ise -1 ile 1 arasında değişmekte olan izoparametrik koordinattır. [12].



(a) (b)

Şekil 2.9. Zenginleştirilmiş elemanların ve geçiş elemanlarının görünümleri (a), yakınlaştırılmış görünümleri (b).

Şekil 2.9.'da, çatlak ucuna komşu olan ve çatlak ucu çizgisi boyunca sıralanan elemanlar zenginleştirilmiş elemenlardır ve kırmızı renk ile gösterilmiştir. Zenginleştirilmiş elemanlara komşu olan elemanlar ise geçiş elemanlarıdır ve sarı renk ile gösterilmiştir. Zenginleştirilmiş eleman formülasyonunun çatlak içerisinden dışarıya doğru eleman kalınlığı boyunca birden sıfıra indirgenmesiyle geçiş elemanları oluşturulmuştur. Zenginleştirilmiş elemanlar ile normal elemanlar (şekilde açık mavi renk ile gösterilmiştir) arasında bir geçiş bölgesi oluşturmaktadırlar. Çatlak ucu gerilme şiddet faktörlerindeki dalgalanmalar, geçiş elemanları sayesinde azalmakta olup gerilme şiddet faktörlerinin hesaplanması daha hassas yapılabilmektedir.

2.4.1. Literatürdeki gerilme şiddet faktörlerine yakınsama çalışmaları

Bu bölümde, tez çalışmaları kapsamında yapılacak olan analizlere başlamadan önce literatürde silindirler üzerinde karışık mod kırılma analizleri yapılan çalışmalardan çeşitli modeller seçilmiştir. Bu modeller için FCPAS ile analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

I. S. Raju ve J. C. Newman çalışmasından eğilme gerilmesine maruz a/c=1, a/t=0.2, 0.5, 0.8 , R/t=2, 4 modelleri seçilip çatlak ucu derinlik ve yüzey noktası için FCPAS sonuçları ile karşılaştırılmıştır [5]. Elde edilen sonuçlara göre çatlak ucu derinlik noktası GŞF değerleri arasındaki maksimum farkın %10.3; serbest yüzey GŞF değerleri arasındaki maksimum farkın %23.67 olduğu Tablo 2.2-2.3.'te görülmektedir.

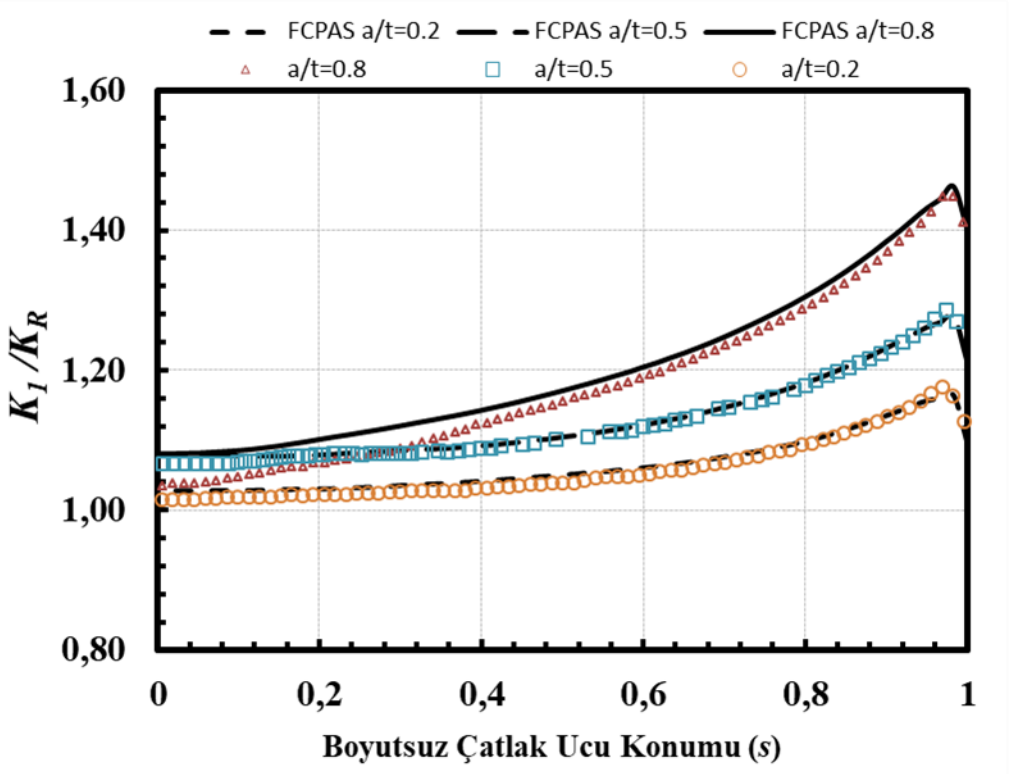
Tablo 2.2. I. S. Raju ve J. C. Newman çalışma sonuçları ile FCPAS çatlak ucu mod-I sonuçlarının kıyaslanması.

Ri /*t*	*a* /*t*	Raju ve Newman	FCPAS	Yüzde fark
2	0,2	0,966	1,044	8,04
2	0,5	0,919	1,014	10,28
2	0,8	0,87	0,960	10,30
4	0,2	0,981	1,064	8,47
4	0,5	0,971	1,059	9,10
4	0,8	0,95	1,028	8,16

Tablo 2.3. I. S. Raju ve J. C. Newman çalışma sonuçları ile FCPAS serbest yüzey mod-I sonuçlarının kıyaslanması

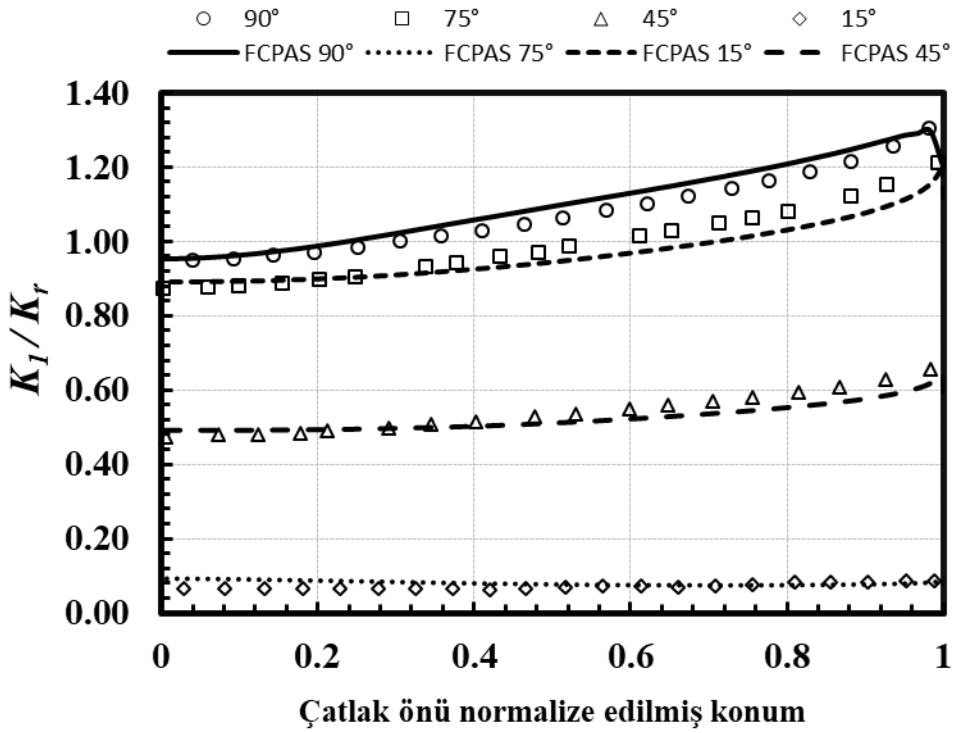
Ri /*t*	*a* /*t*	Raju ve Newman	FCPAS	Yüzde fark
2	0,2	1,137	1,179	3,70
2	0,5	1,188	1,312	10,45
2	0,8	1,287	1,592	23,67
4	0,2	1,133	1,165	2,79
4	0,5	1,204	1,286	6,77
4	0,8	1,327	1,546	16,52

O. M. Fakhri ve ark. çalışmalarında çekme gerilmesi etkisi altındaki bir silindirin dış yüzeyinde eliptik çatlak bulunan model için a/c=1, Ri/t=1.1, a/t=0.2, a/t=0.5, a/t=0.8 parametreleri seçilmiştir [9]. Bu parametreler için çalışmada bulunan mod-I GŞF'leri FCPAS sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çatlak ucu derinlik noktası GŞF değerleri ile literatür çözümü değerlerinin benzer sonuçlar verdiği Şekil.2.10.'da görülmektedir.

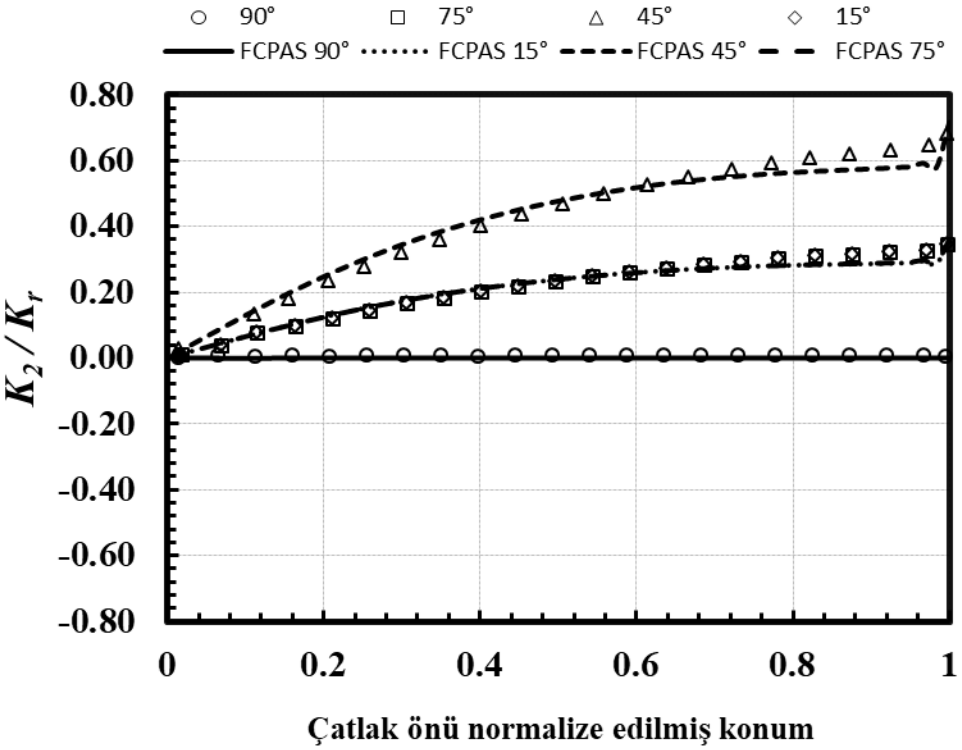


Şekil 2.10. *Ri*/*t*=1.1, *a*/*c*=1, *a*/*t*=0.2, *a*/*t*=0.5, *a*/*t*=0.8 için mod I karşılaştırması.

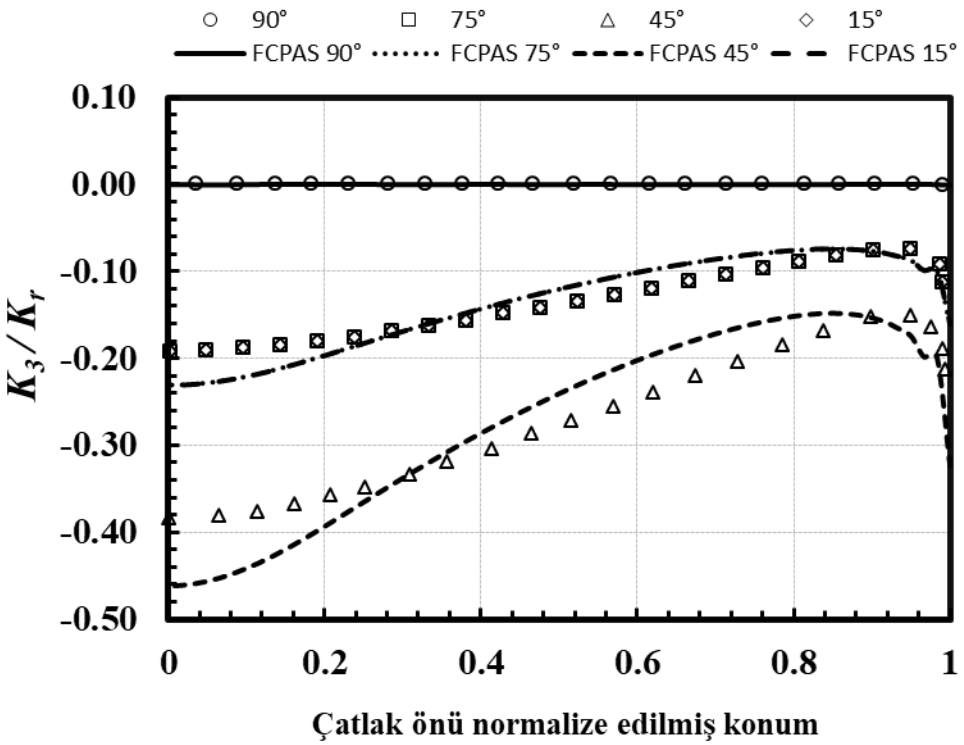
G. Fu, W. Yang, ve C. Q. Li çalışmalarında eğilme gerilmesine etkisi altındaki bir silindirin dış yüzeyinde eğik çatlak model için *a*/*c*=1.5; *a*/*d*=0.5; *d*/*R*=0.1 (*d*: silindir et kalınlığı, *R*: silindir dış yarıçap) paremetreleri seçilmiş olup karışık mod analizleri gerçekleştirilmiştir [7]. Yapılan çalışma değerleri ile FCPAS'den elde edilen değerler kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucu değerlerin birbirlerine yakın sonuçlar verdiği Şekil 2.11-2.13.'te gösterilmektedir.



Şekil 2.11. *a*/*c*=1.5, *d*/*R*=0.25, *a*/*d*=0.5; dönme açısı 90°,75°,45° ve 15° için mod I karşılaştırması.



Şekil 2.12. *a*/*c*:1.5, *d*/*R*:0.25, *a*/*d*:0.5; dönme açısı 90°,75°,45° ve 15° için mod II karşılaştırması.



Şekil 2.13. *a/c*:1.5, *d*/*R*:0.25, *a*/*d*:0.5; dönme açısı 90°,75°,45° ve 15° için mod III karşılaştırması.

2.4.2. Sonlu eleman ağ duyarlılık analizi

Bu bölümde, parametreleri *Ri/Ro*= 0.3 , *a/c*=1, *a/t*=0,25 , α=15° olan ve eğilme gerilmesine maruz silindirde dönmüş yüzey çatlak modeli için ağ duyarlılık analizi yapılmıştır. Çatlak ucundeki zenginleştirilmiş elemanların çatlak önüne dik yöndeki kenar uzunluğu için *a*/25, *a*/50, *a*/100, *a*/200, *a*/300, *a*/400 değerleri kullanılmış olup *a*/100 parametresinden sonraki değerlerde sonuçlarda kayda değer bir fark olmadığı görülmüştür. Sonuçlar, Tablo 2.3'te gösterilmiştir. Bu nedenle analizlerde çatlak ucu elemen değeri *a*/100 olarak belirlenmiştir. $a/c \geq 2$ içeren bazı modellerde ise bölüntülemeler arası düzgün geçiş elde etmek amacıyla çatlak ucu elemen değeri a/1000 olarak belirlenmiştir. Bölüntülenme çalışmalarının tamamında çatlağın bulunduğu çatlak ucu çizgisi boyunca, farklı değerlerde elemanlar kullanılarak ayrıca analizler gerçekleştirilmiş olup sonuçların çok değişmediği görülmüştür. Bu nedenle çatlak ucu boyunca 60 bölüntüleme yapılmıştır. Bölüntülemeler arası düzgün geçiş sağlamak amacıyla bazı modellerde 90 bölüntüleme kullanılmıştır.

Tablo 2.4. Çatlak ucuna temas eden eleman boyutları için eleman kenar boyutuna bağlı yakınsama çalışması.

Çatlak Ucu Eleman Boyutu	Çatlak Ucu Derinlik Noktası Mod-I GŞF	Yüzde Fark
$a/25$	0,90489	
$a/50$	0,93535	3,25667
$a/100$	0,93181	-0,38061
$a/200$	0,92074	-1,20153
$a/300$	0,92452	0,40799
$a/400$	0,91094	-1,49065

2.5. Eğilme Gerilmesine Maruz Silindirdeki Dönmüş Çatlak Analizleri

Bu bölümde, dönmüş yüzey çatlağı içeren, eğilme gerilmesine maruz içi boş silindirlerin analiz sonuçlarından elde edilen karışık mod GŞF'leri hesaplanmıştır. Problemi tanımlayan parametrelerin değerleri, *Ri/Ro* (silindir iç yarıçapı / silindir dış yarıçapı) 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 0.95; *a/c* (çatlak şekil oranı) 0.25, 0.5, 1, 2; *a/t* (çatlak derinliği/silindir et kalınlığı) 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0,8; α (çatlak dönme açısı) 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° alınmıştır.

Elde edilen sonuçlar, çatlak uzunluğu / derinlik oranı ve uygulanan gerilme yüküne bağlı bir K_r değeri ile normalize edilmiştir. Burada *Q*, dönmüş çatlak için şekil faktörü olarak ifade edilmektedir. Çatlak için şekil faktörü '*Q*' formülasyonları Denklem 2.3-2.4'de verilmiştir [5]. K_R formülasyonu denklem 2.5.'te verilmiştir [7].

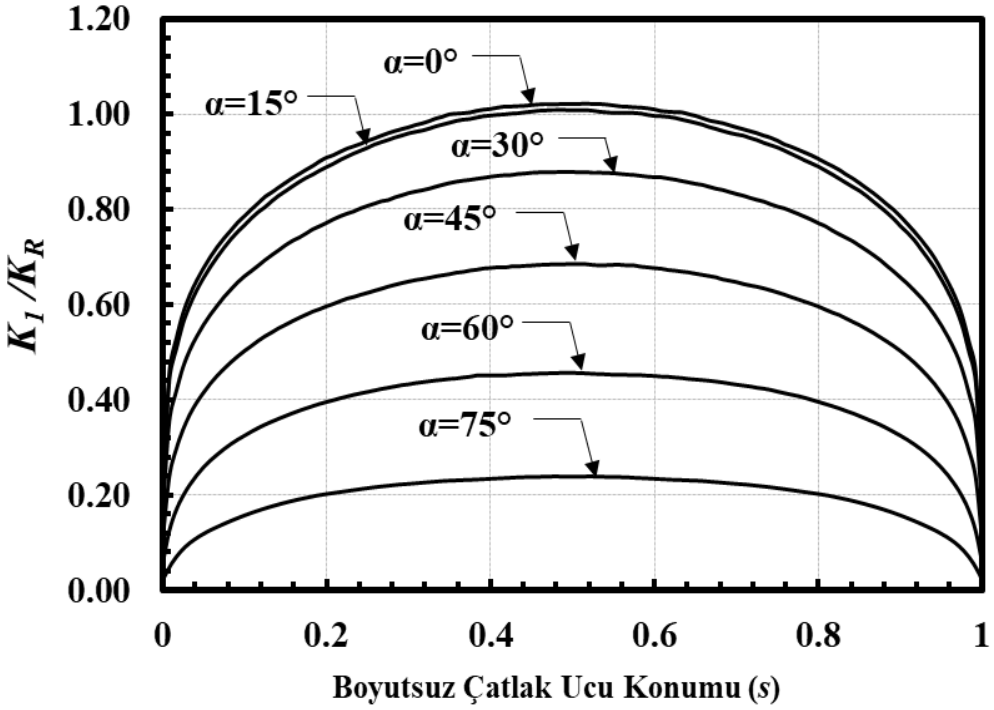
$$Q = 1 + 1.464\left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}; \qquad \frac{a}{c} < 1 \tag{2.3}$$

$$Q = 1 + 1.464\left(\frac{c}{a}\right)^{1.65}; \qquad \frac{a}{c} > 1 \tag{2.4}$$

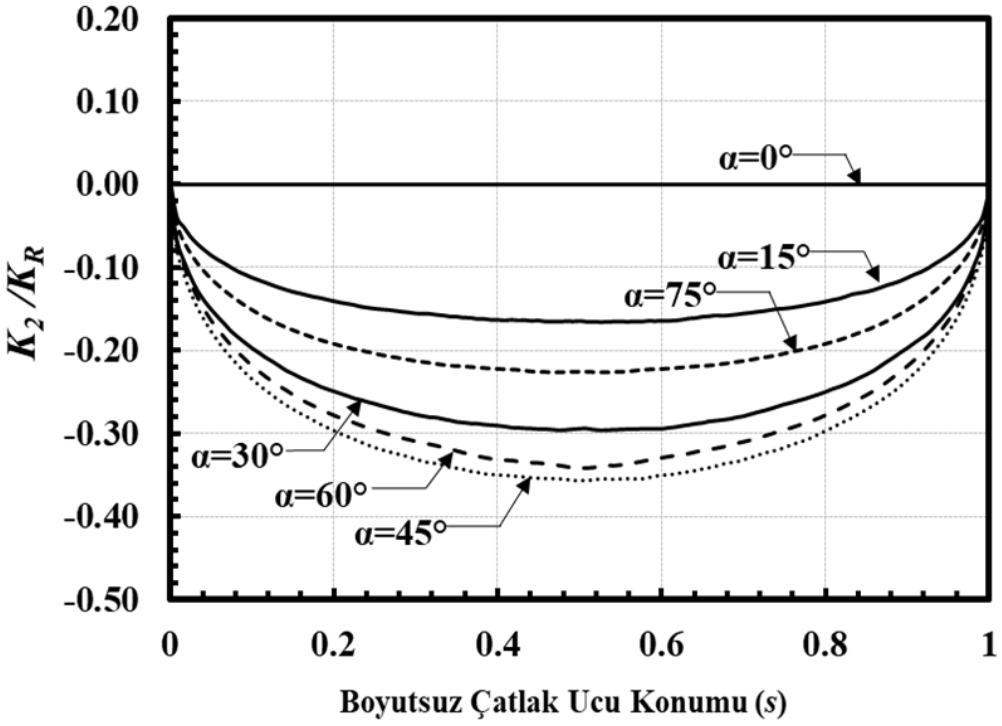
$$K_R = \sigma_0\sqrt{\left(\frac{\pi a}{Q}\right)} \tag{2.5}$$

Normalize edilmiş K_1, K_2, K_3 grafiklerinin x ekseninde boyutsuz çatlak ucu konumu (*s*) olarak tanımlanmıştır. Sonlu eleman modelinde yarı eliptik yüzey çatlağı çizgisi üzerinde sıralanan düğüm noktaları tam bir silindir için çatlak çizgisinin başlangıcındaki bir serbest yüzeyden (*s*=0) bitişinde bulunan serbest yüzeye kadar (*s*=1) olacak şekilde sıralanmıştır. Bu sıralamada tam ortada kalan nokta çatlak ucu

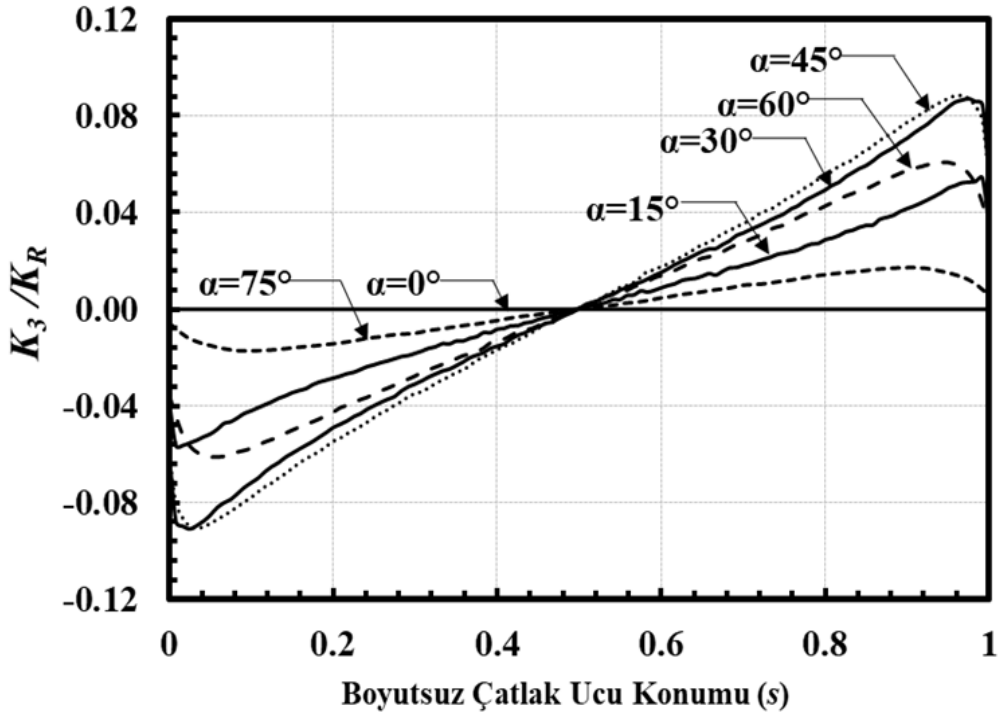
derinlik noktası (*s*=0.5) olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda problemi tanımlayan parametreler kullanılarak oluşturulmuş 300 adet grafik paylaşılmıştır.



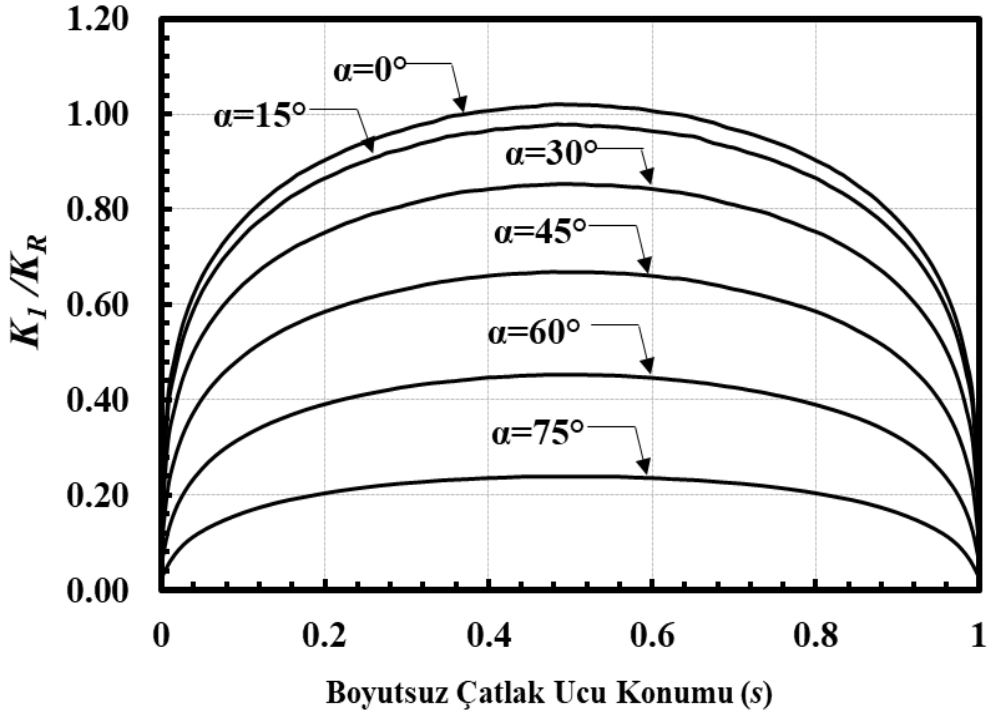
Şekil 2.14. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1 , *a/c*=0.25 , *a/t*=0.05.



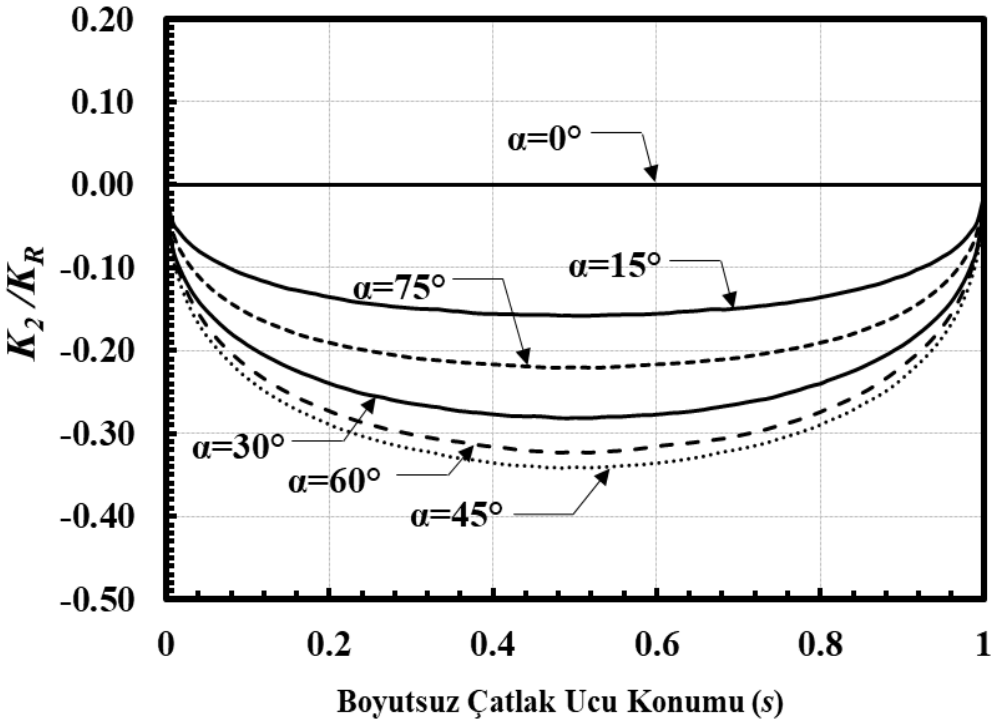
Şekil 2.15. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



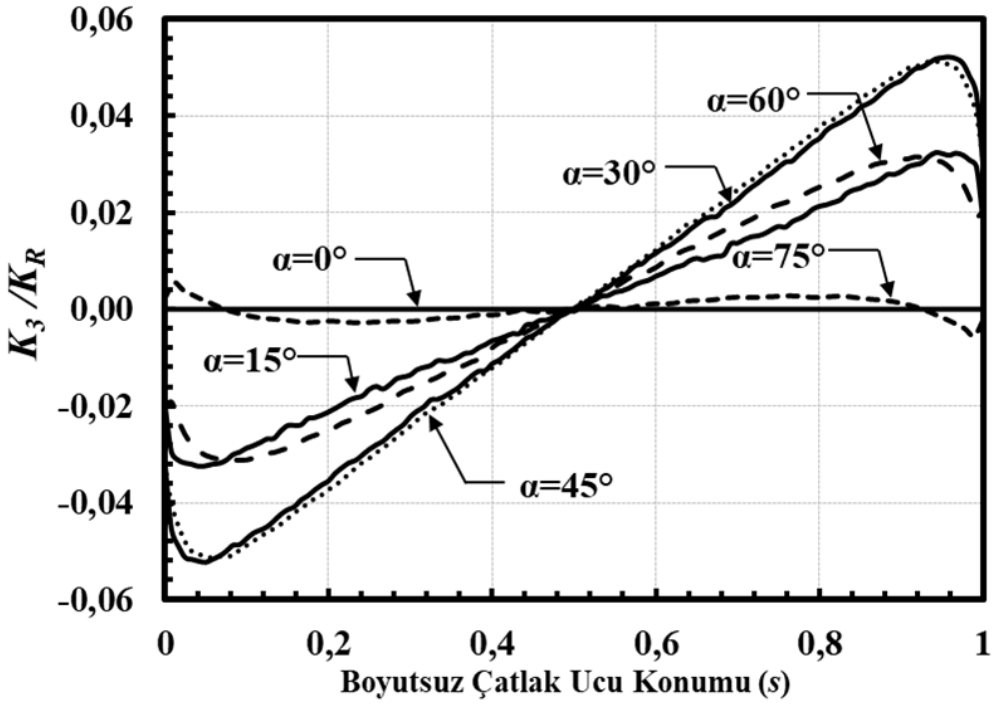
Şekil 2.16. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



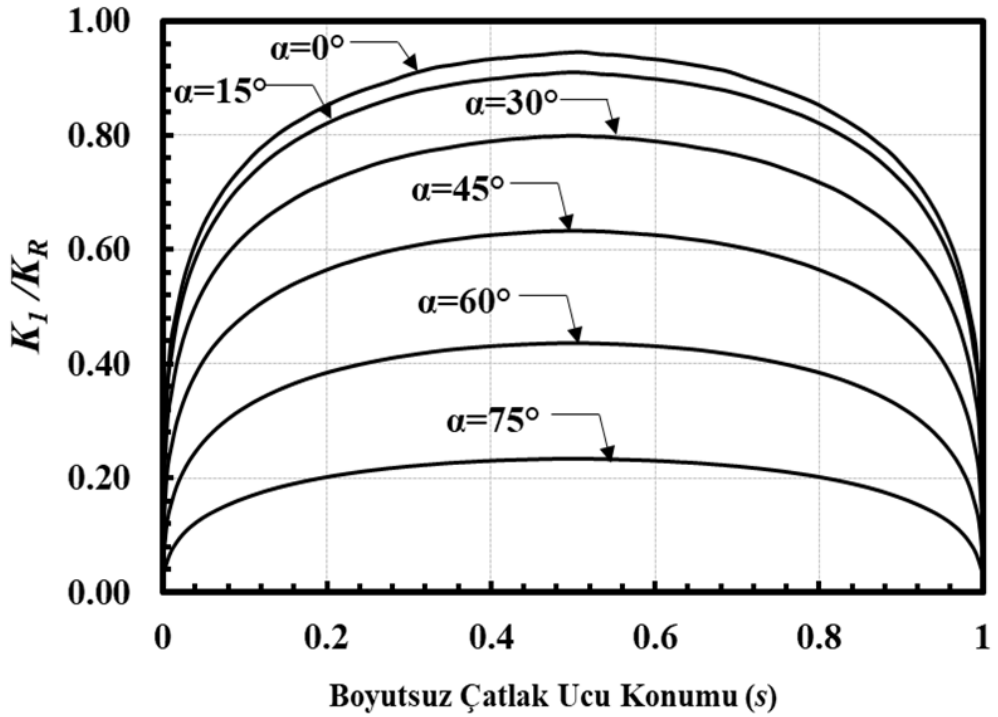
Şekil 2.17. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



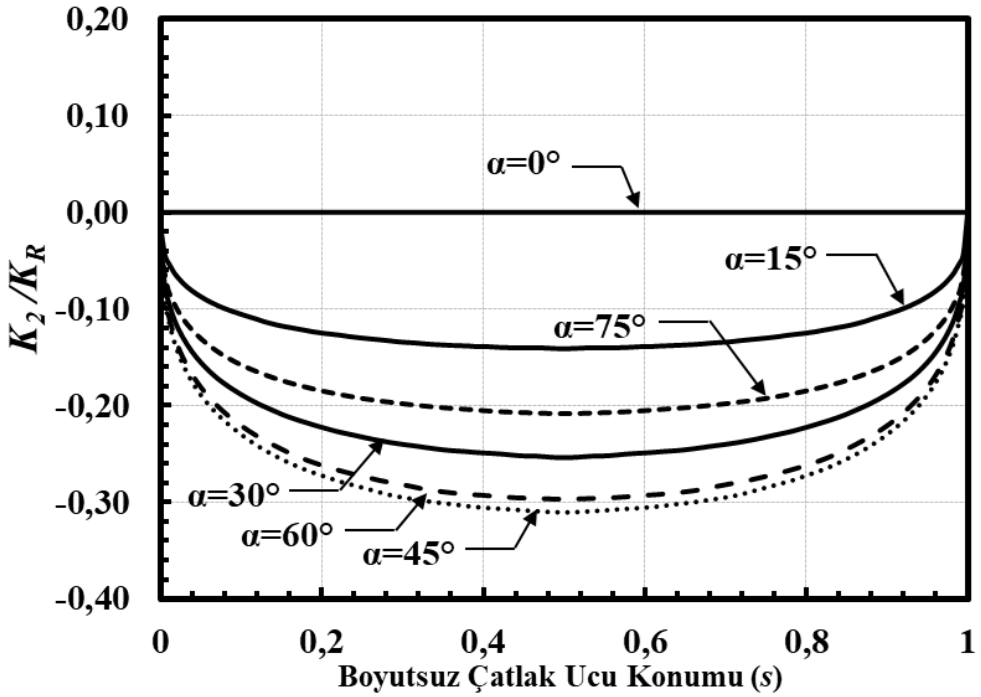
Şekil 2.18. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



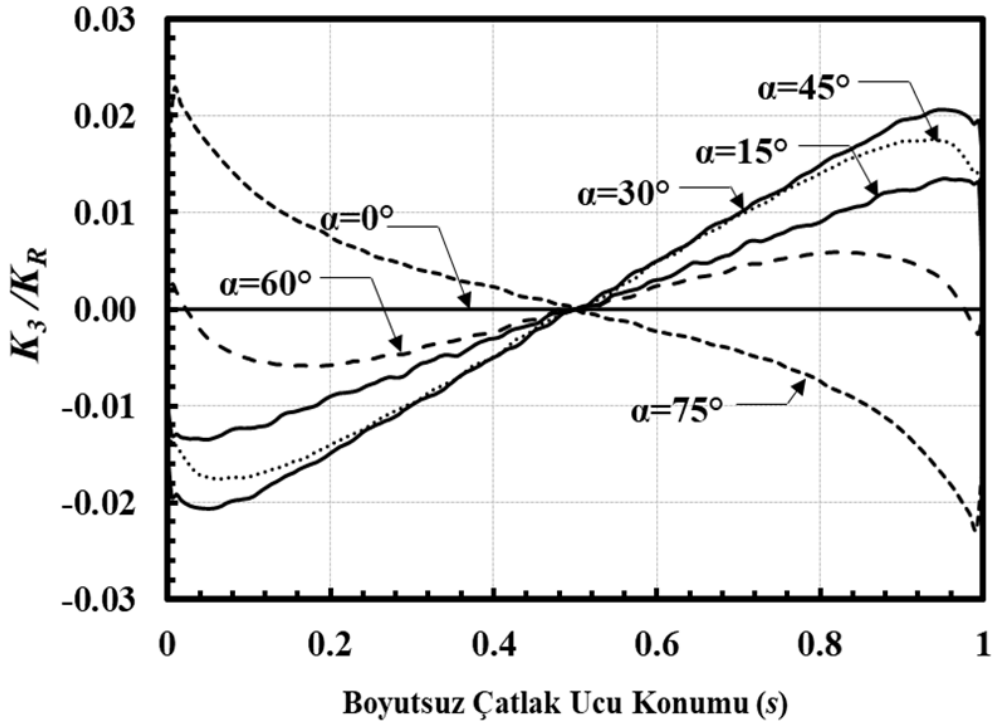
Şekil 2.19. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



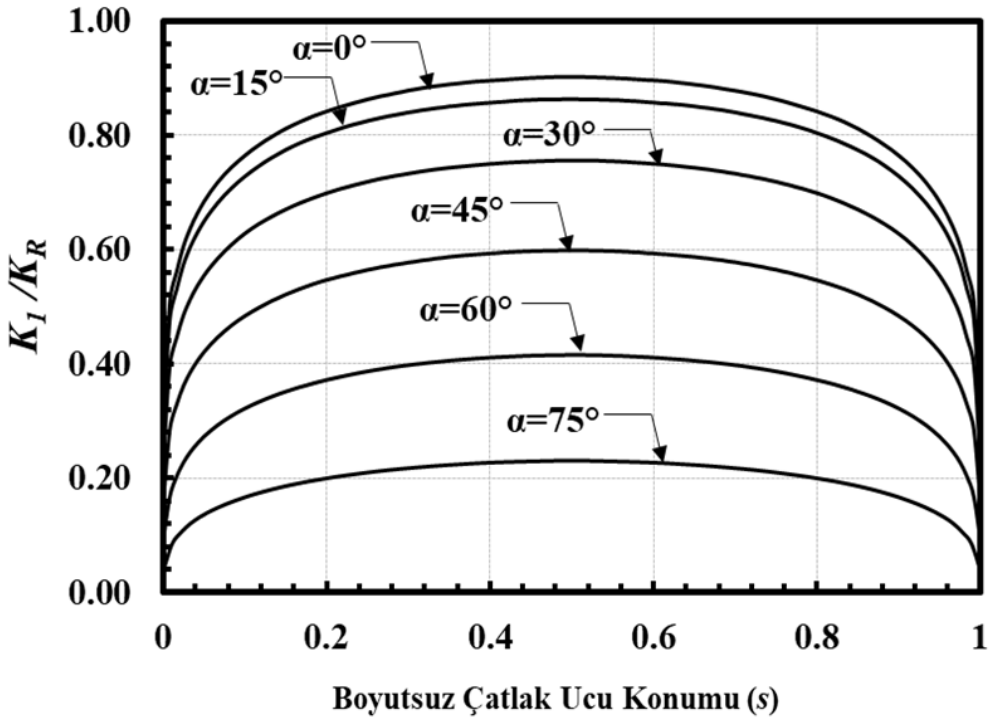
Şekil 2.20. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



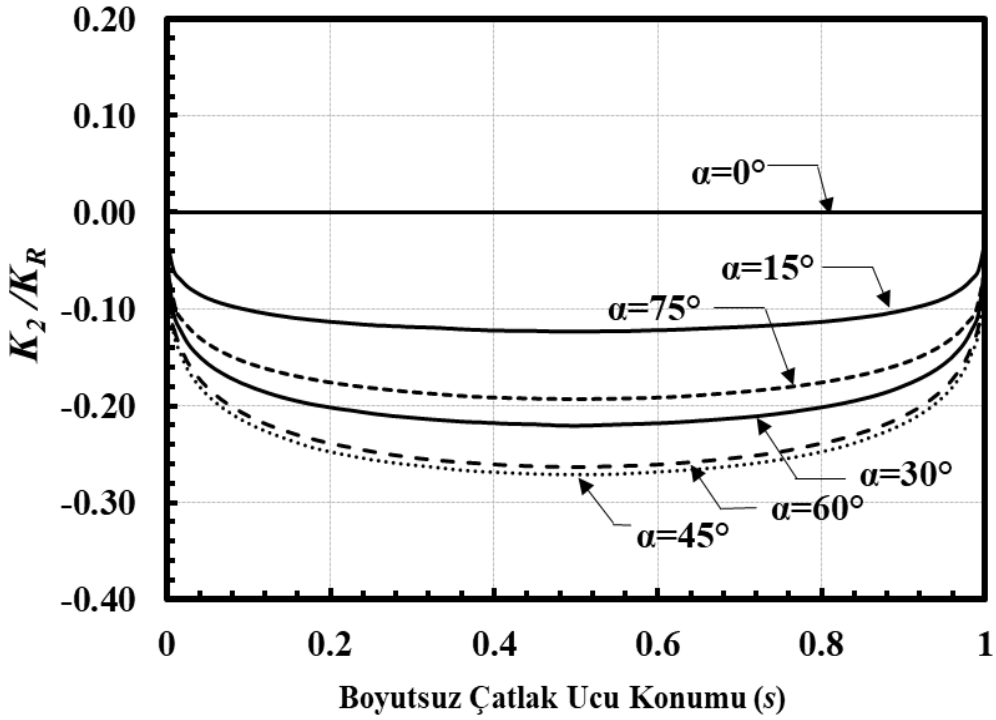
Şekil 2.21. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



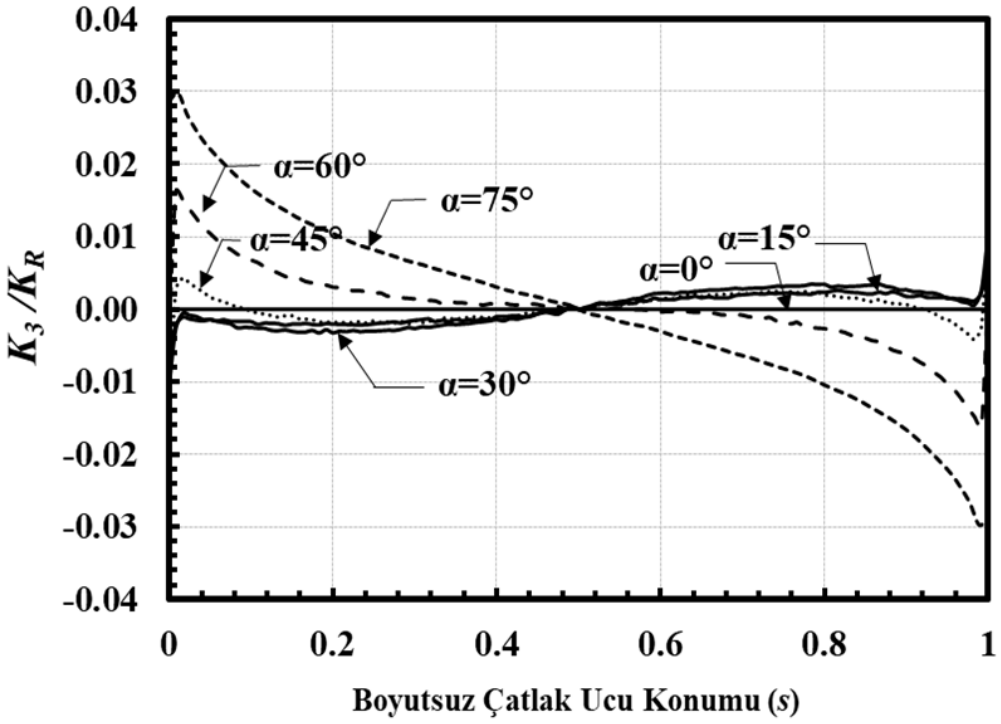
Şekil 2.22. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



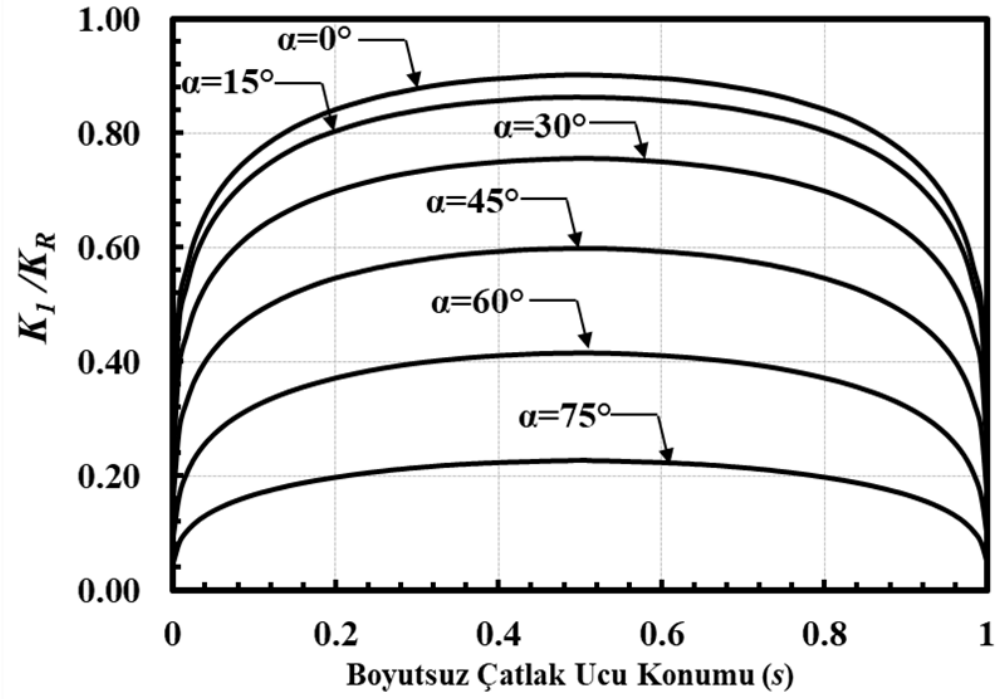
Şekil 2.23. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



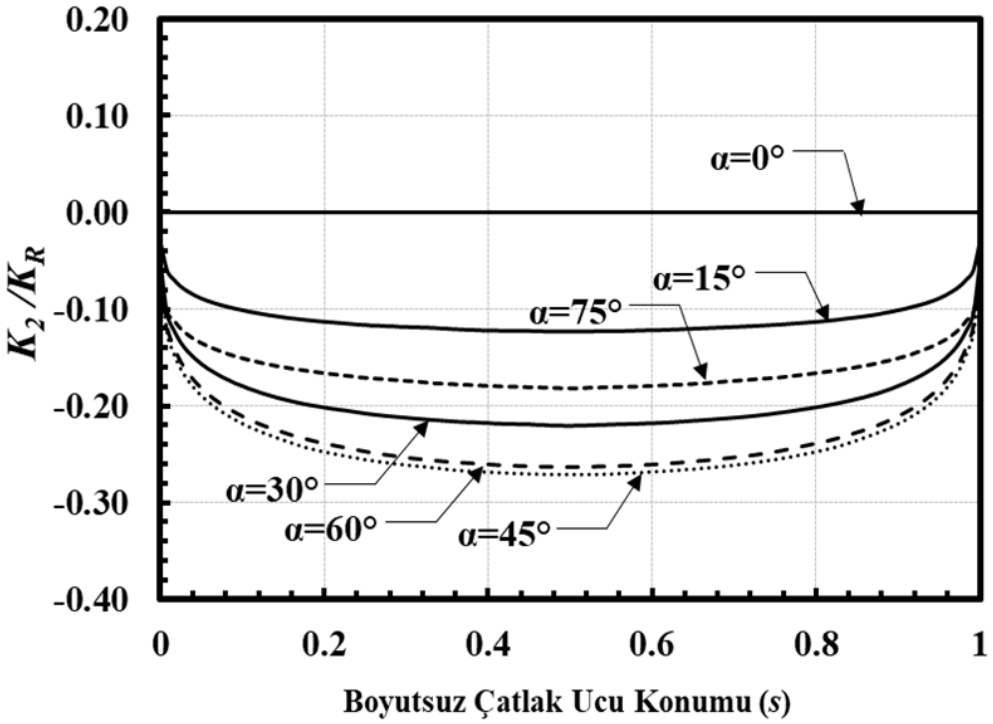
Şekil 2.24. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



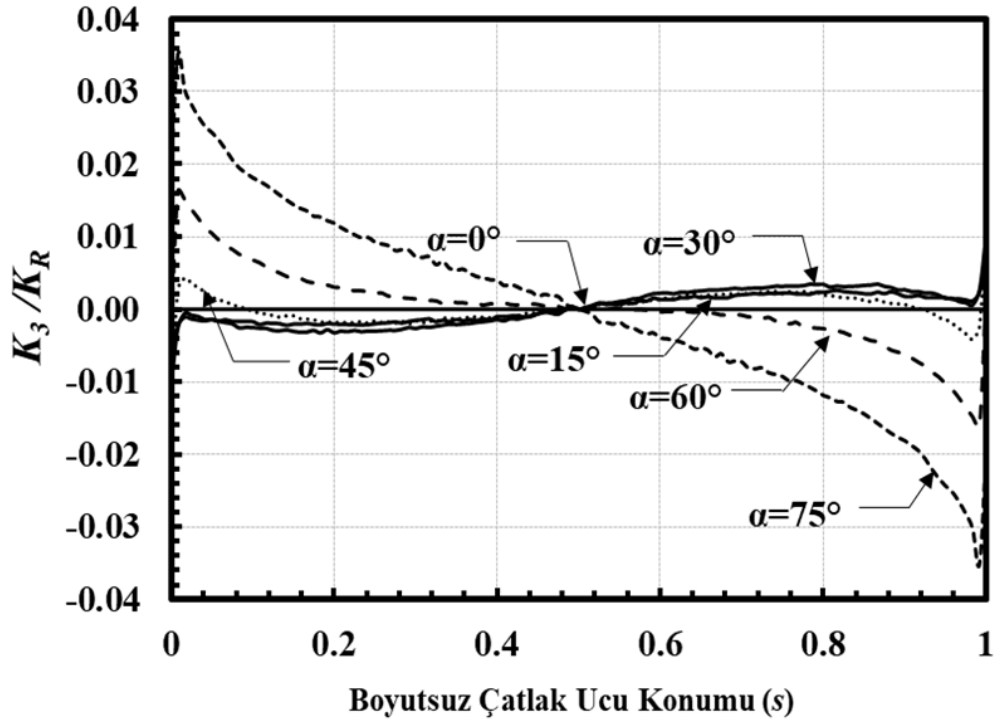
Şekil 2.25. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



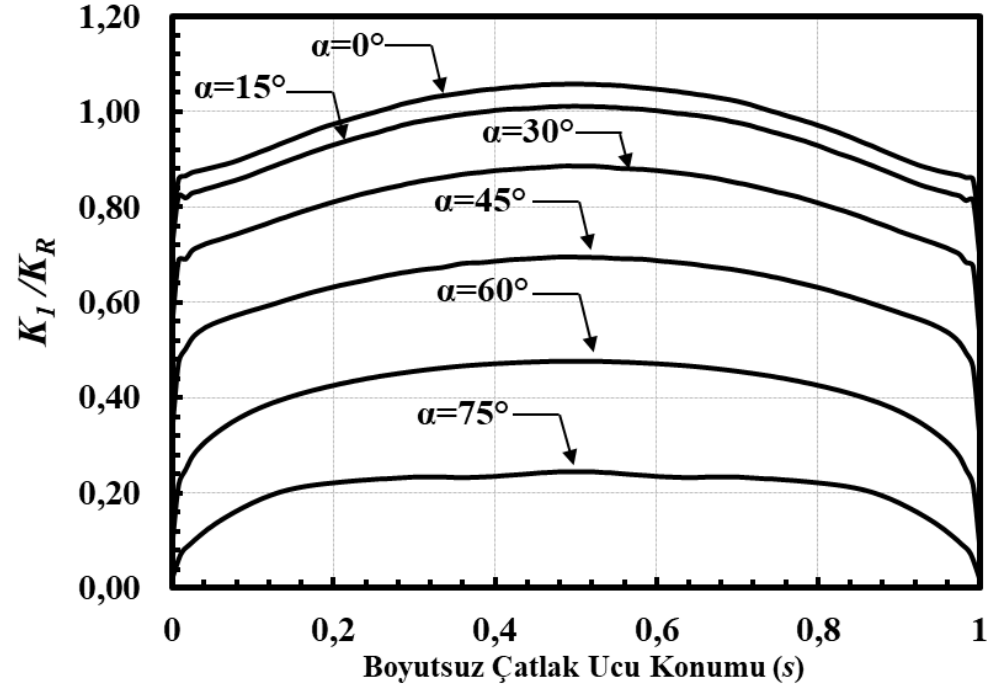
Şekil 2.26. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



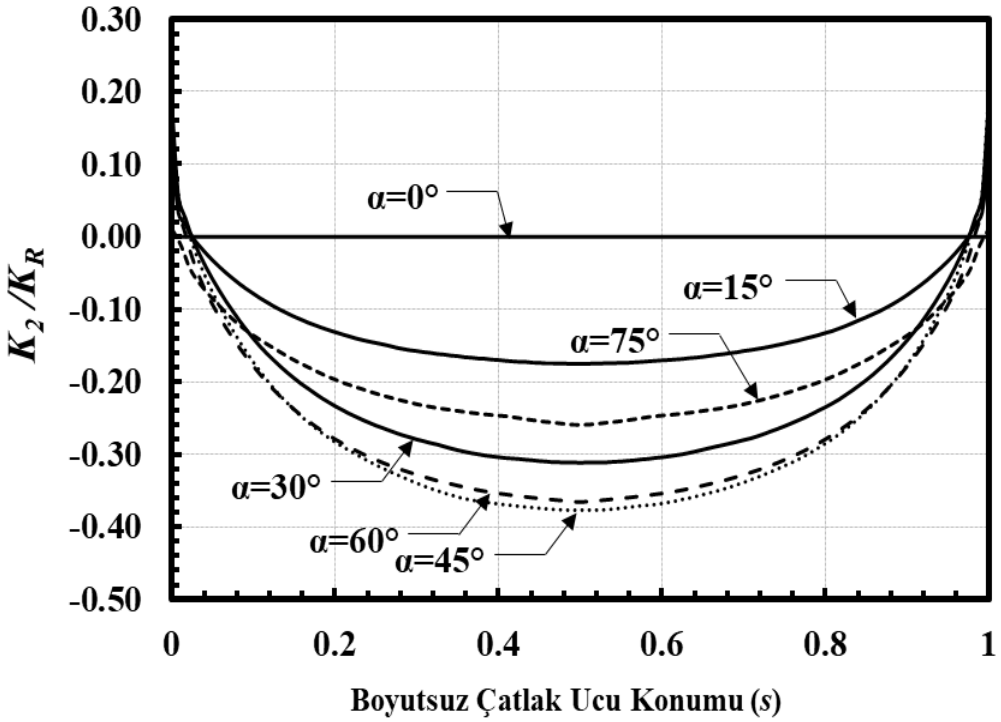
Şekil 2.27. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



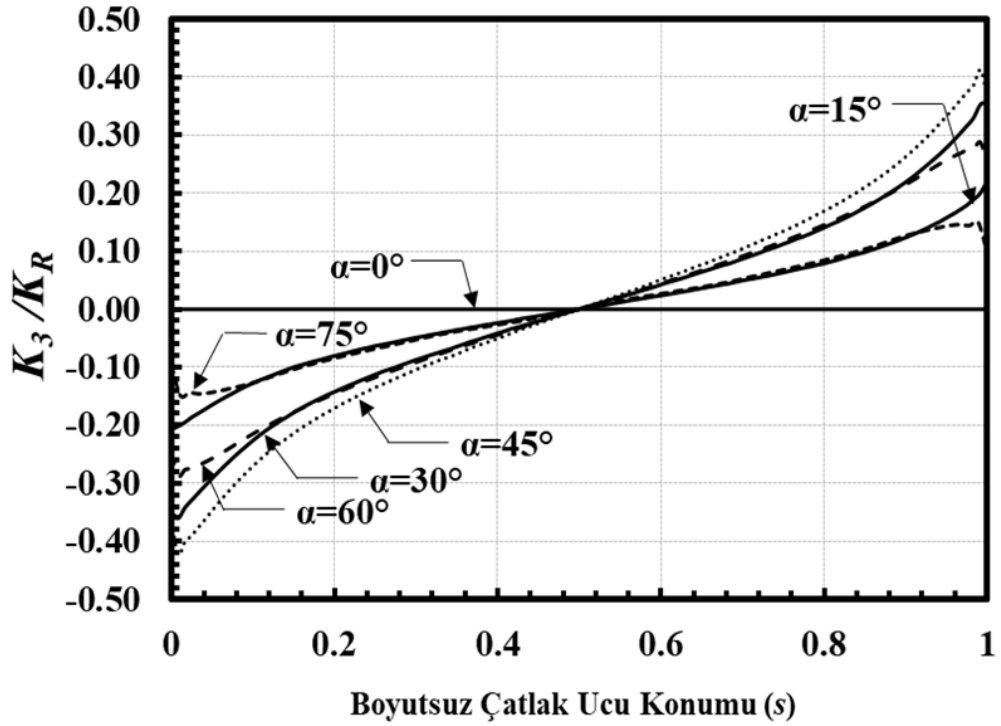
Şekil 2.28. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



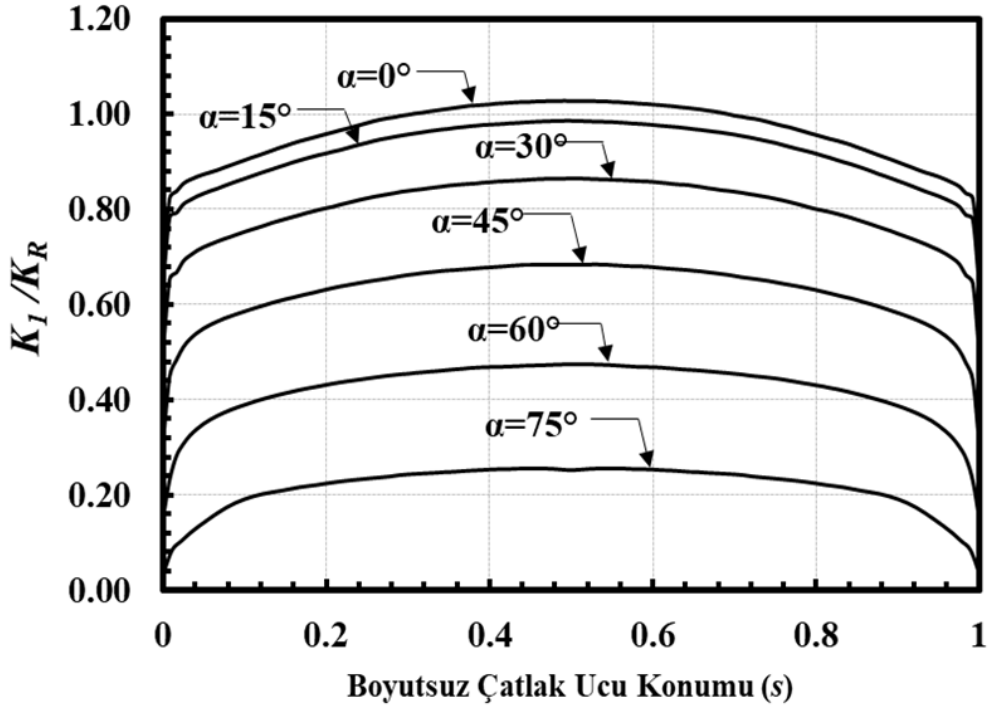
Şekil 2.29. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



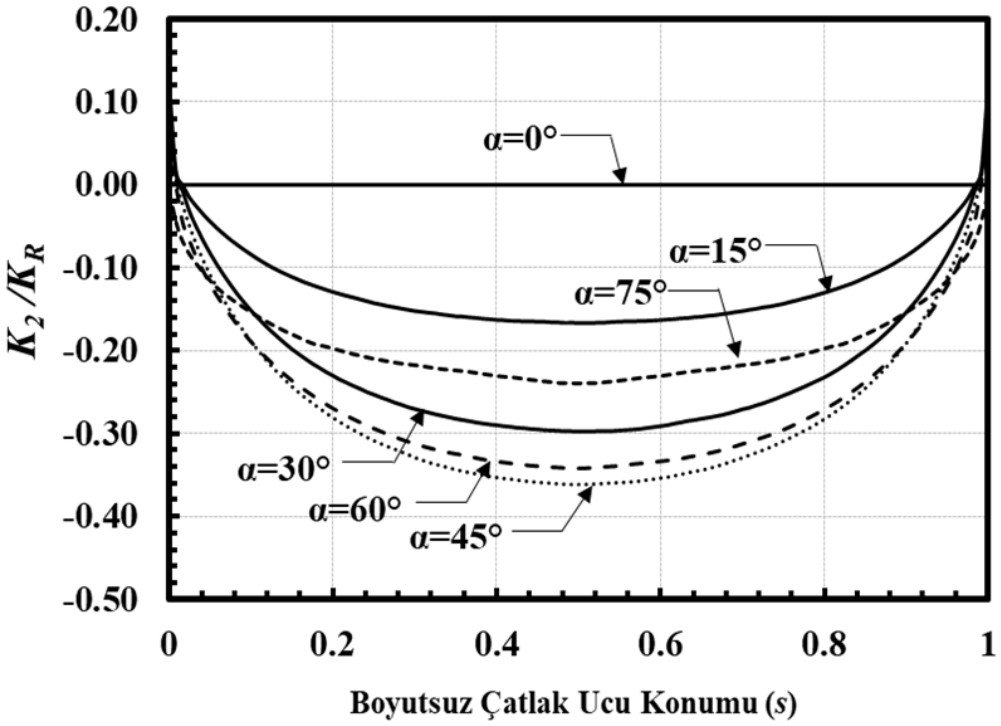
Şekil 2.30. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



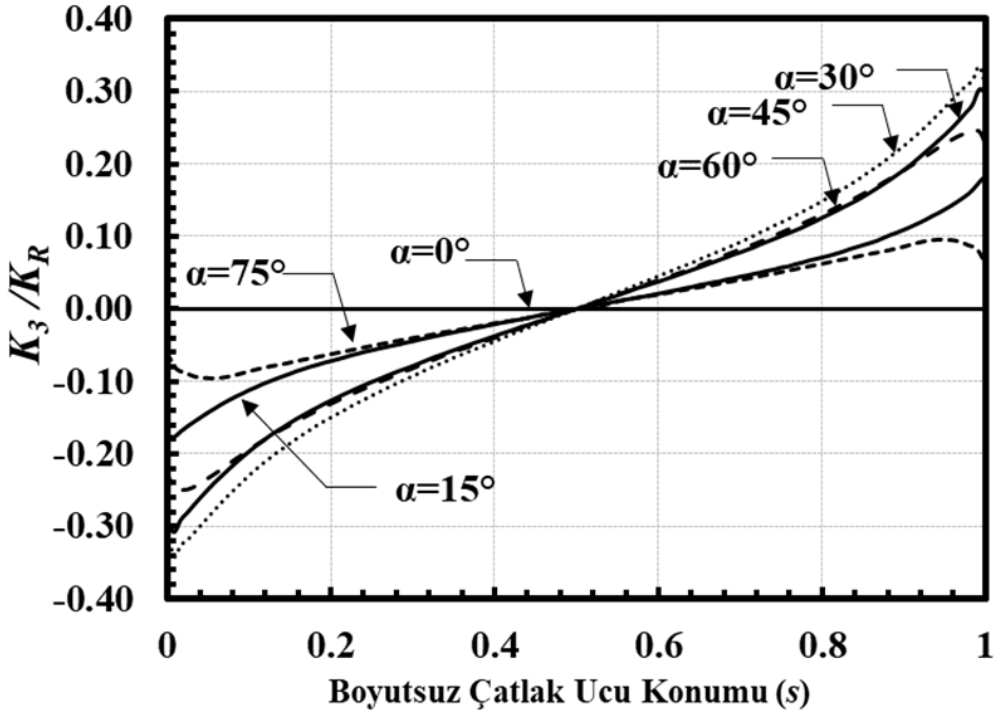
Şekil 2.31. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



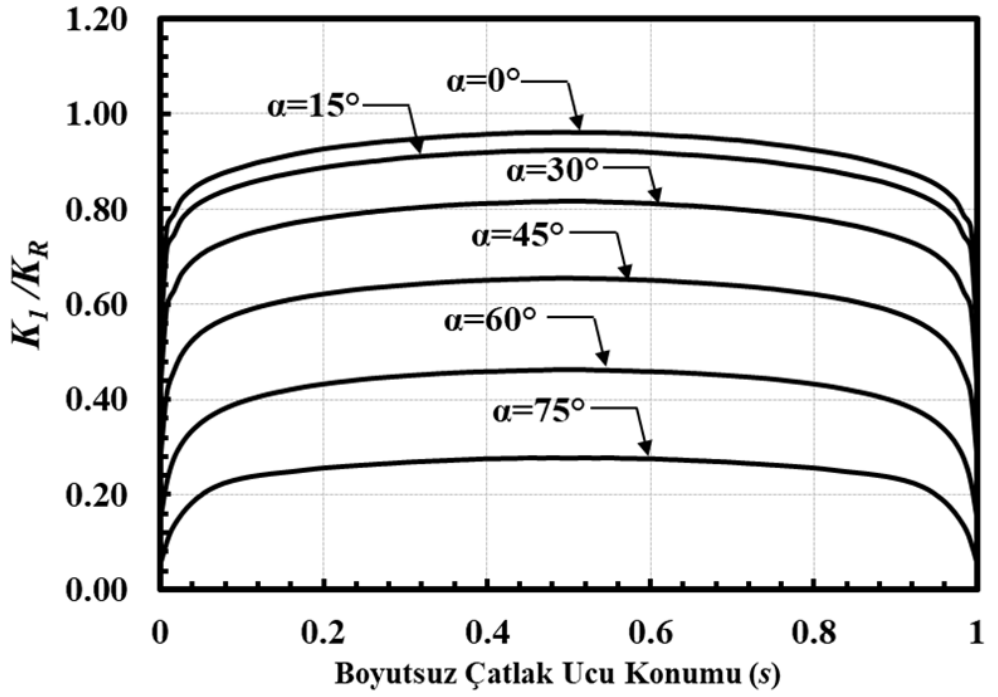
Şekil 2.32. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



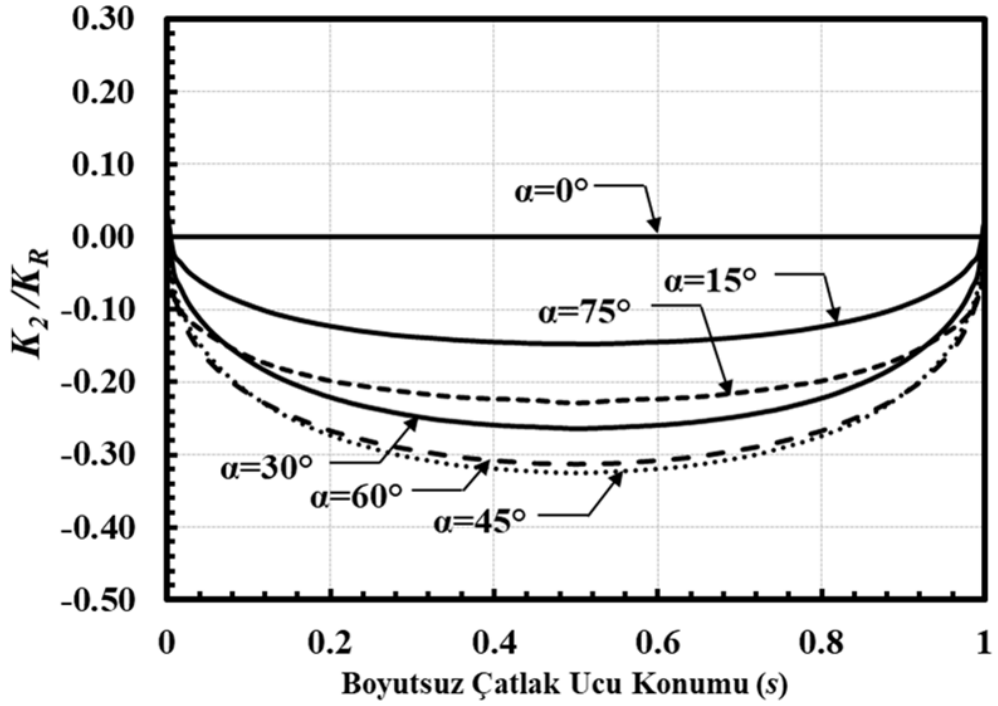
Şekil 2.33. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



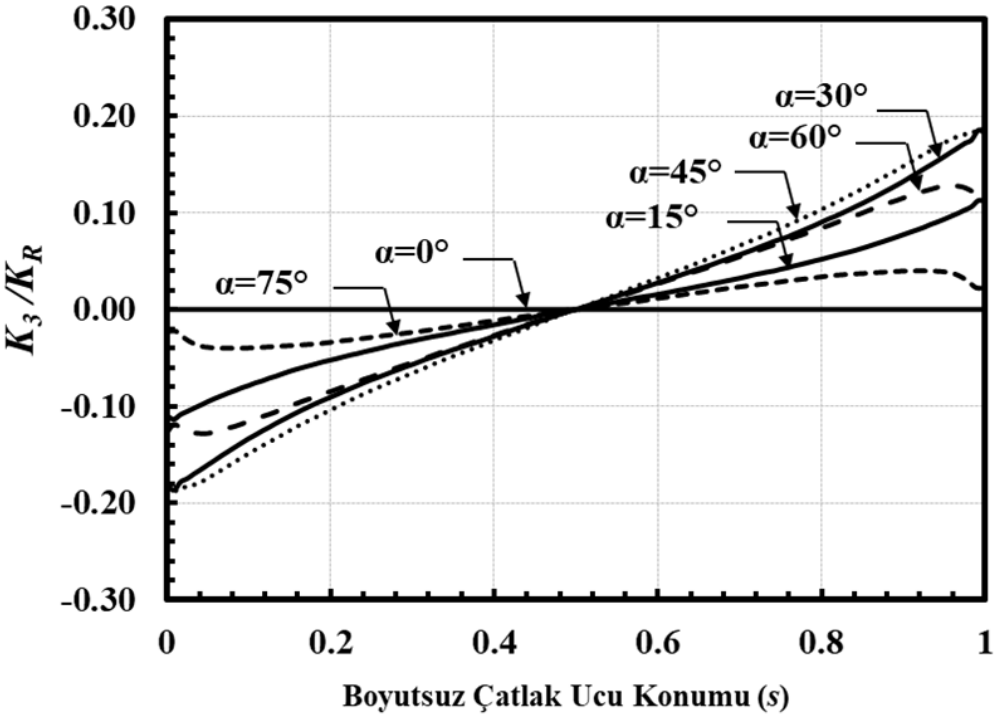
Şekil 2.34. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



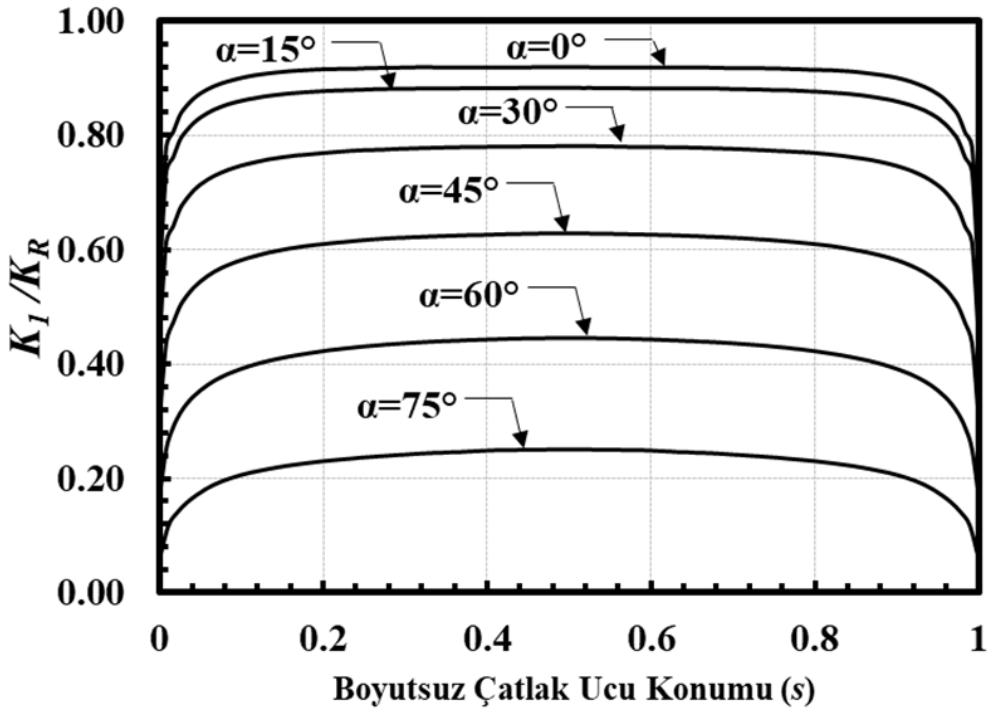
Şekil 2.35. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



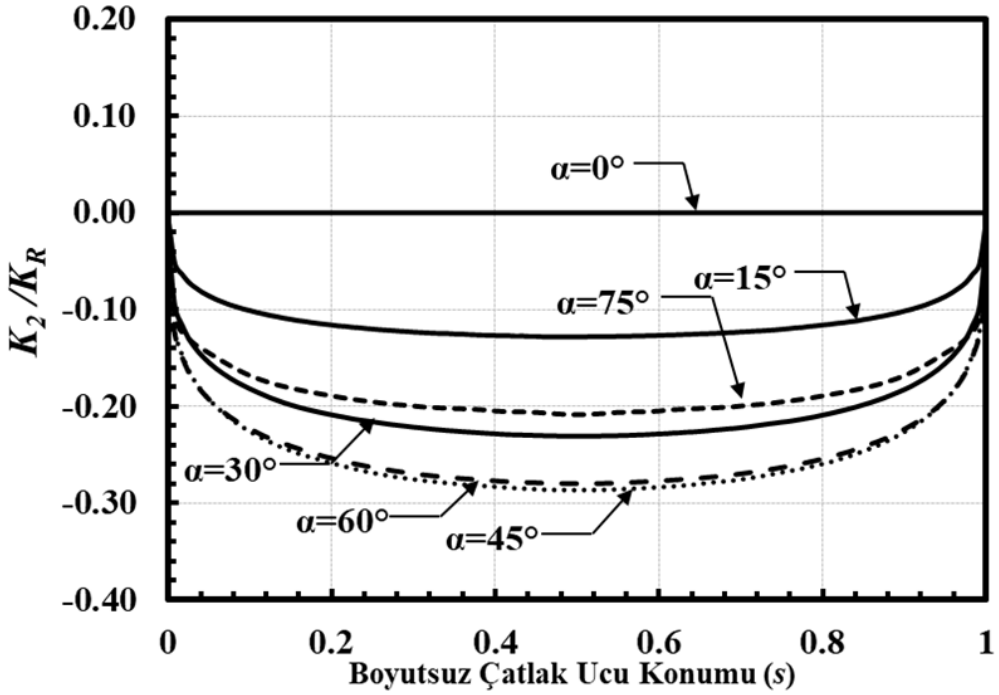
Şekil 2.36. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



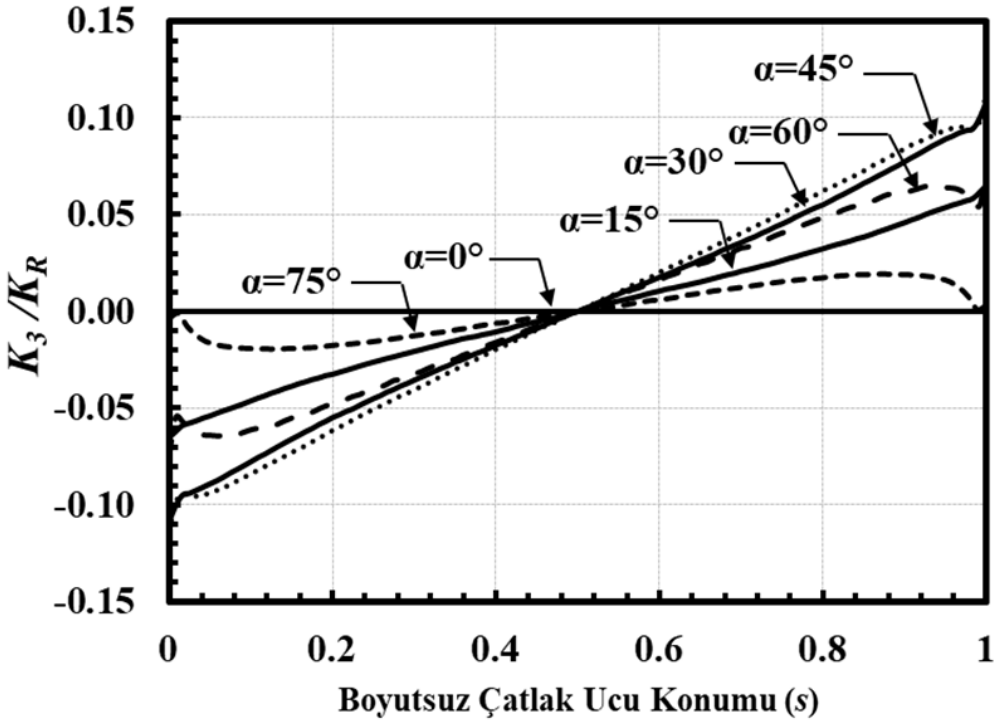
Şekil 2.37. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



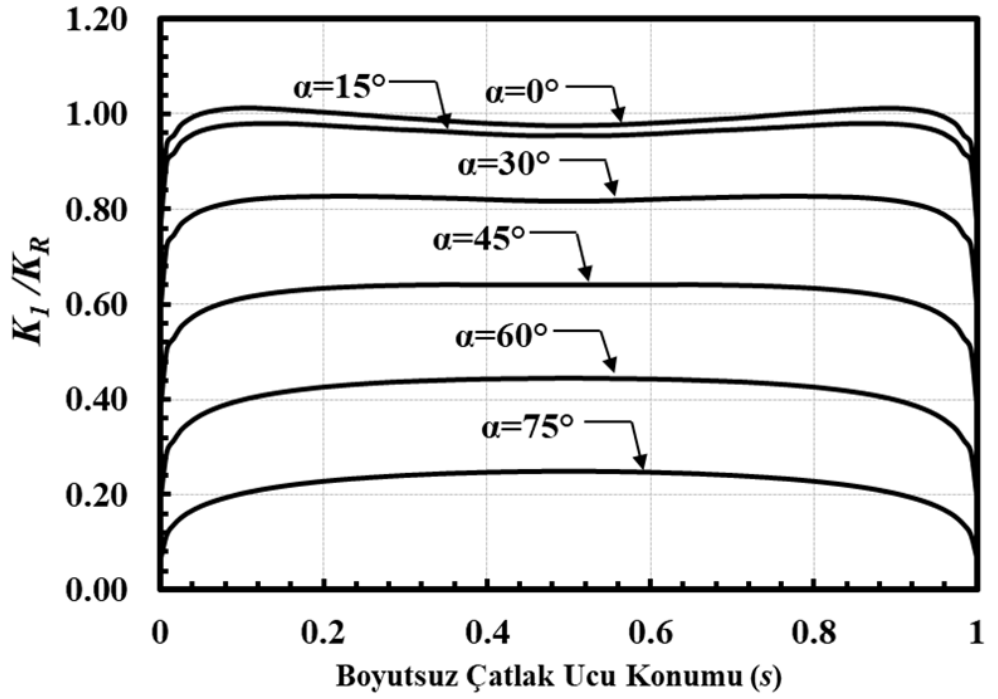
Şekil 2.38. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



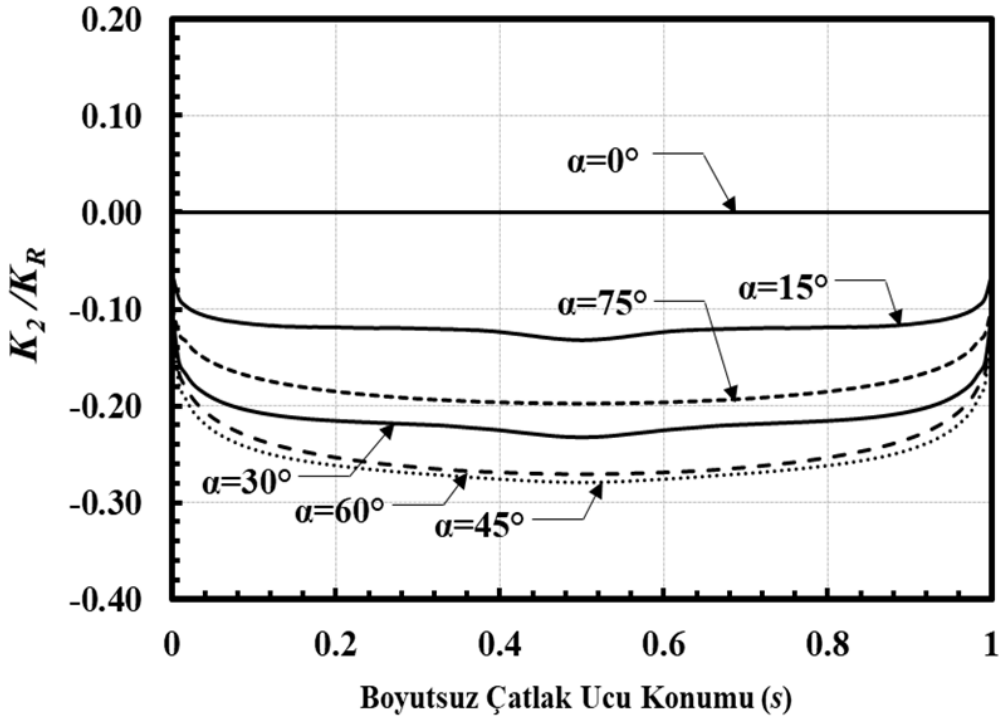
Şekil 2.39. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



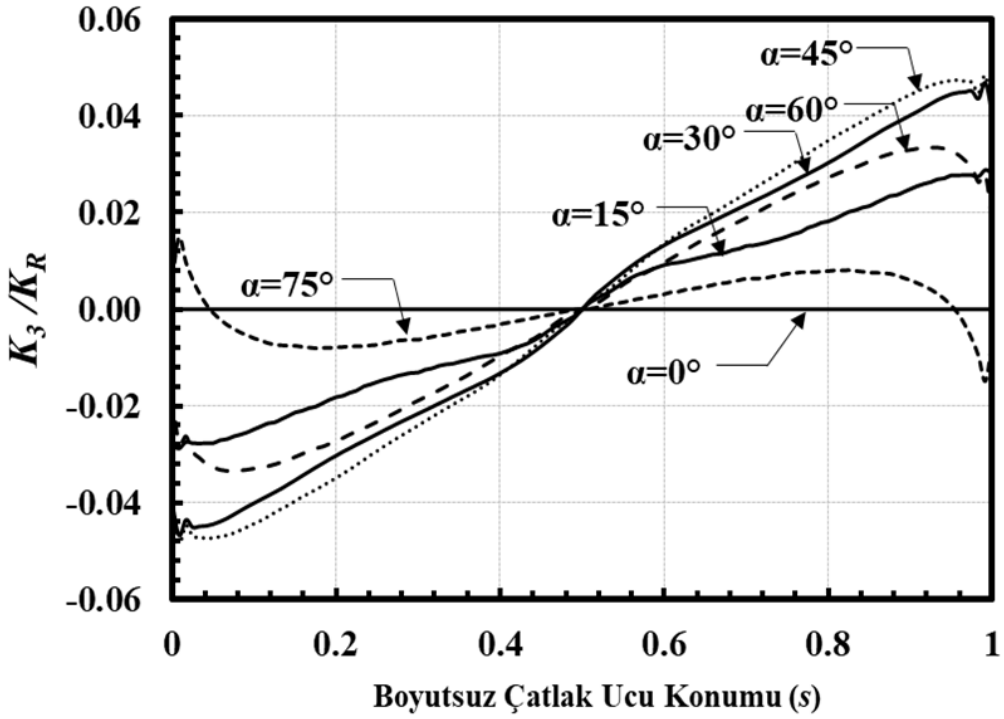
Şekil 2.40. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



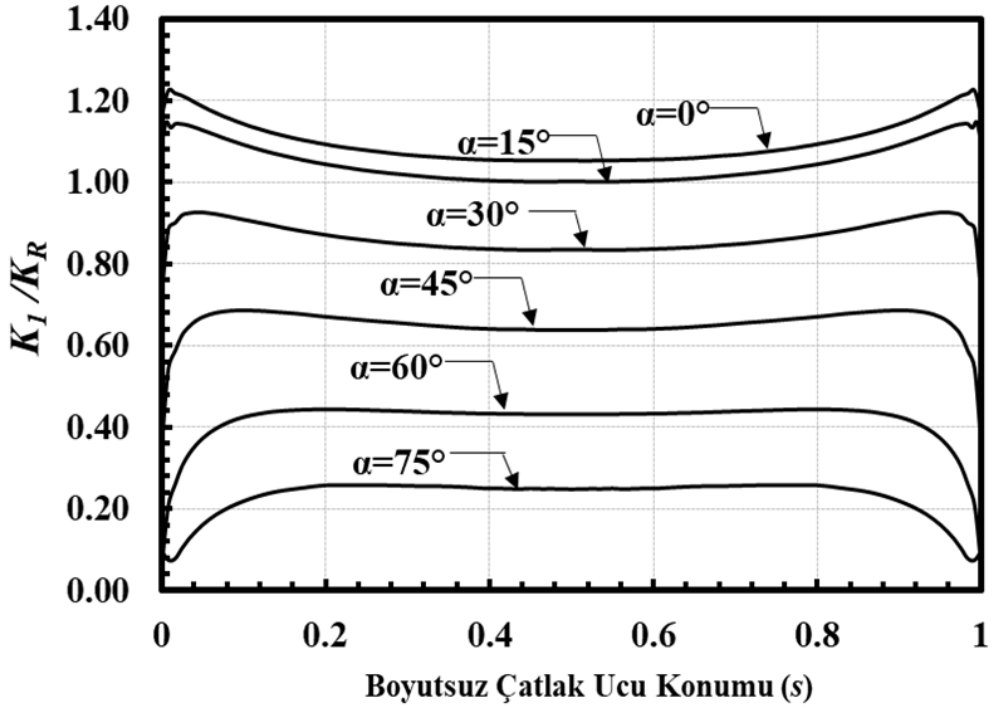
Şekil 2.41. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



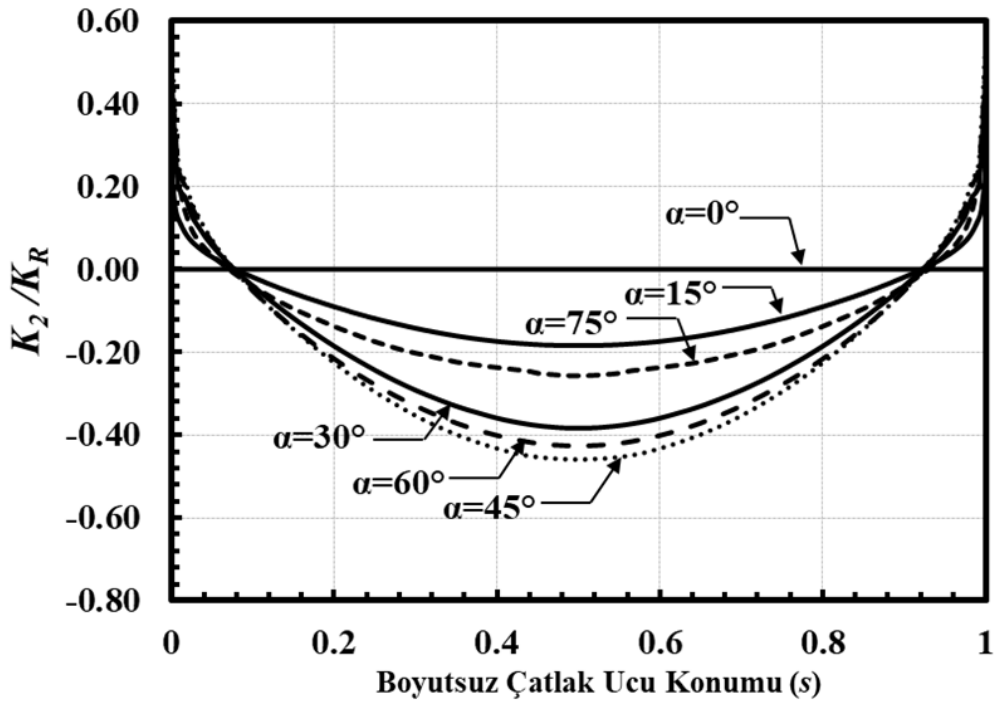
Şekil 2.42. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



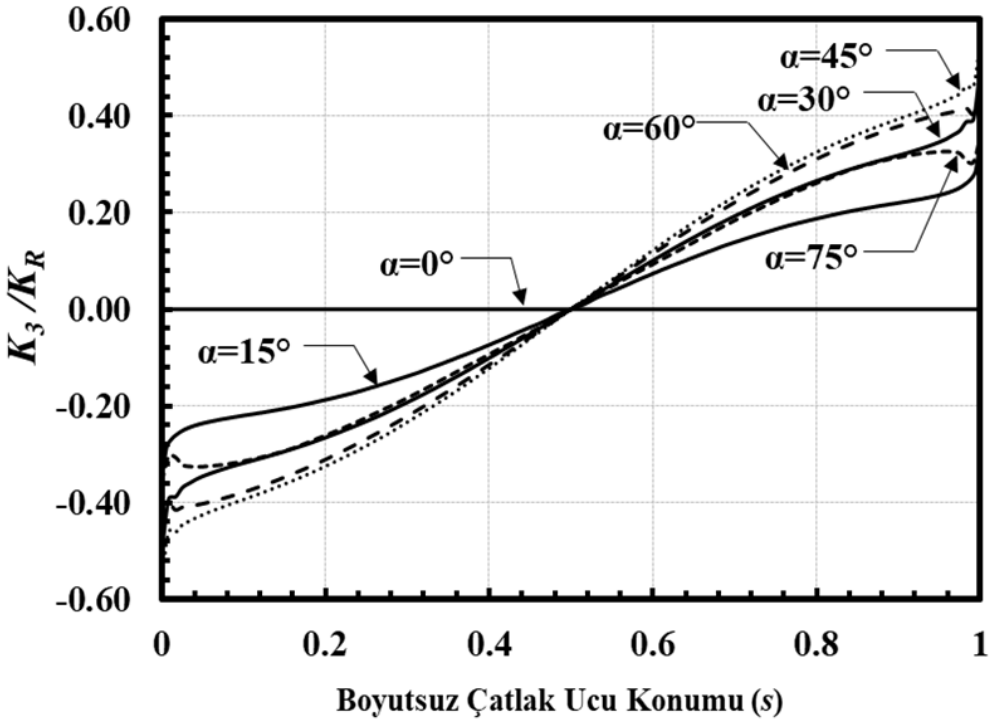
Şekil 2.43. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



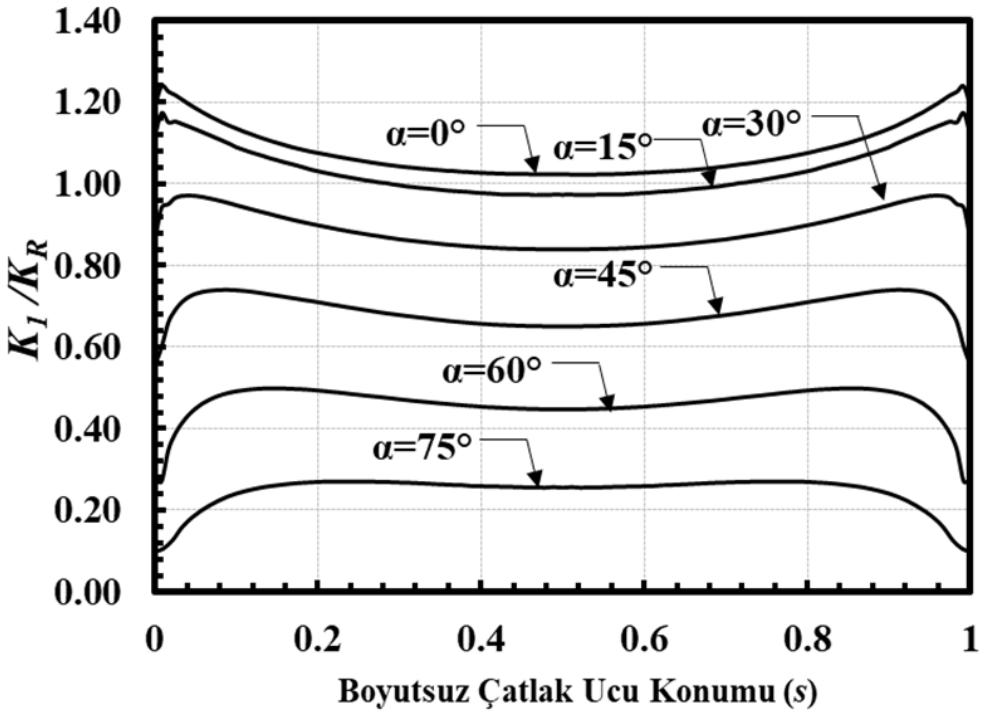
Şekil 2.44. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



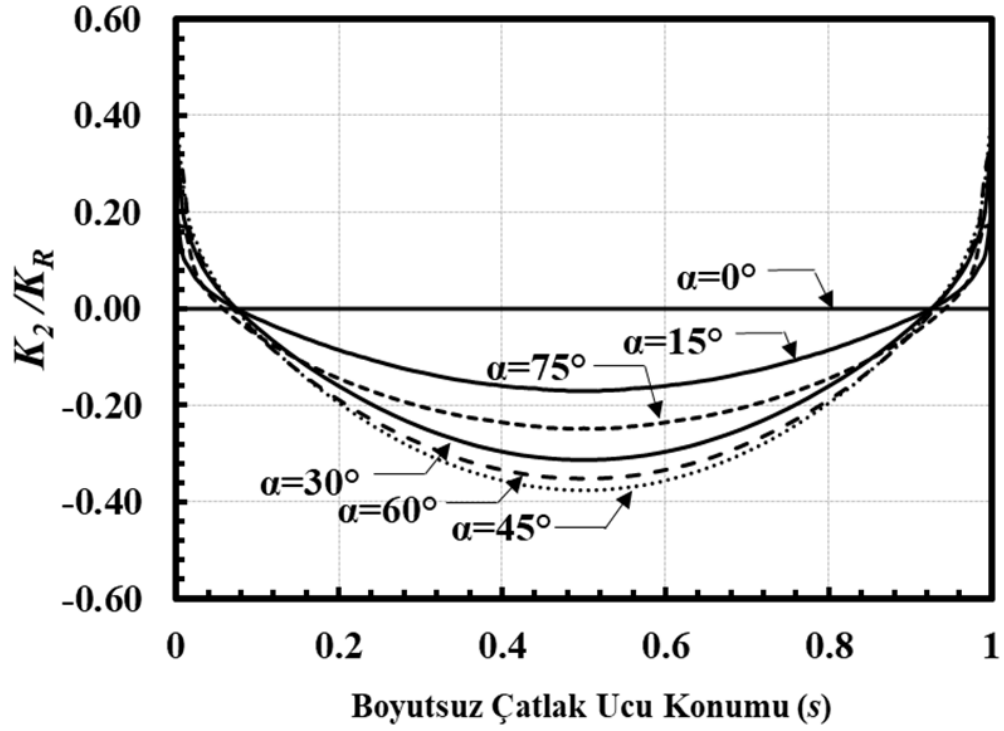
Şekil 2.45. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



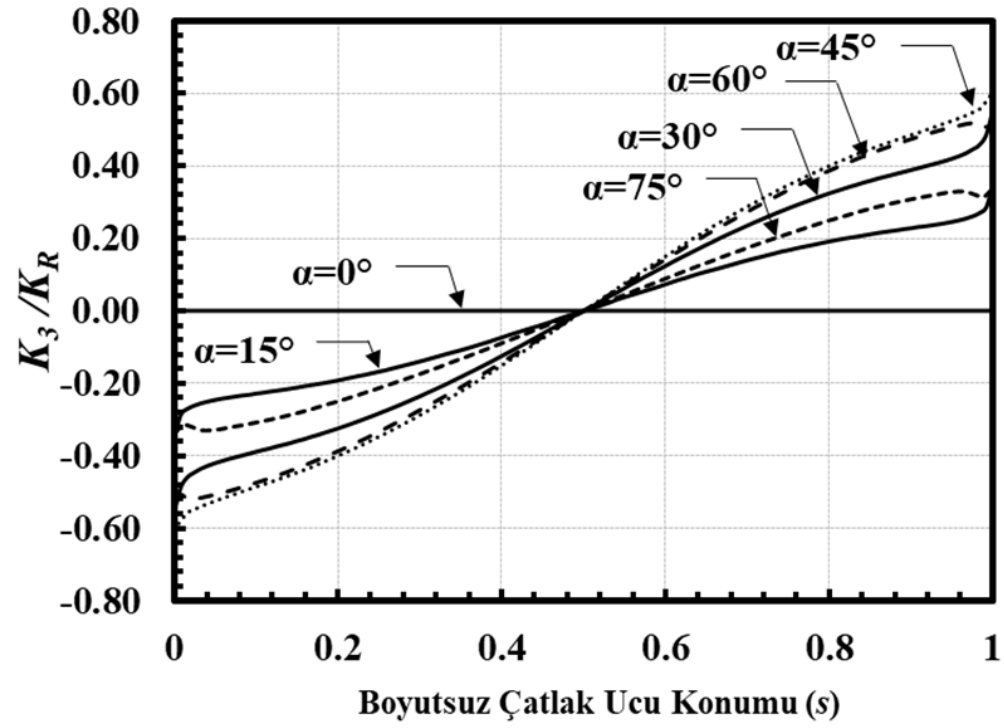
Şekil 2.46. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



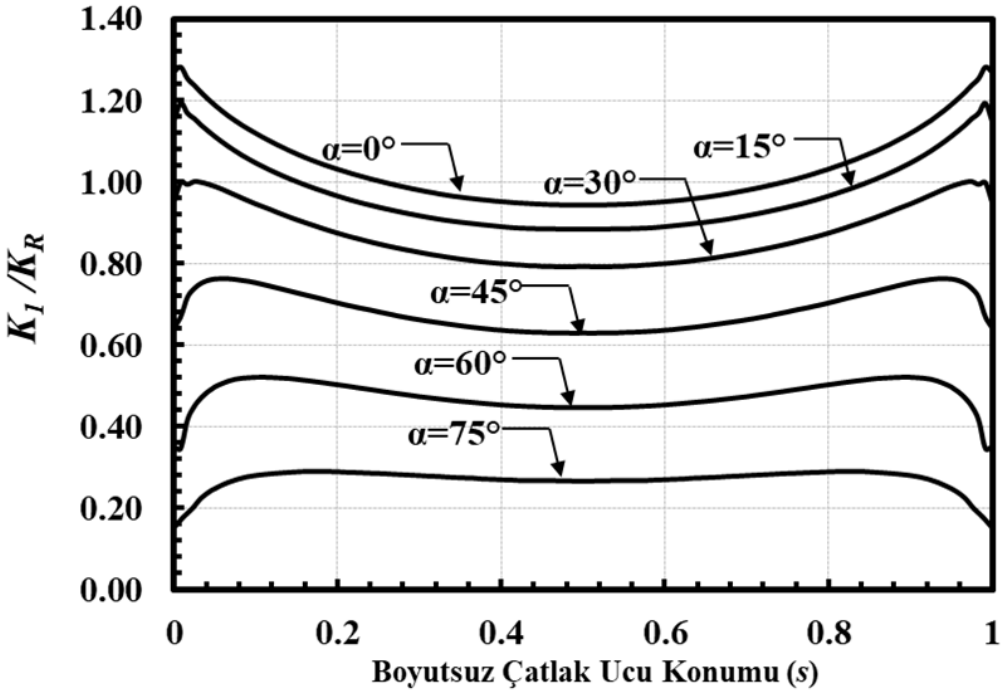
Şekil 2.47. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



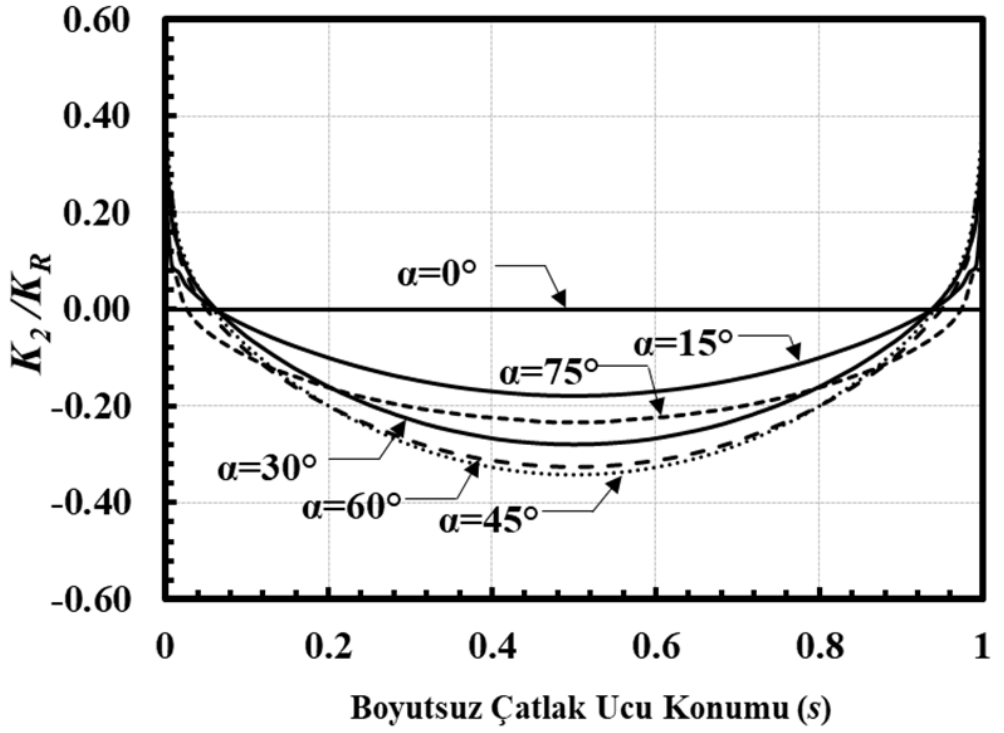
Şekil 2.48. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



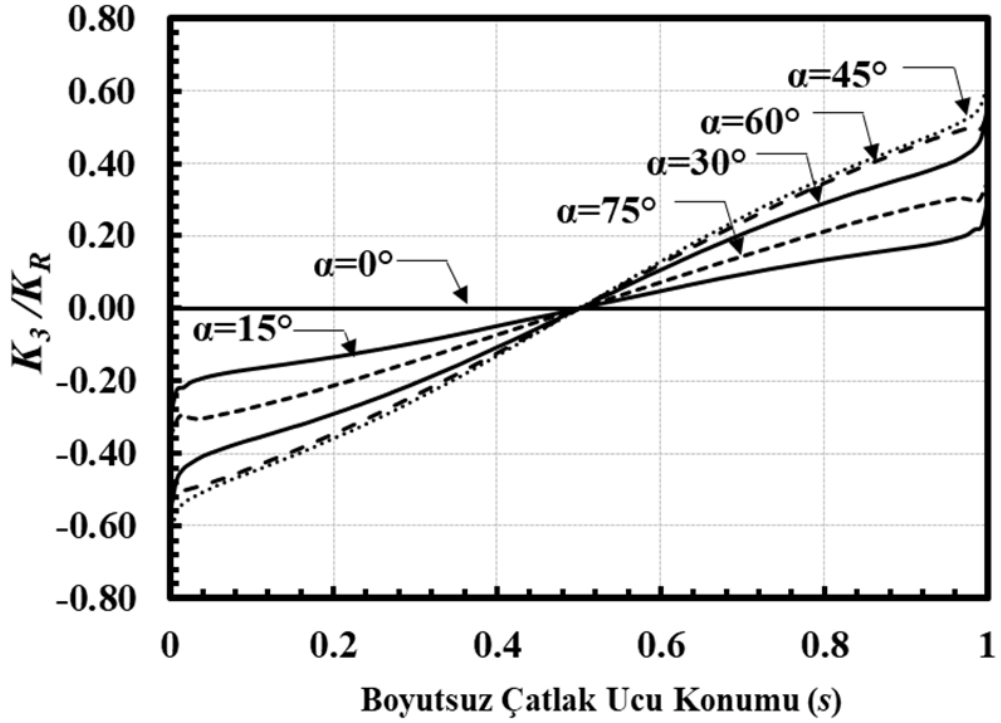
Şekil 2.49. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



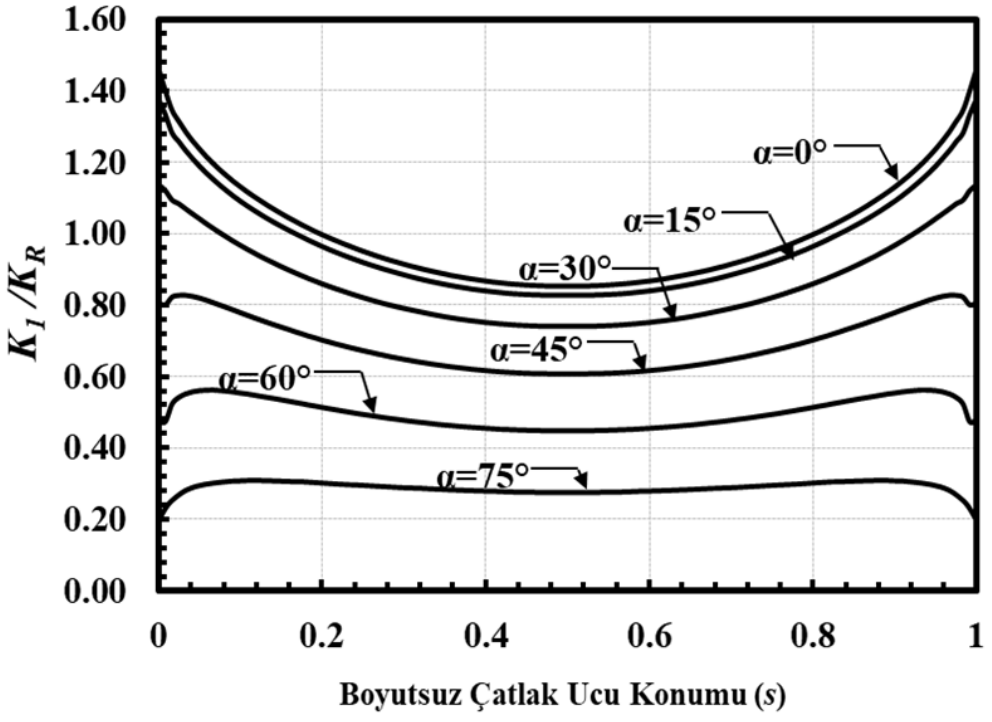
Şekil 2.50. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



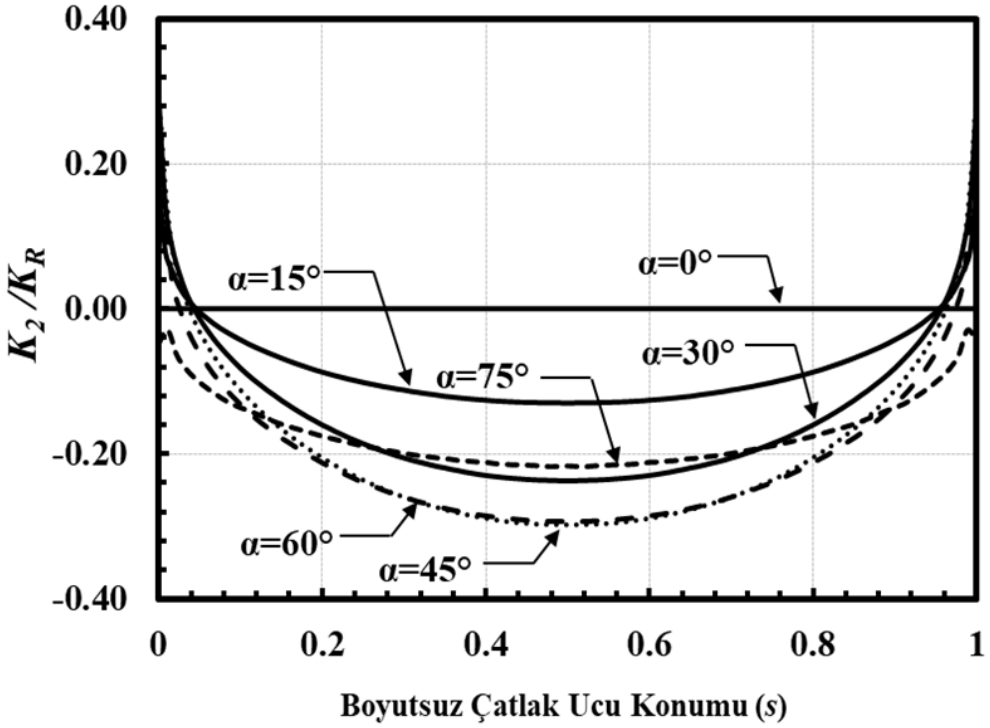
Şekil 2.51. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



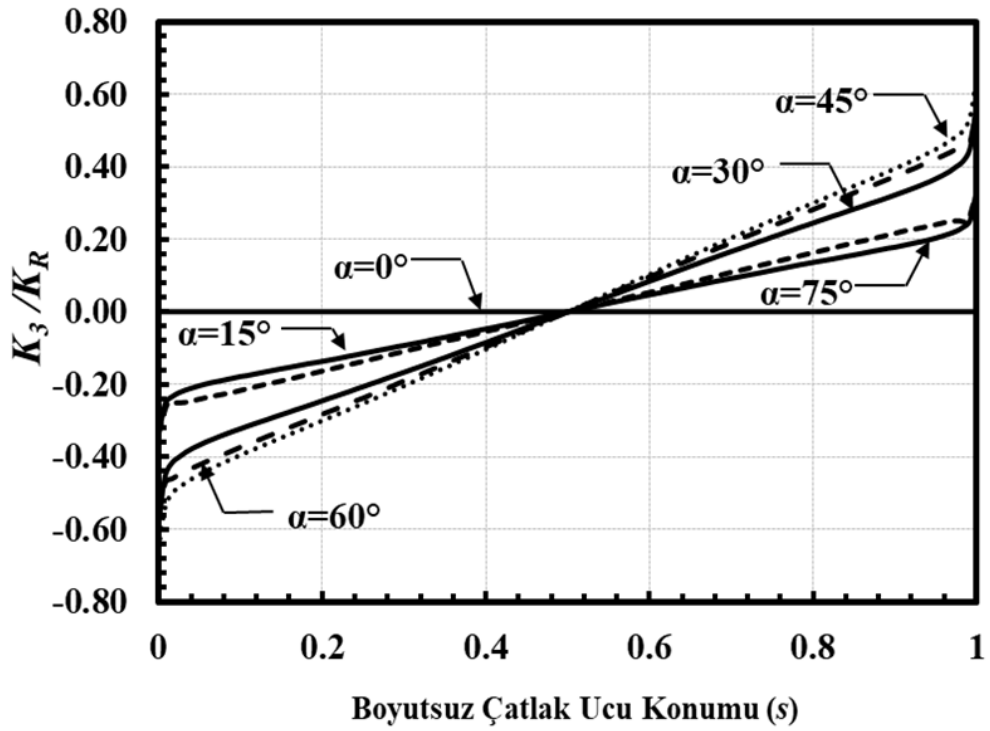
Şekil 2.52. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



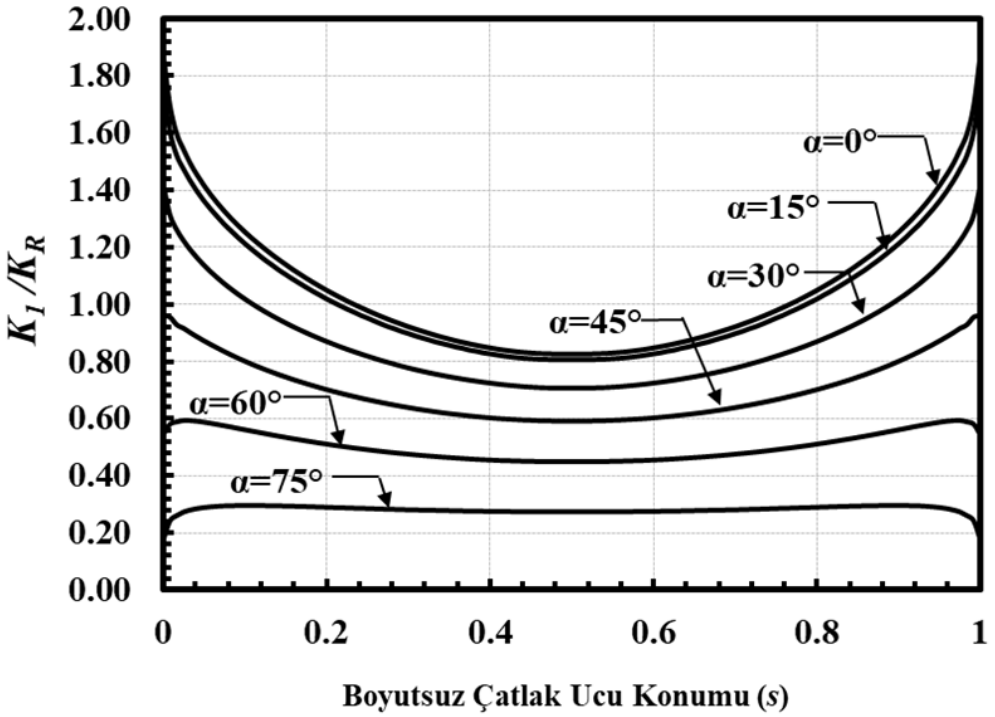
Şekil 2.53. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



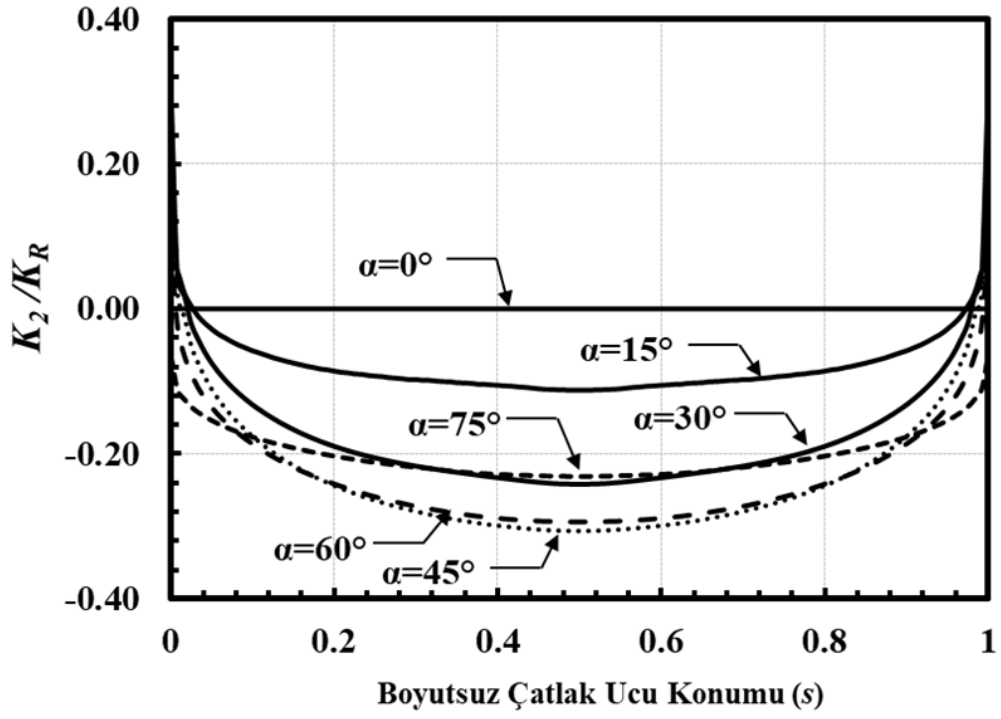
Şekil 2.54. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



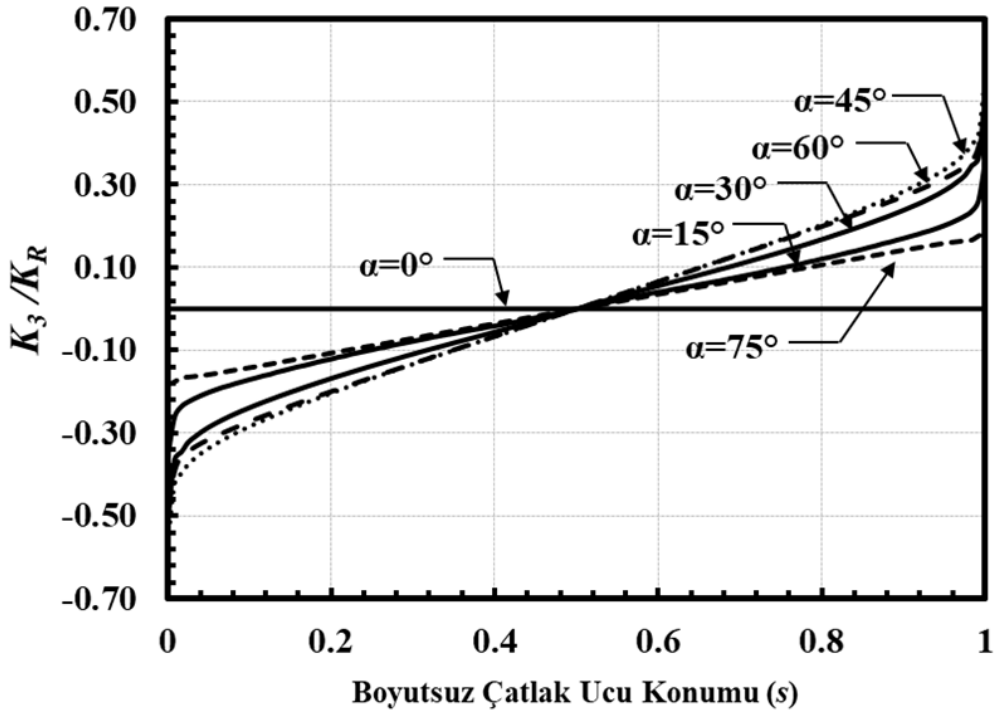
Şekil 2.55. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=0.1, *a/t*=0.5.



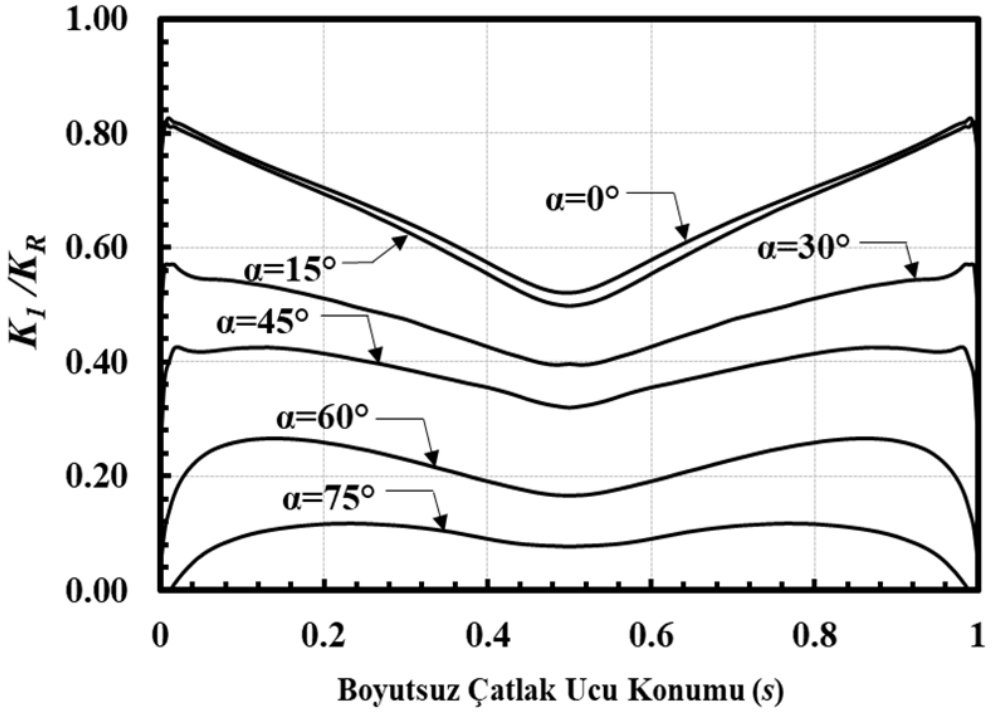
Şekil 2.56. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



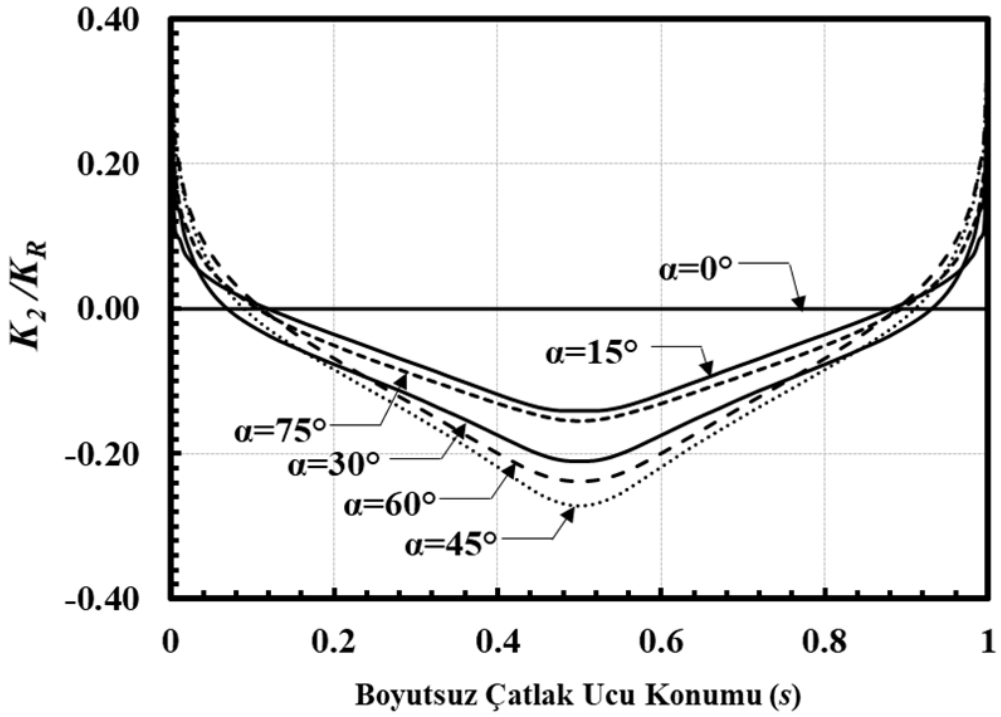
Şekil 2.57. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



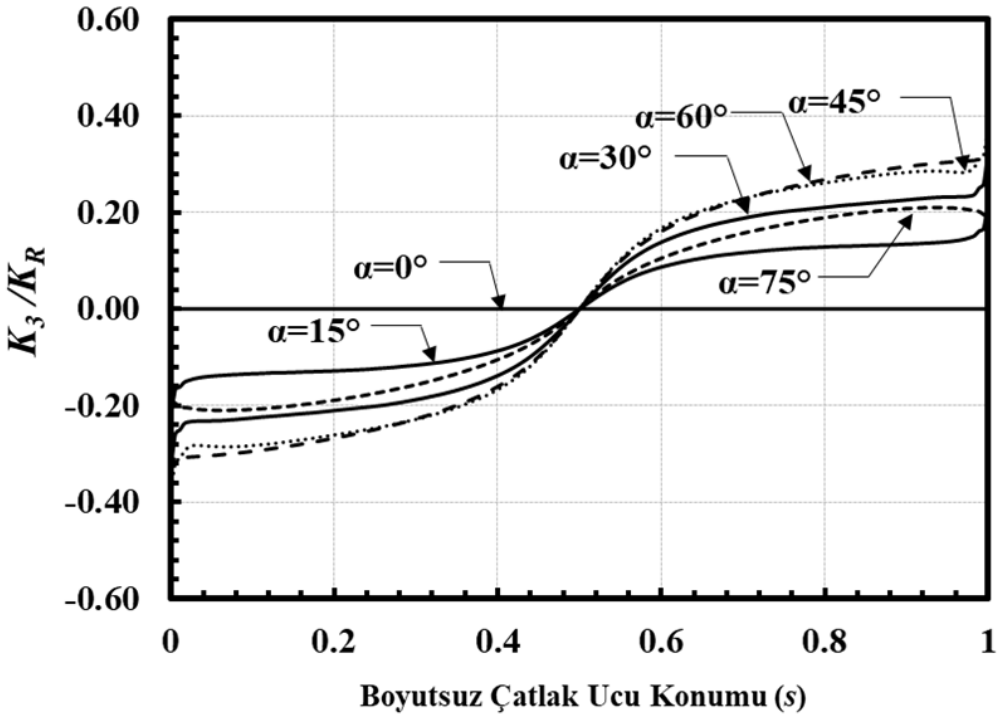
Şekil 2.58. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



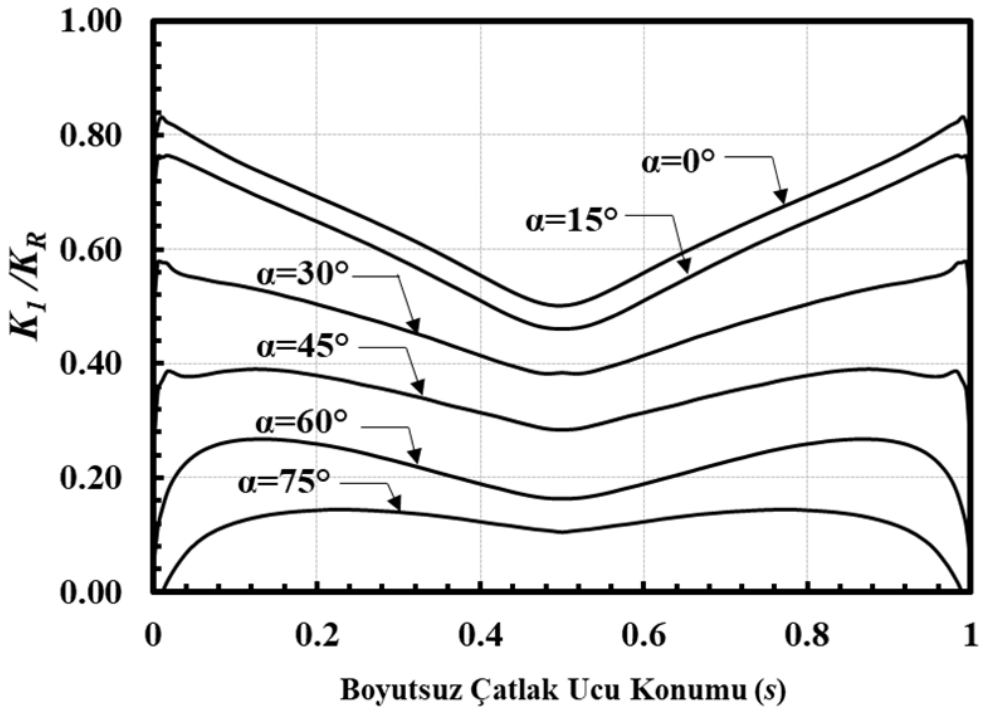
Şekil 2.59. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



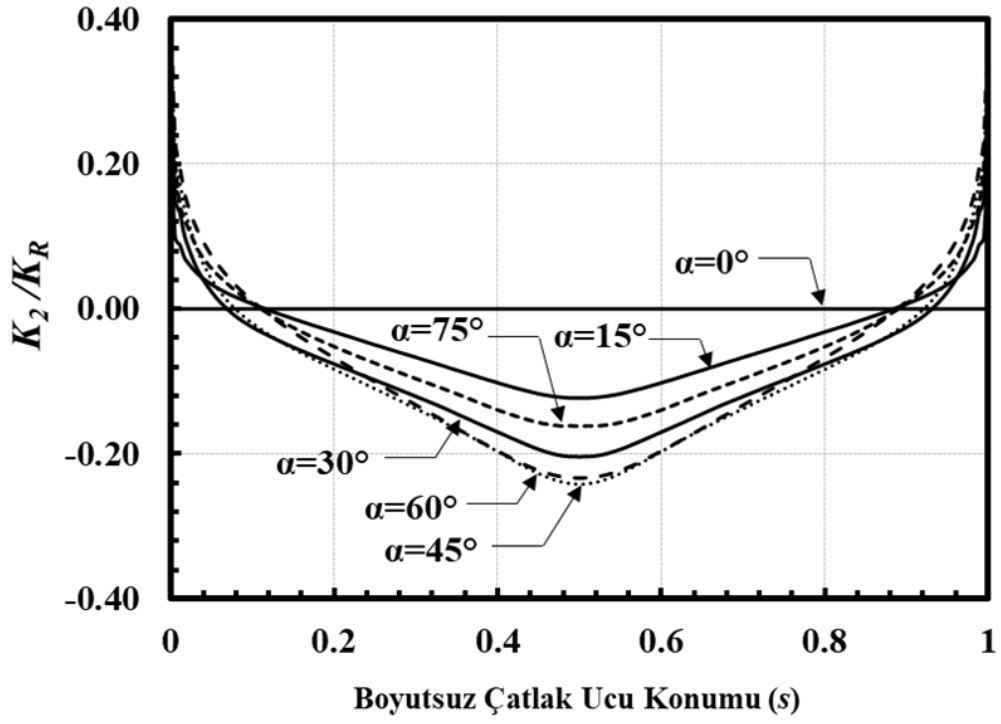
Şekil 2.60. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



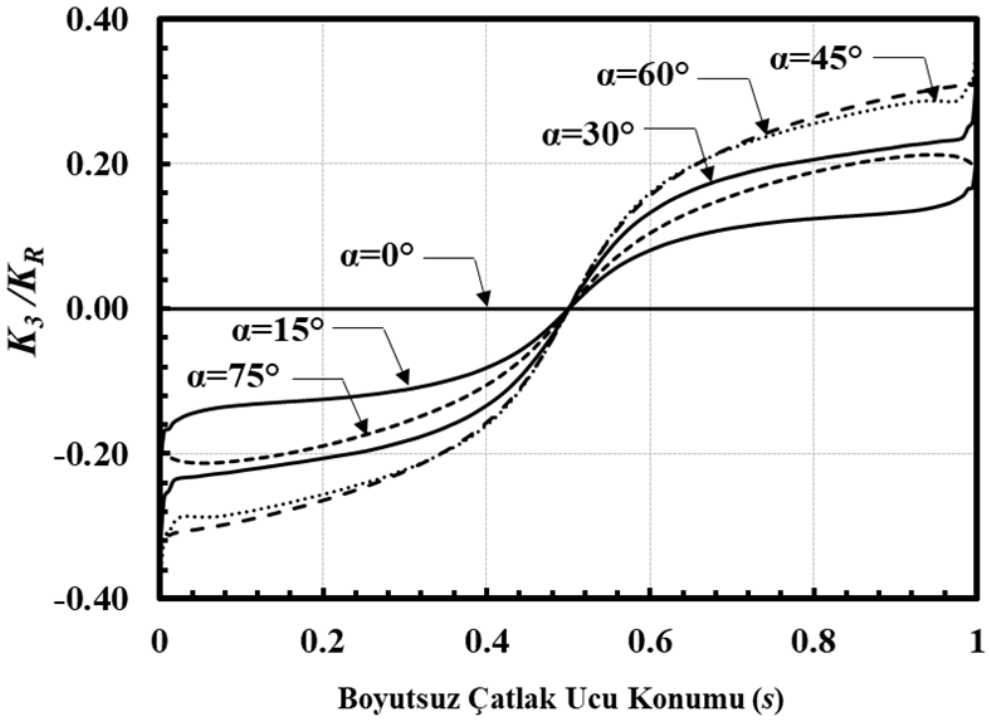
Şekil 2.61. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



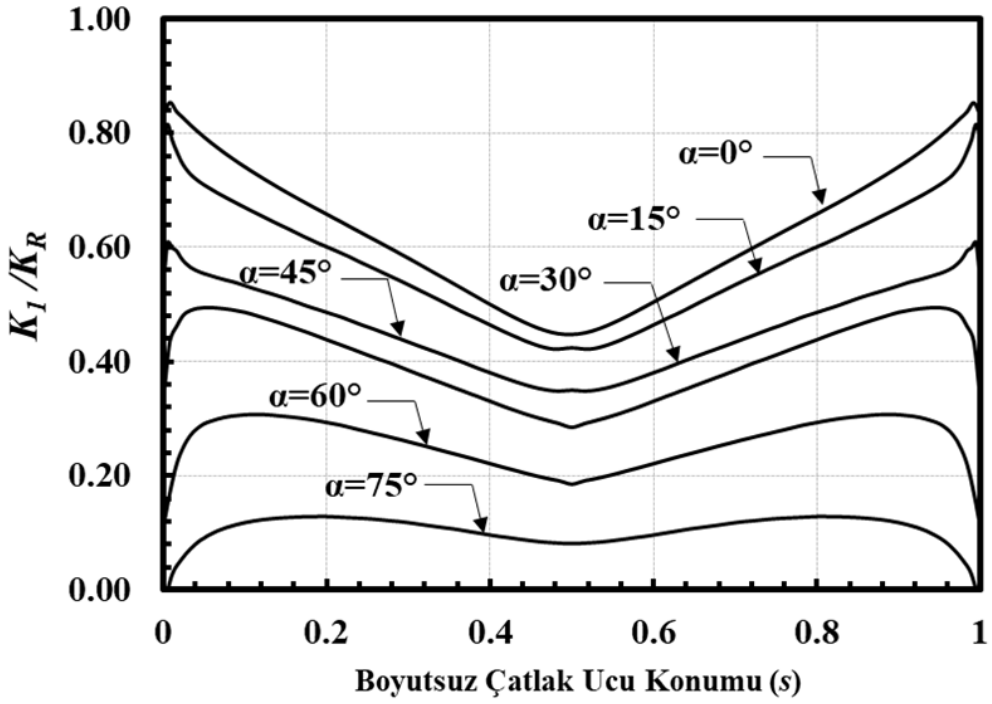
Şekil 2.62. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



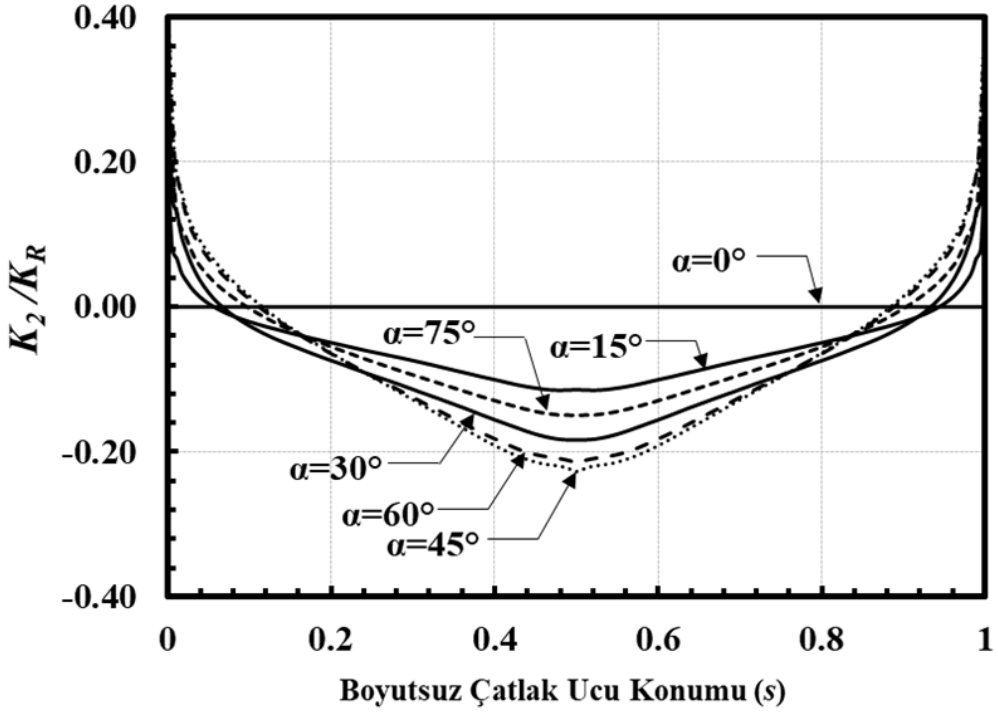
Şekil 2.63. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



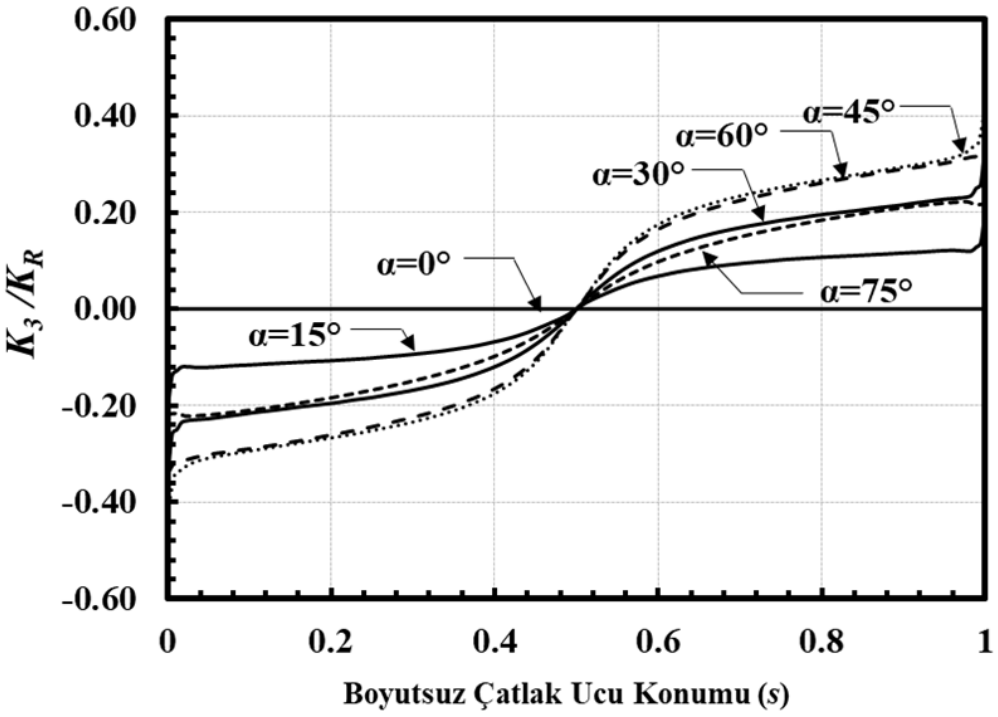
Şekil 2.64. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



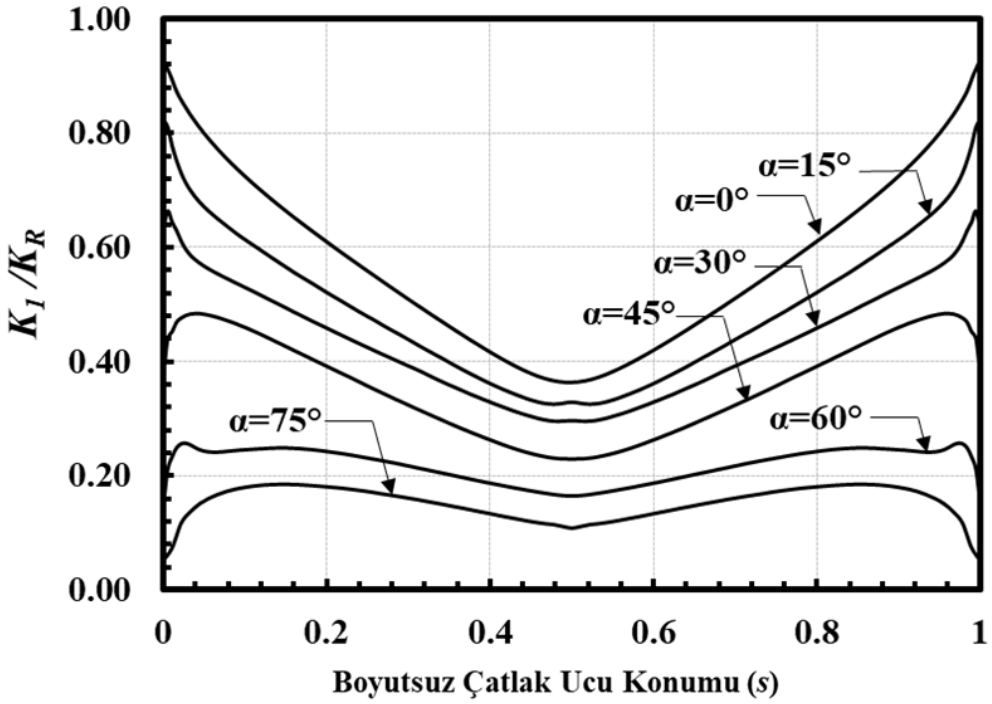
Şekil 2.65. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



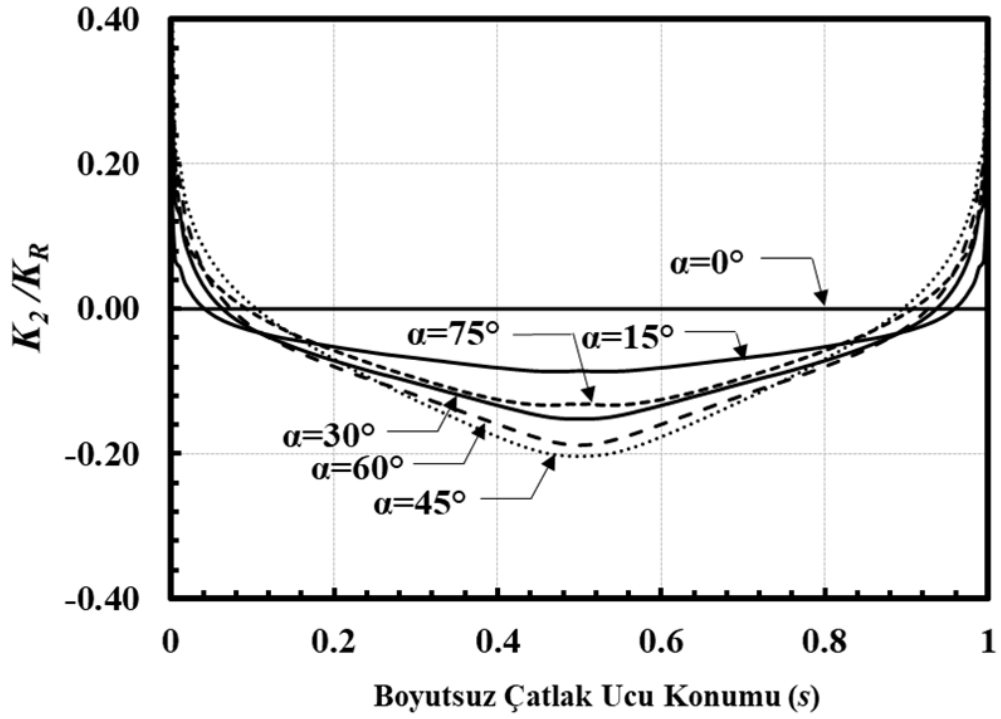
Şekil 2.66. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



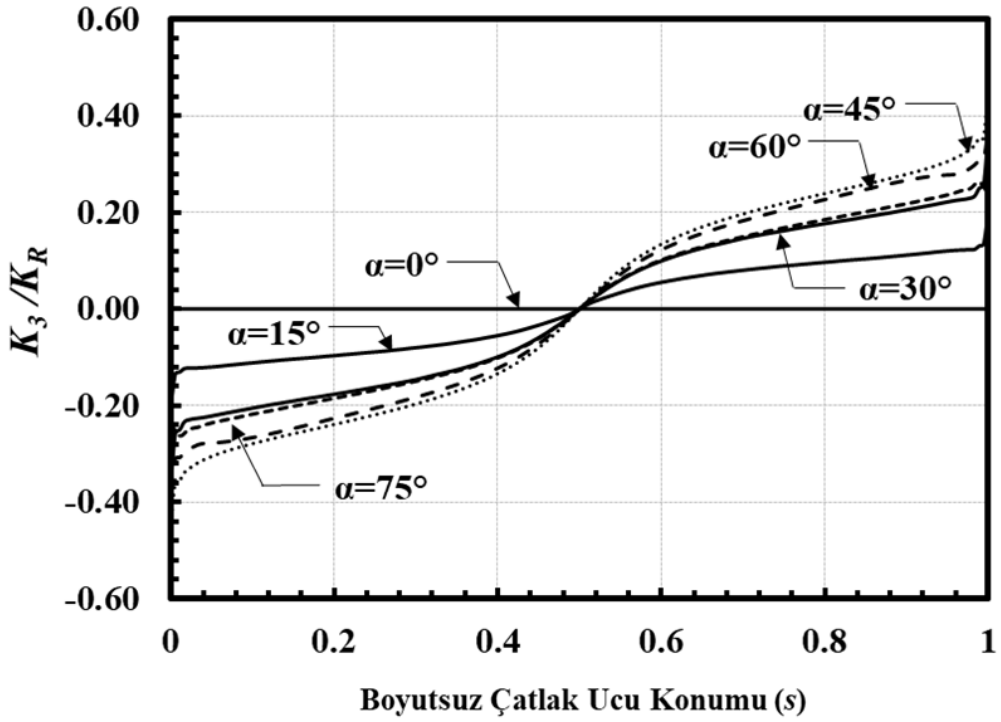
Şekil 2.67. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



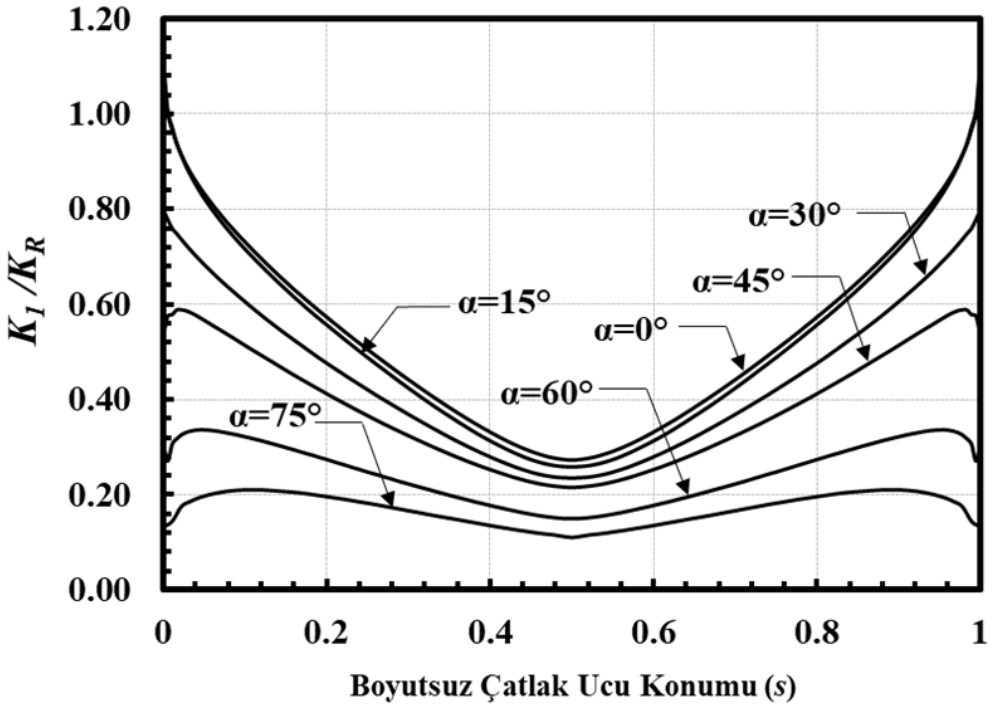
Şekil 2.68. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



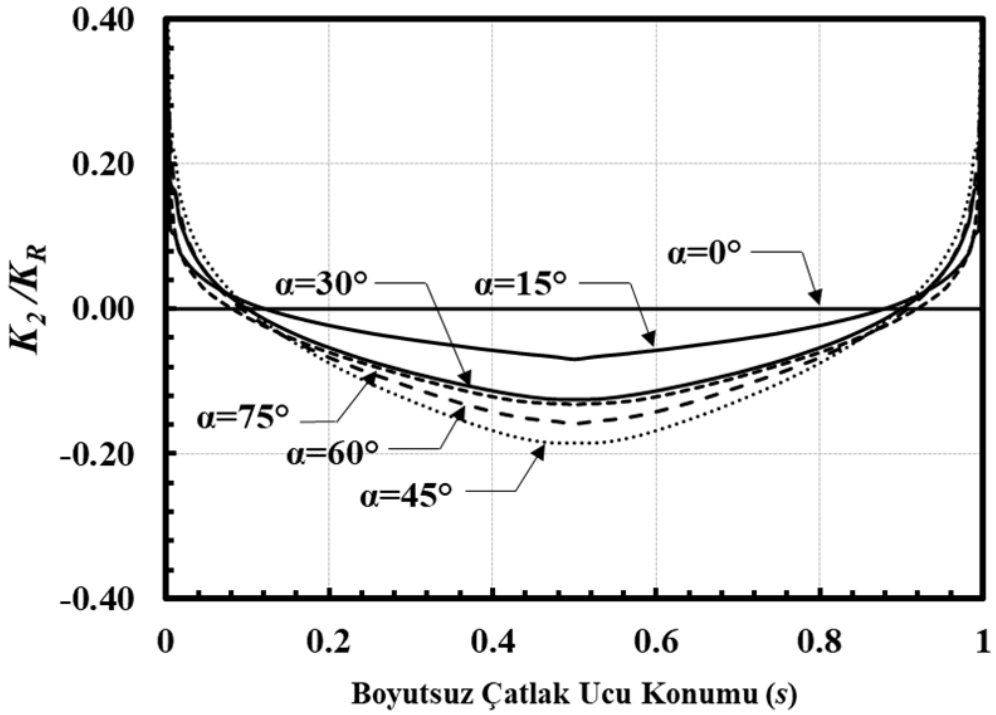
Şekil 2.69. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



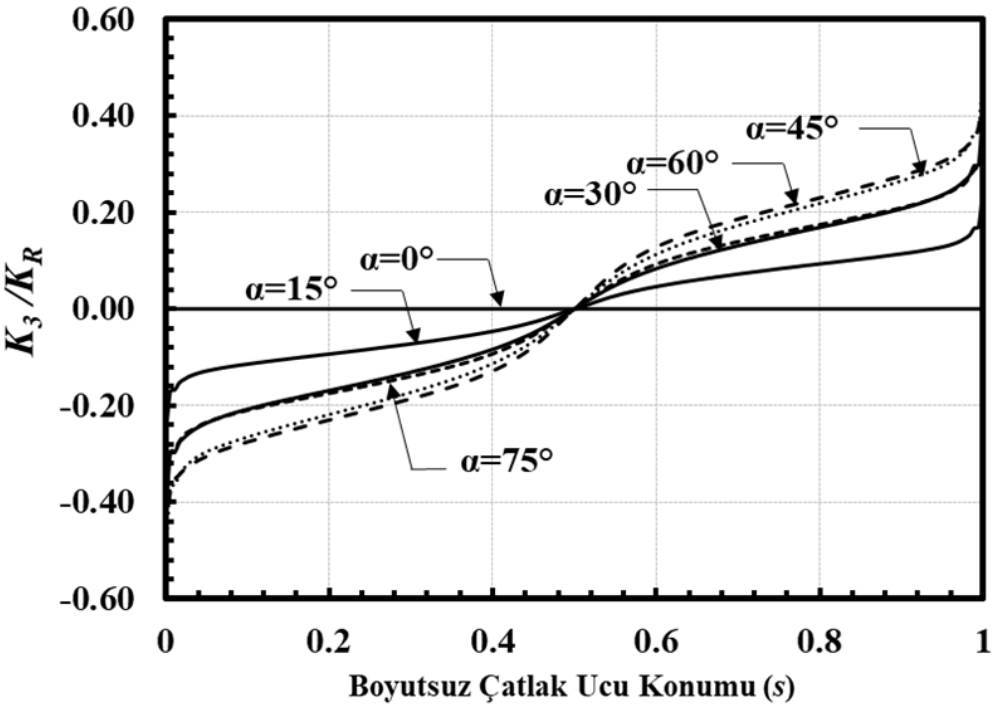
Şekil 2.70. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



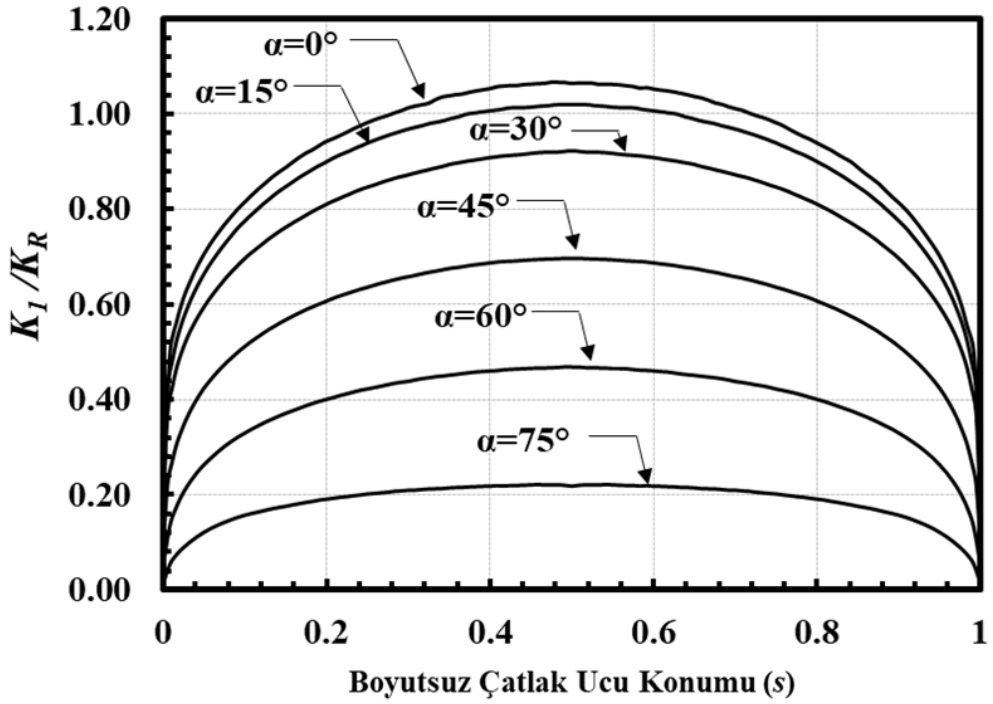
Şekil 2.71. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



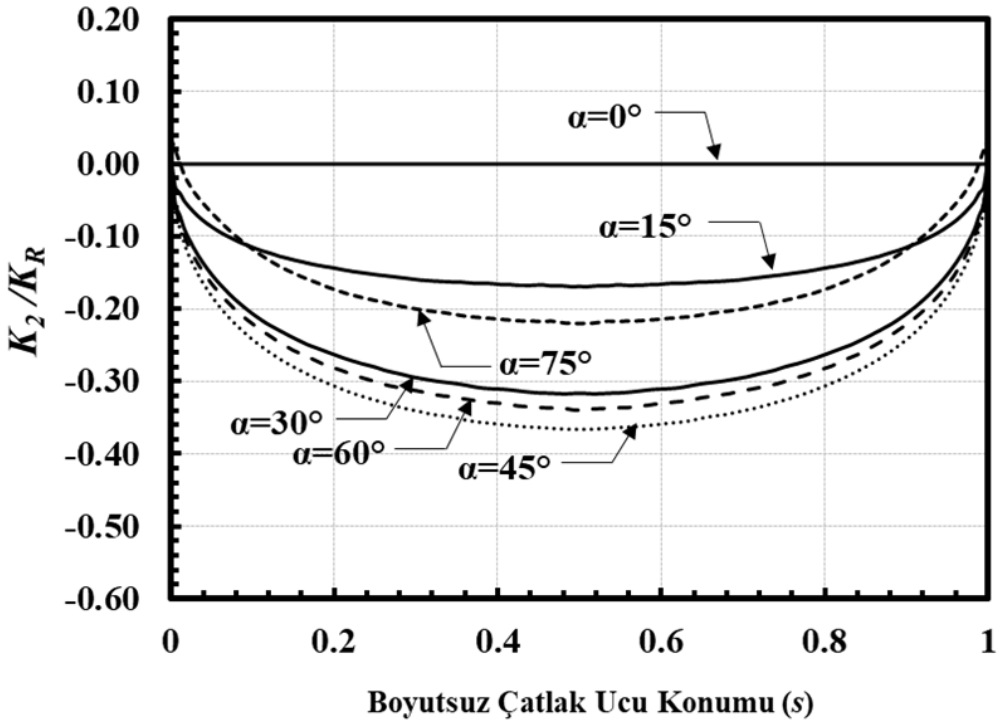
Şekil 2.72. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



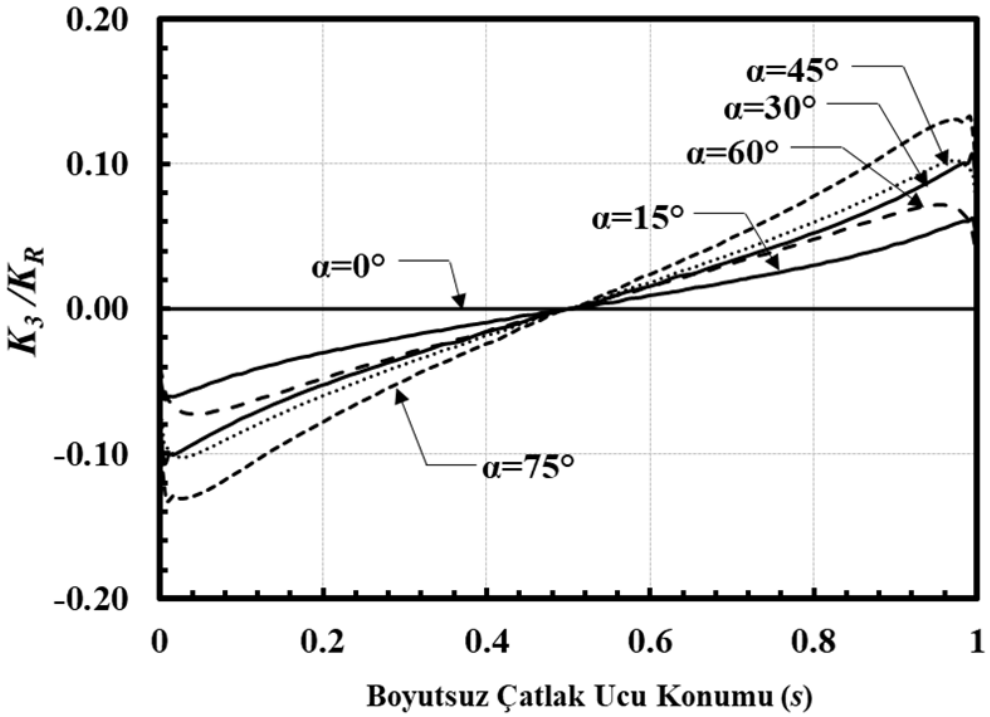
Şekil 2.73. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



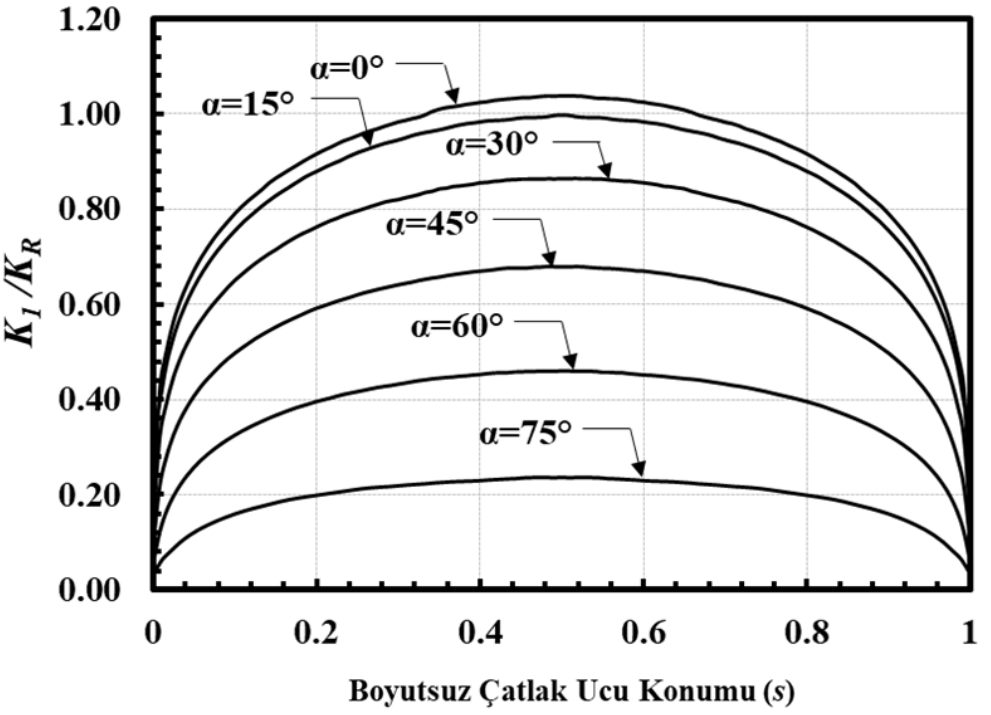
Şekil 2.74. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



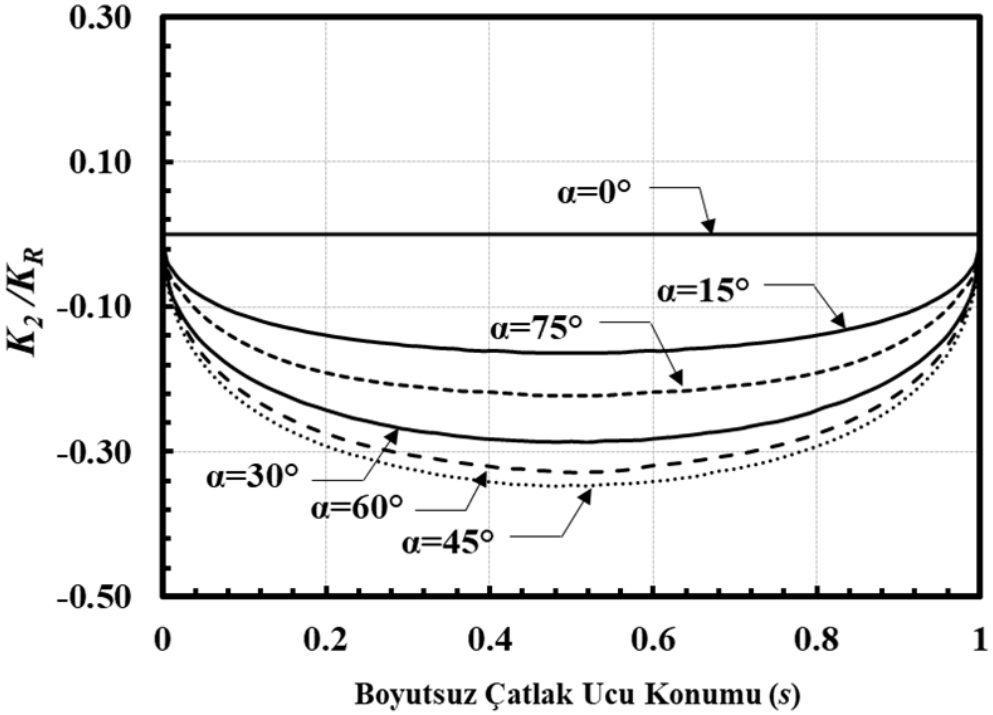
Şekil 2.75. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



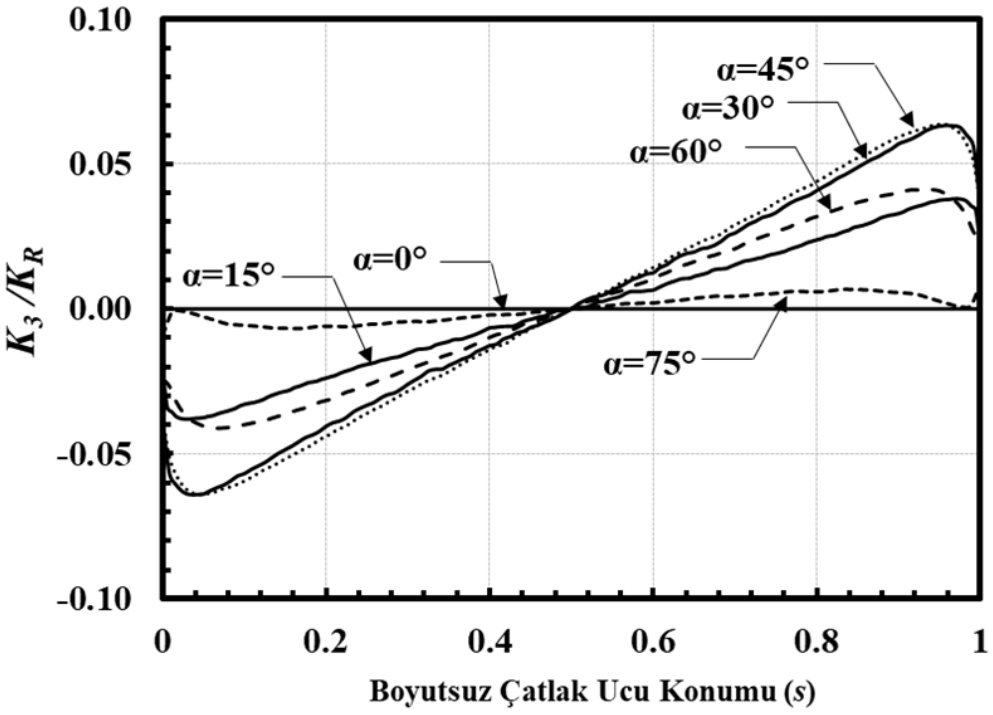
Şekil 2.76. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



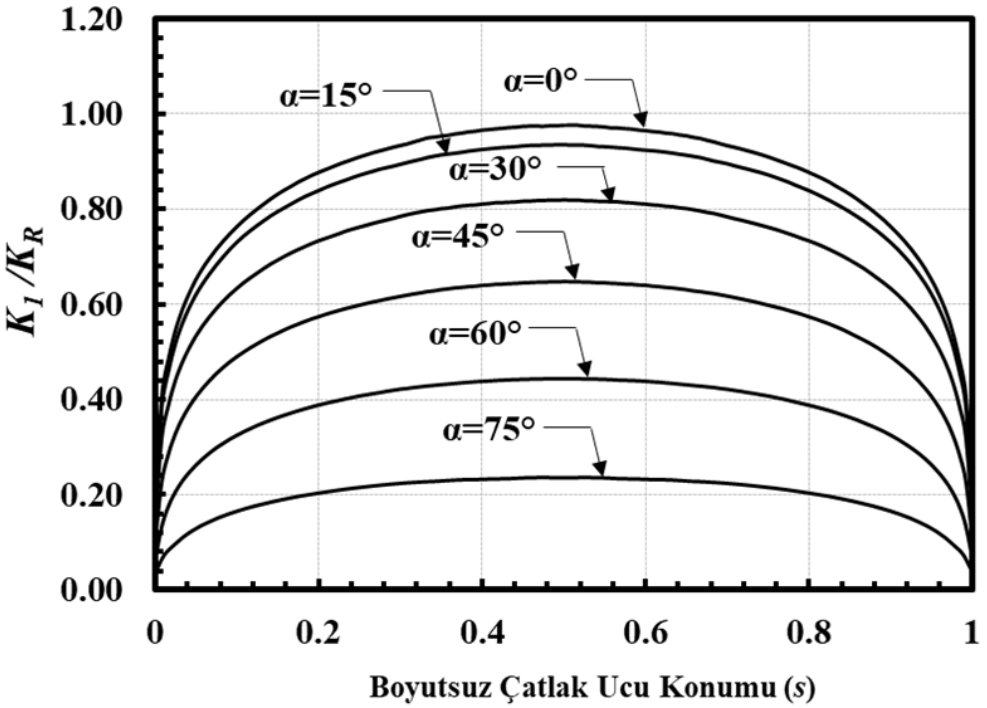
Şekil 2.77. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



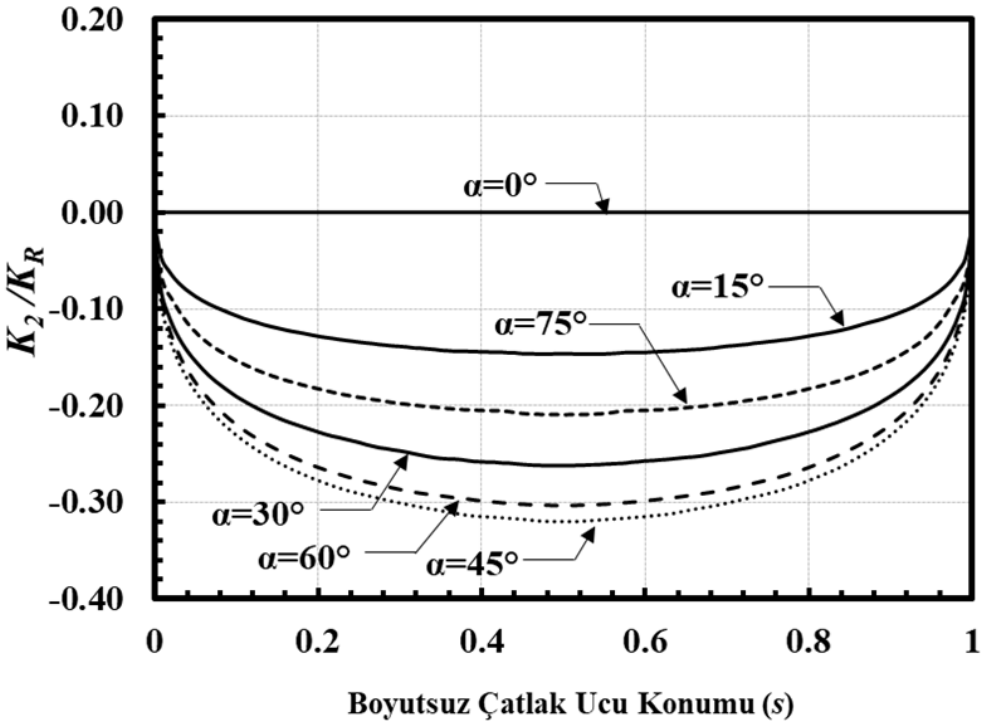
Şekil 2.78. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



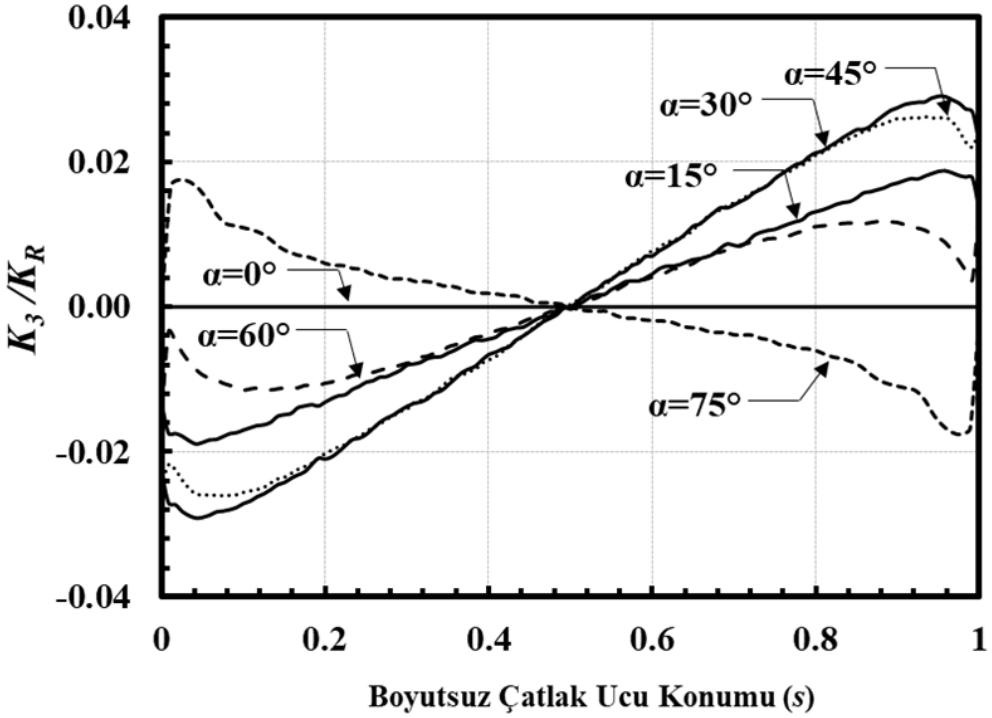
Şekil 2.79. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



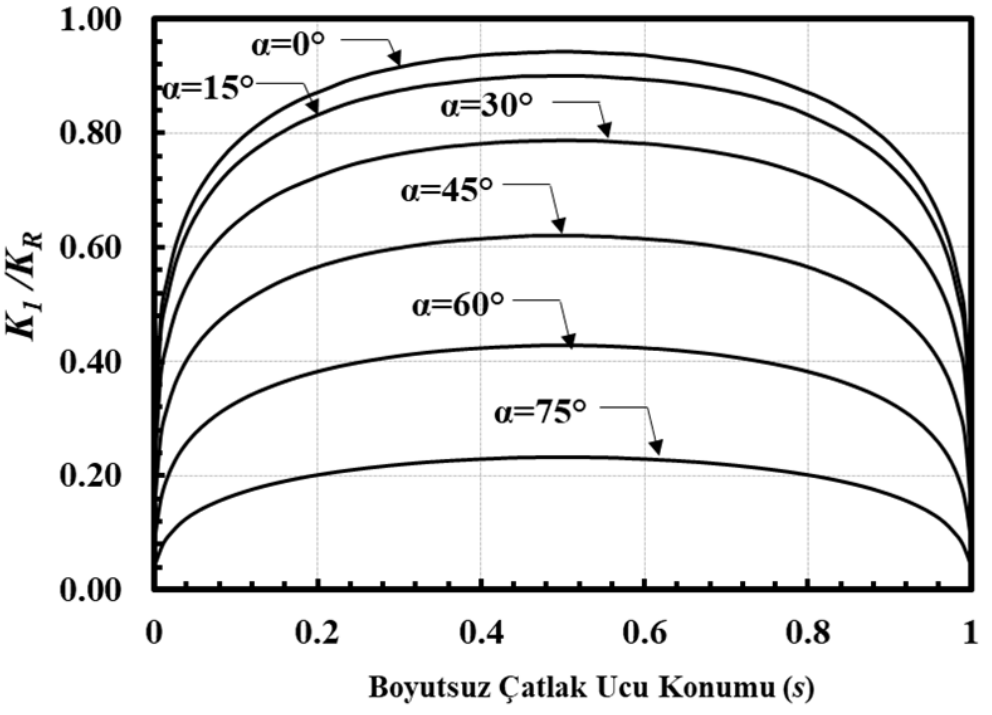
Şekil 2.80. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



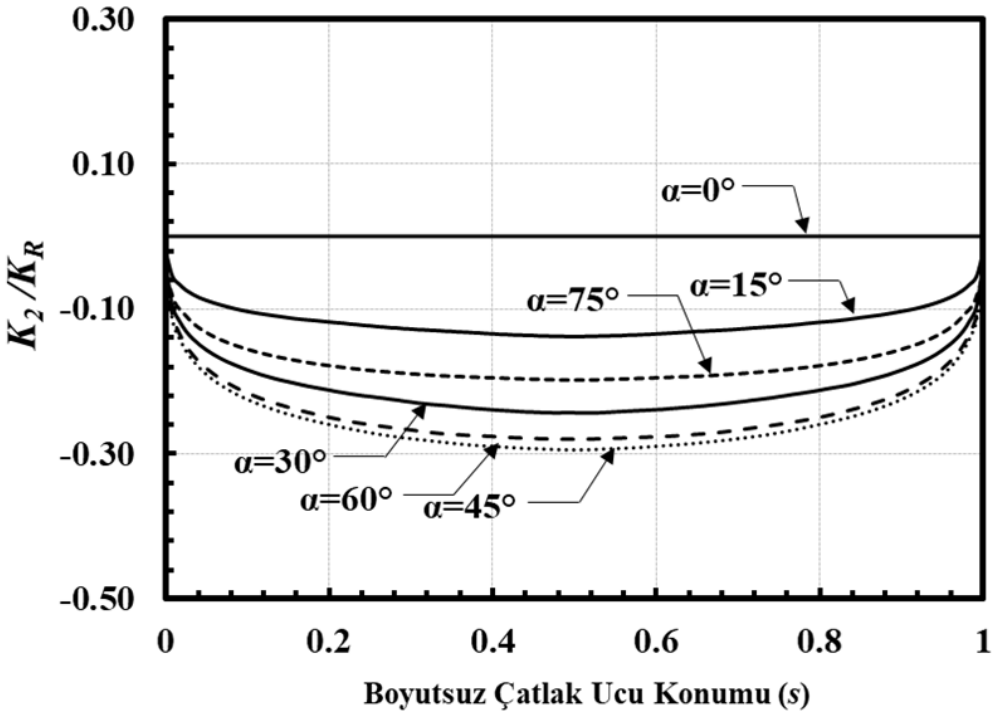
Şekil 2.81. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



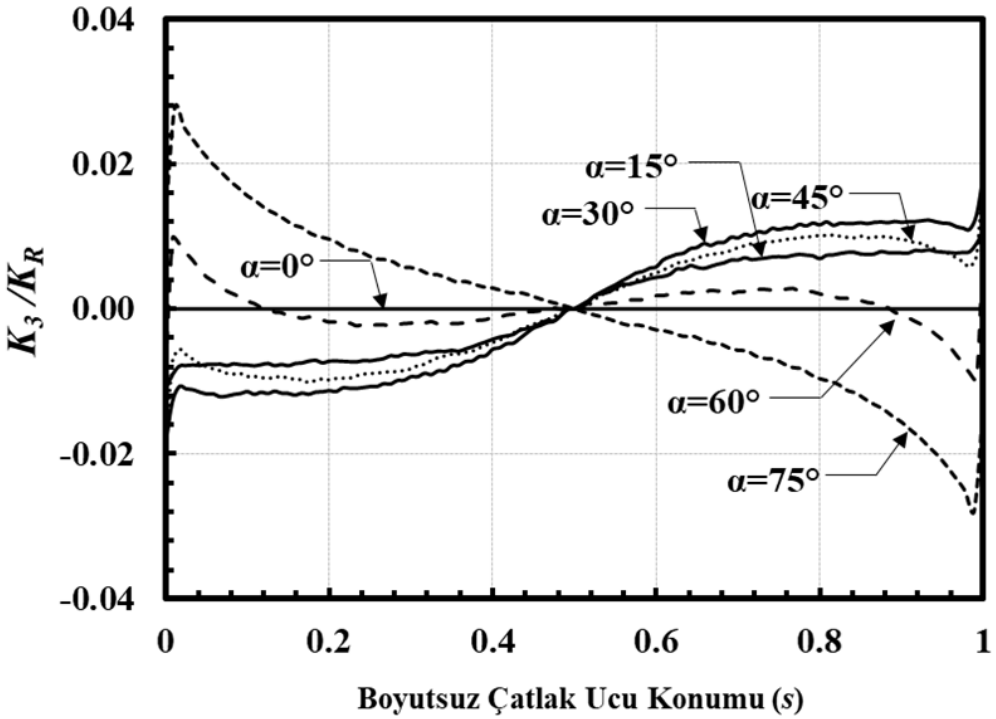
Şekil 2.82. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



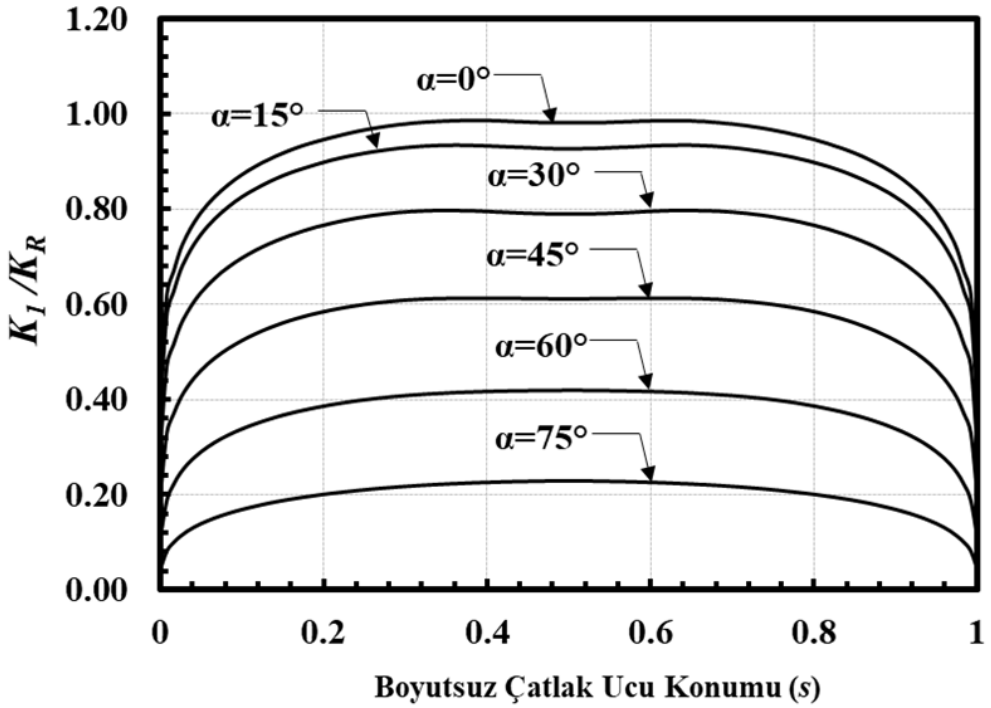
Şekil 2.83. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



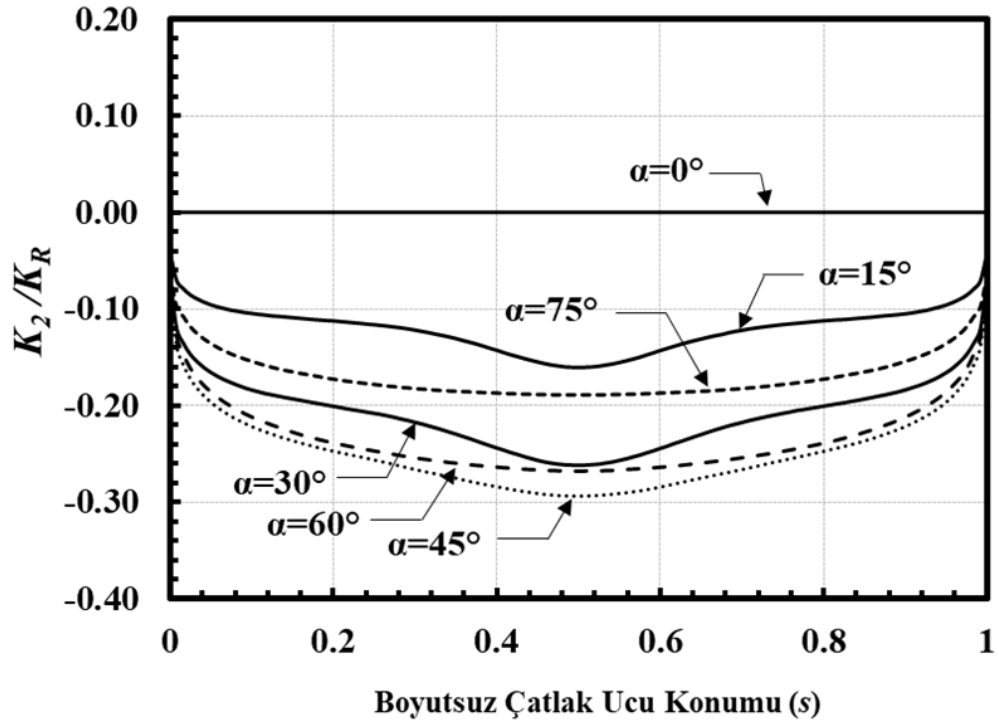
Şekil 2.84. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



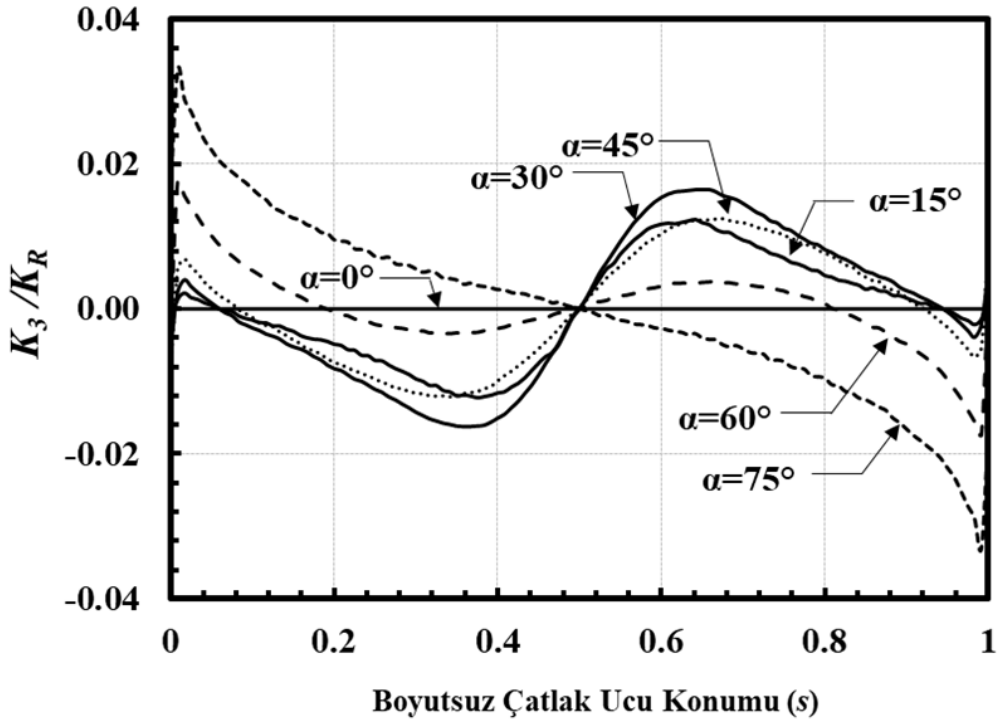
Şekil 2.85. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



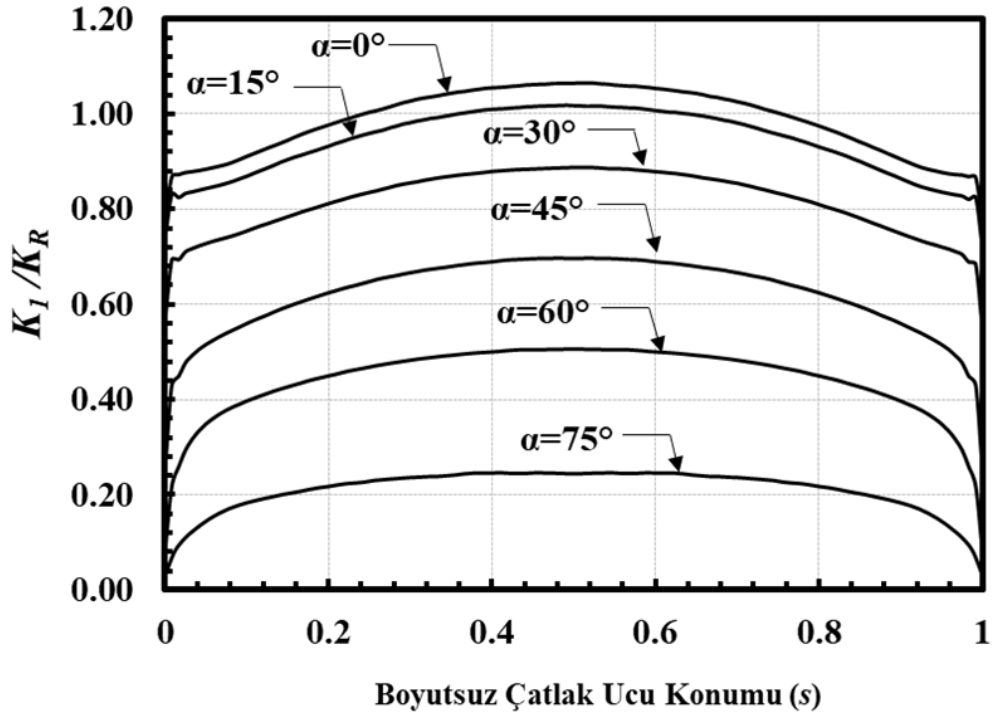
Şekil 2.86. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



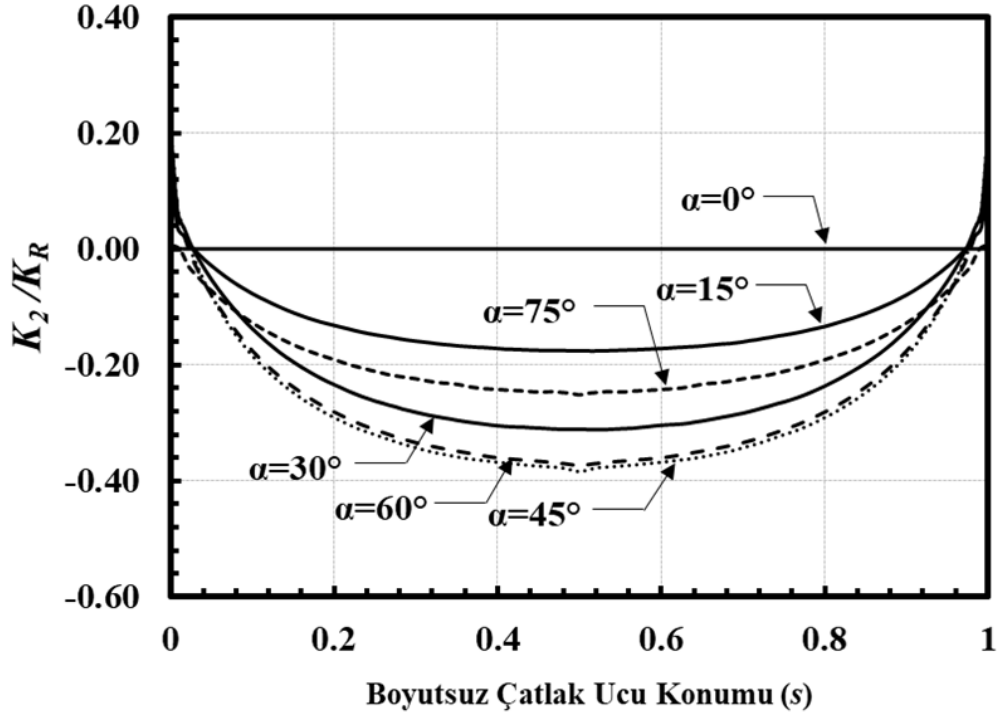
Şekil 2.87. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



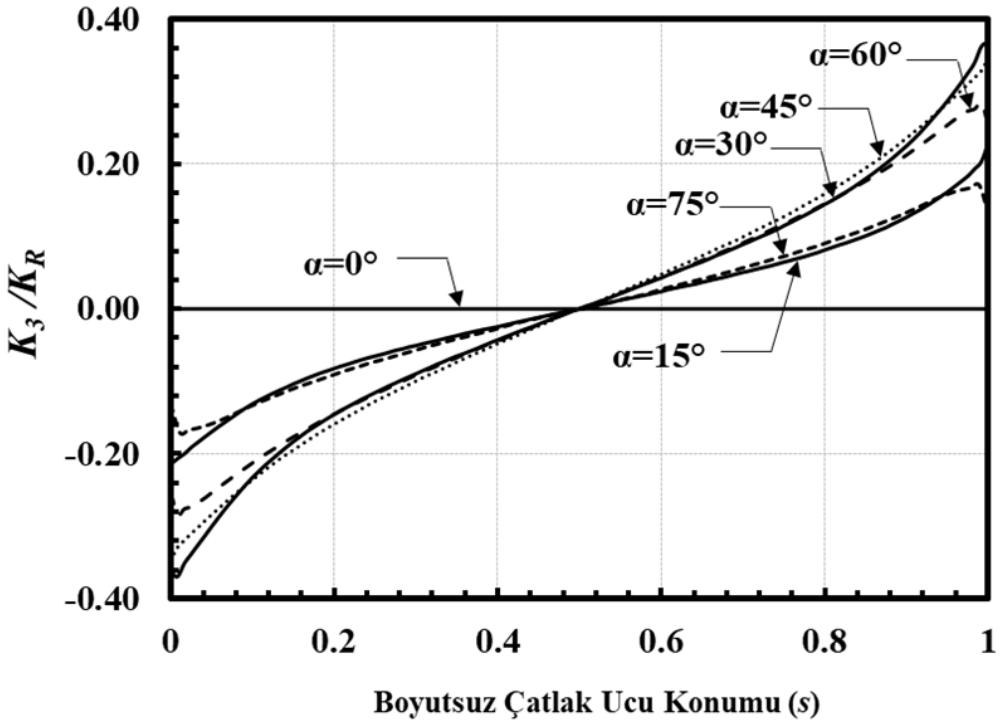
Şekil 2.88. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



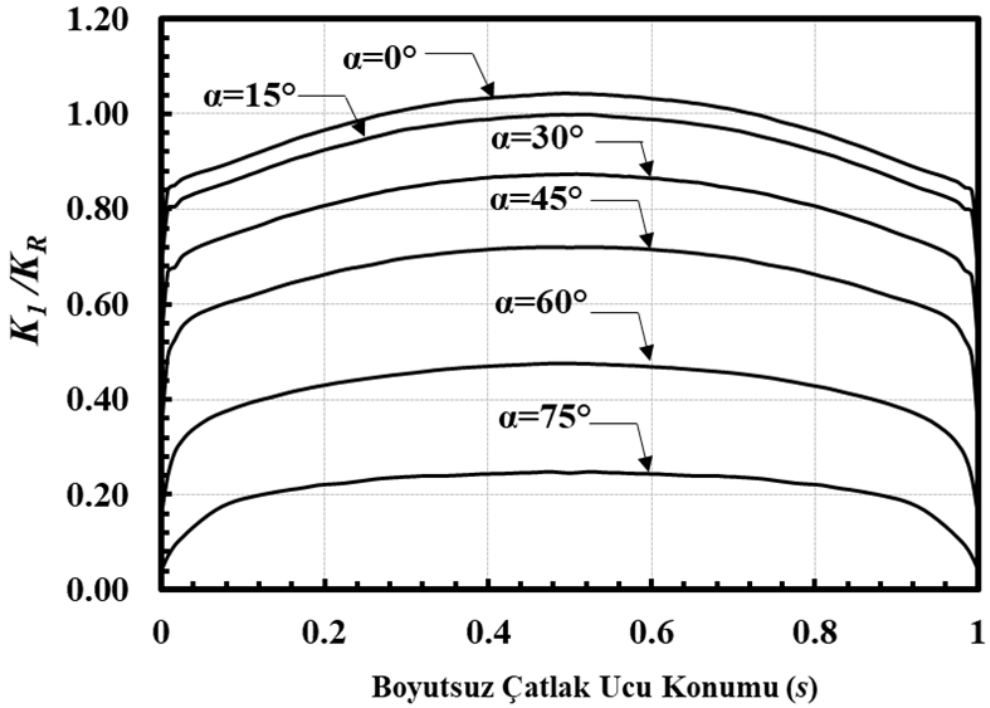
Şekil 2.89. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



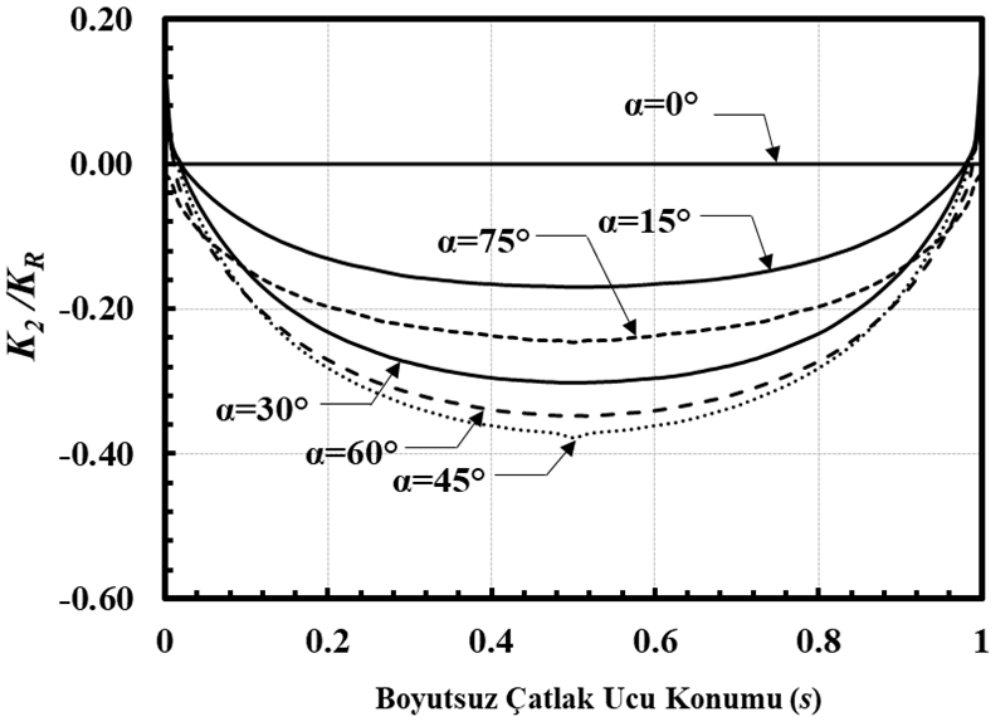
Şekil 2.90. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



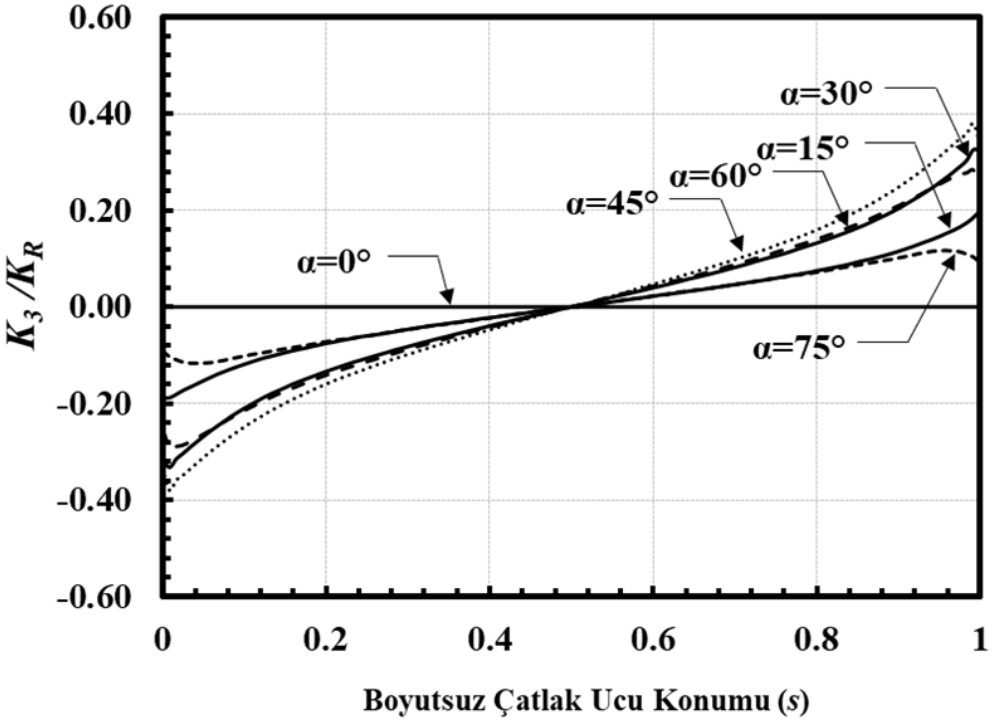
Şekil 2.91. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



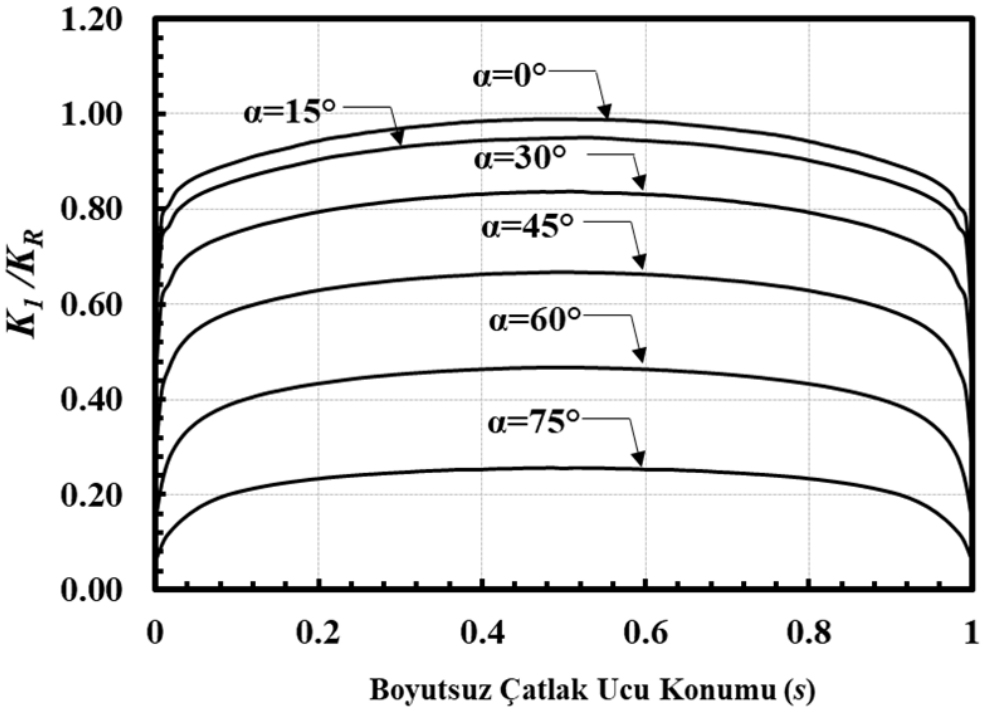
Şekil 2.92. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



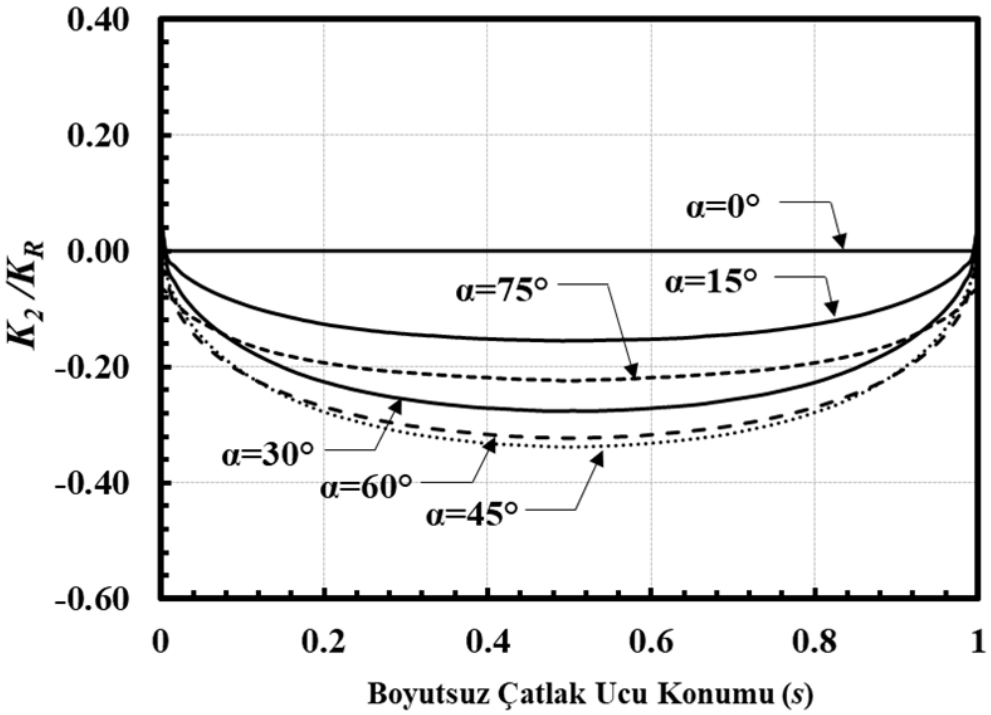
Şekil 2.93. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



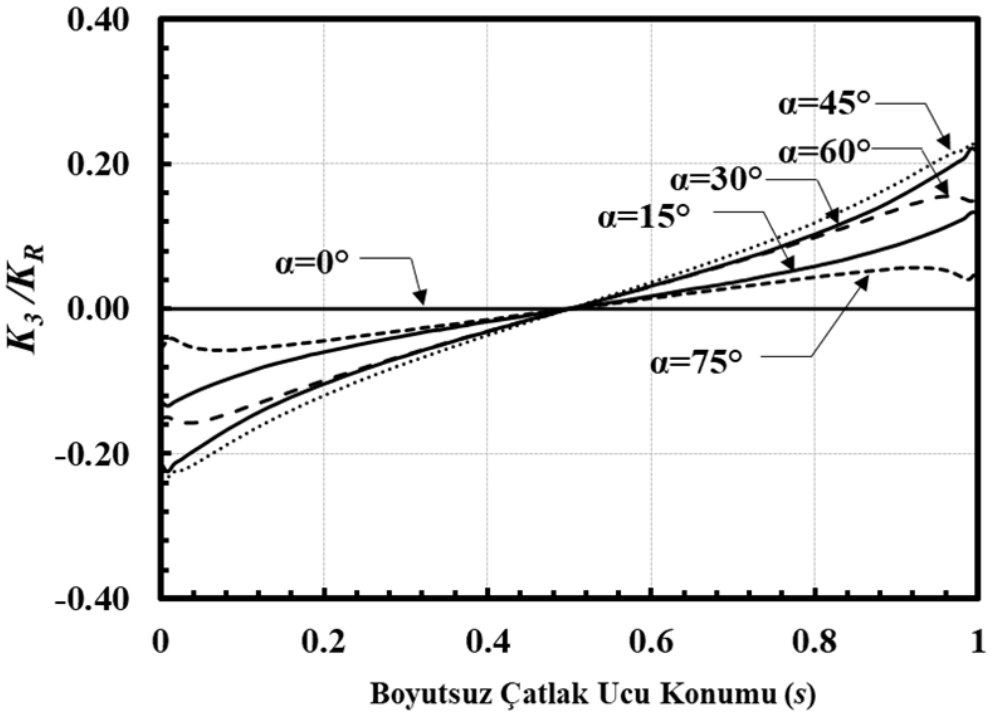
Şekil 2.94. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



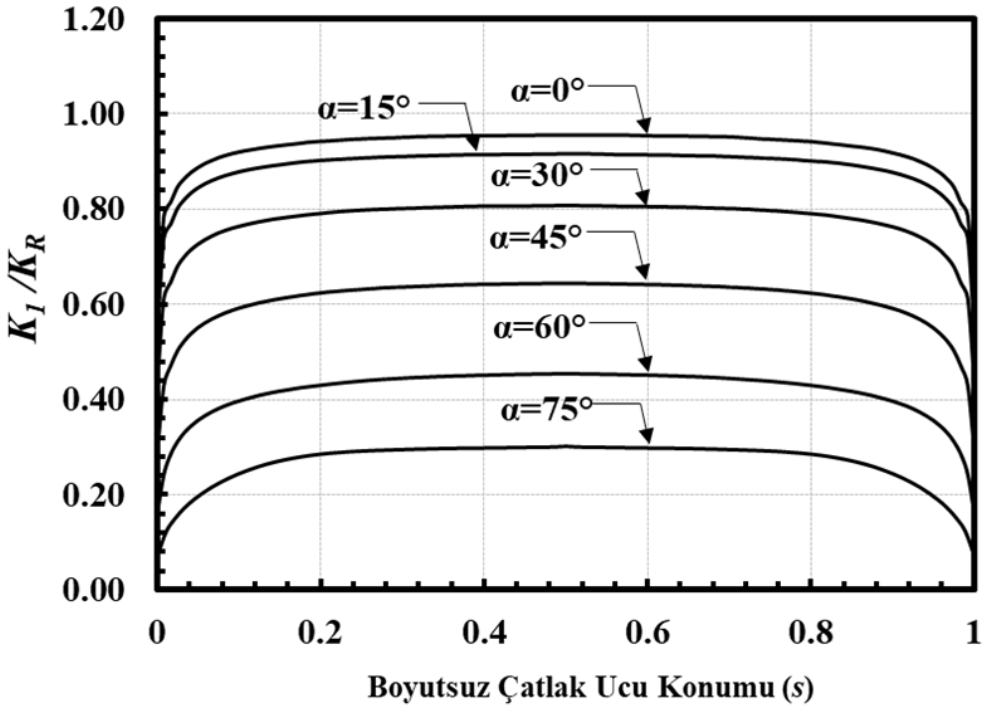
Şekil 2.95. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



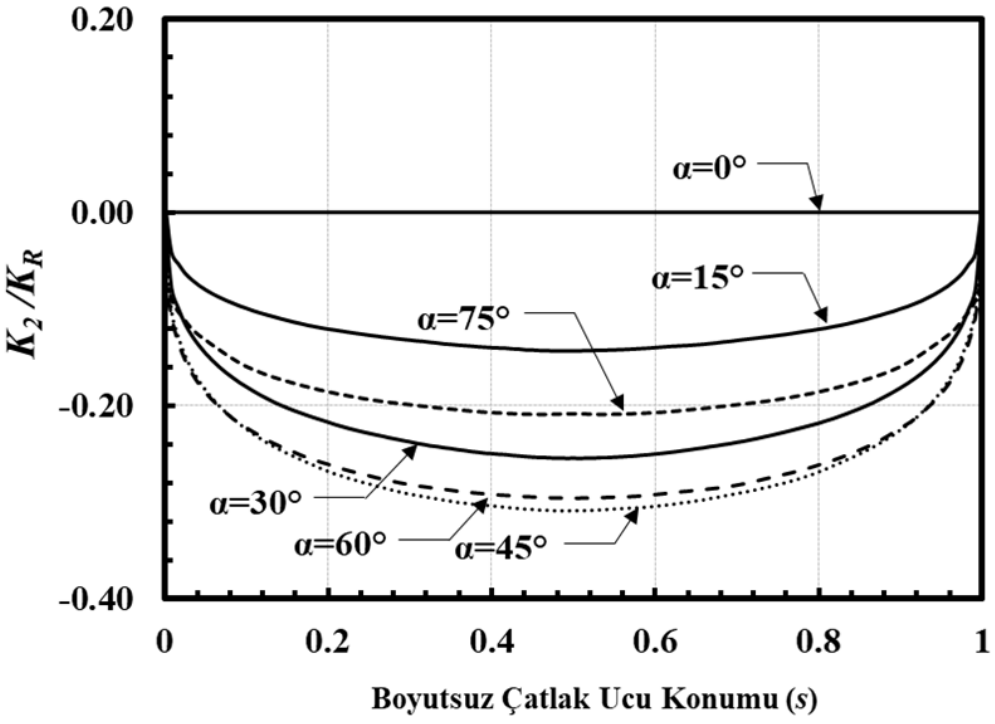
Şekil 2.96. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



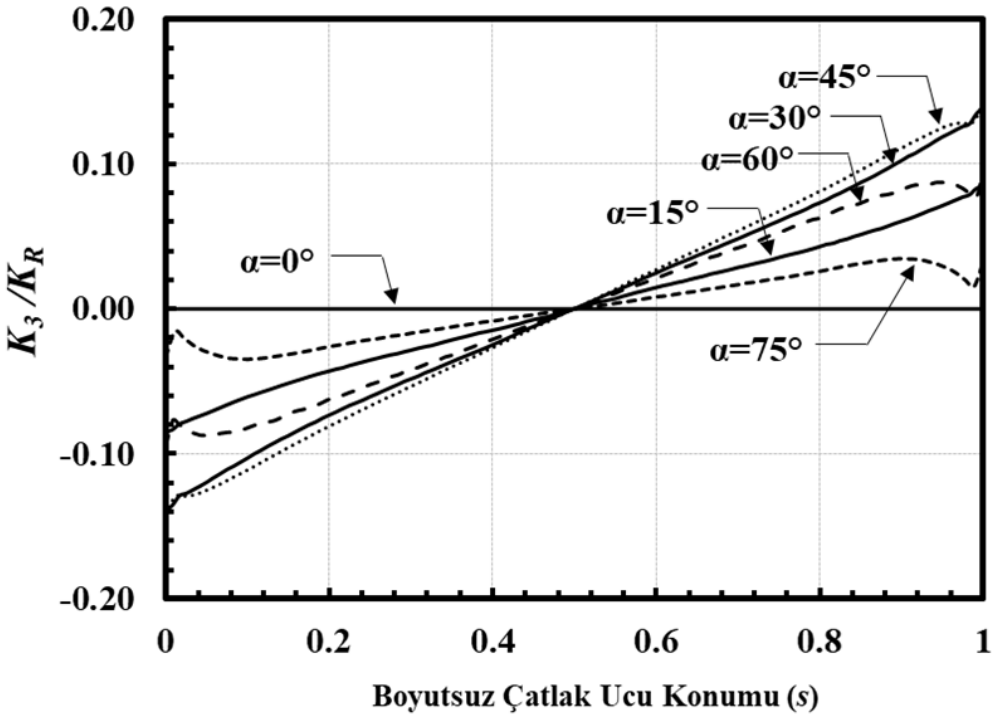
Şekil 2.97. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



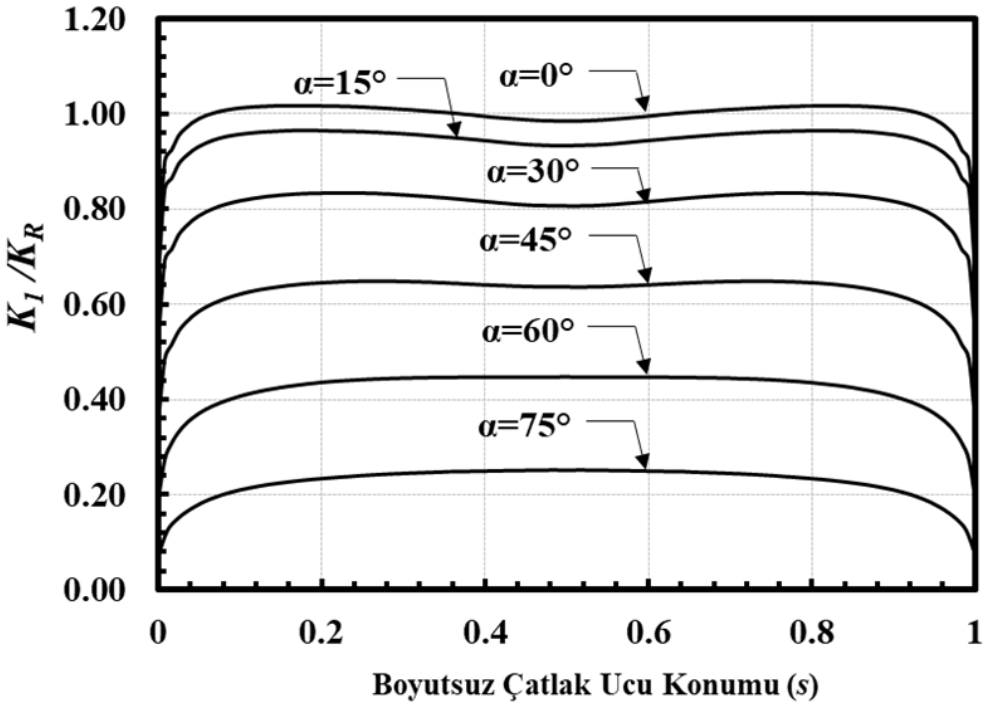
Şekil 2.98. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



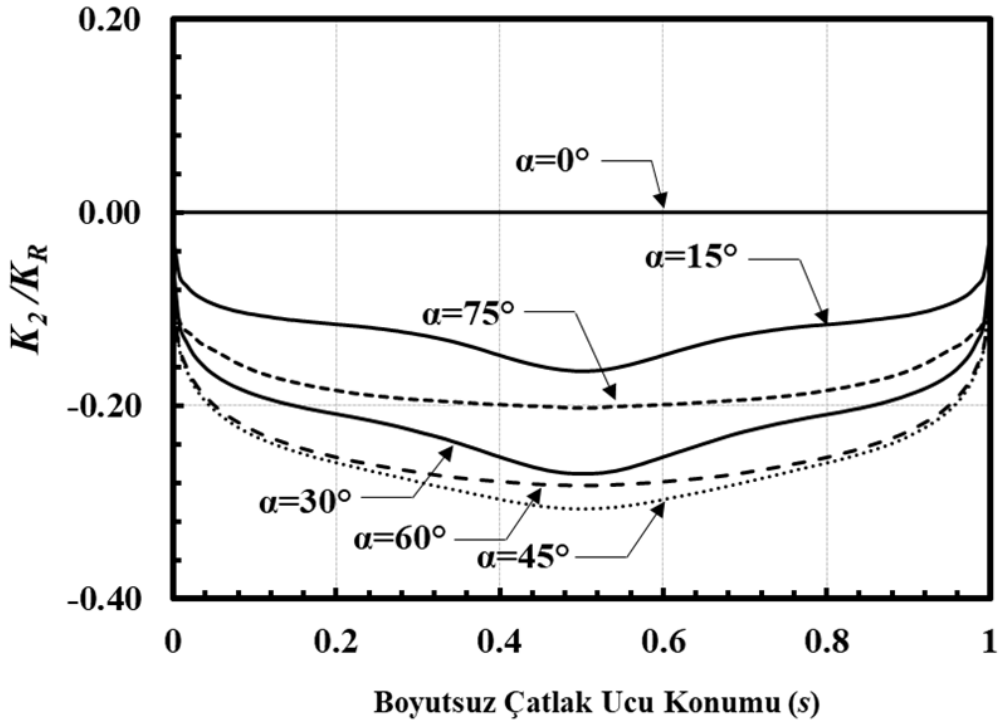
Şekil 2.99. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



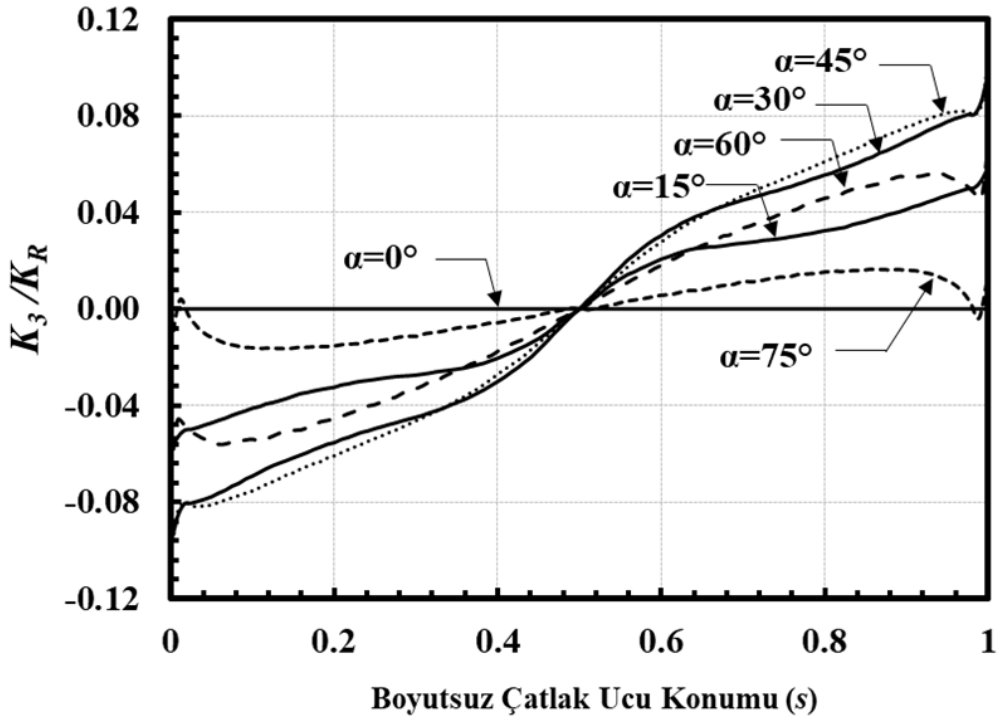
Şekil 2.100. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



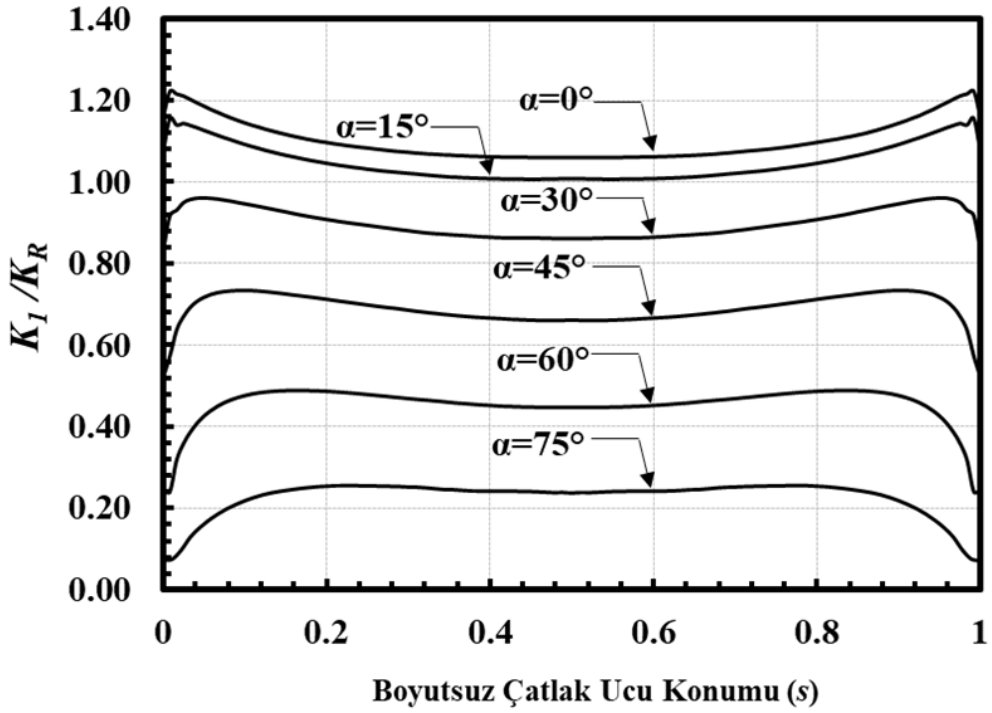
Şekil 2.101. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



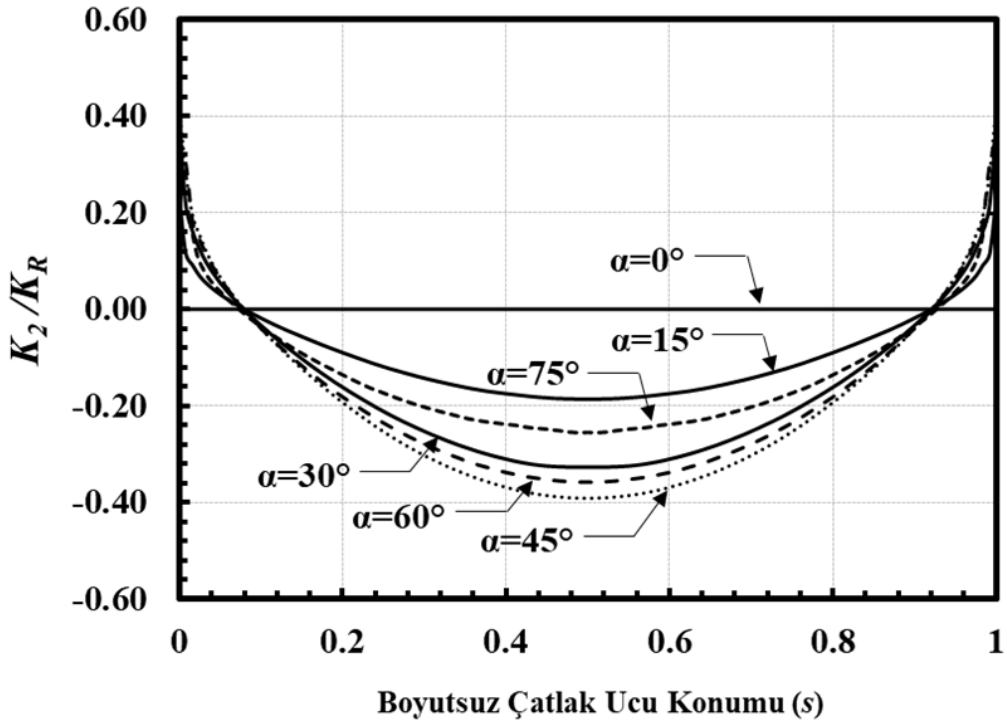
Şekil 2.102. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



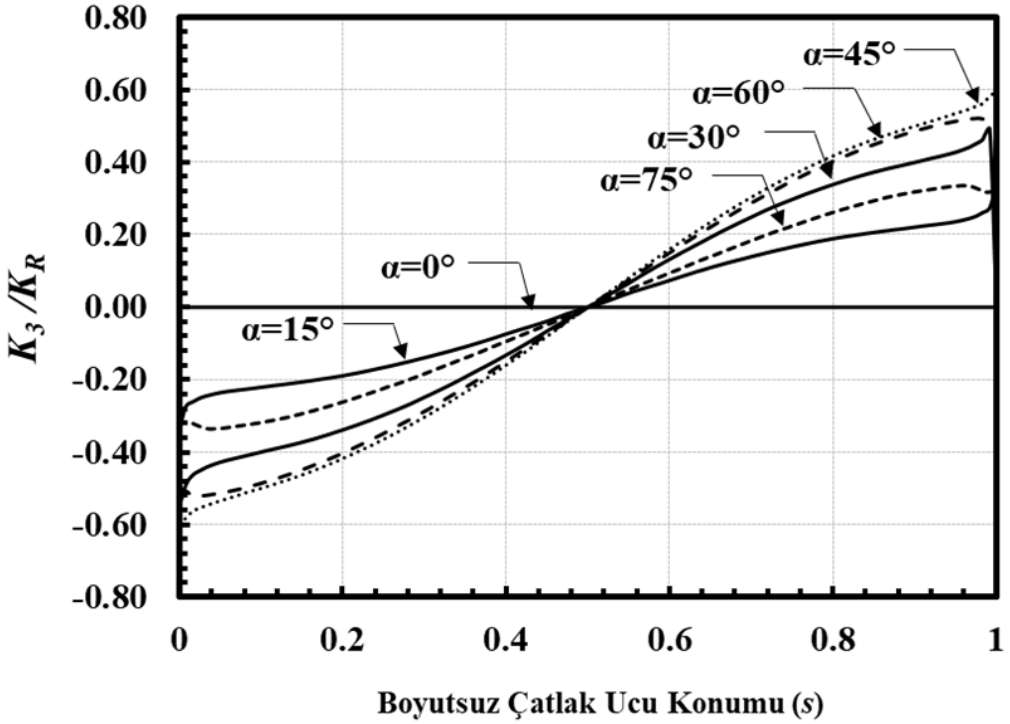
Şekil 2.103. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



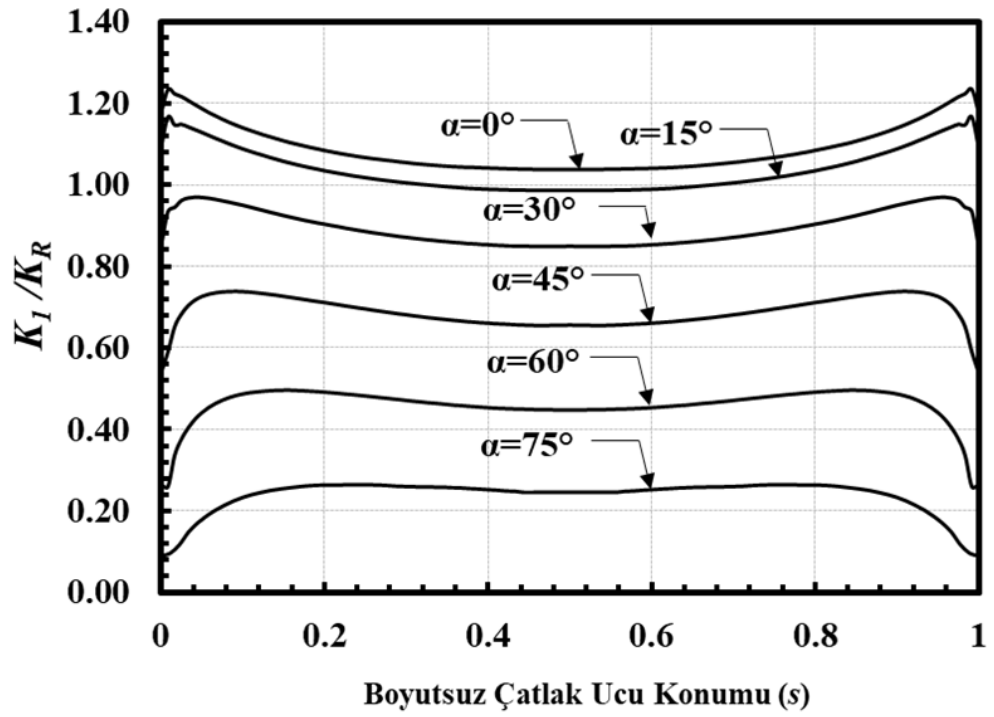
Şekil 2.104. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



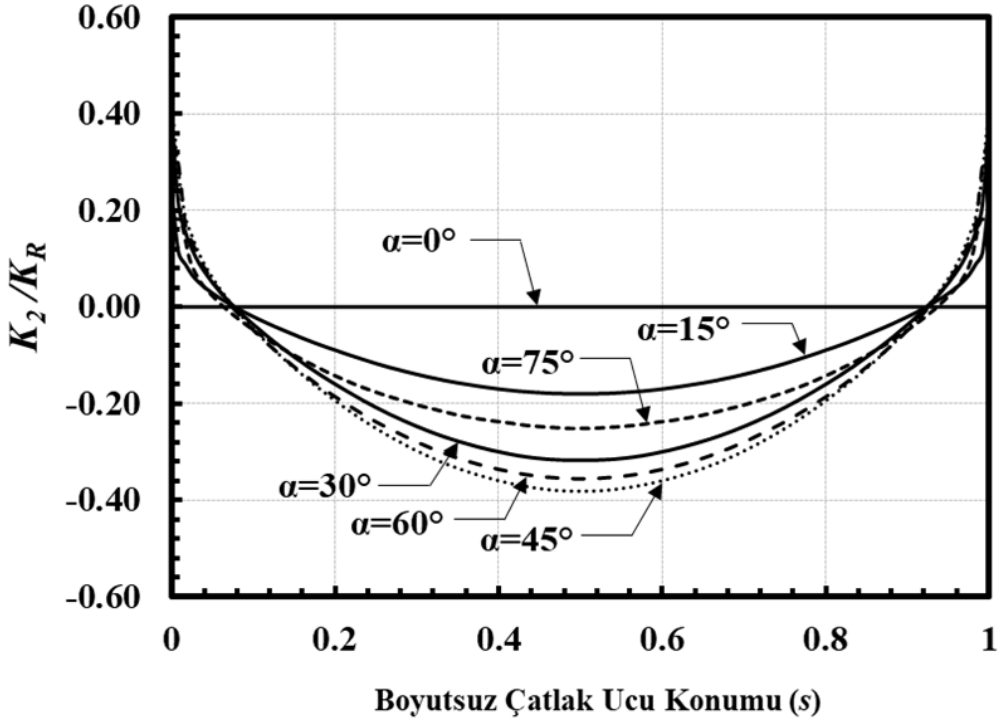
Şekil 2.105. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



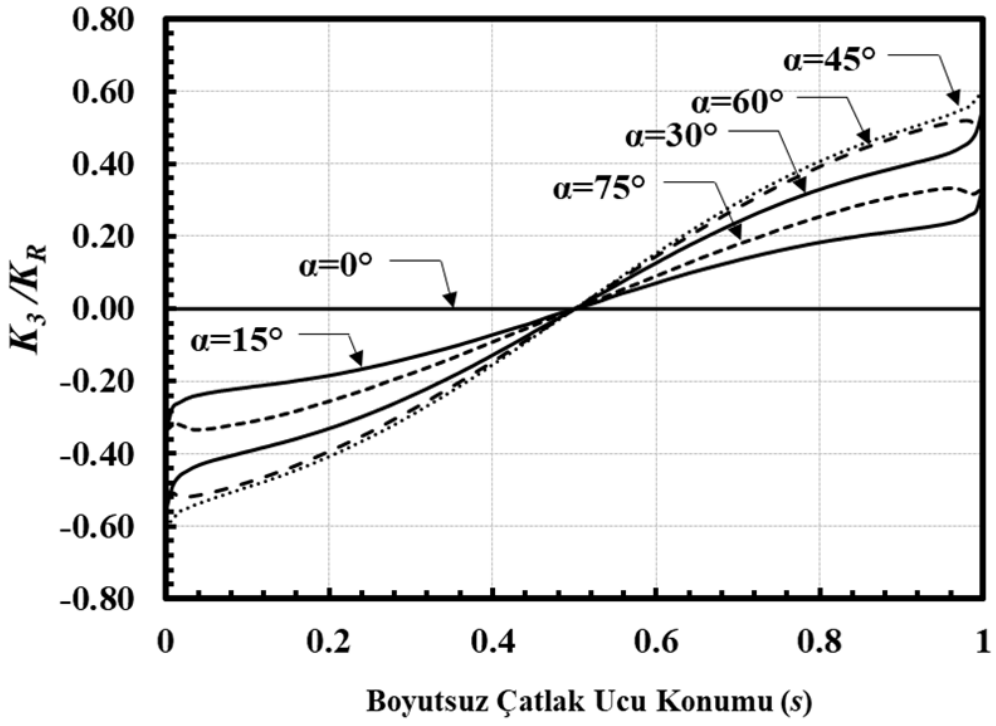
Şekil 2.106. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



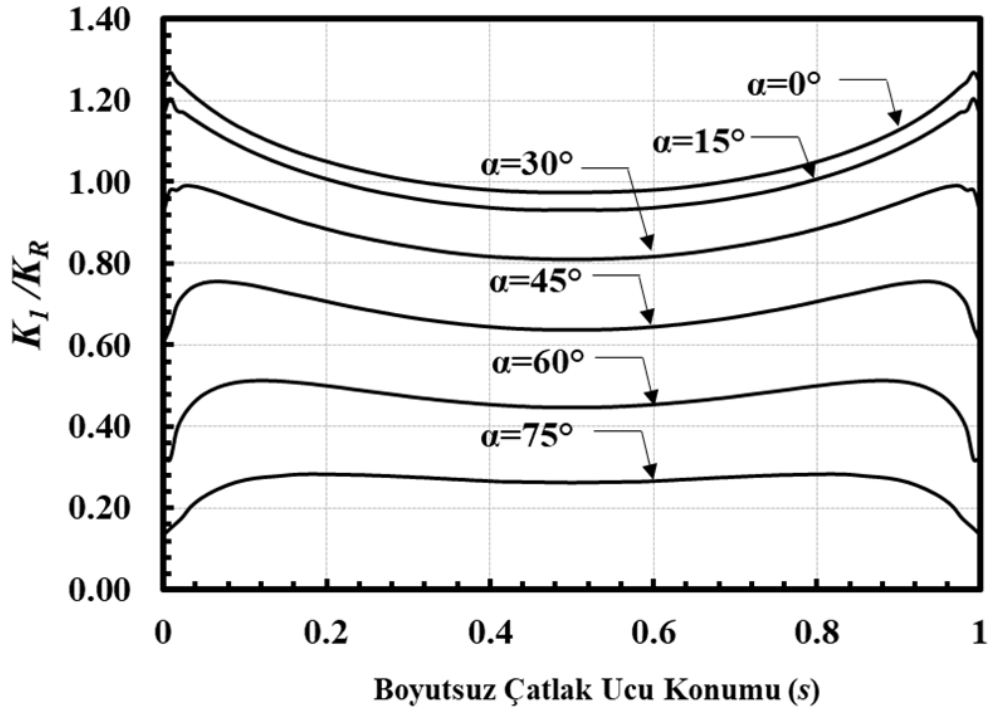
Şekil 2.107. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



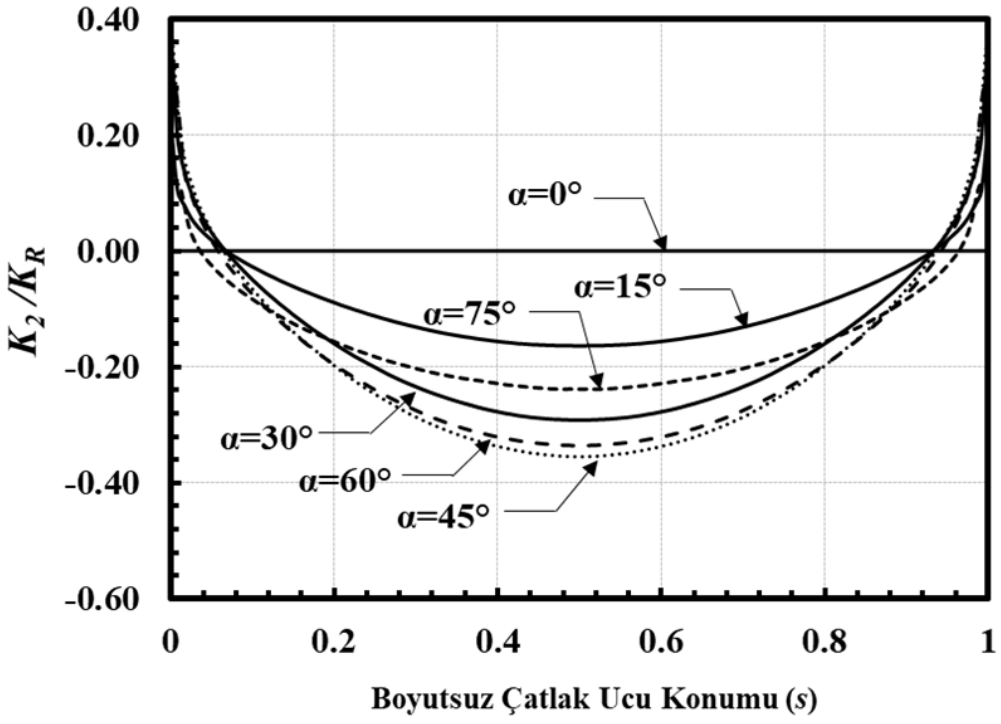
Şekil 2.108. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



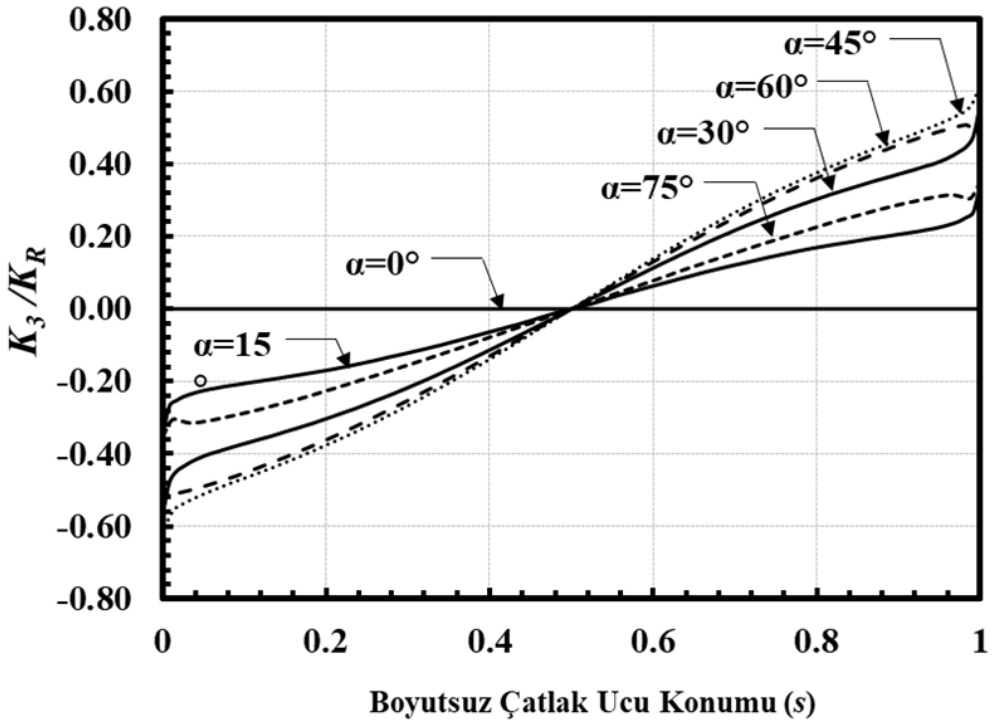
Şekil 2.109. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



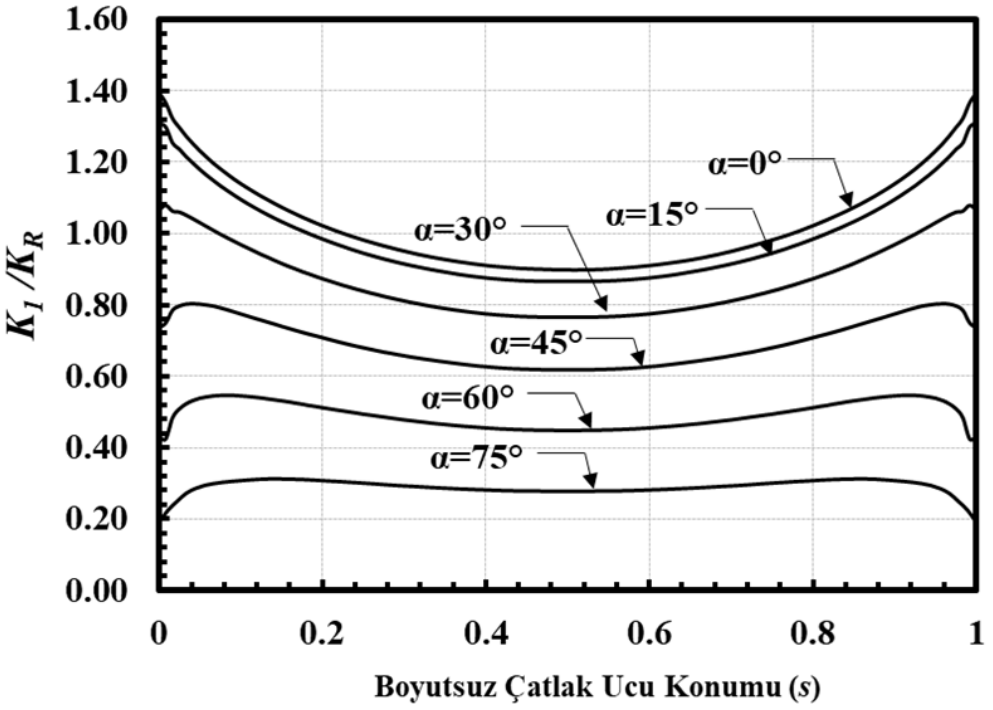
Şekil 2.110. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



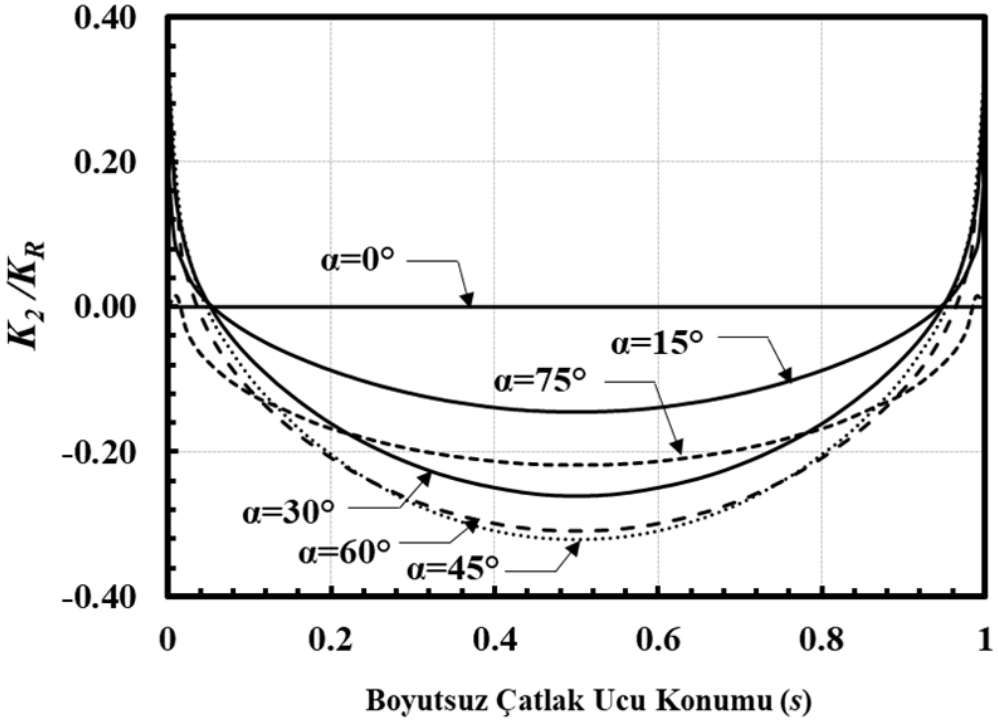
Şekil 2.111. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



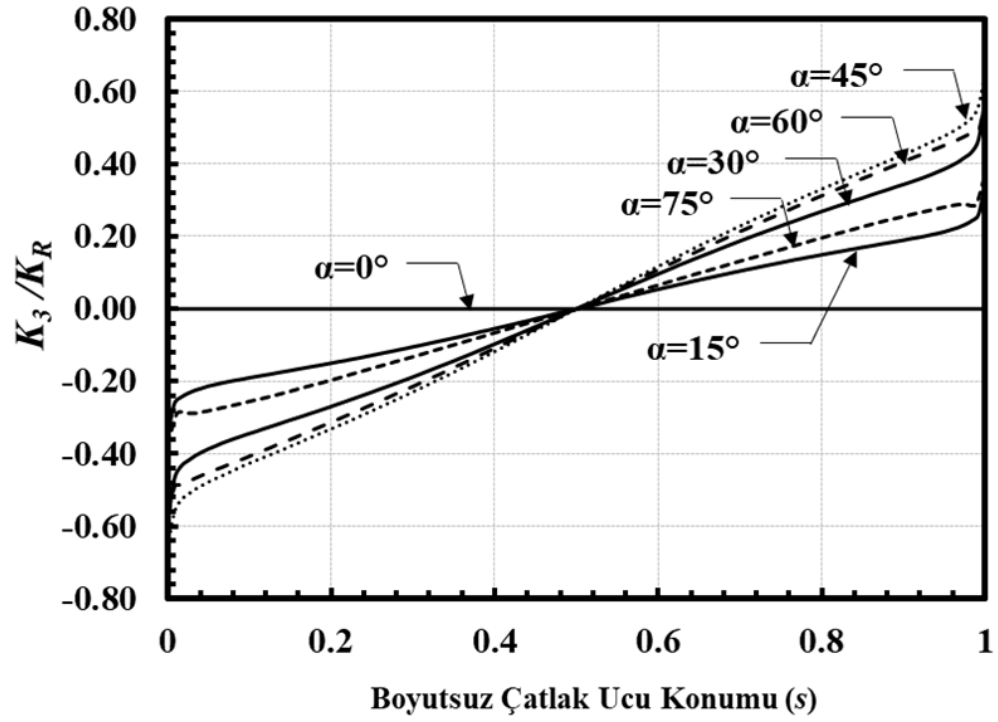
Şekil 2.112. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



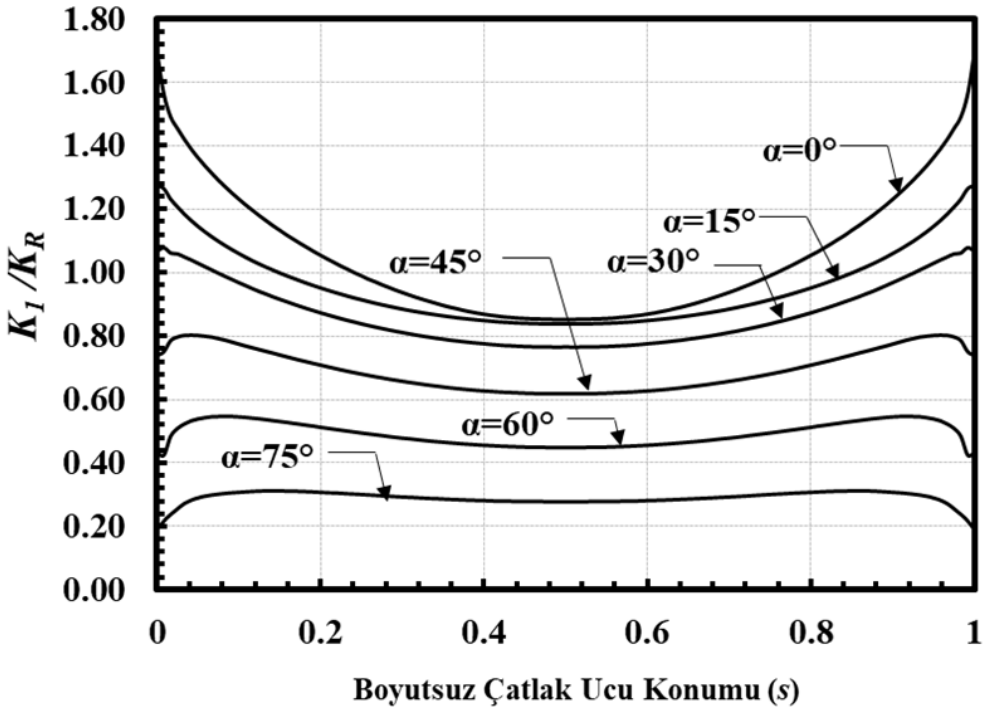
Şekil 2.113. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



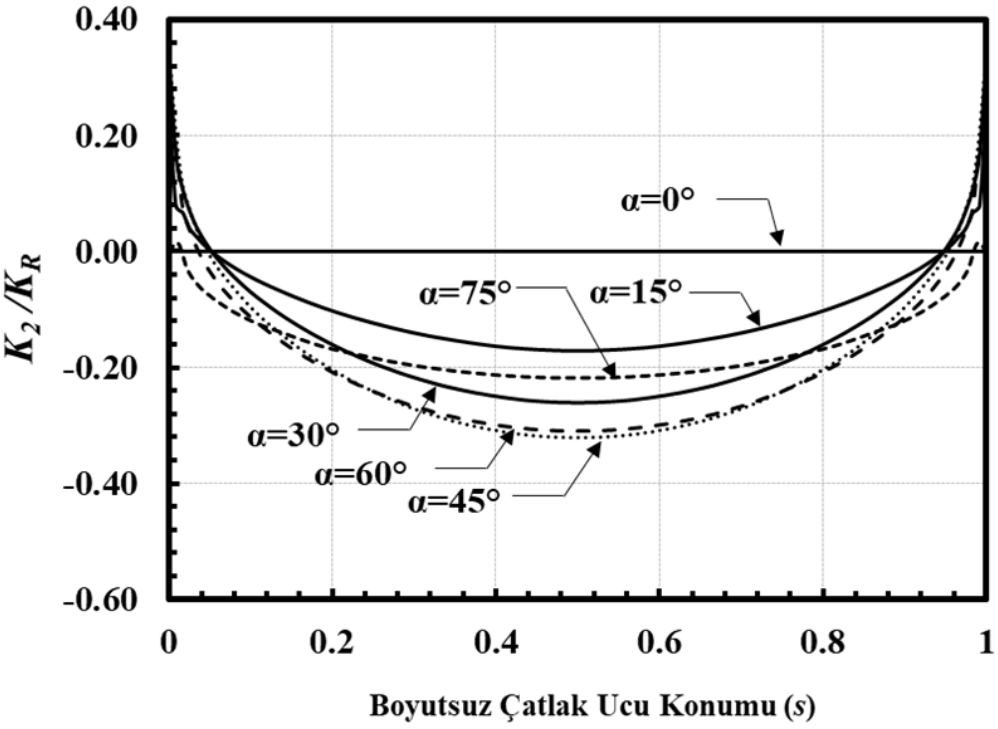
Şekil 2.114. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



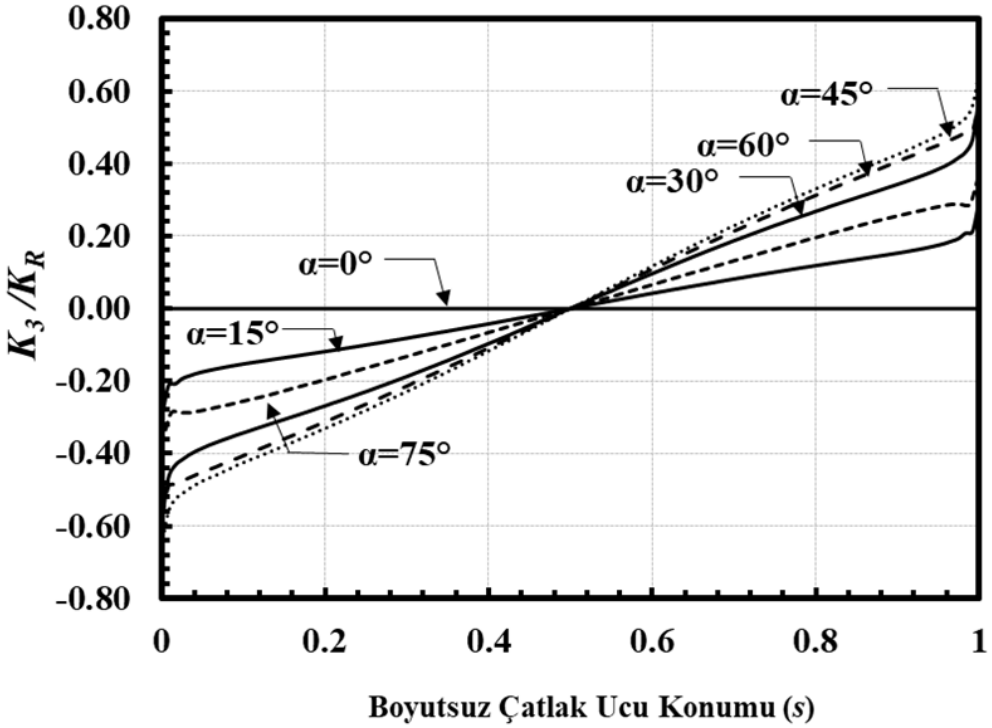
Şekil 2.115. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



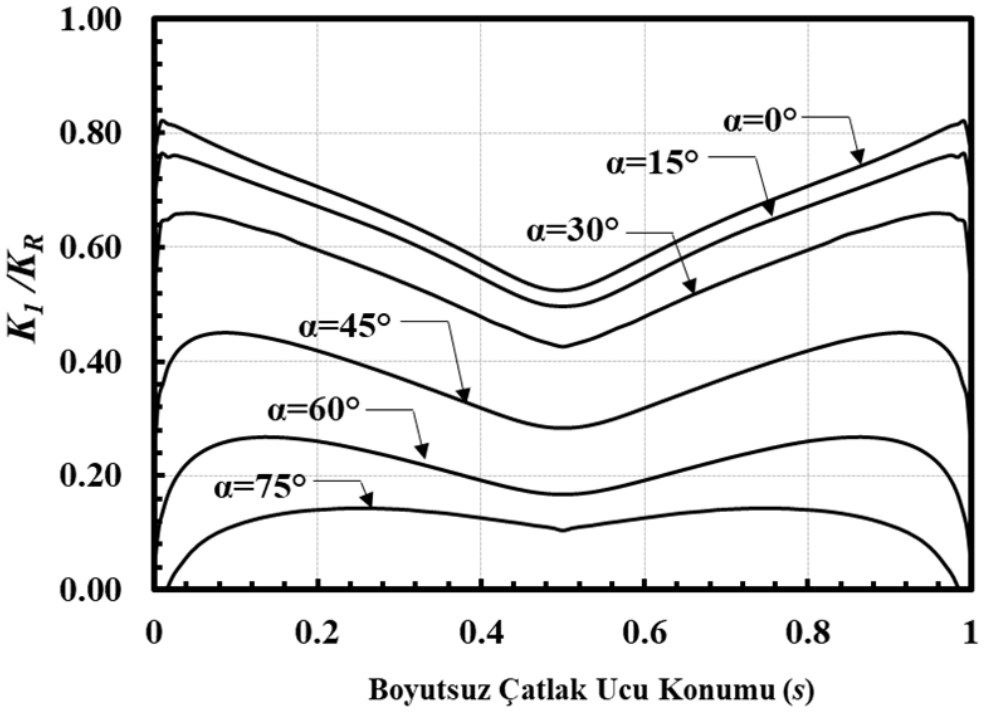
Şekil 2.116. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



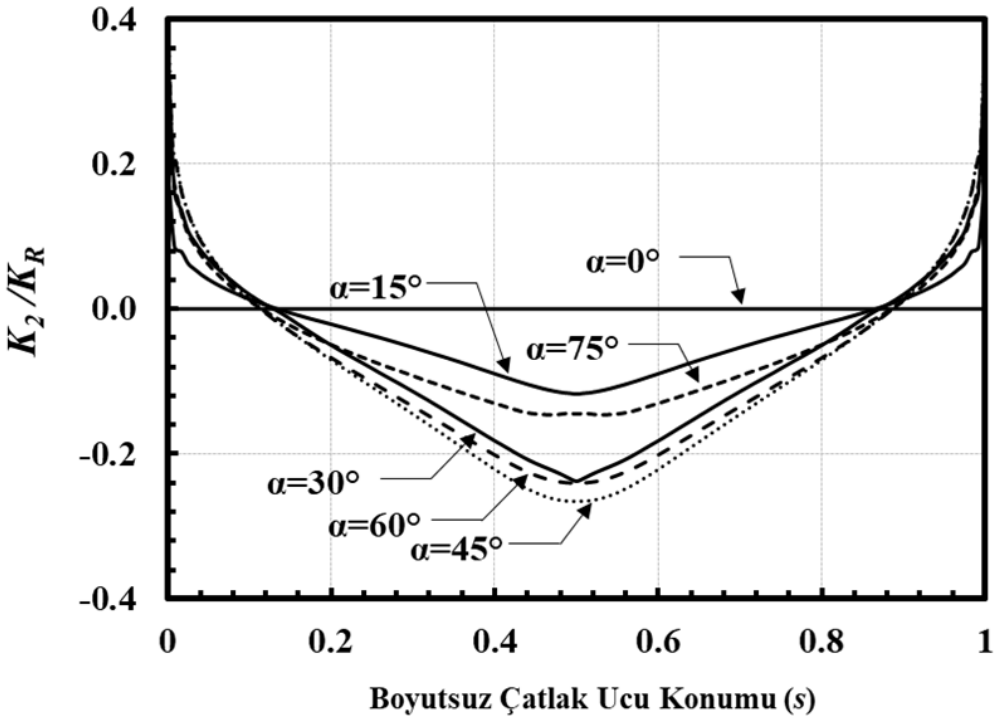
Şekil 2.117. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



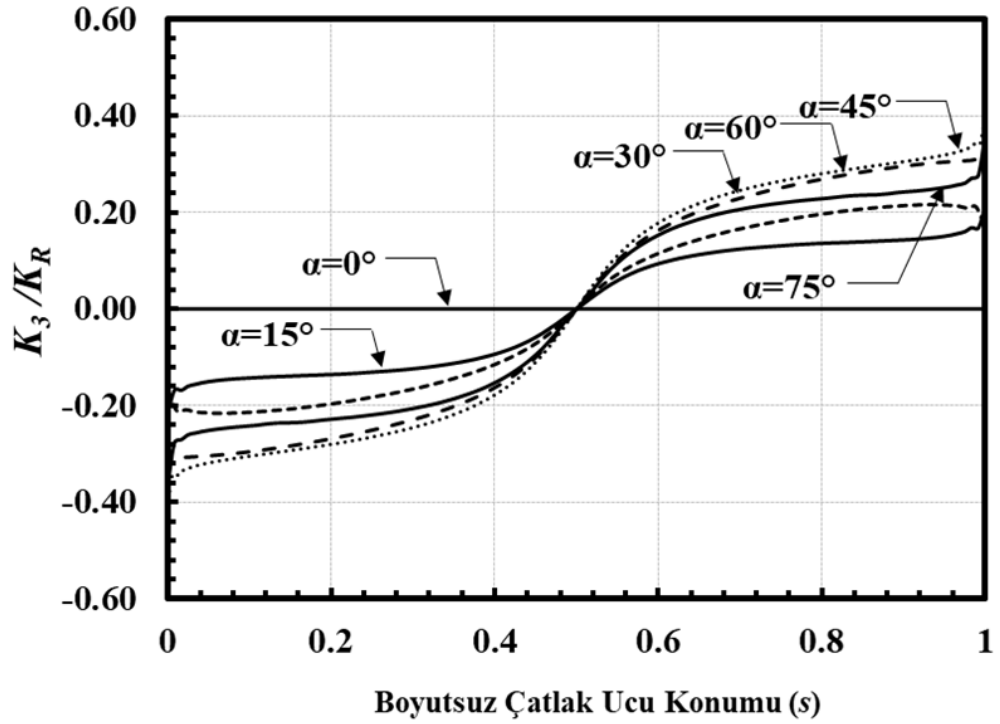
Şekil 2.118. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



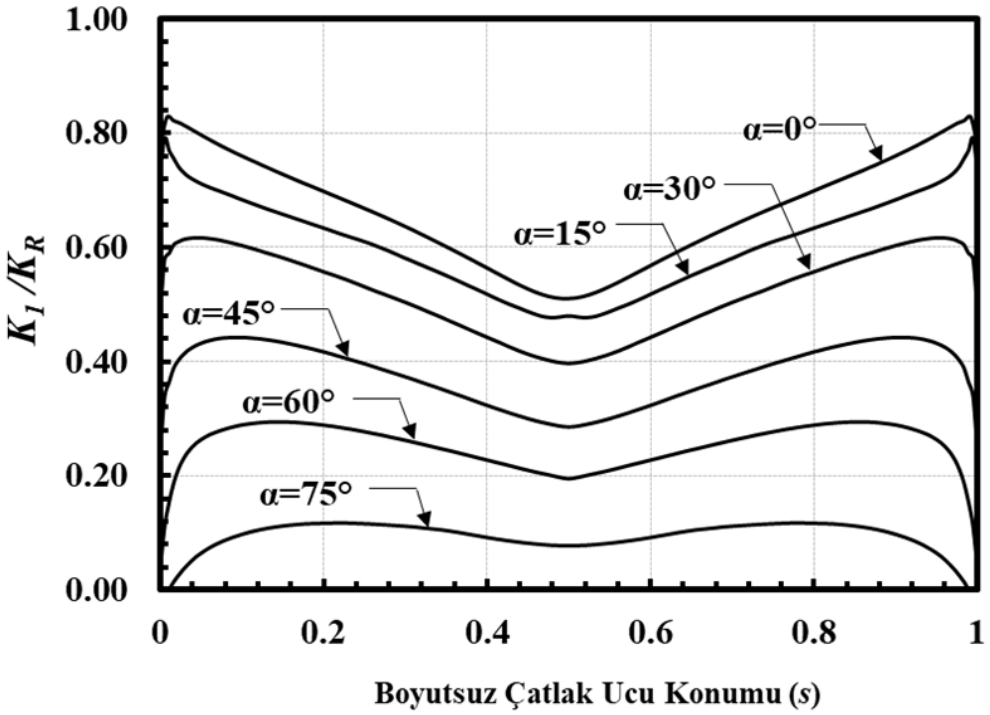
Şekil 2.119. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



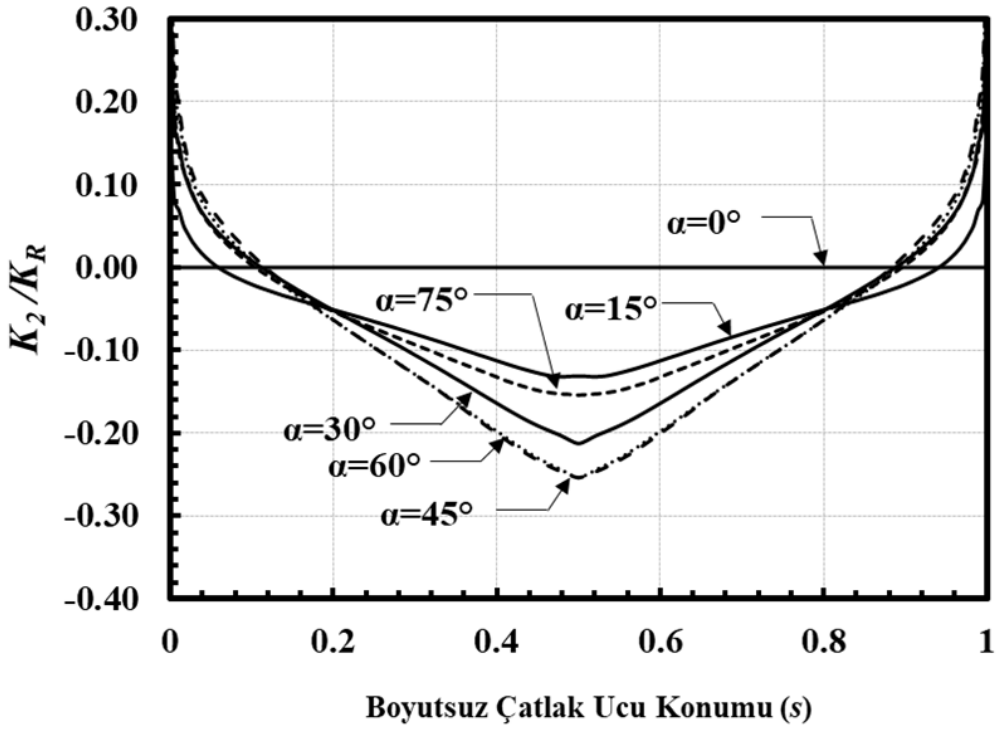
Şekil 2.120. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



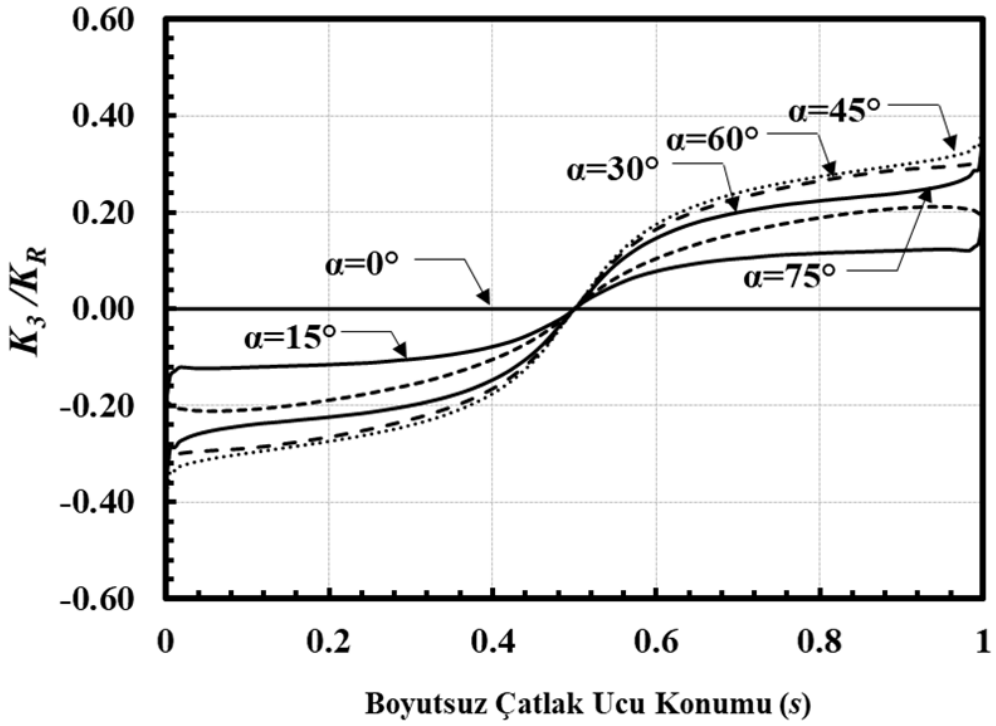
Şekil 2.121. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



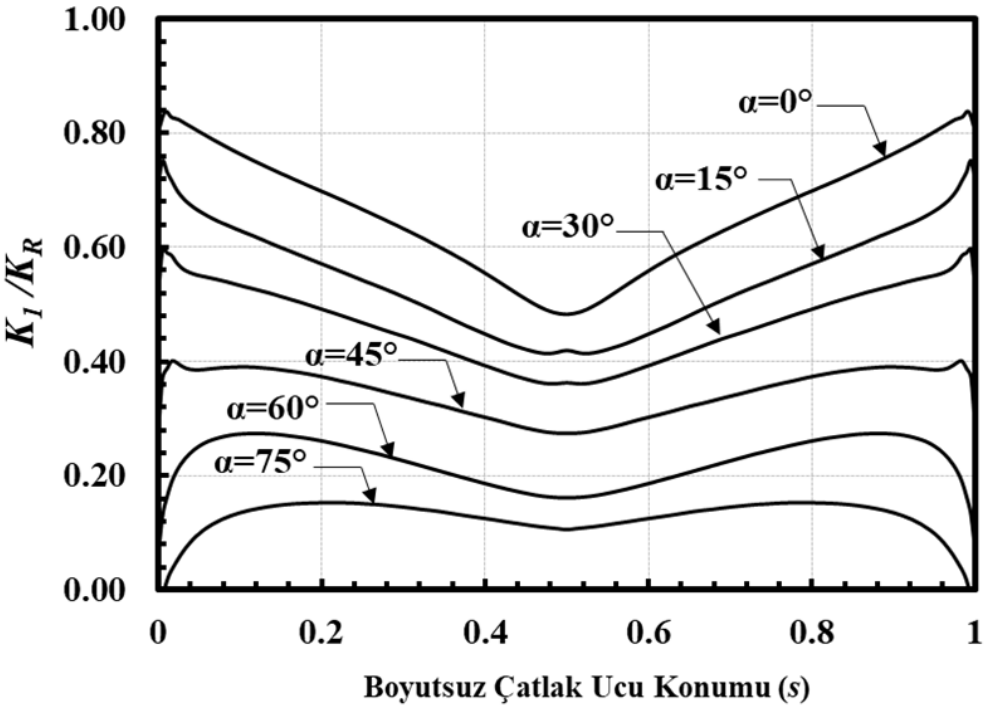
Şekil 2.122. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



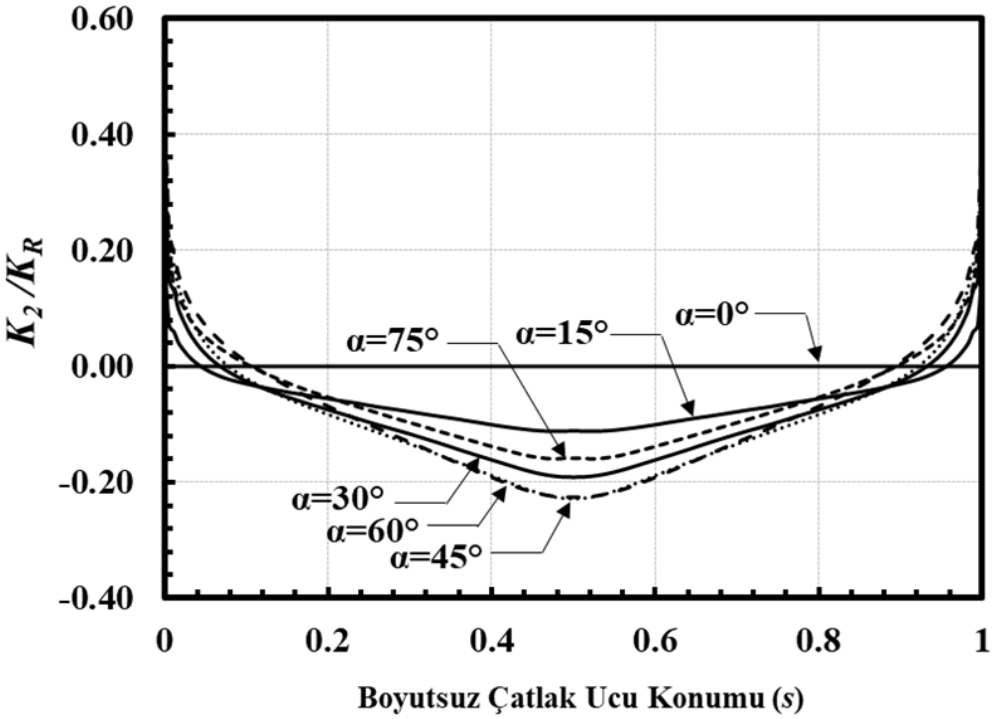
Şekil 2.123. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



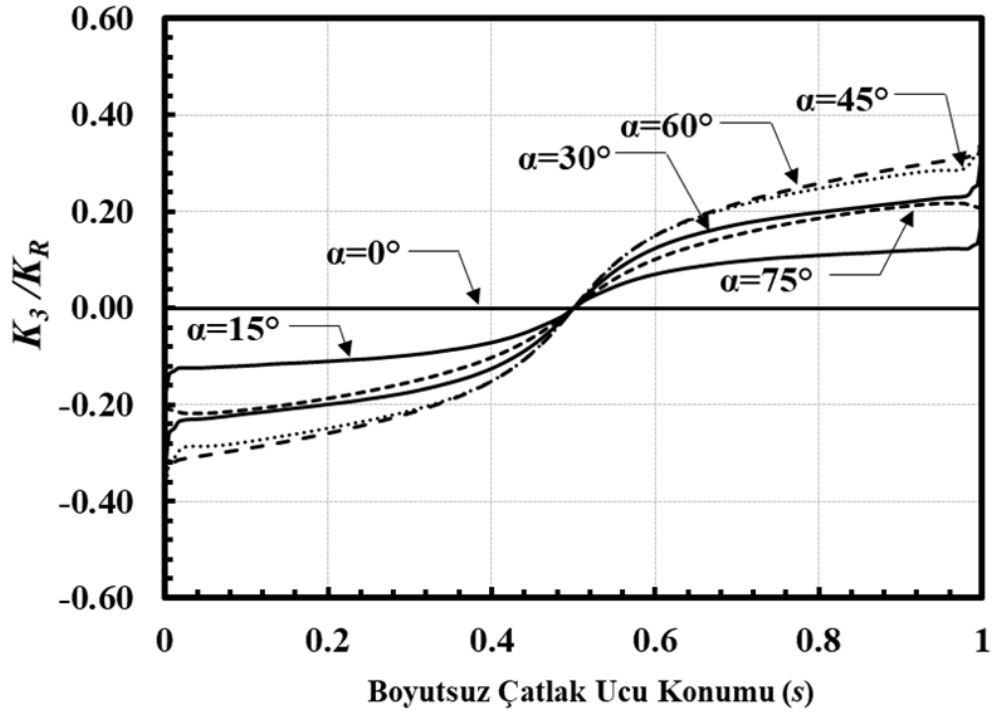
Şekil 2.124. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



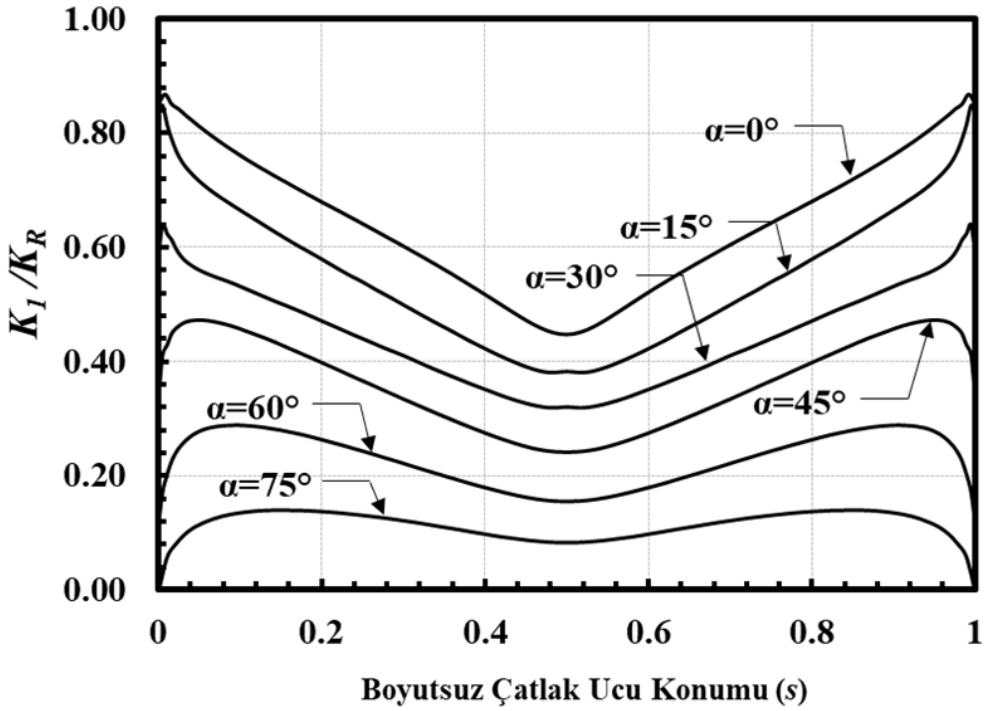
Şekil 2.125. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



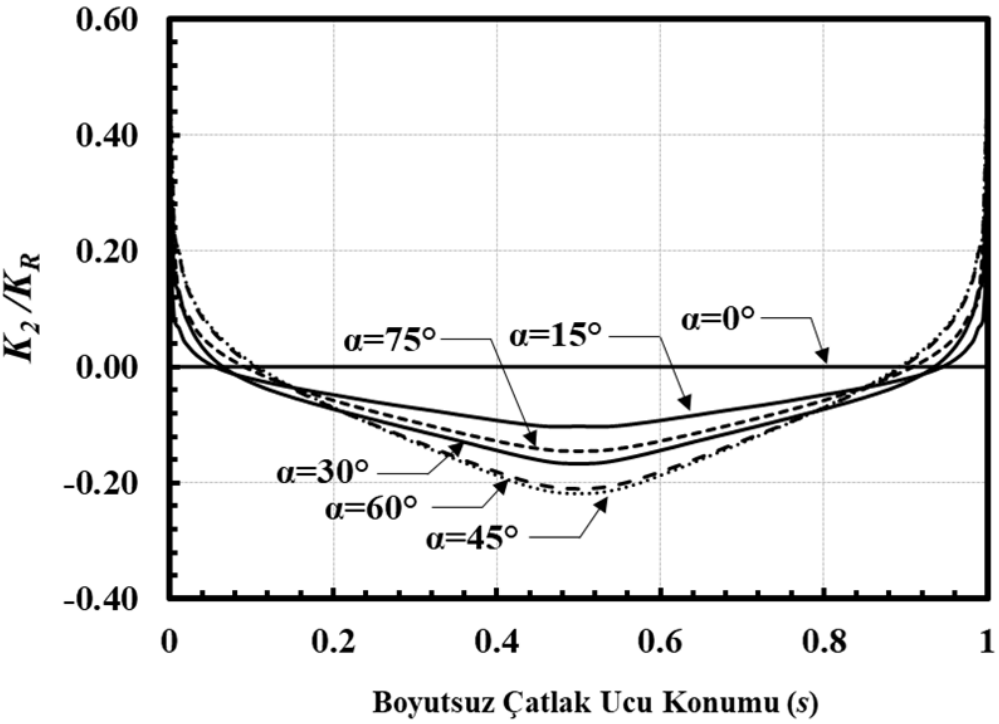
Şekil 2.126. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



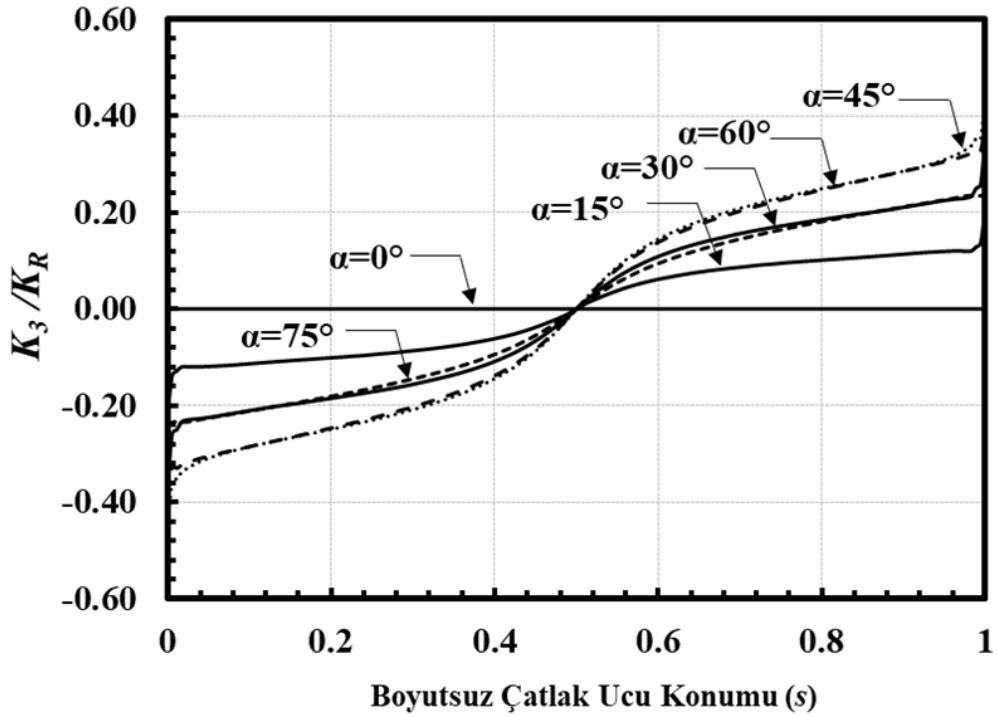
Şekil 2.127. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



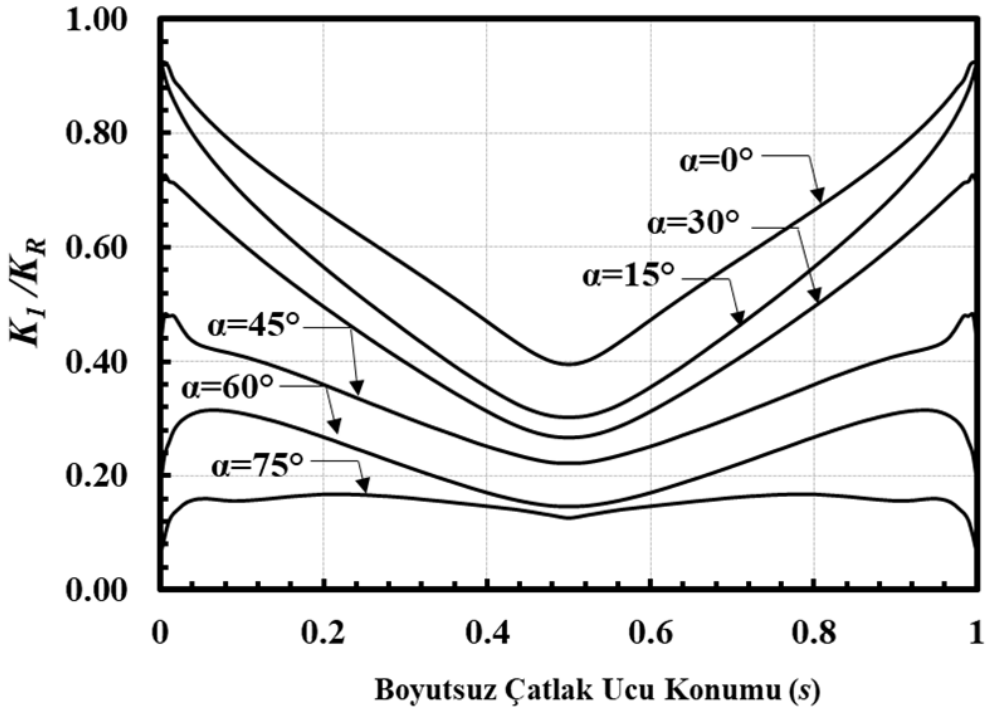
Şekil 2.128. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



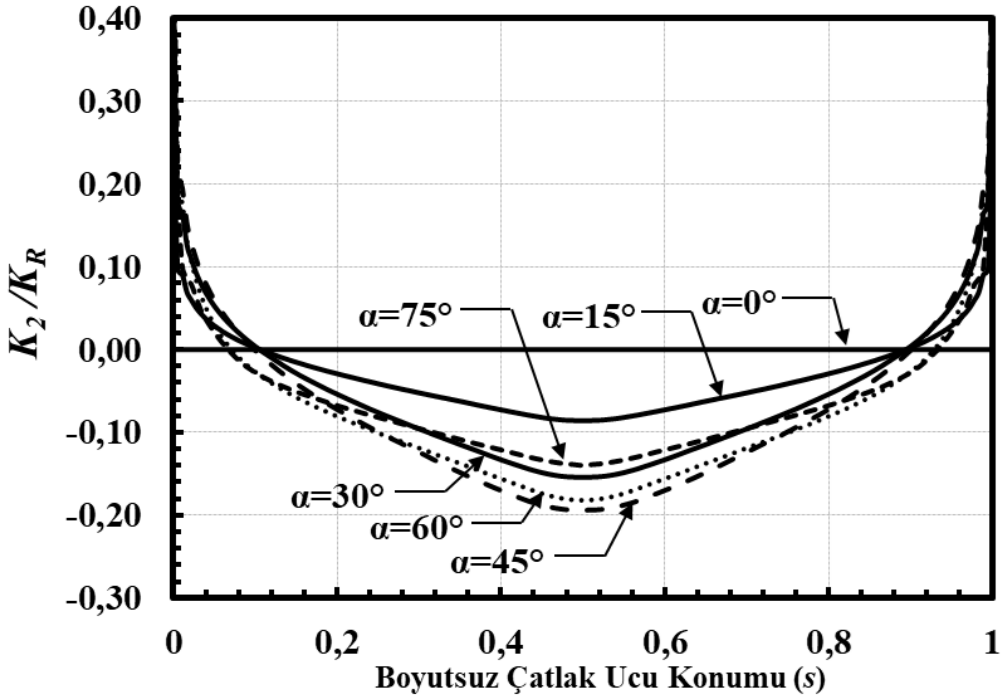
Şekil 2.129. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



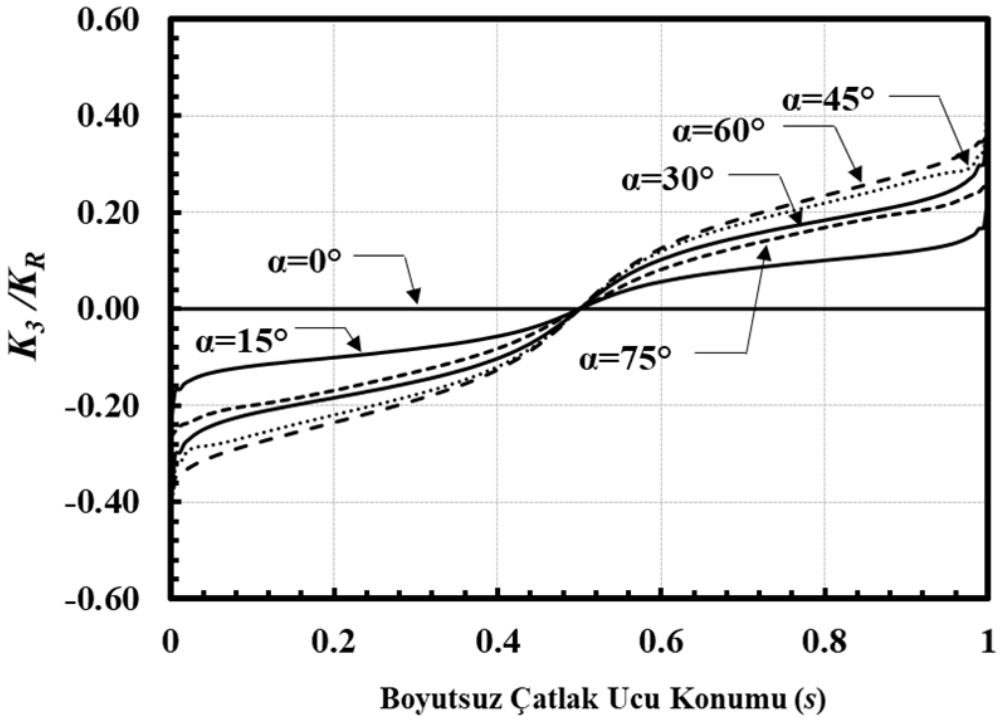
Şekil 2.130. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



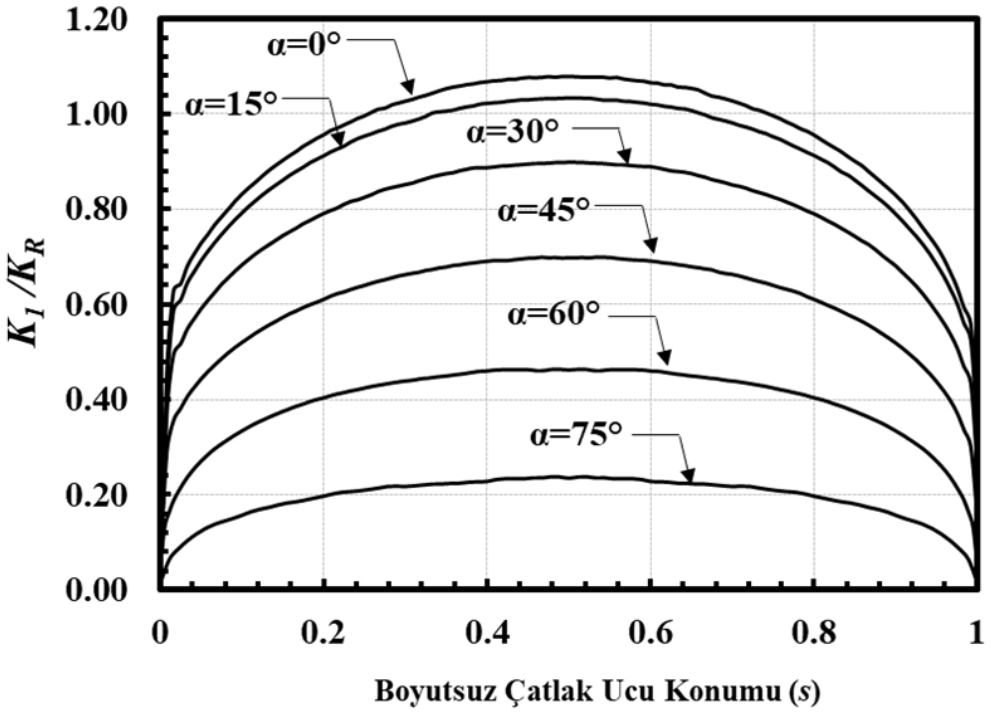
Şekil 2.131. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



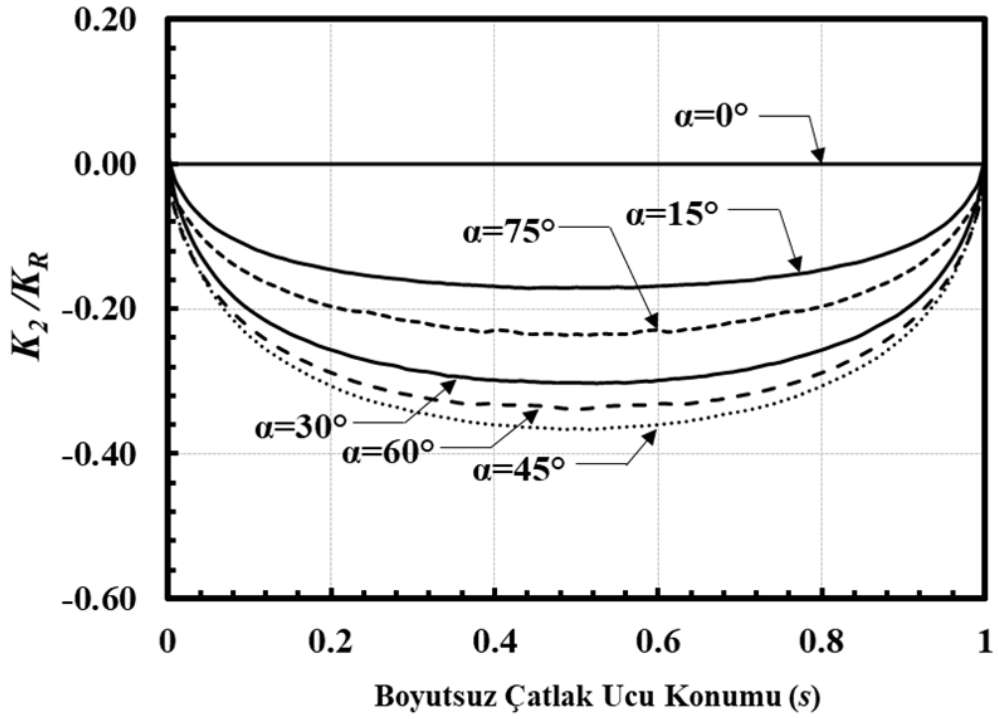
Şekil 2.132. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



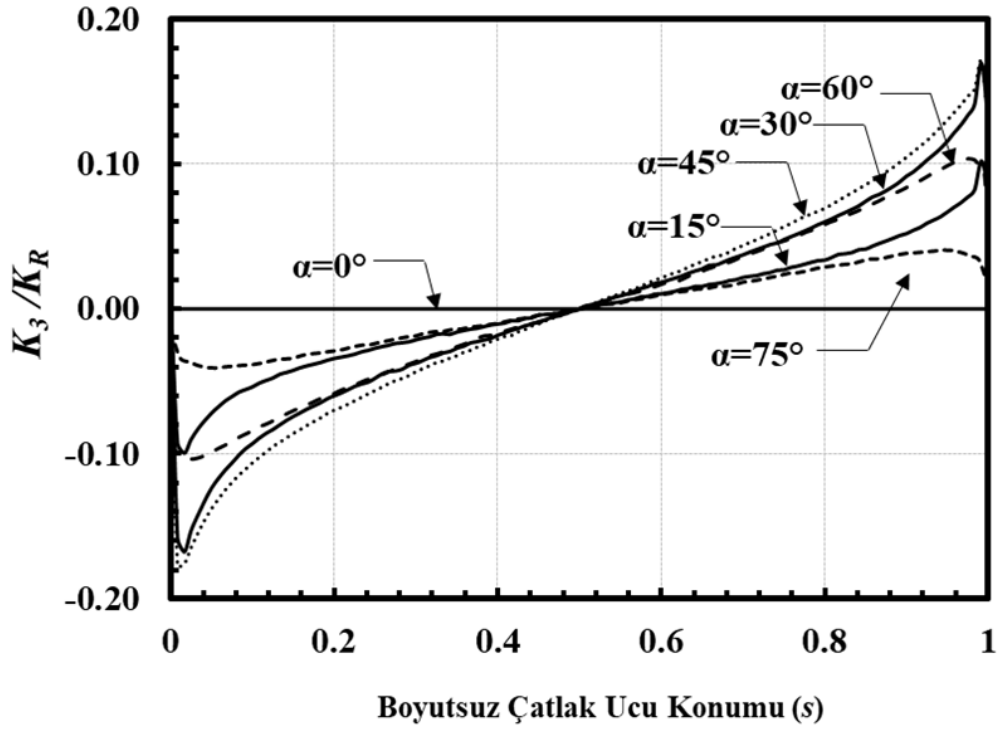
Şekil 2.133. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.3, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



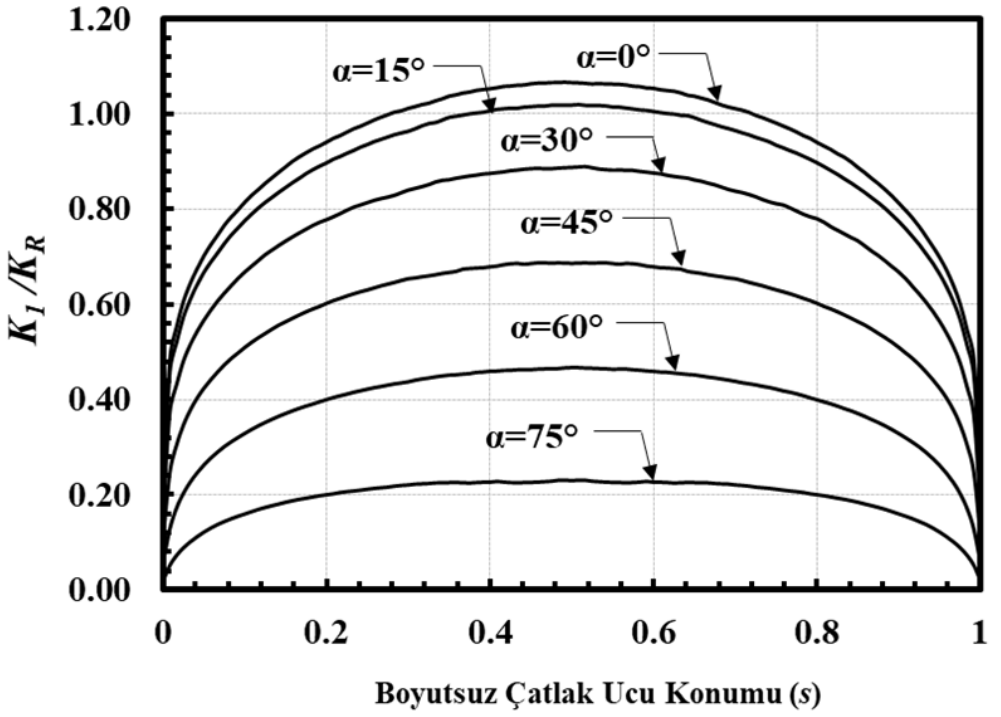
Şekil 2.134. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



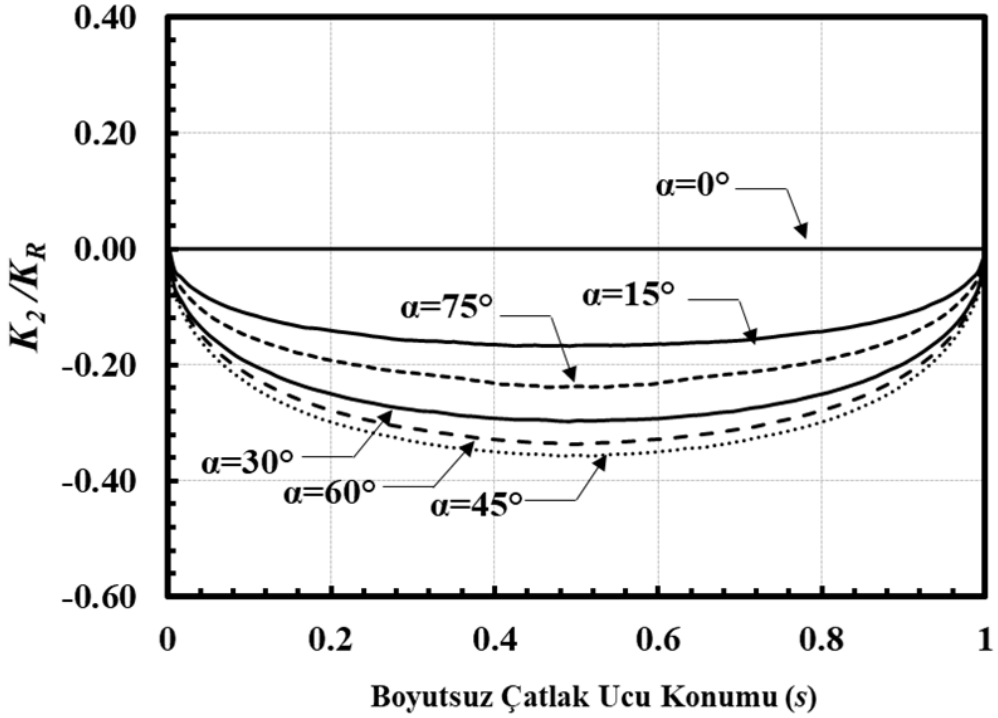
Şekil 2.135. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



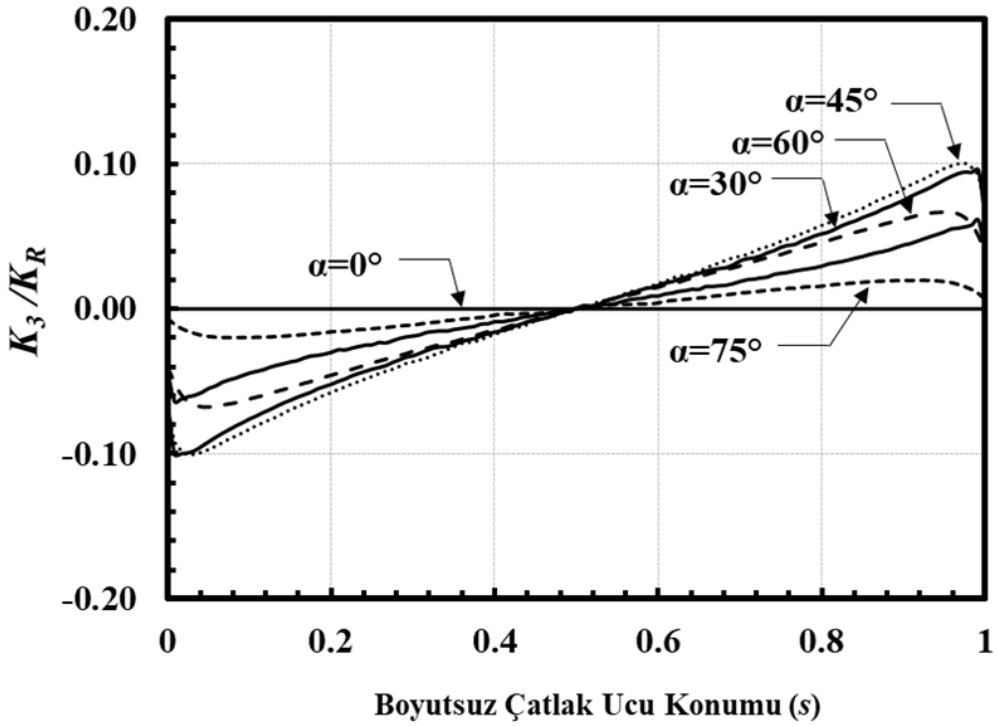
Şekil 2.136. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



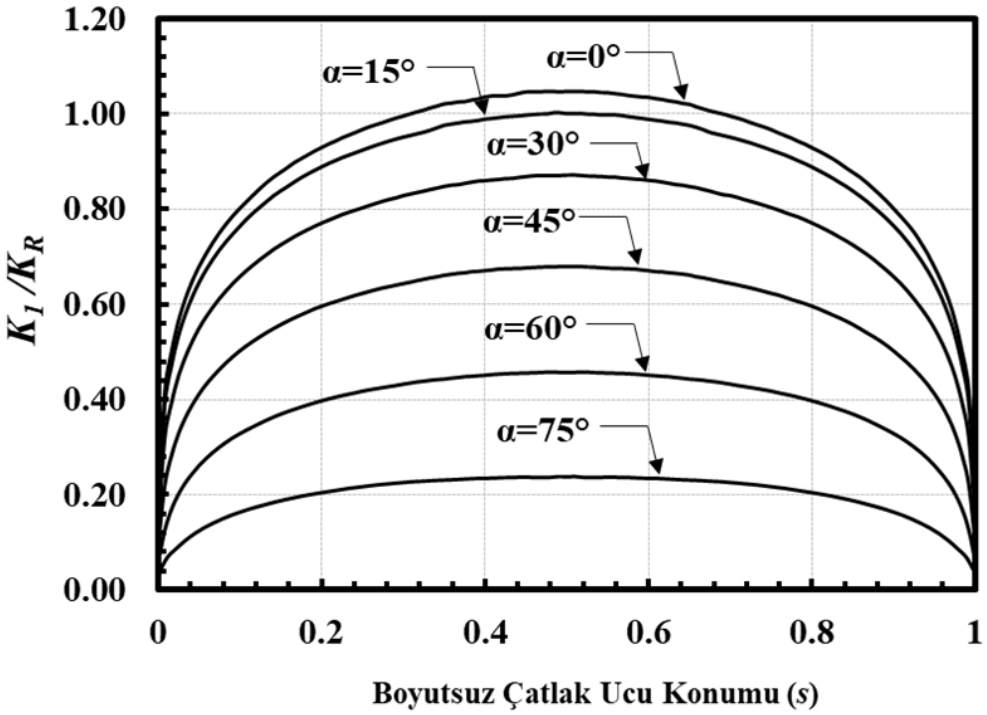
Şekil 2.137. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



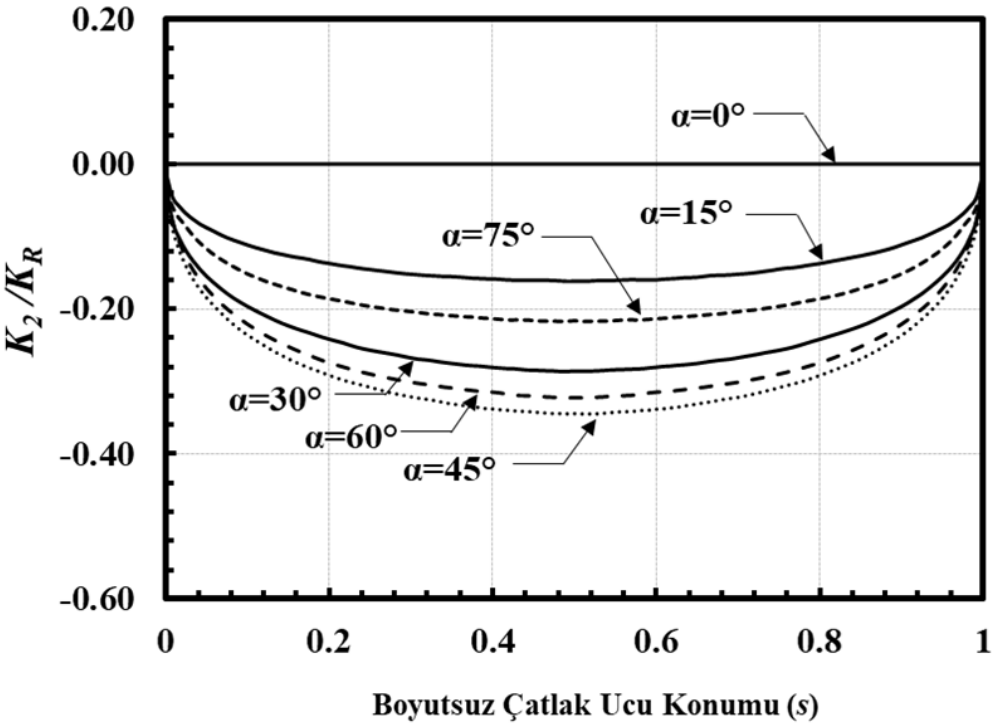
Şekil 2.138. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



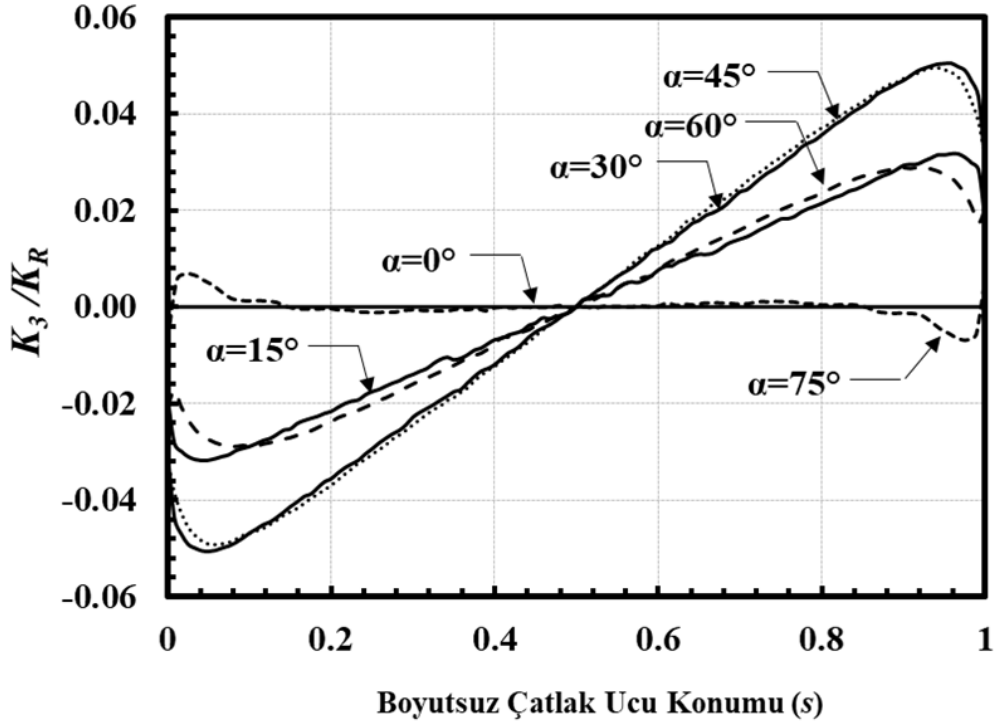
Şekil 2.139. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



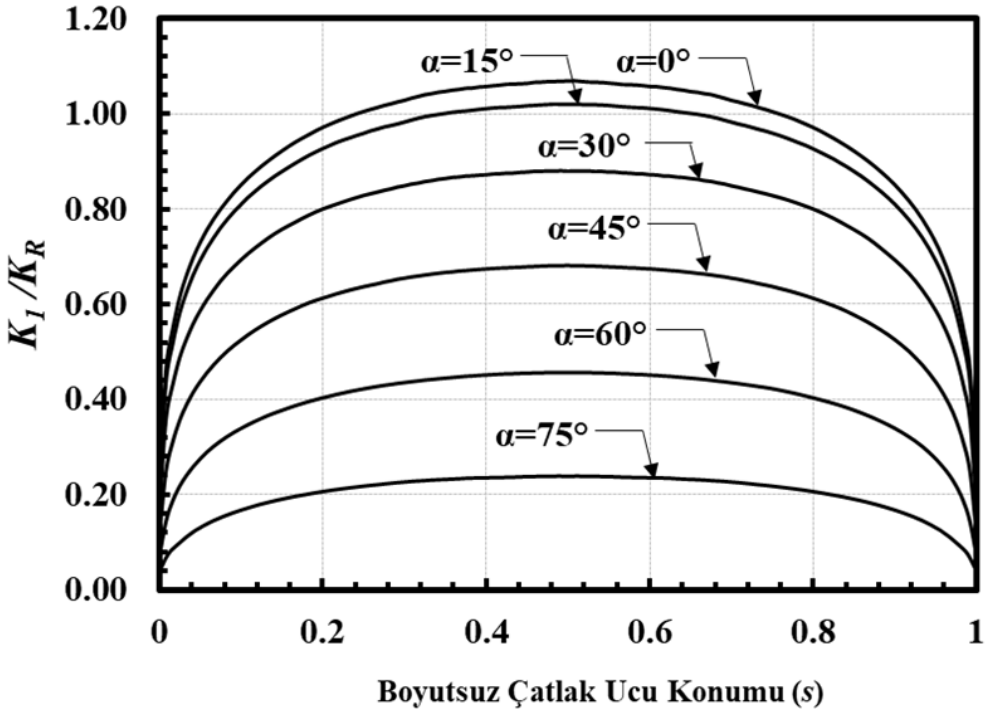
Şekil 2.140. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



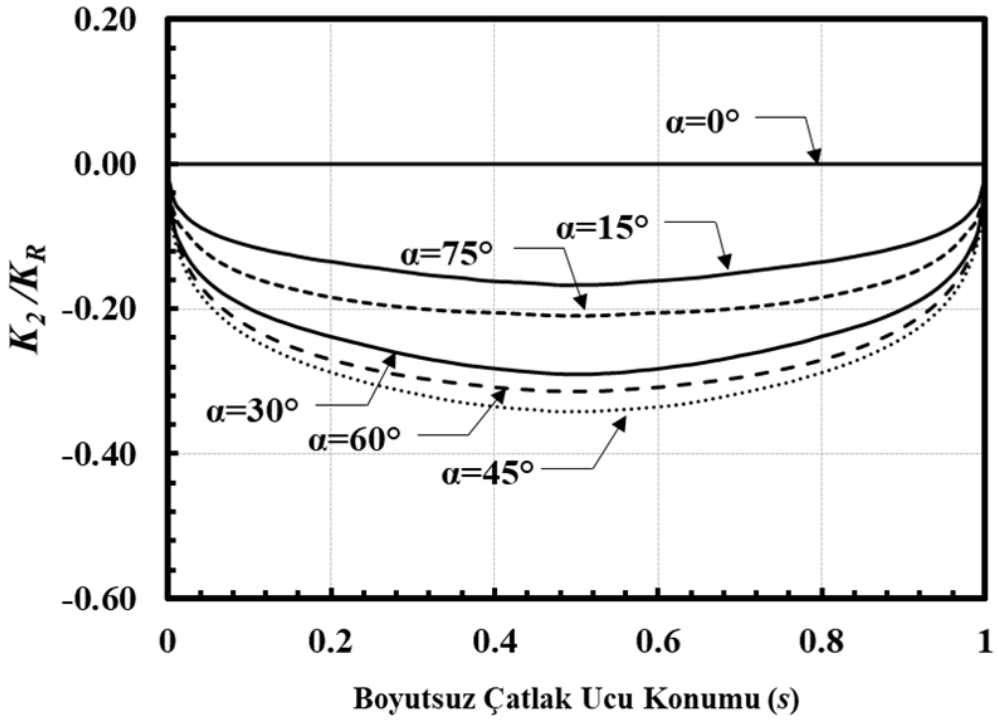
Şekil 2.141. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



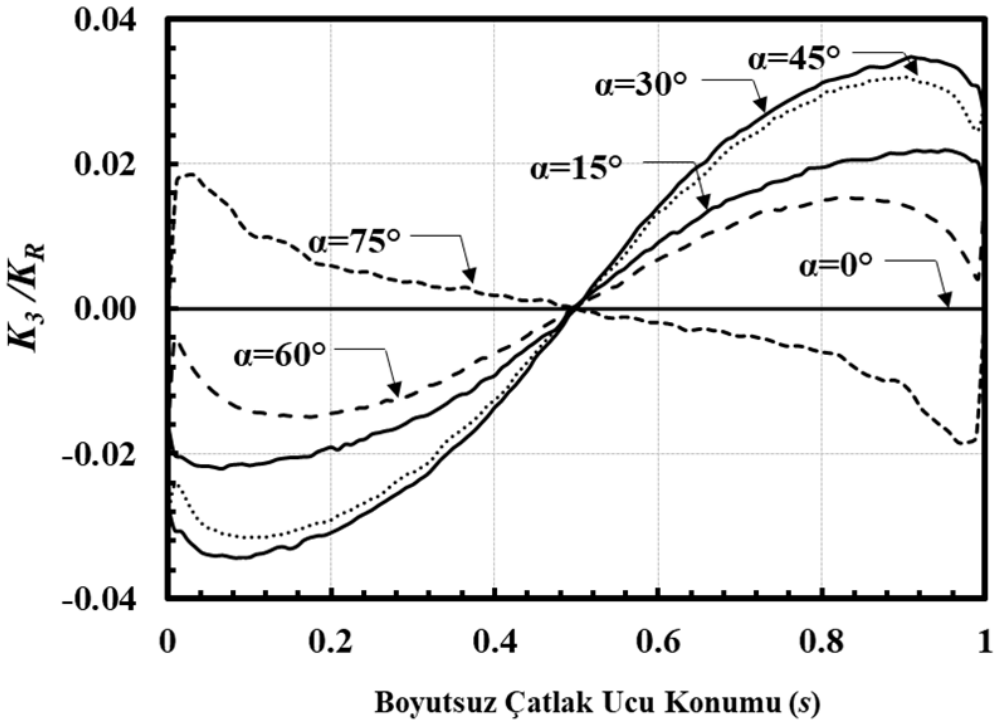
Şekil 2.142. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



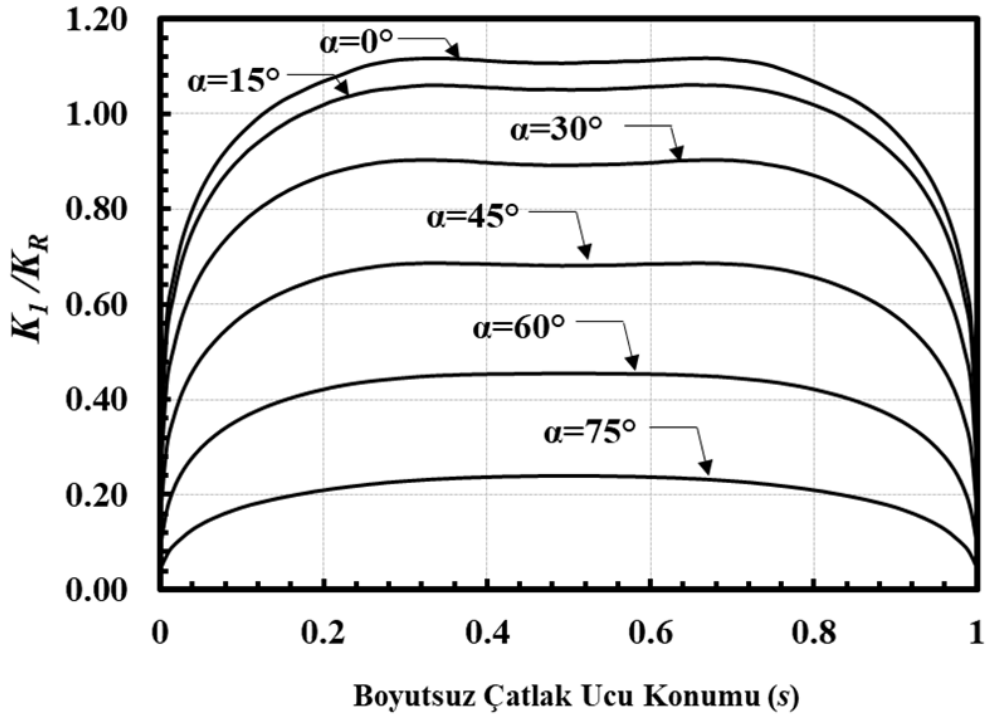
Şekil 2.143. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



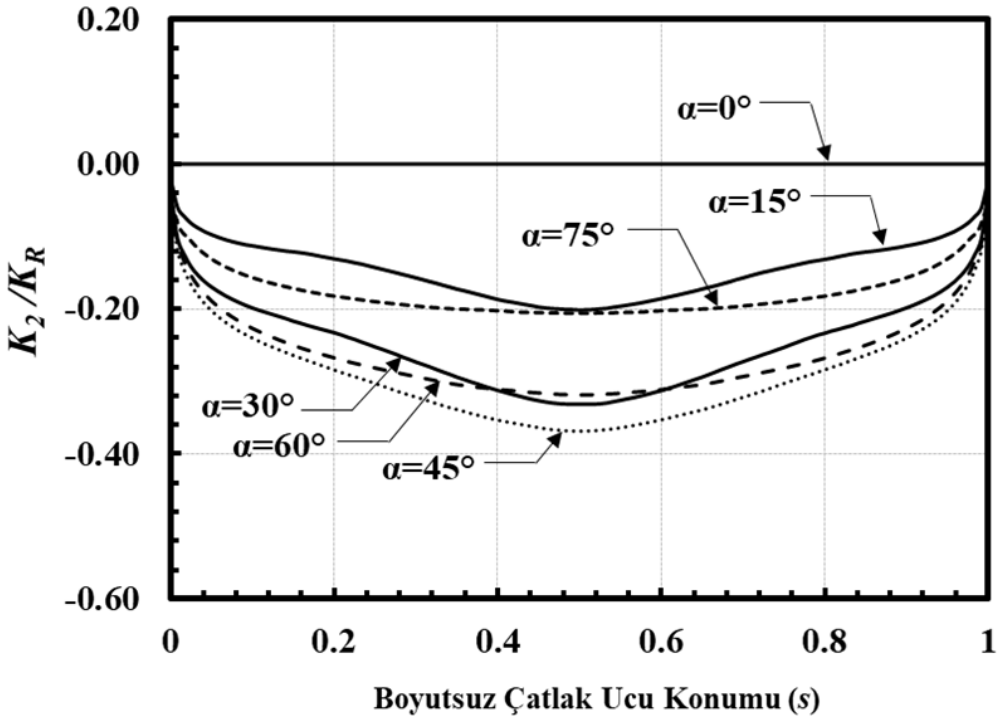
Şekil 2.144. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



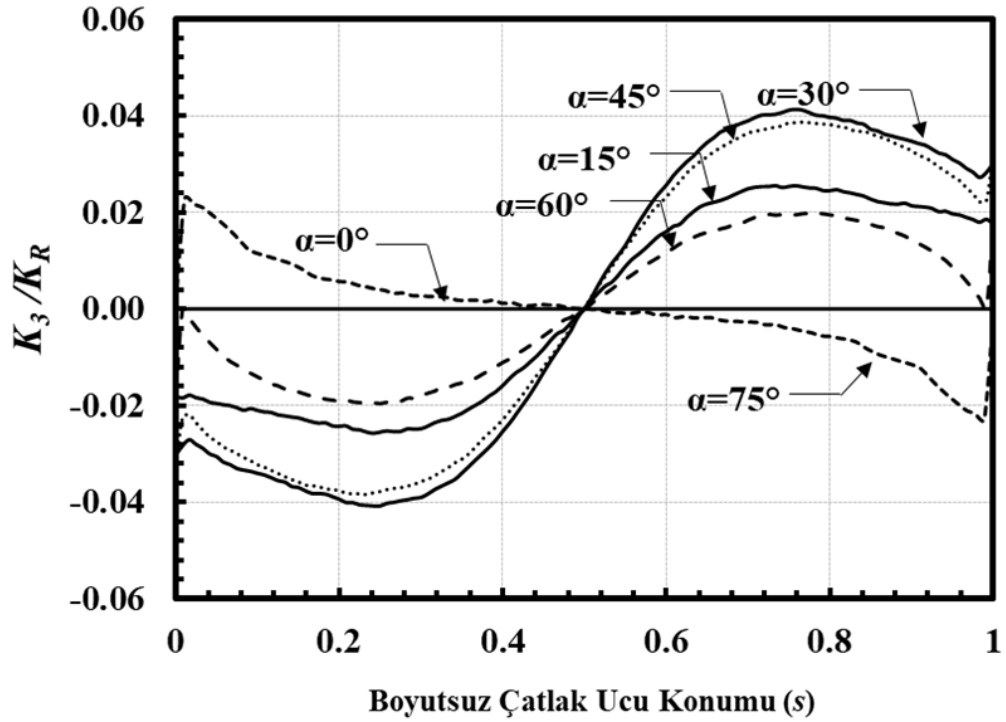
Şekil 2.145. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



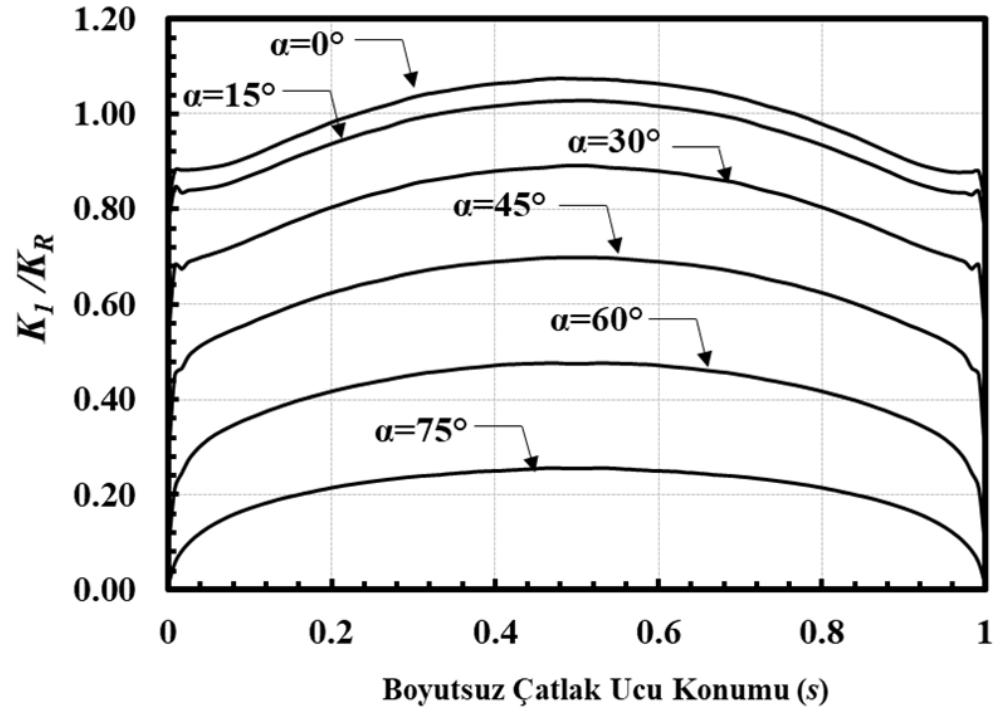
Şekil 2.146. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



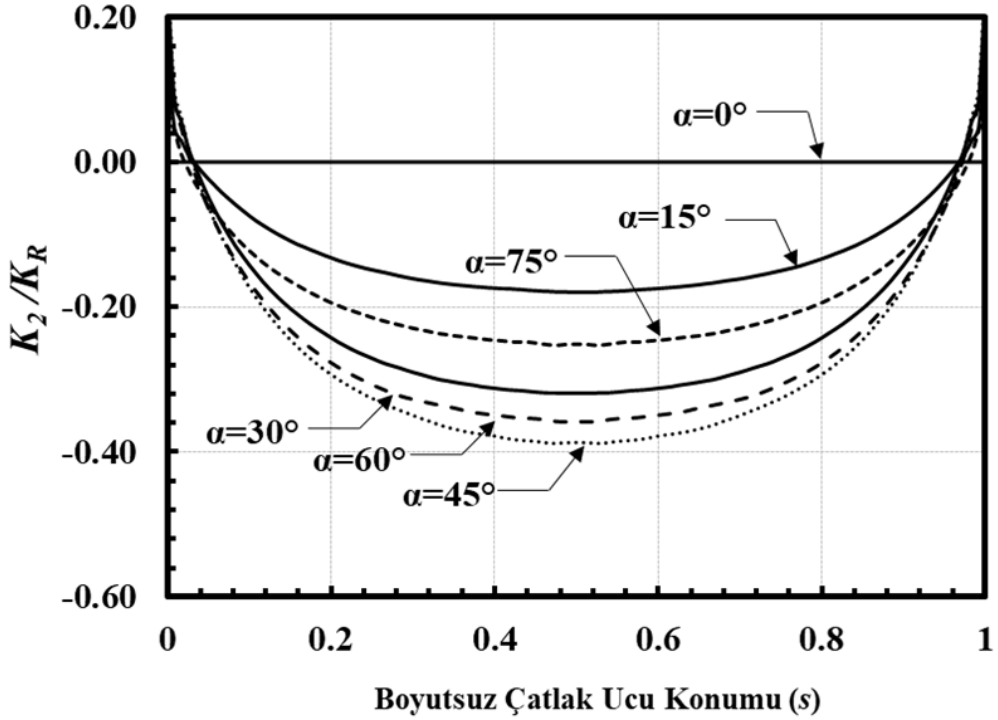
Şekil 2.147. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



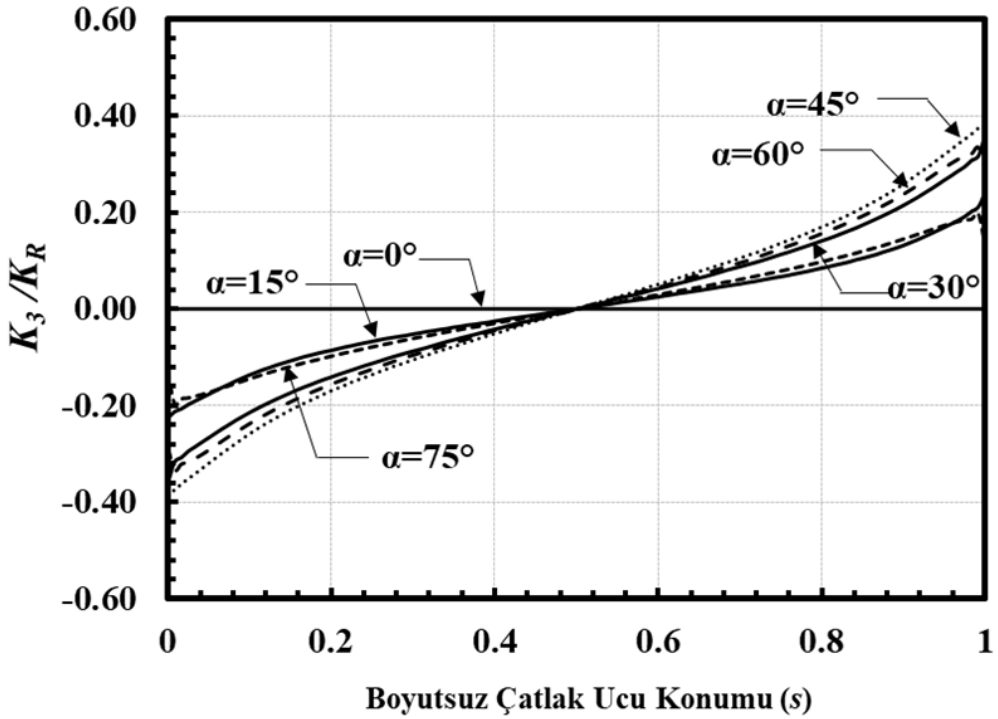
Şekil 2.148. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



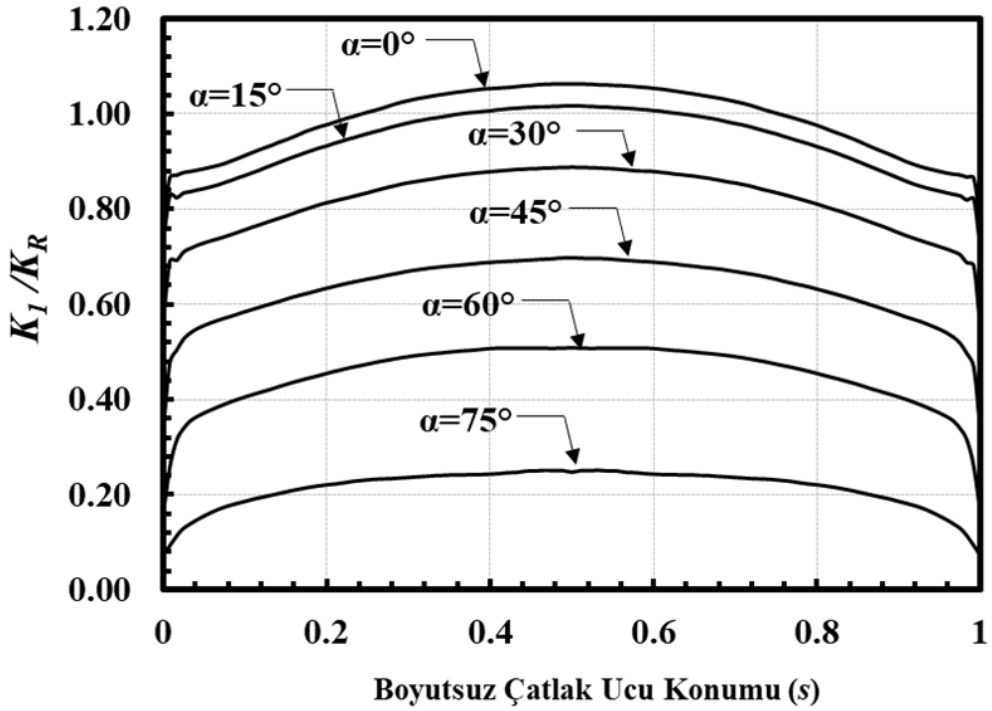
Şekil 2.149. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



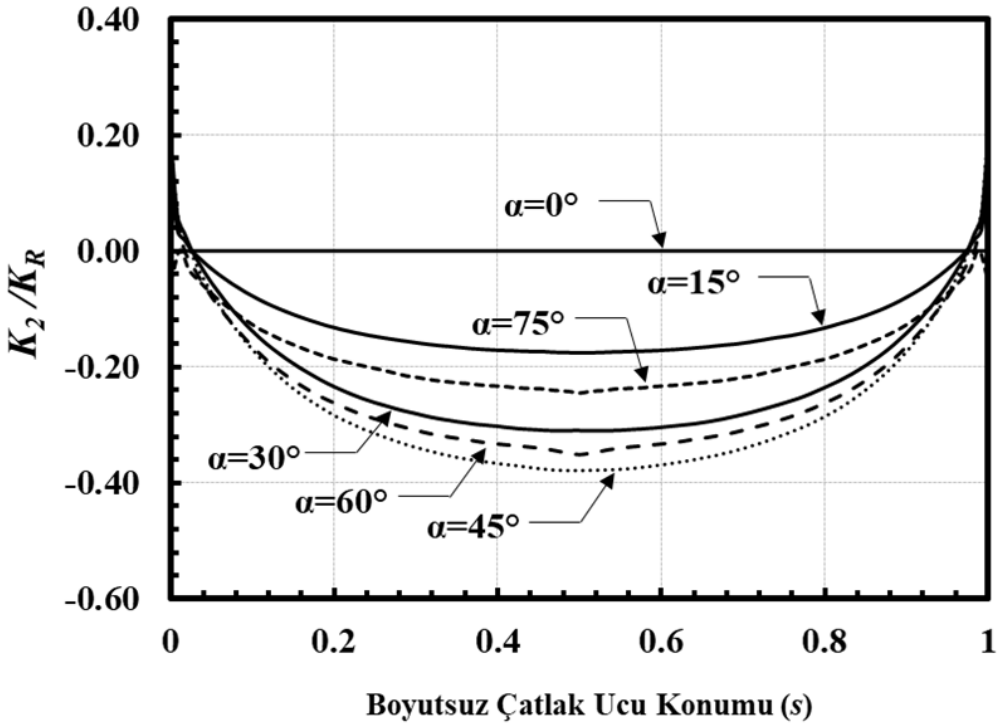
Şekil 2.150. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



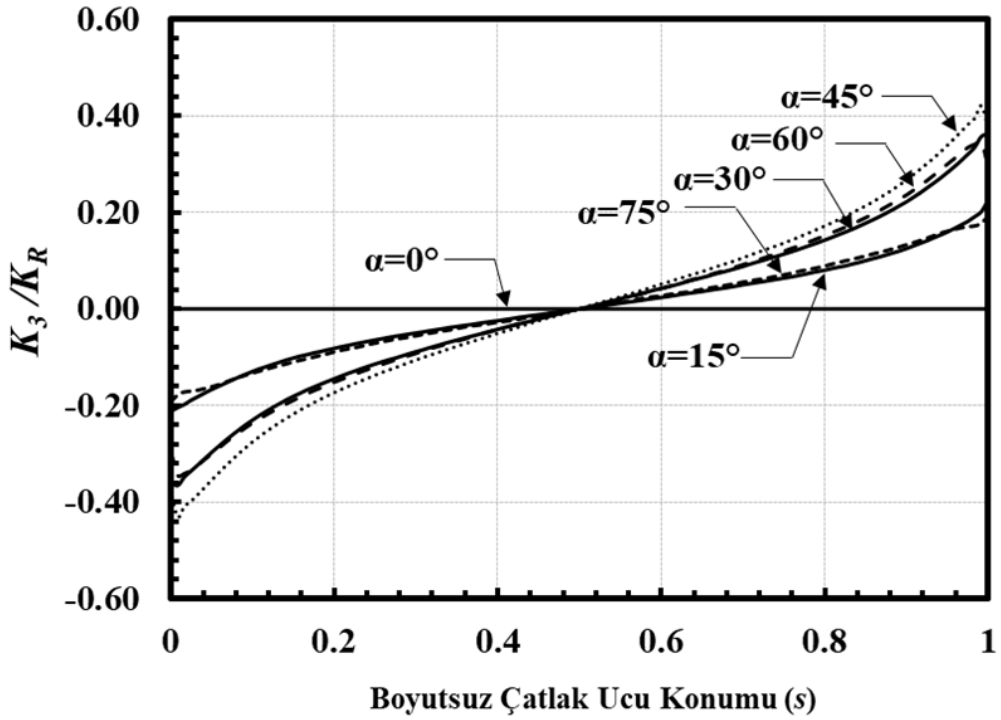
Şekil 2.151. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



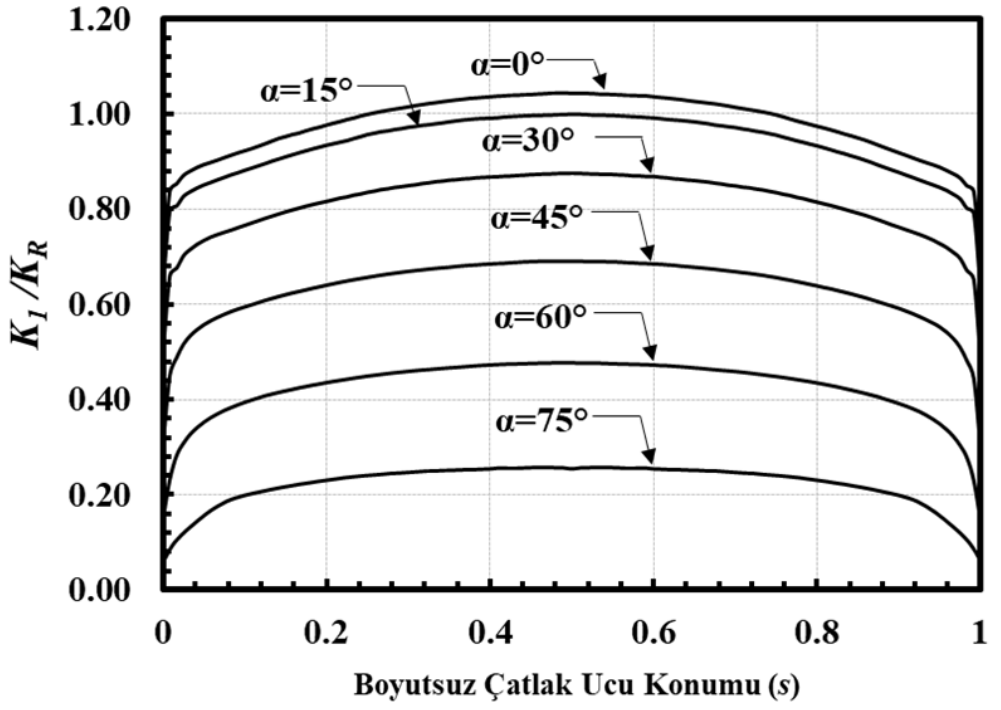
Şekil 2.152. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



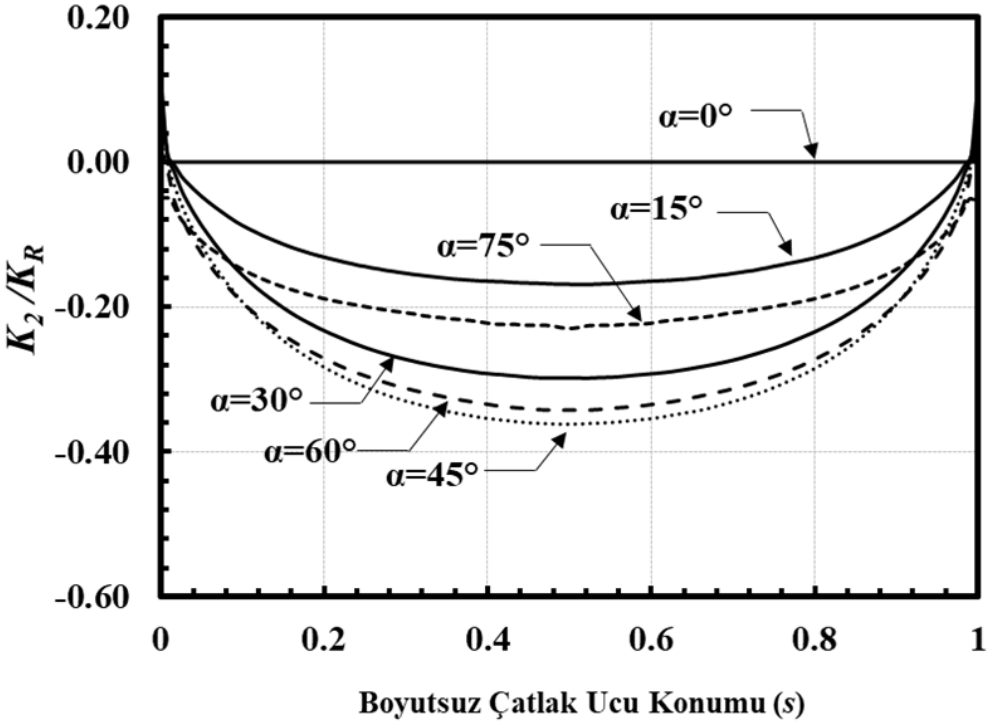
Şekil 2.153. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



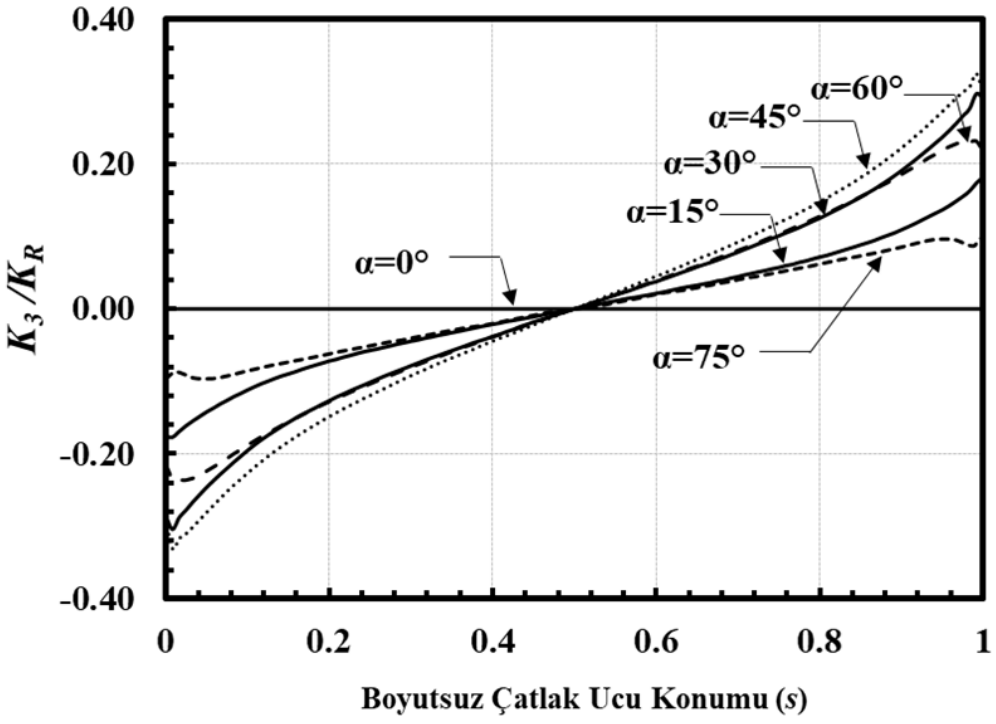
Şekil 2.154. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



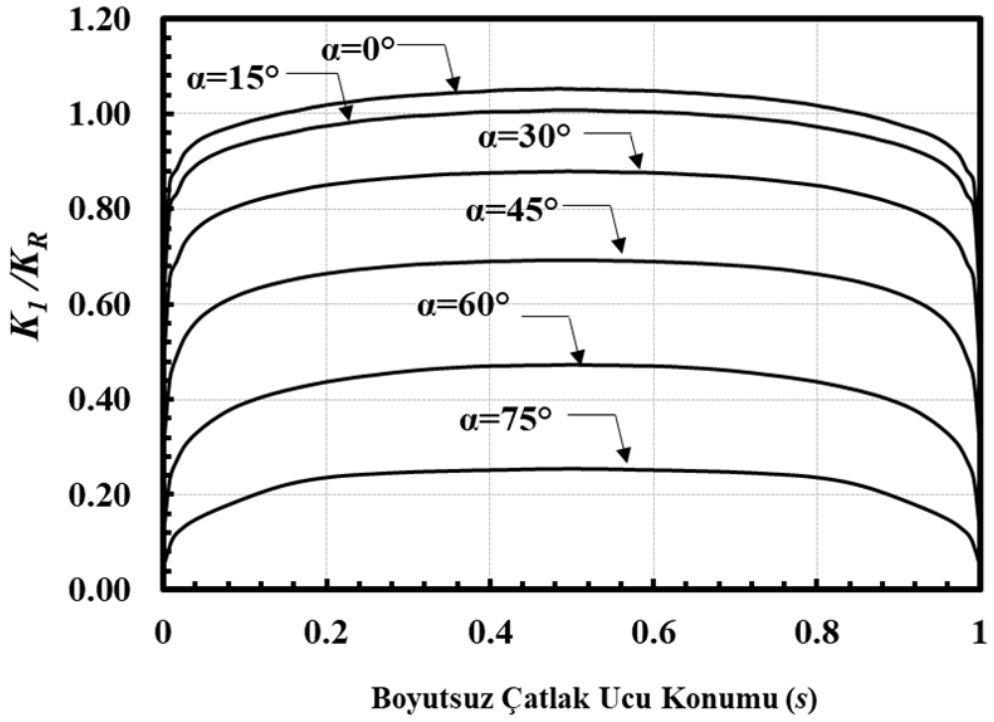
Şekil 2.155. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



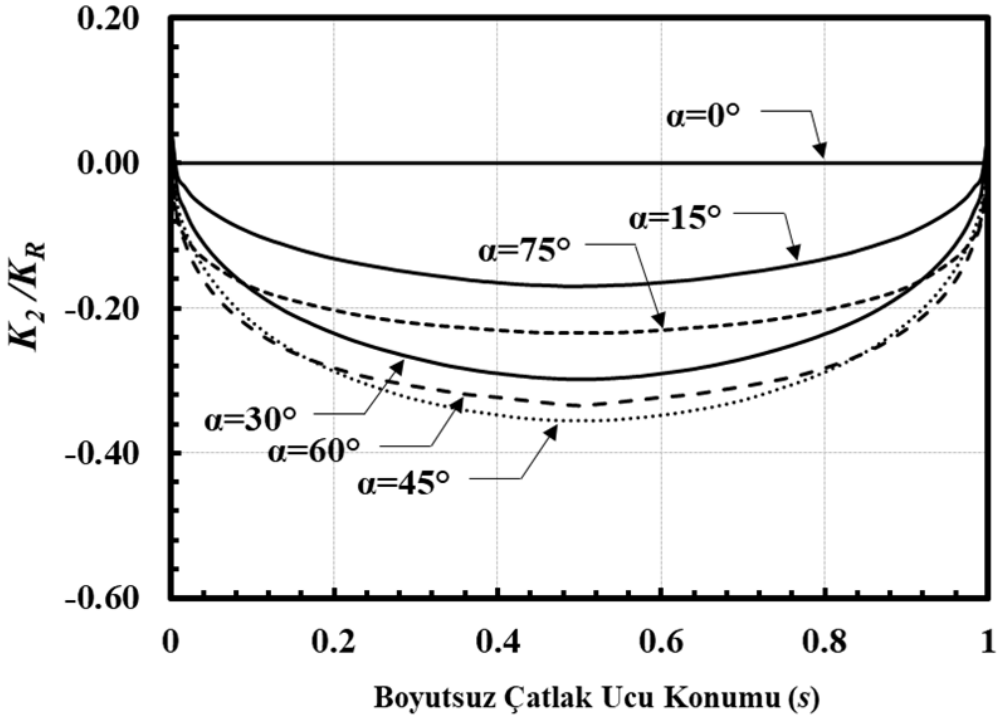
Şekil 2.156. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



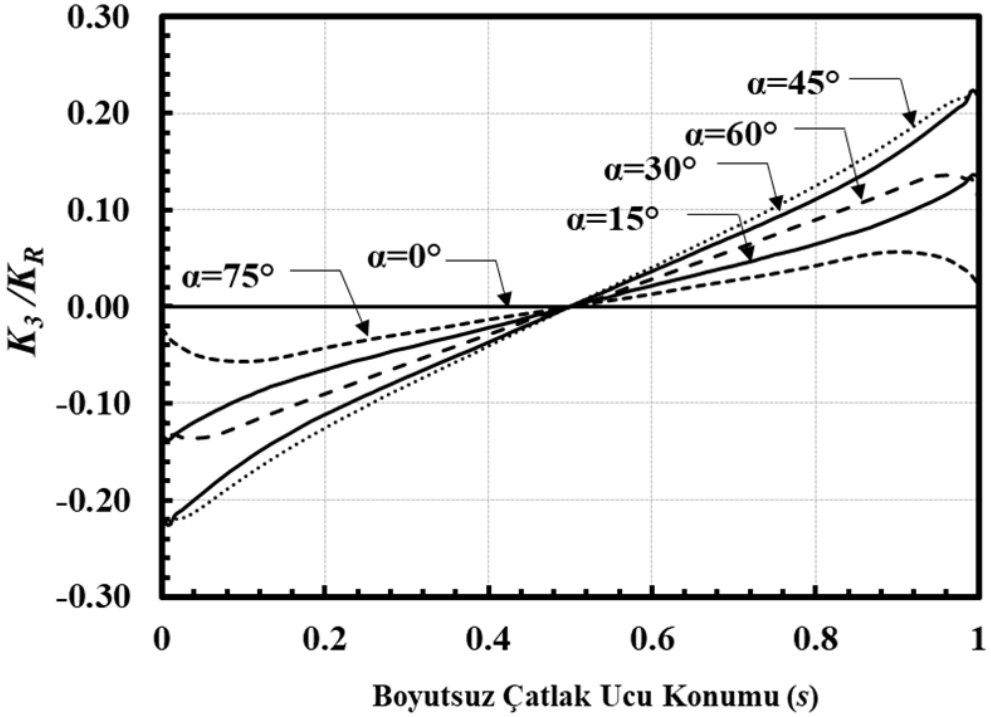
Şekil 2.157. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



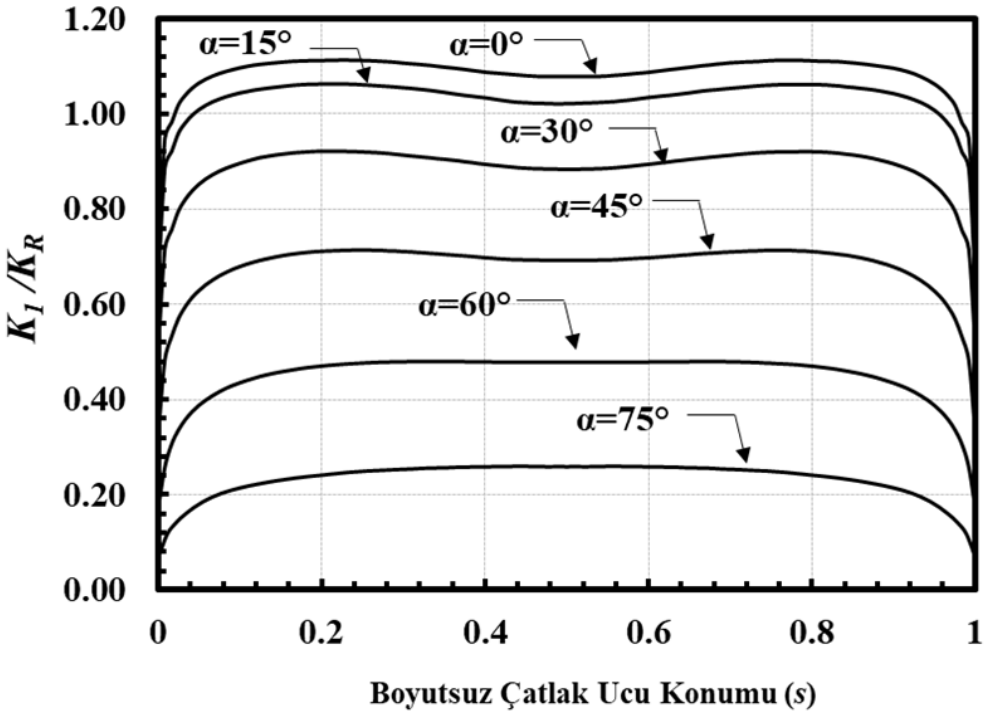
Şekil 2.158. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



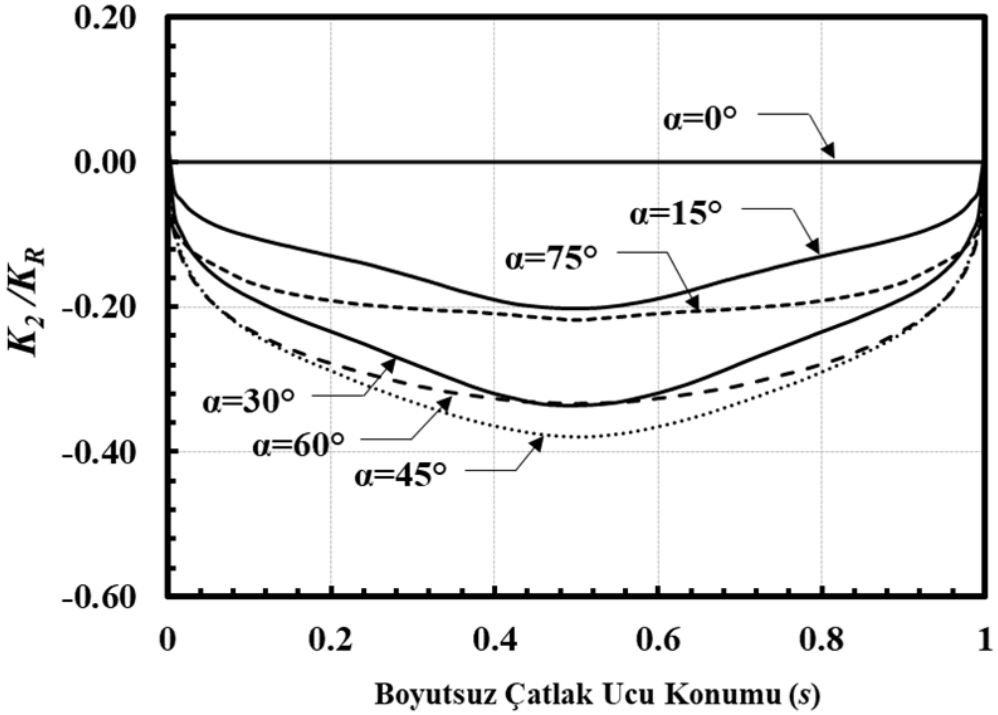
Şekil 2.159. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



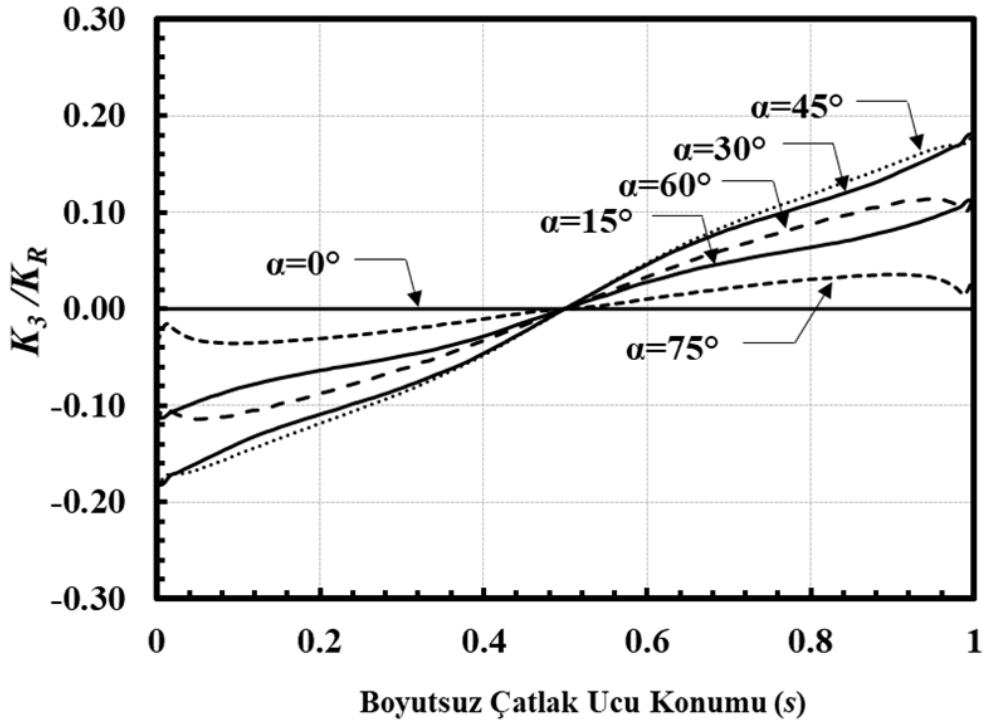
Şekil 2.160. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



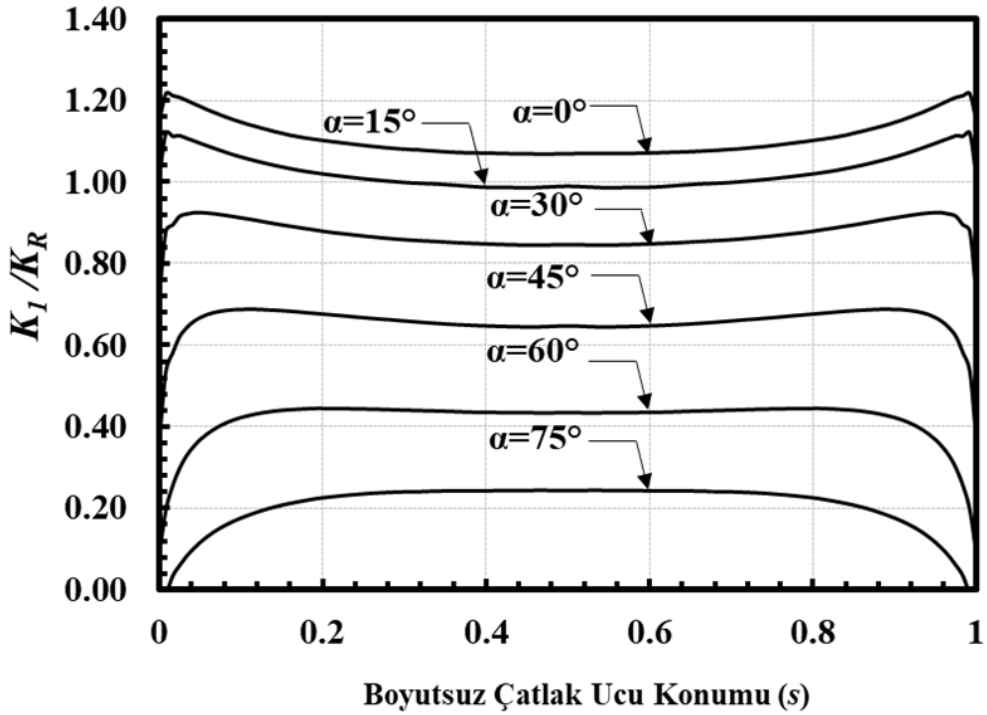
Şekil 2.161. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



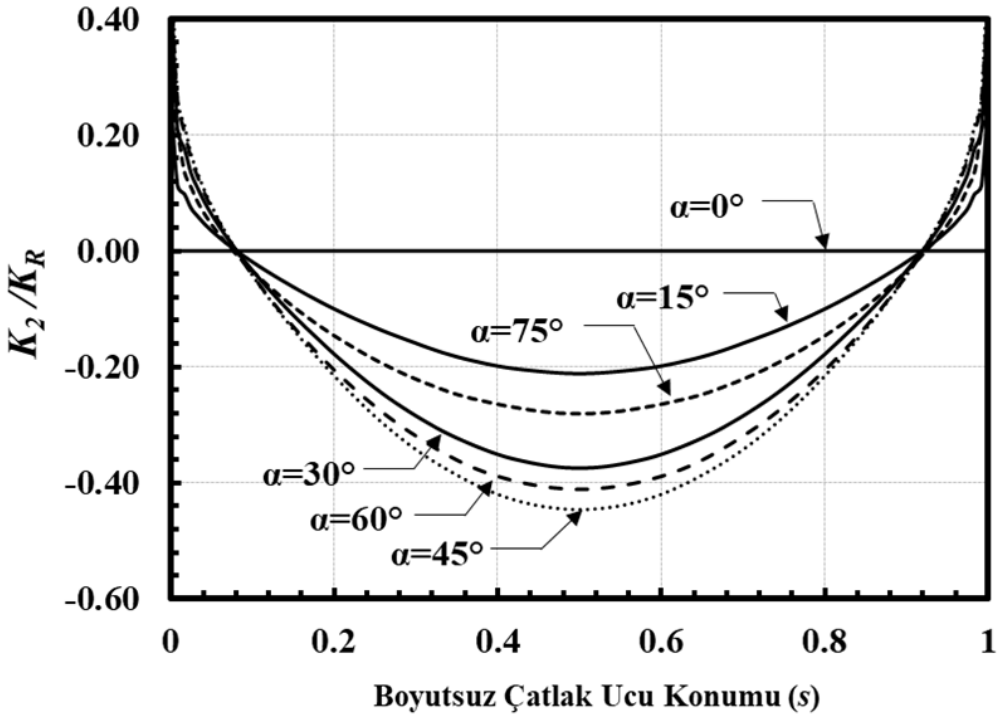
Şekil 2.162. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



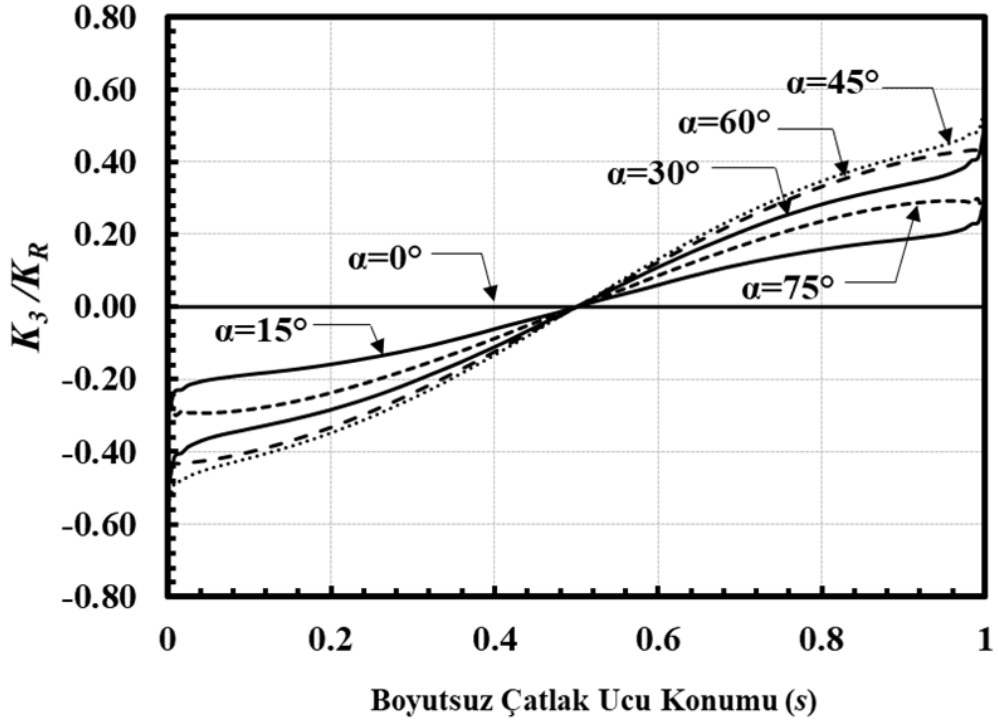
Şekil 2.163. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



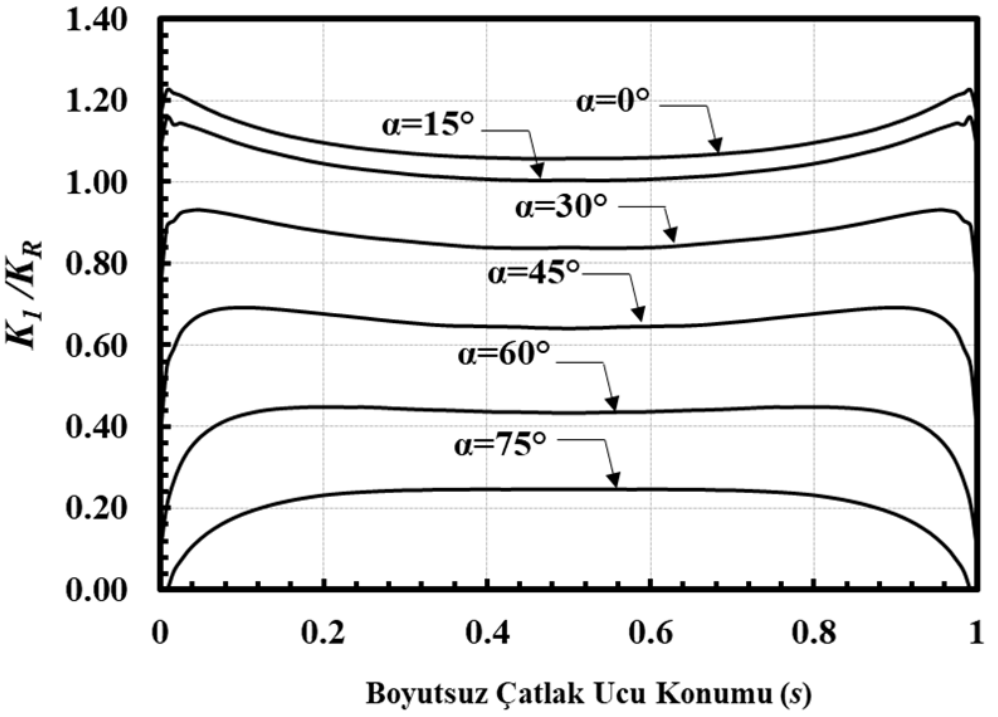
Şekil 2.164. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



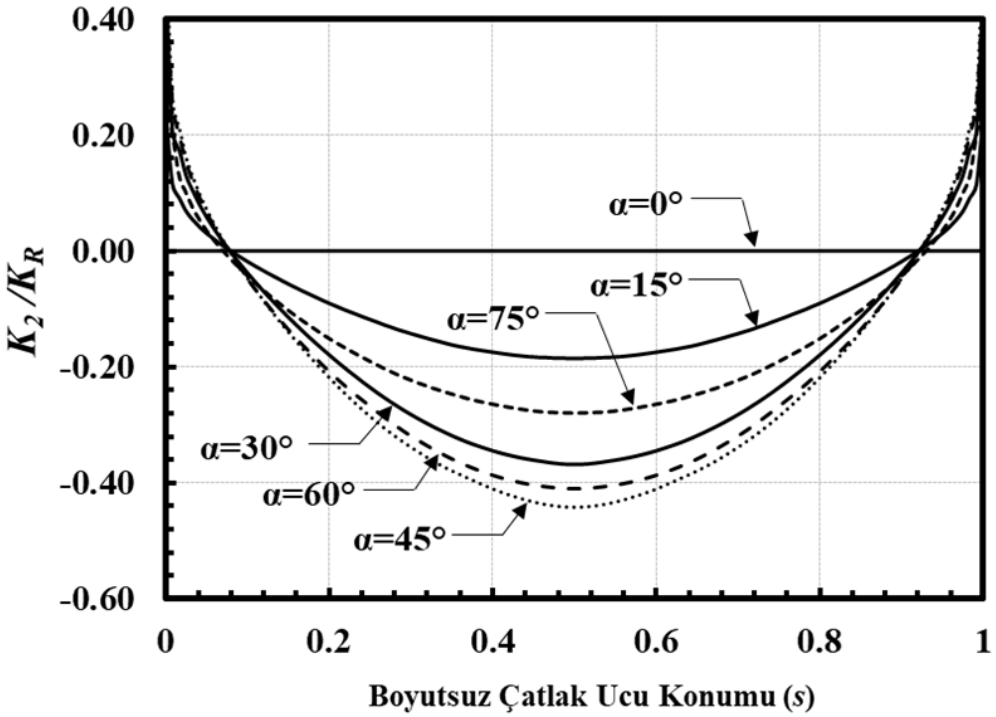
Şekil 2.165. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



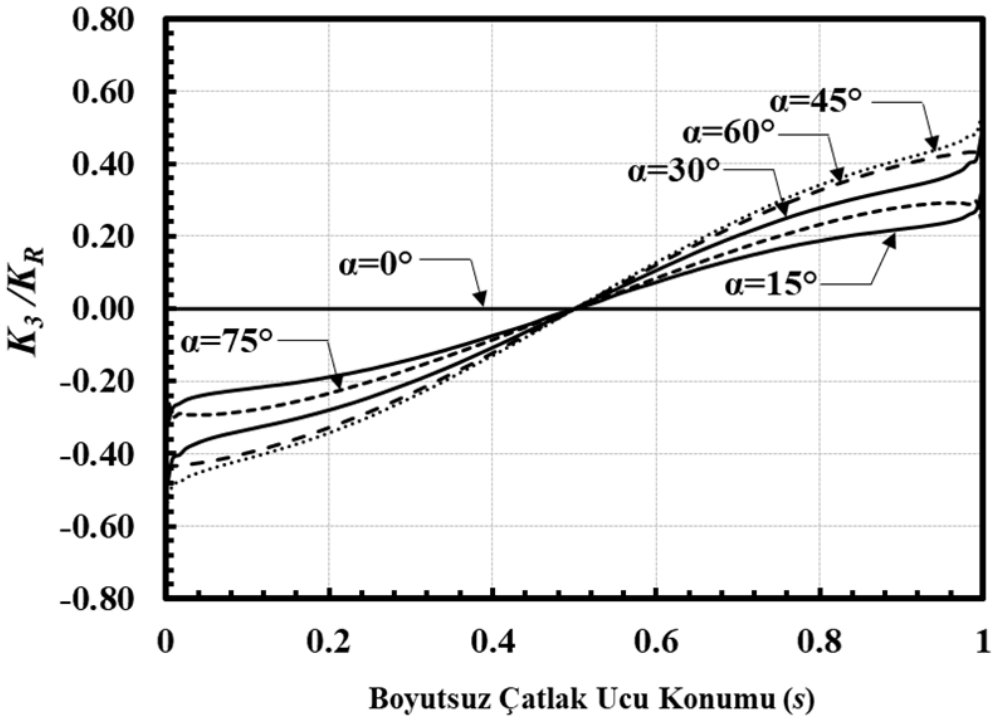
Şekil 2.166. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



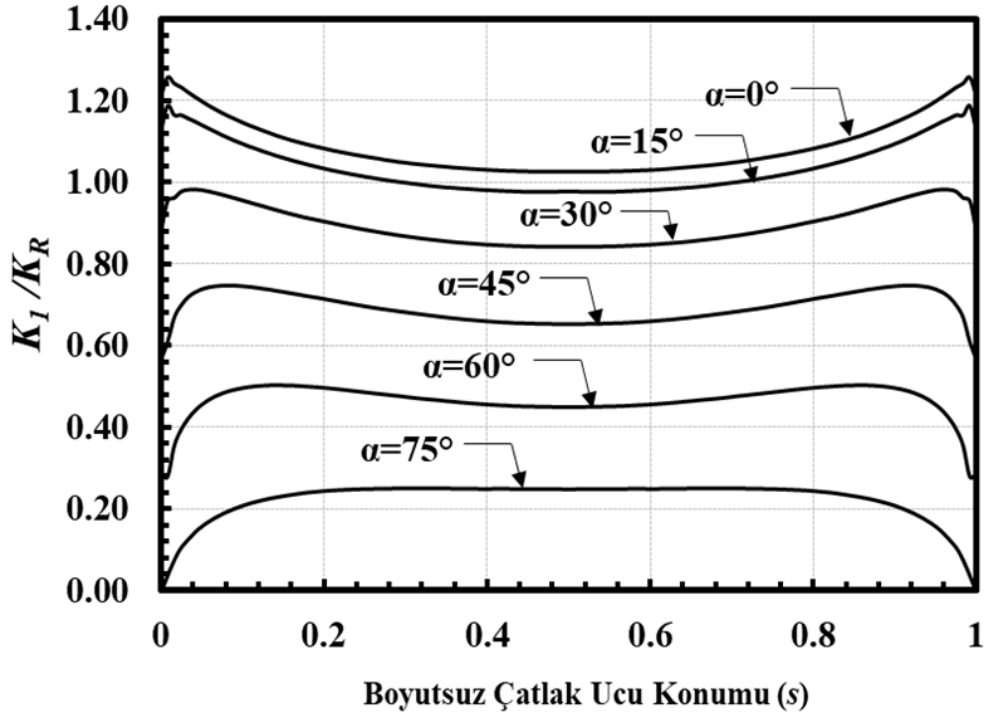
Şekil 2.167. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



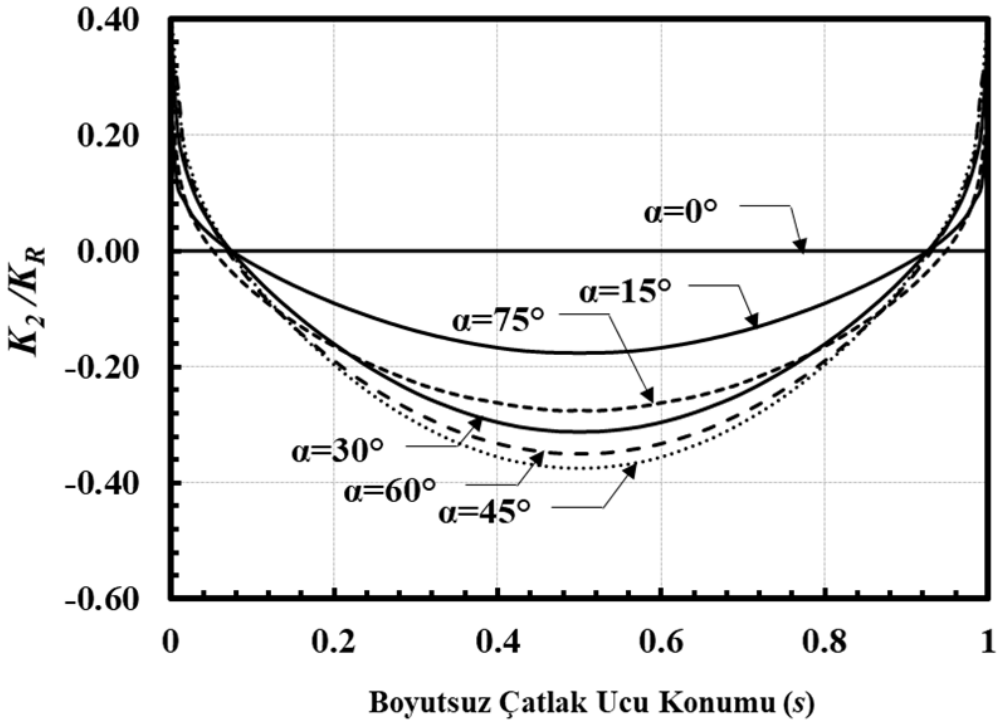
Şekil 2.168. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



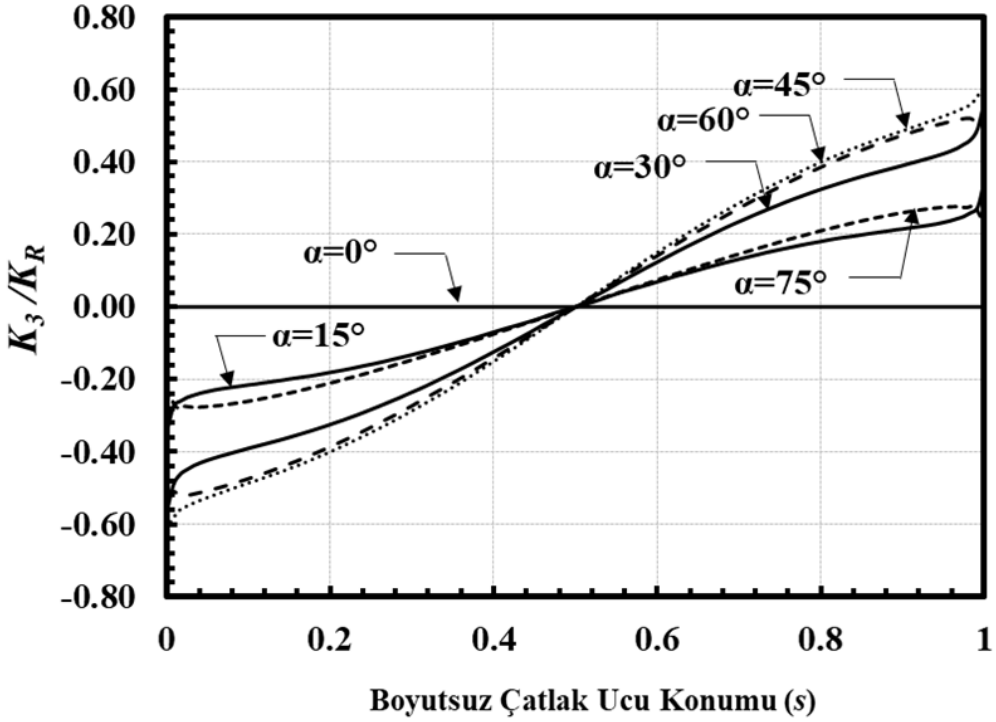
Şekil 2.169. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



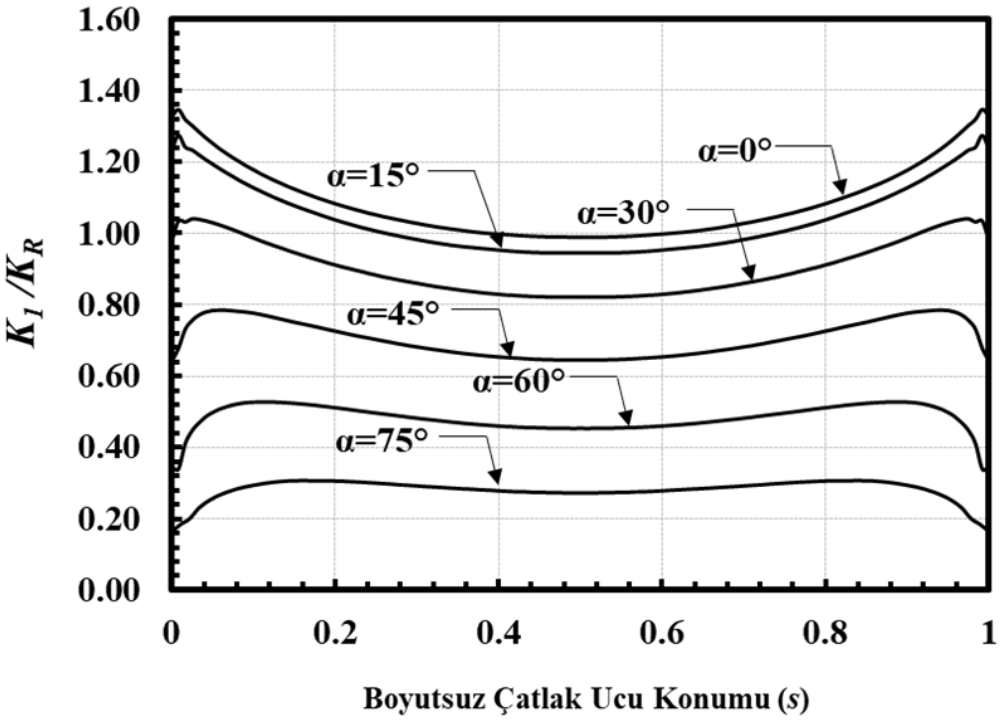
Şekil 2.170. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



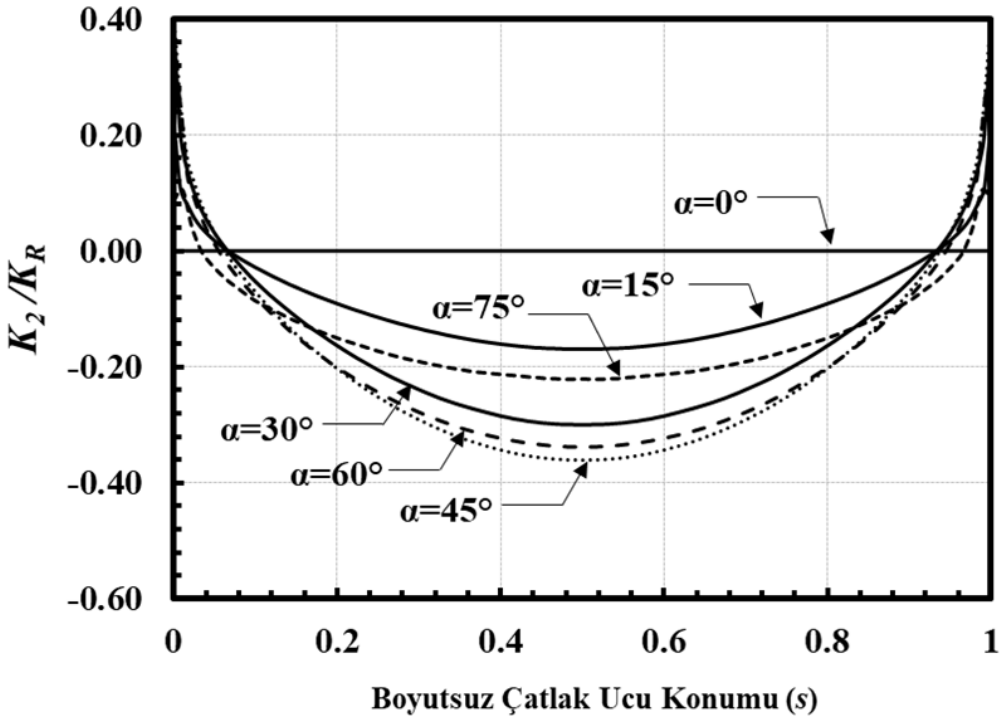
Şekil 2.171. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



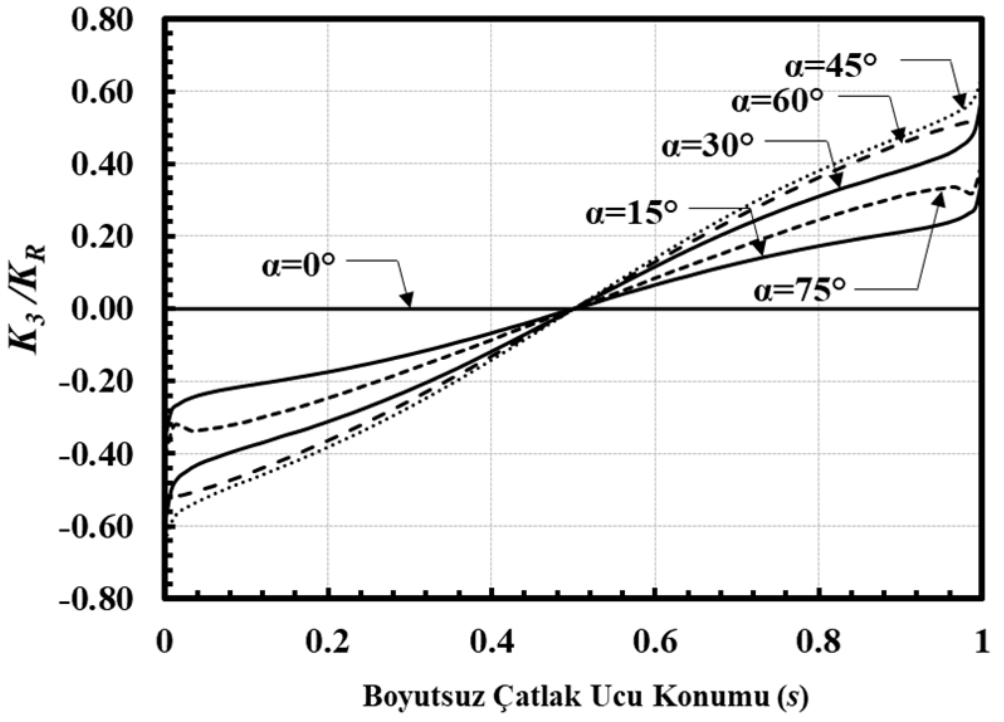
Şekil 2.172. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



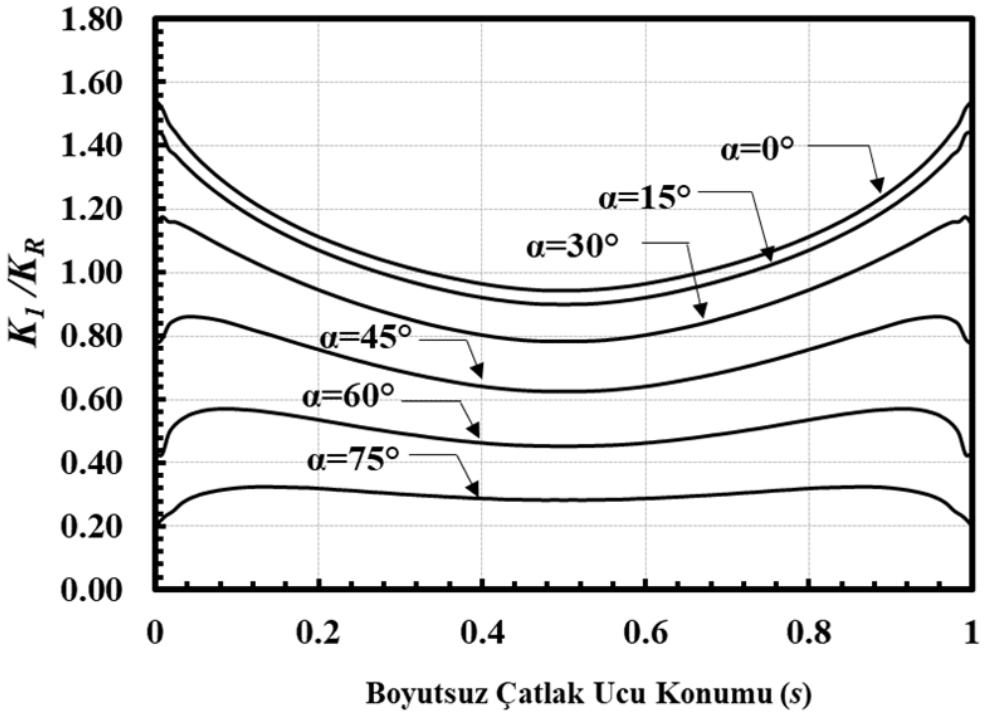
Şekil 2.173. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



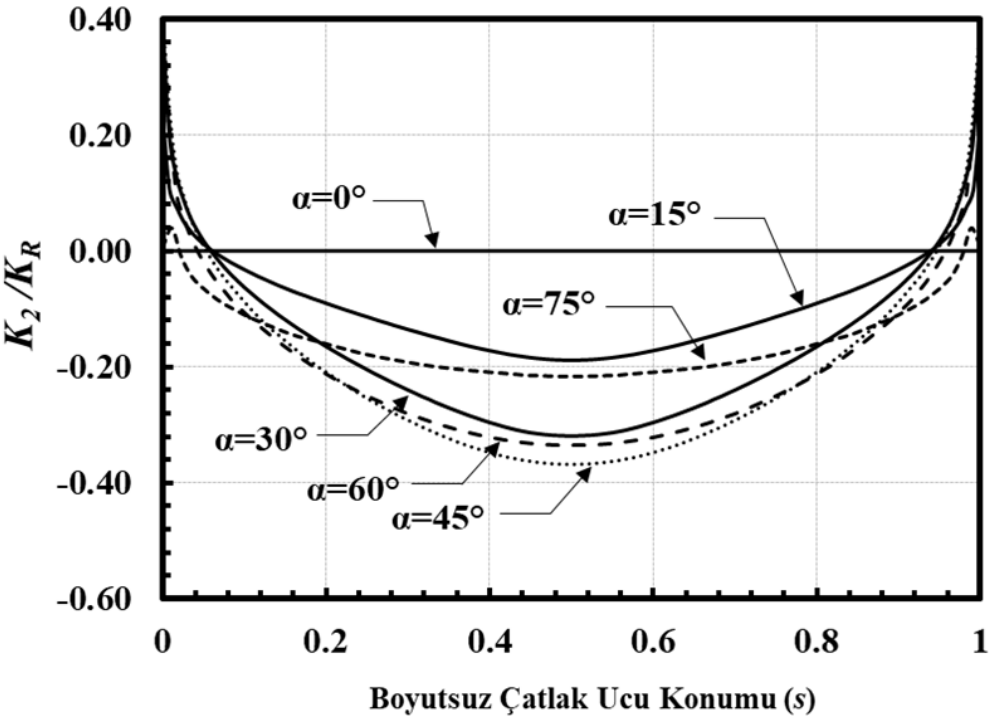
Şekil 2.174. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



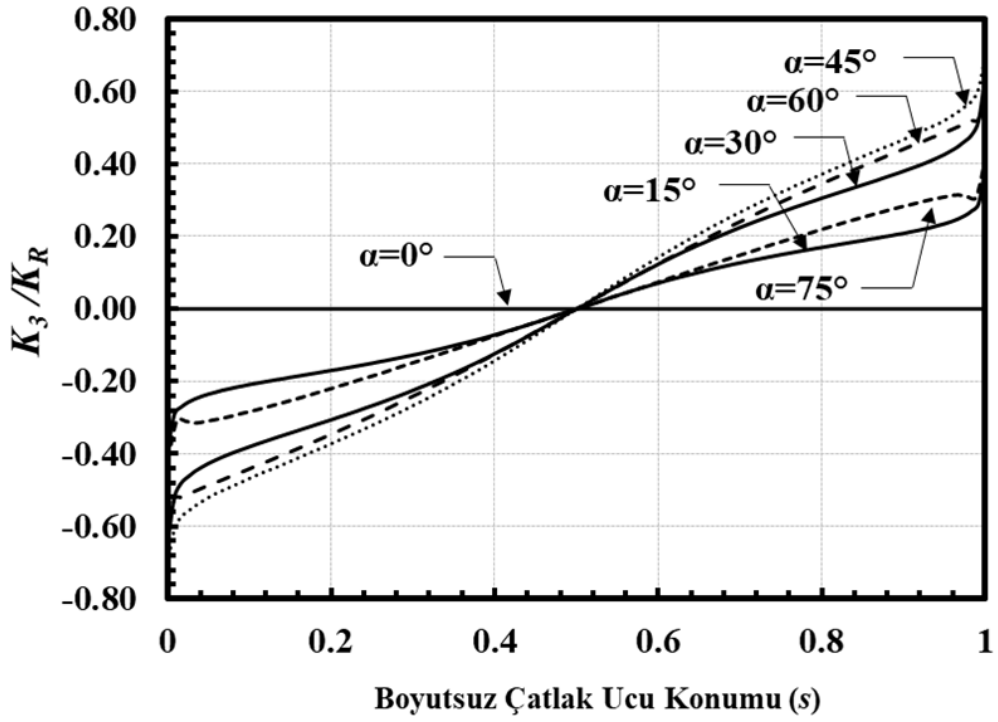
Şekil 2.175. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



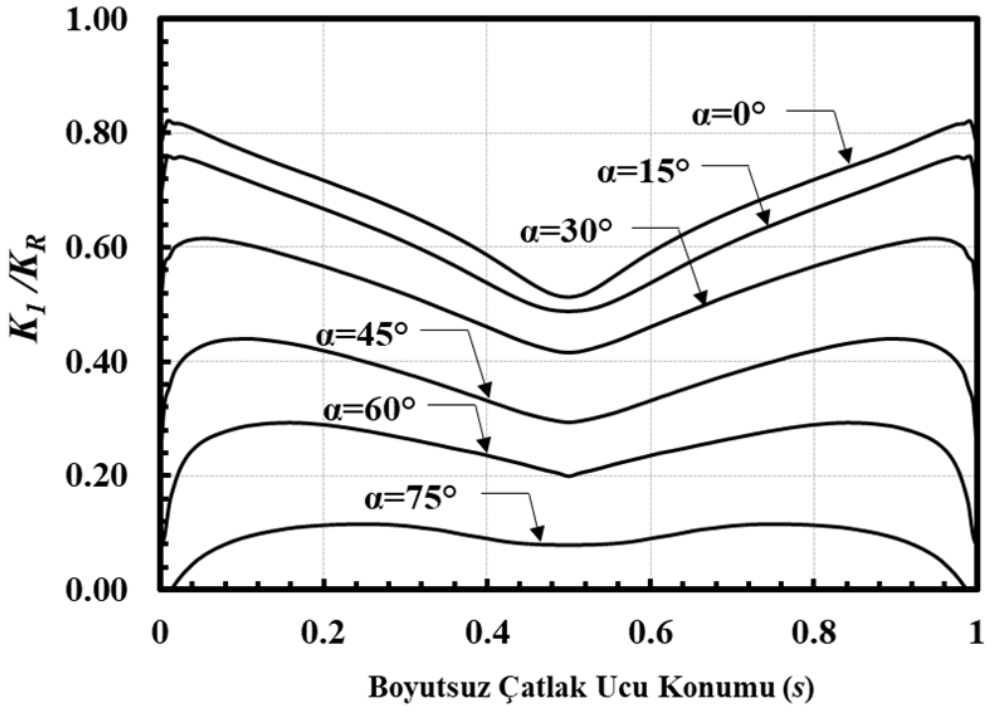
Şekil 2.176. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



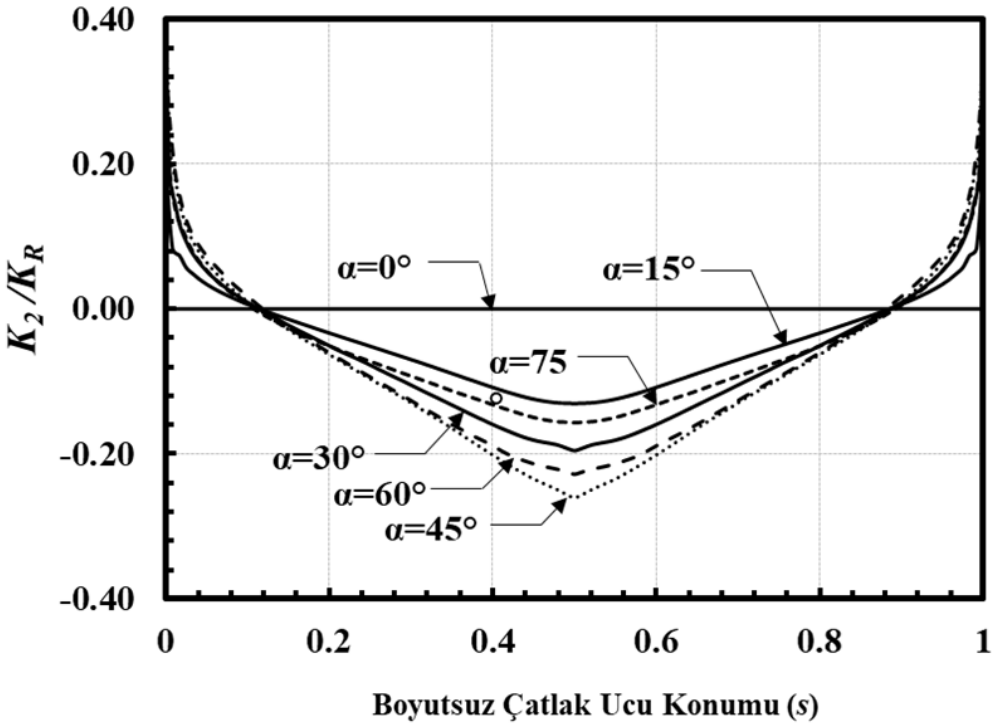
Şekil 2.177. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



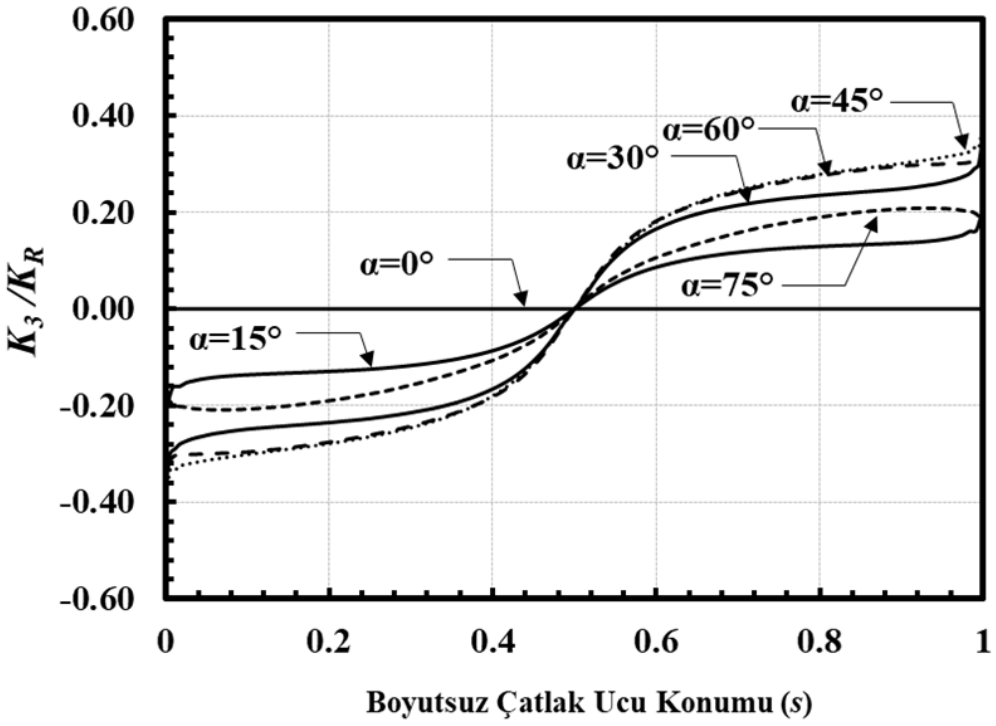
Şekil 2.178. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



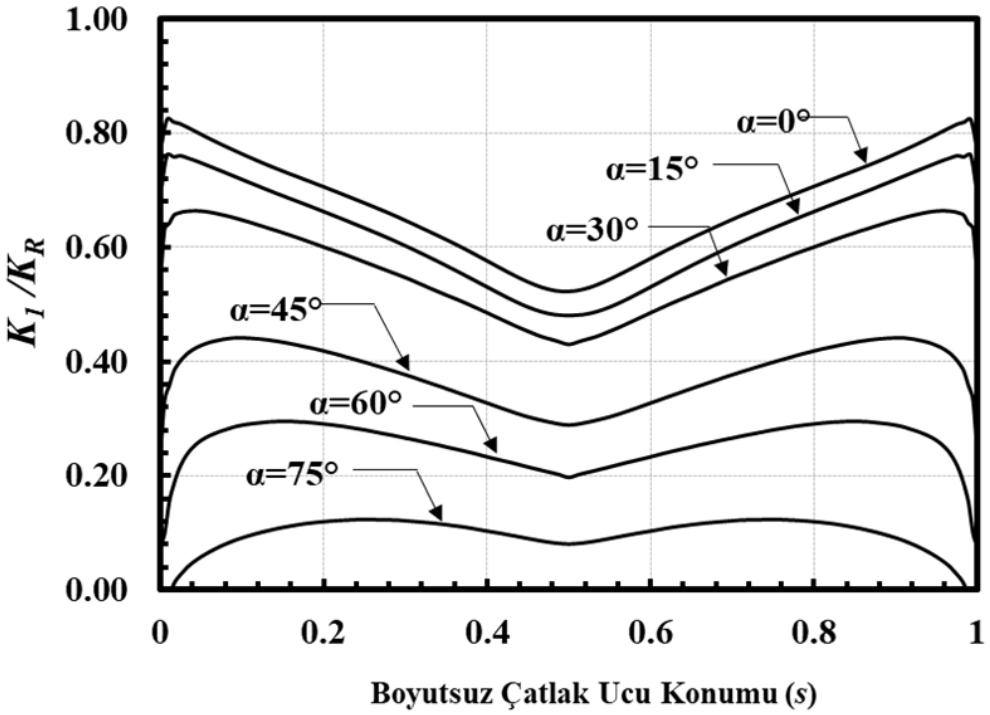
Şekil 2.179. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



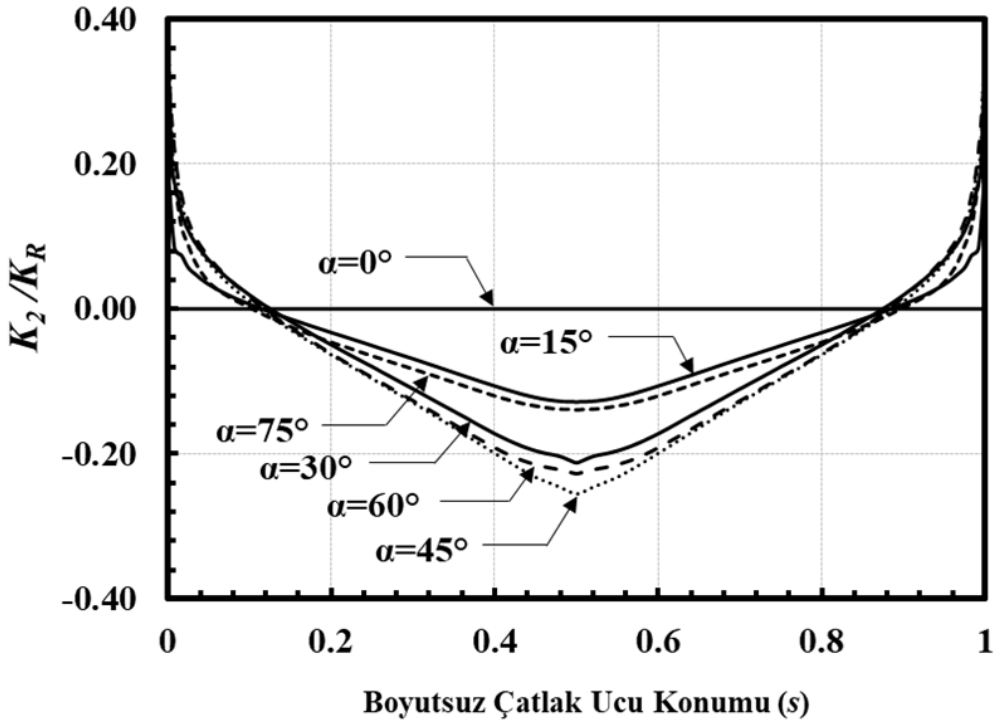
Şekil 2.180. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



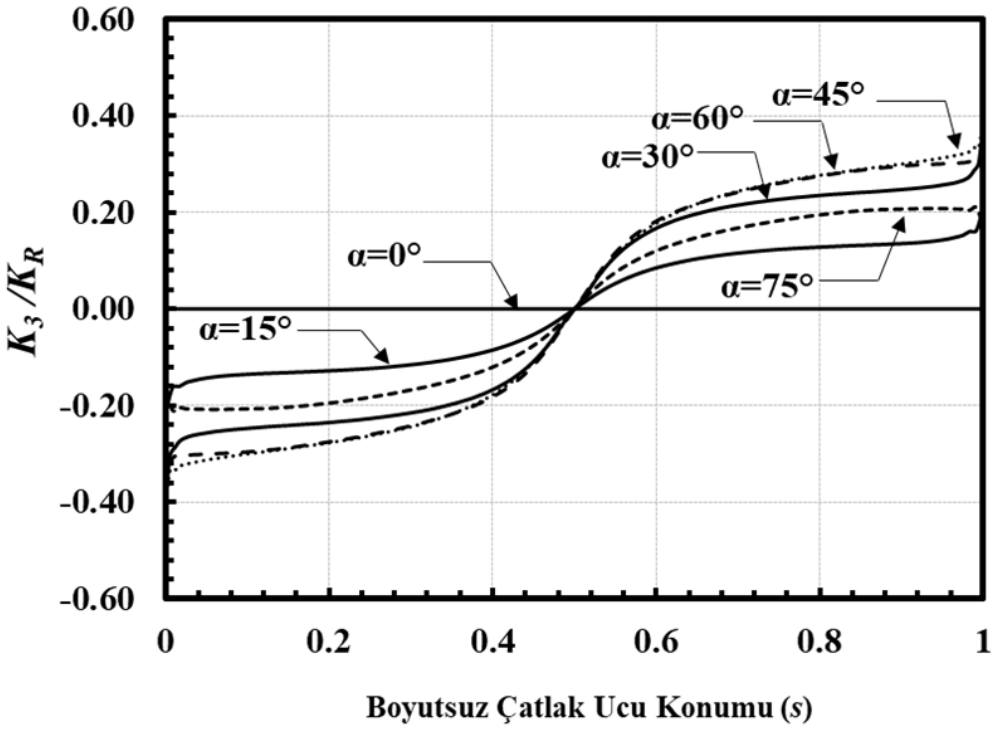
Şekil 2.181. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



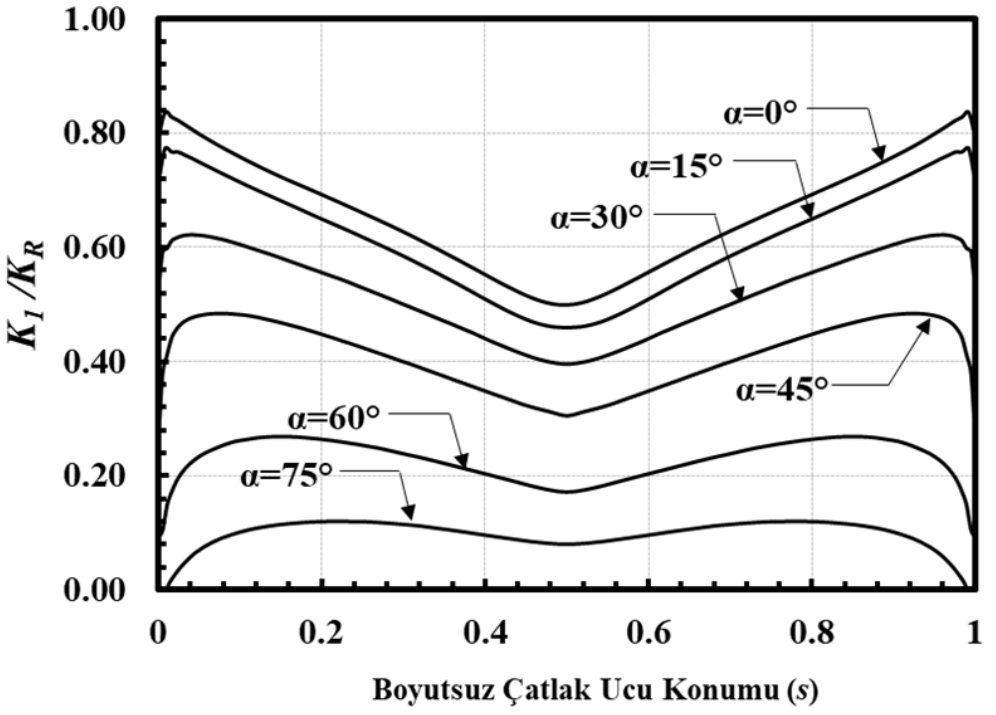
Şekil 2.182. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



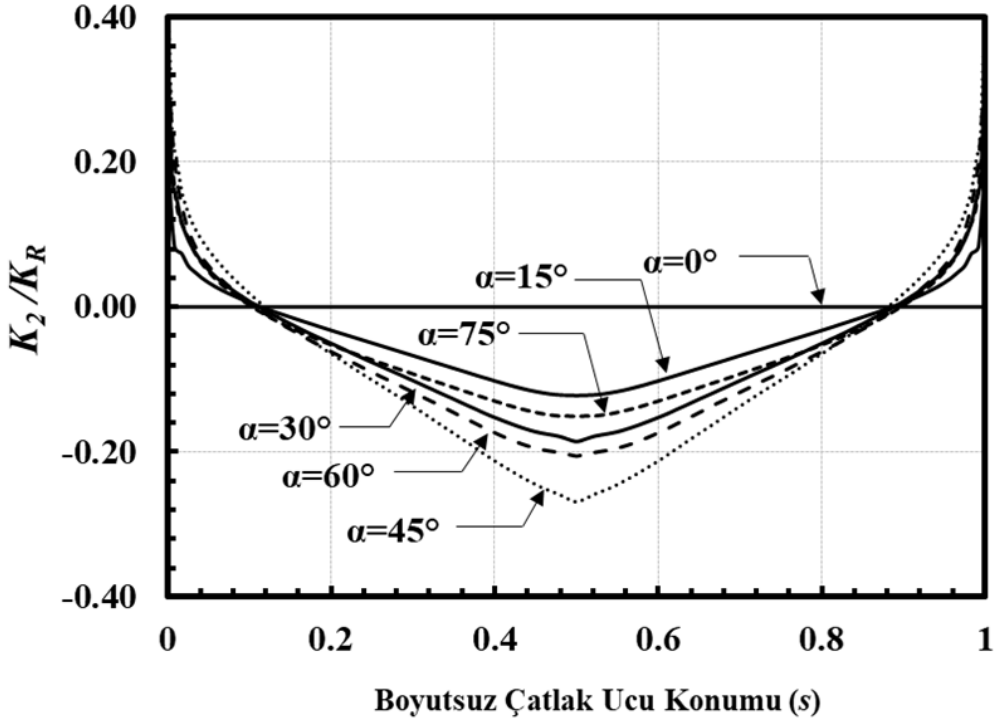
Şekil 2.183. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



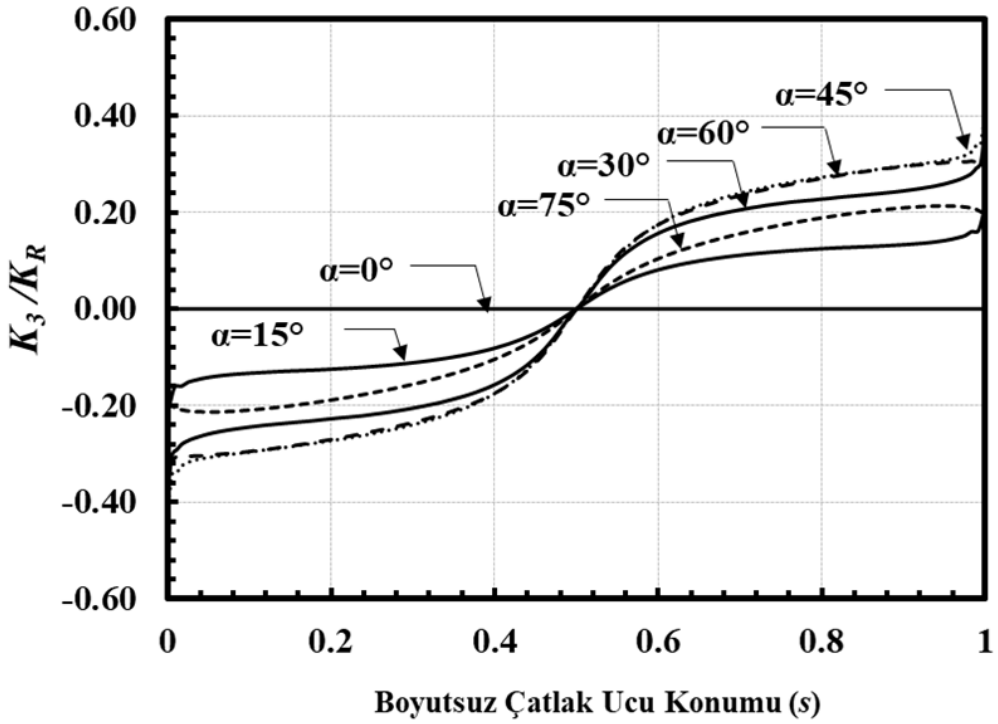
Şekil 2.184. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



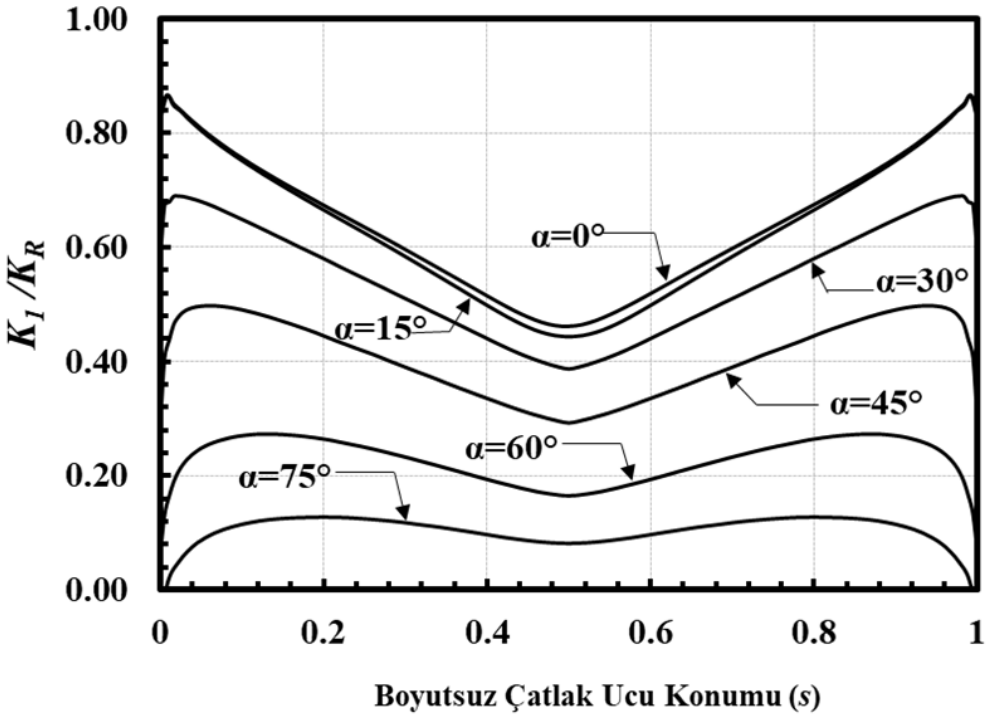
Şekil 2.185. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



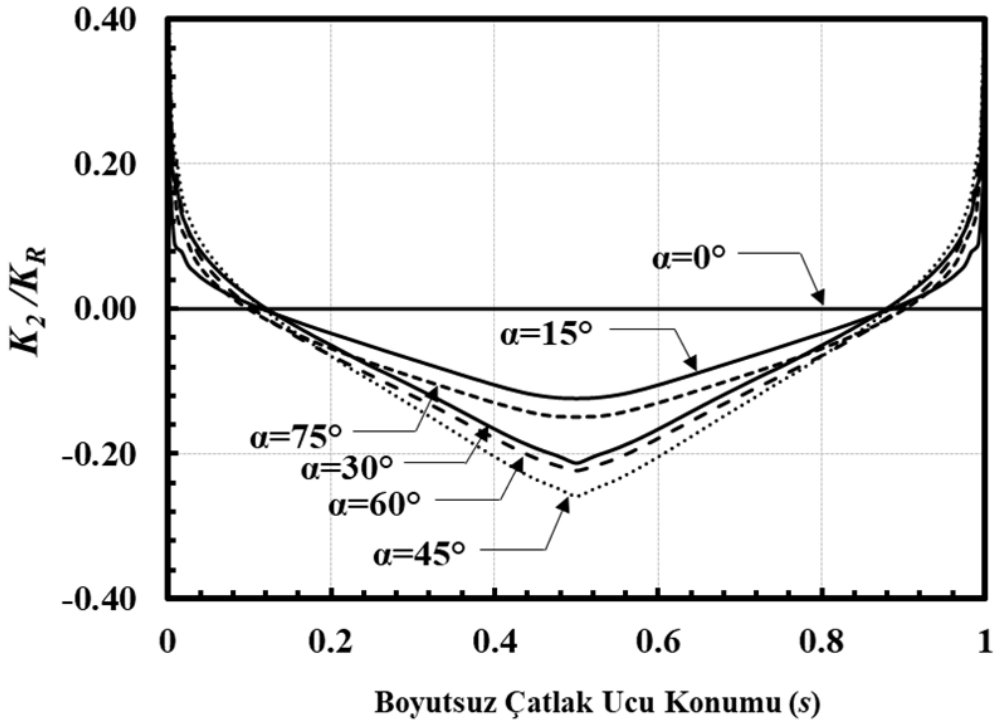
Şekil 2.186. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



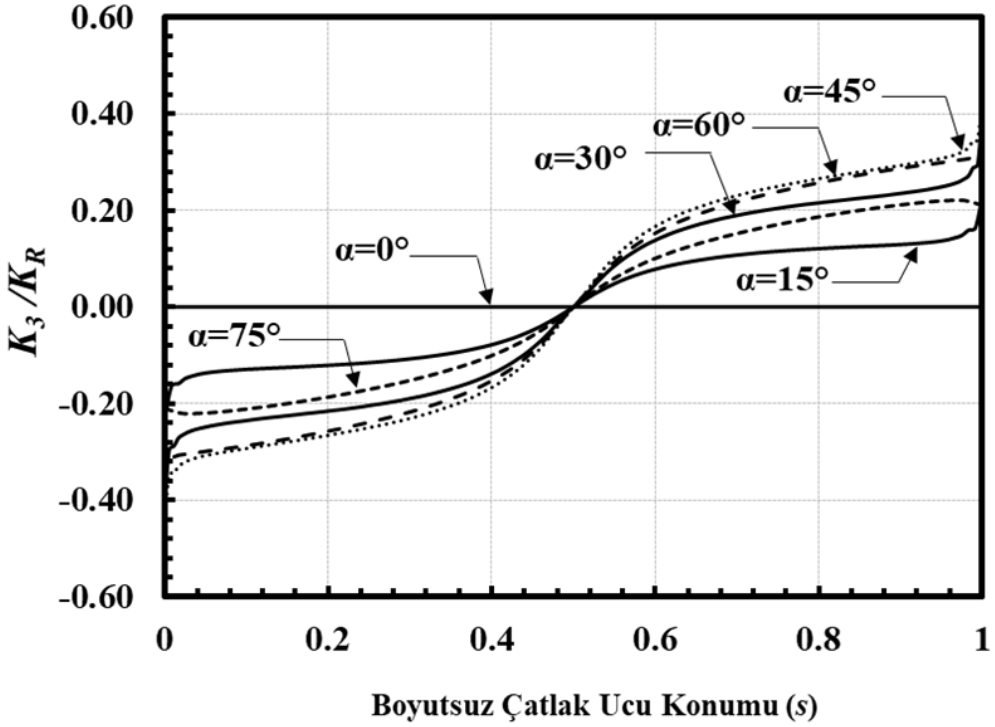
Şekil 2.187. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



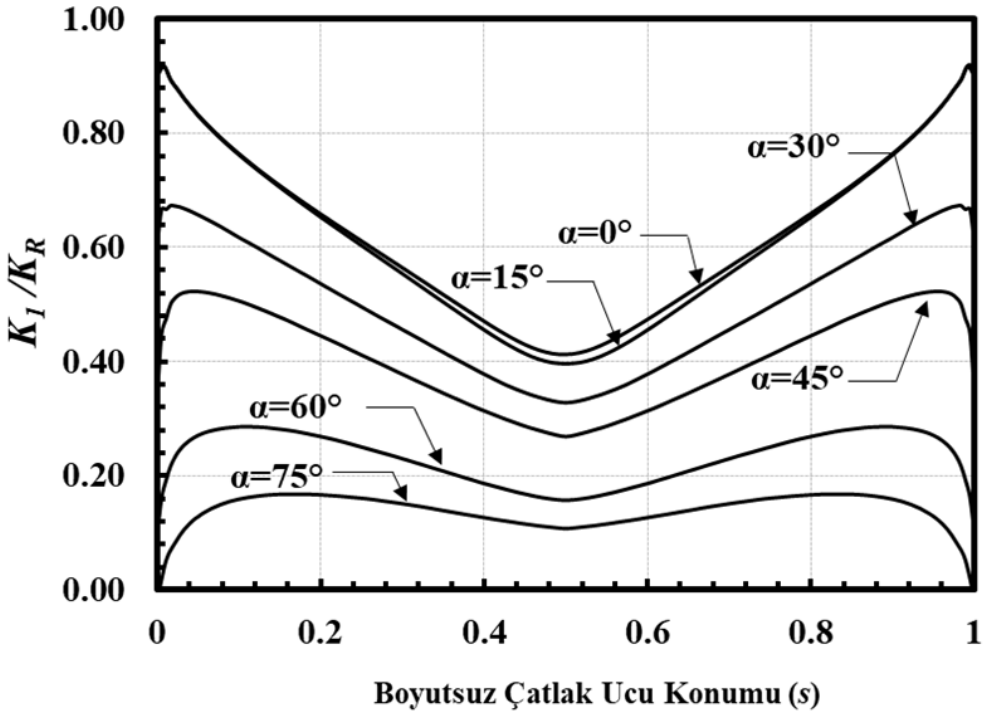
Şekil 2.188. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



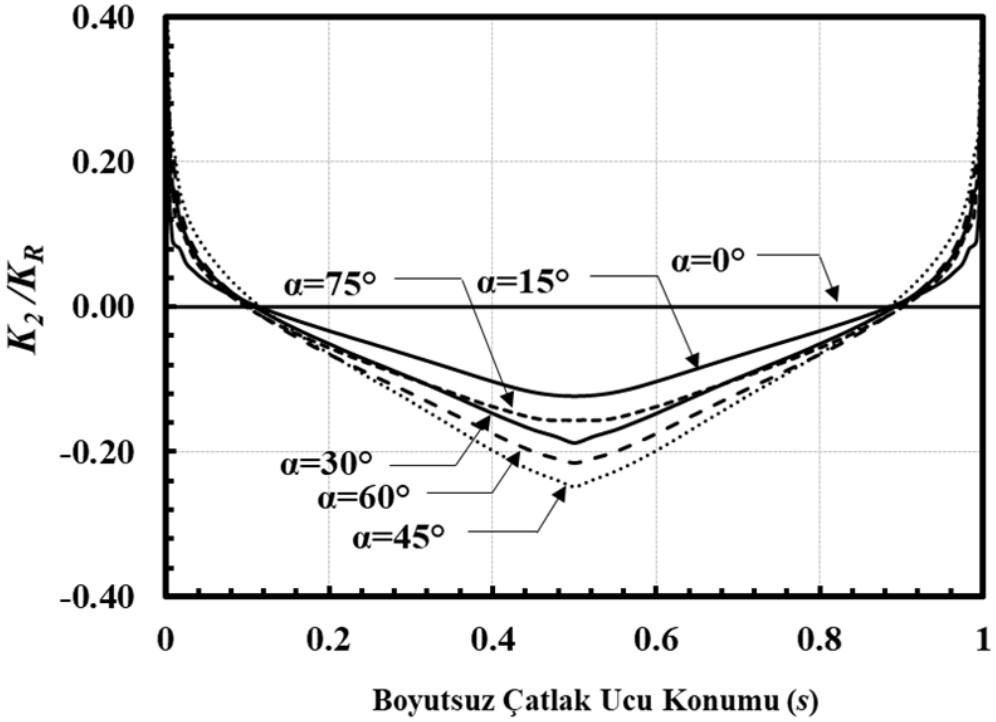
Şekil 2.189. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



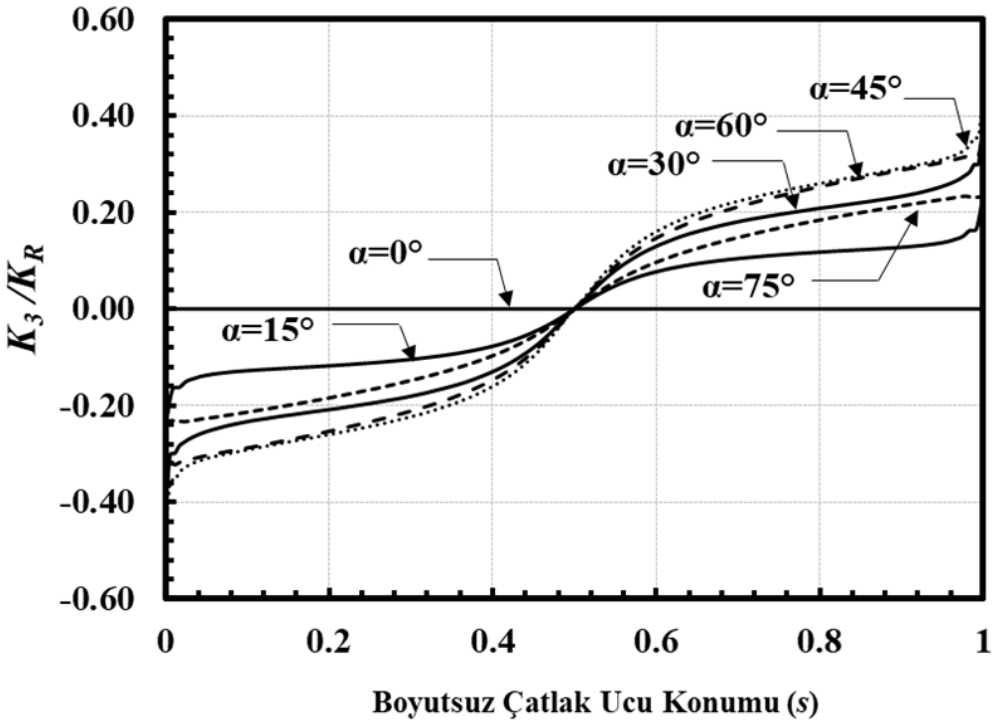
Şekil 2.190. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



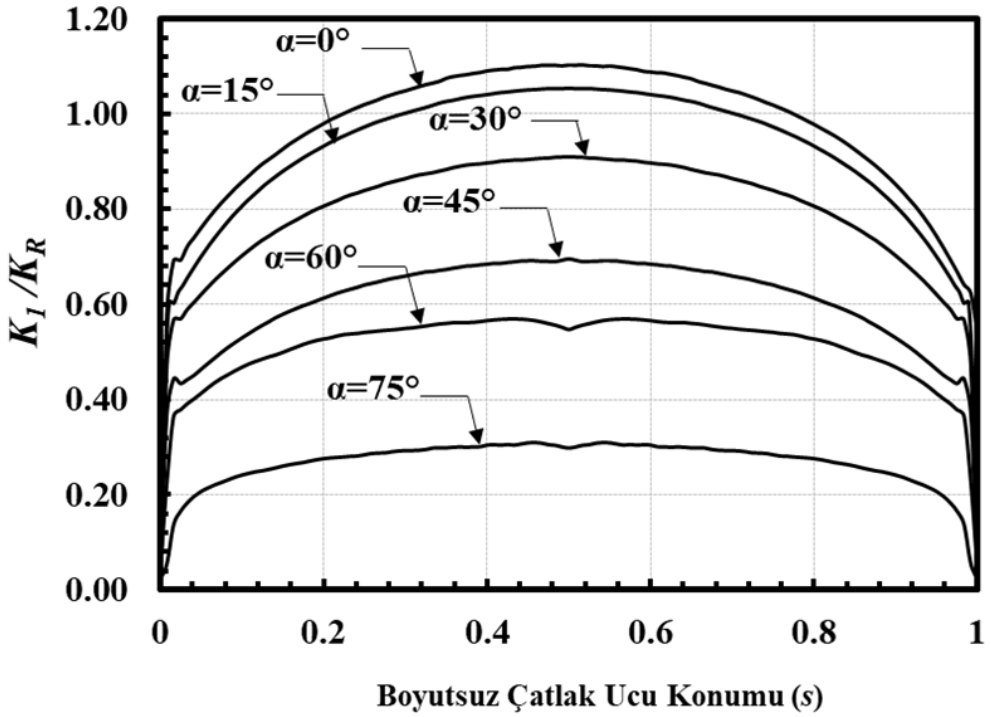
Şekil 2.191. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



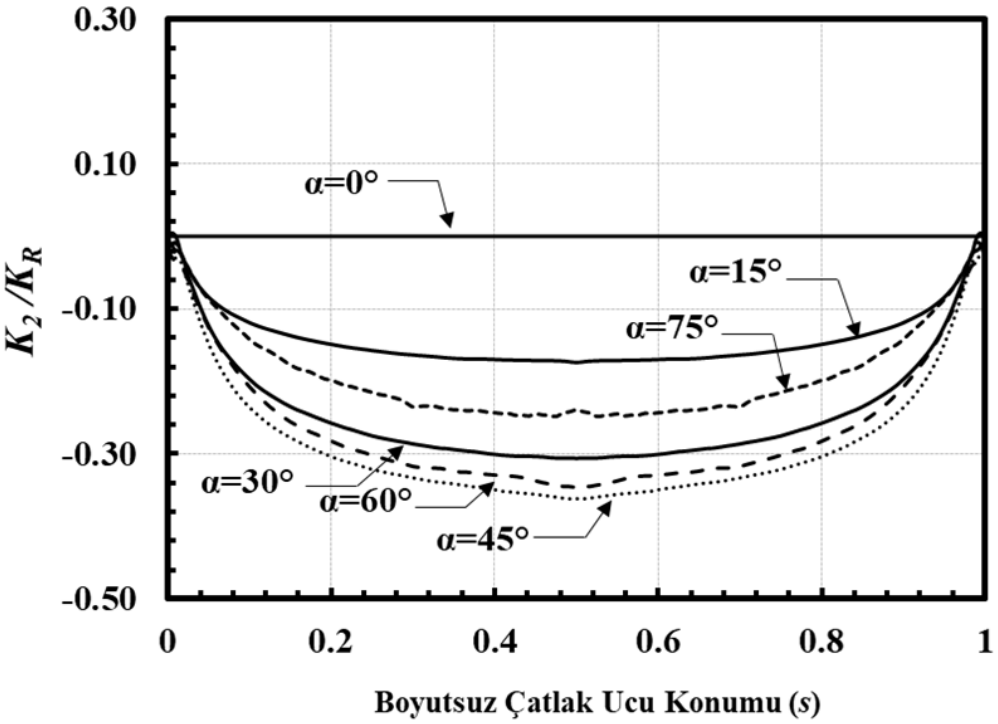
Şekil 2.192. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



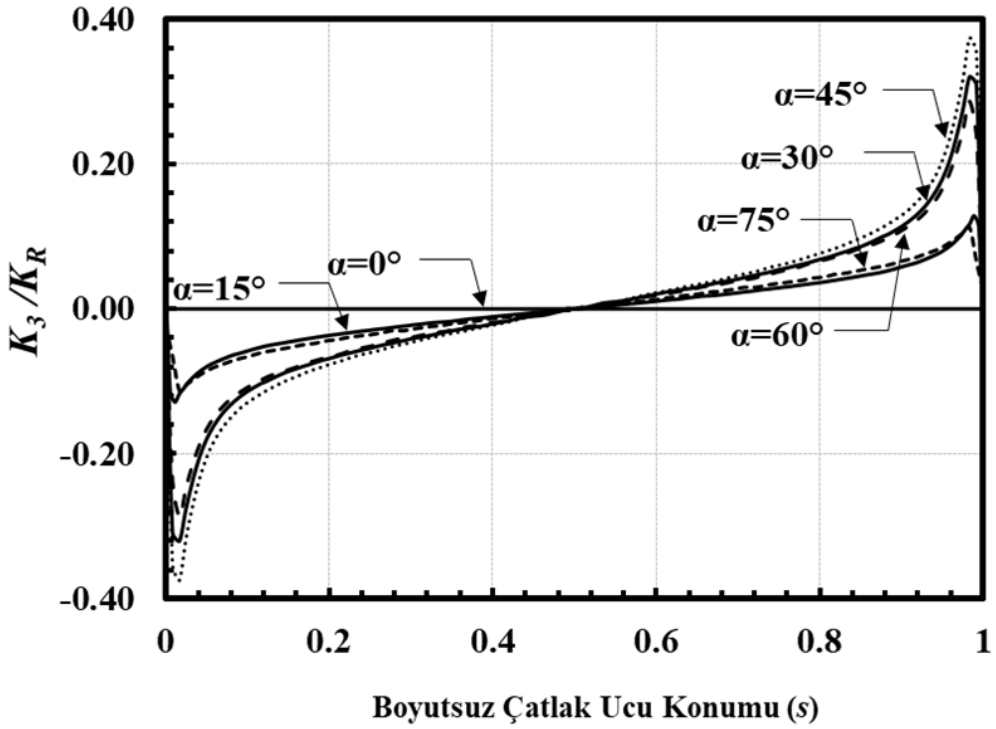
Şekil 2.193. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



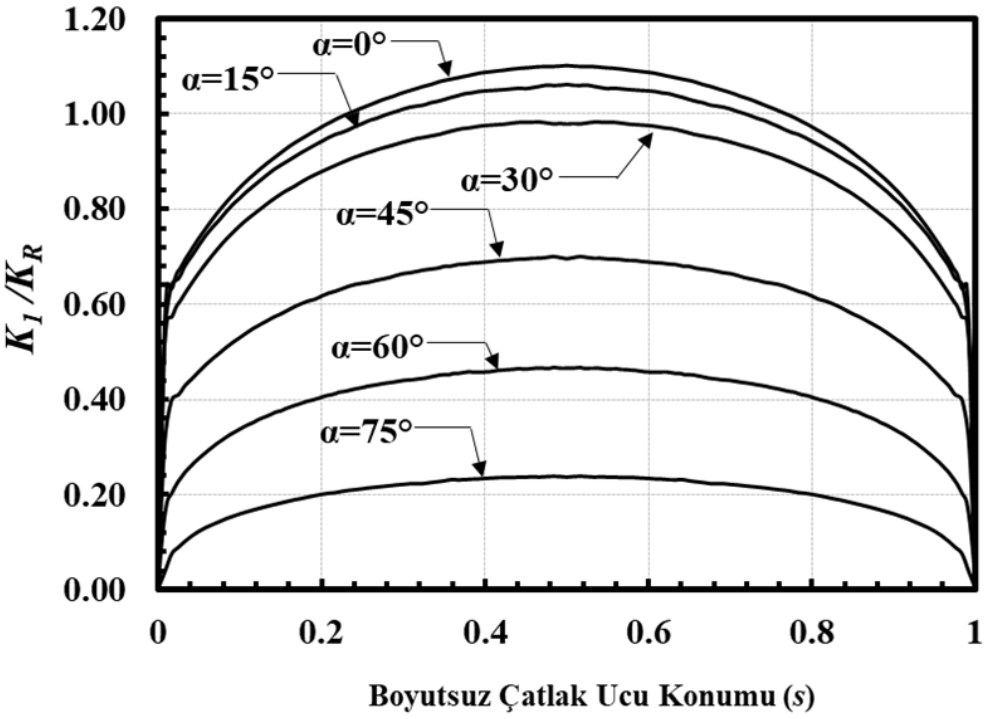
Şekil 2.194. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



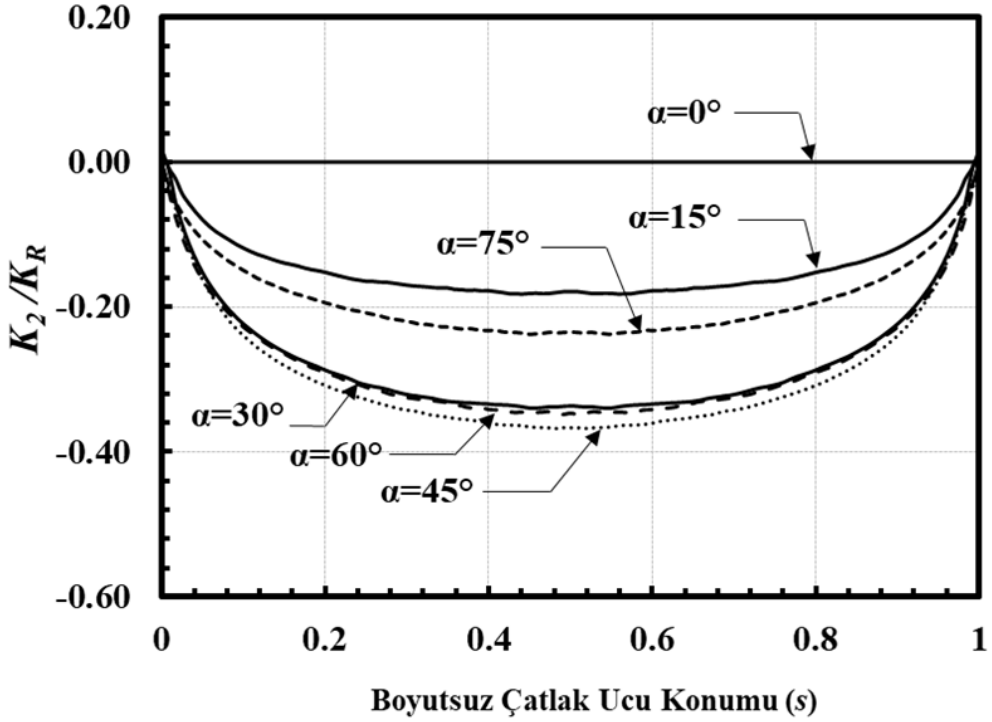
Şekil 2.195. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



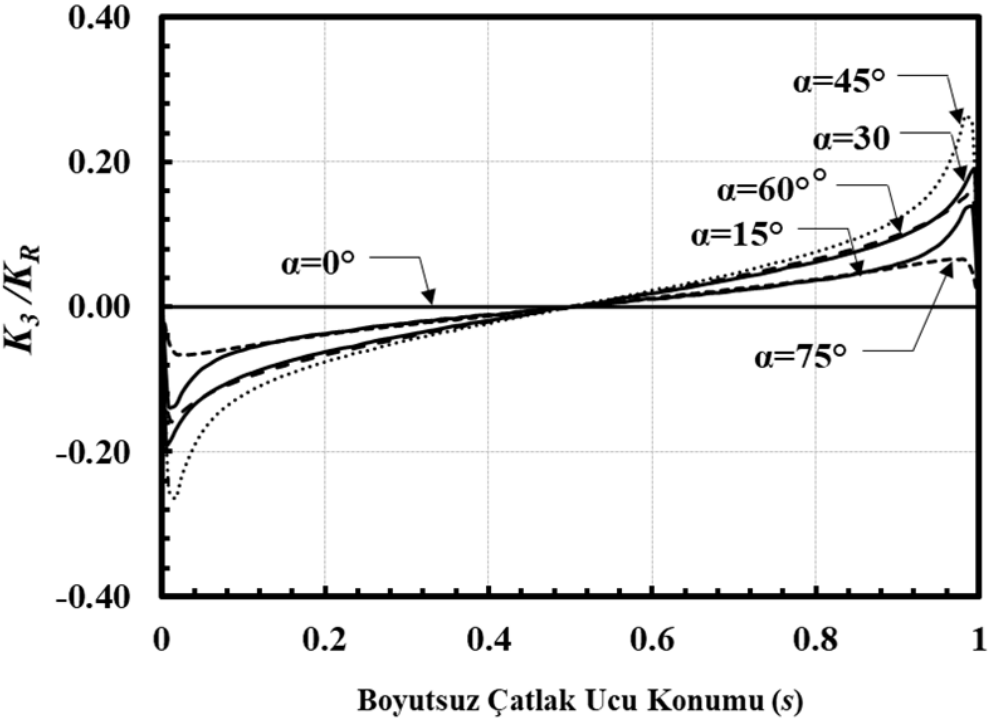
Şekil 2.196. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



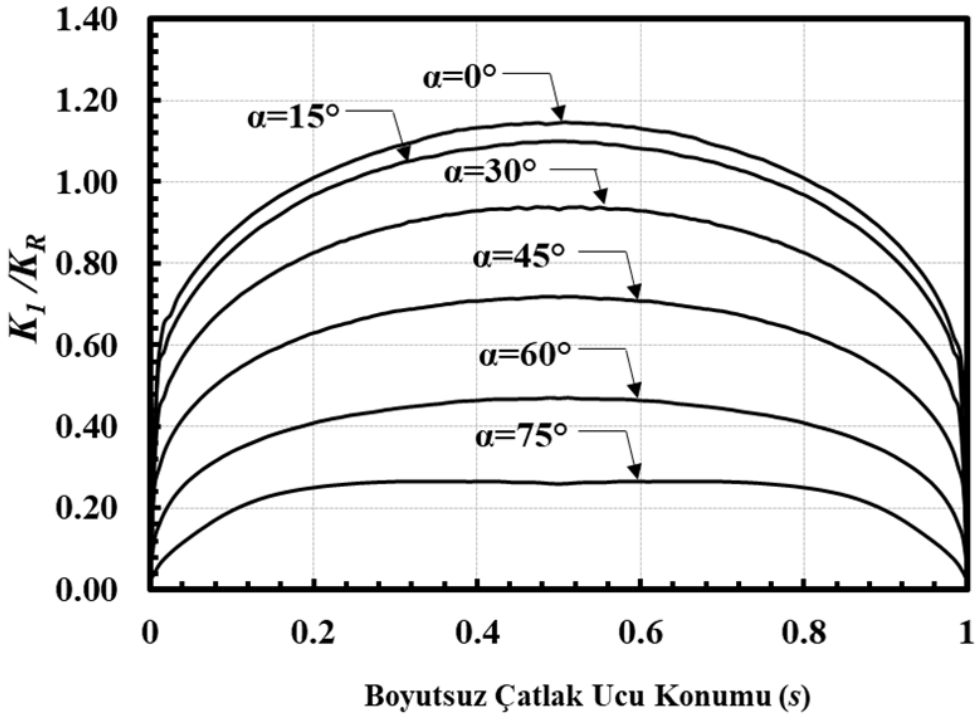
Şekil 2.197. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



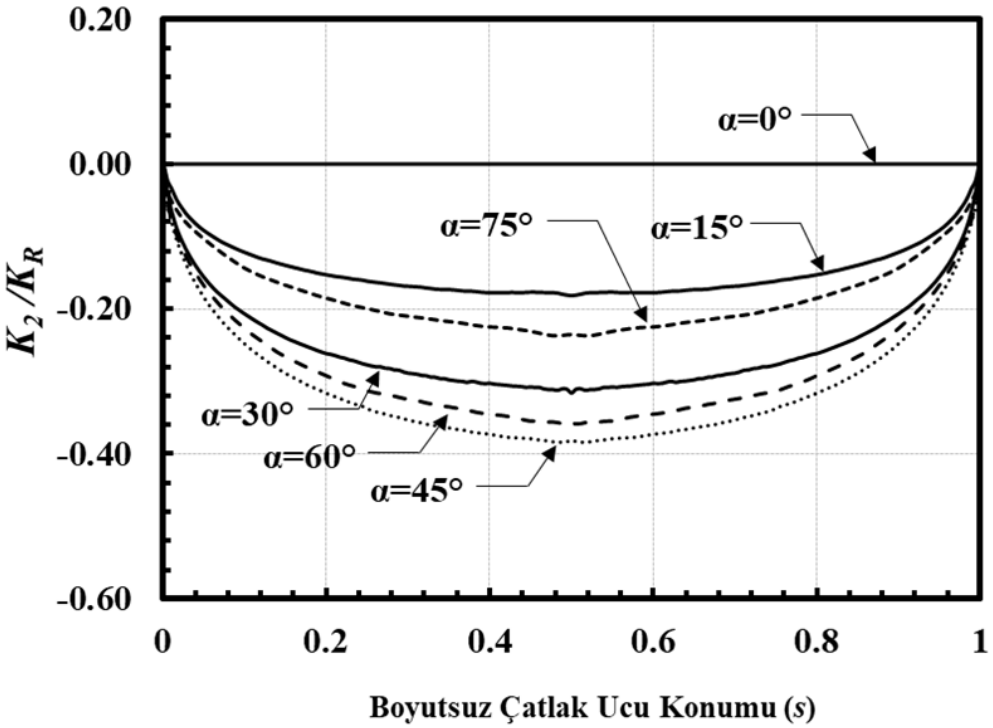
Şekil 2.198. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



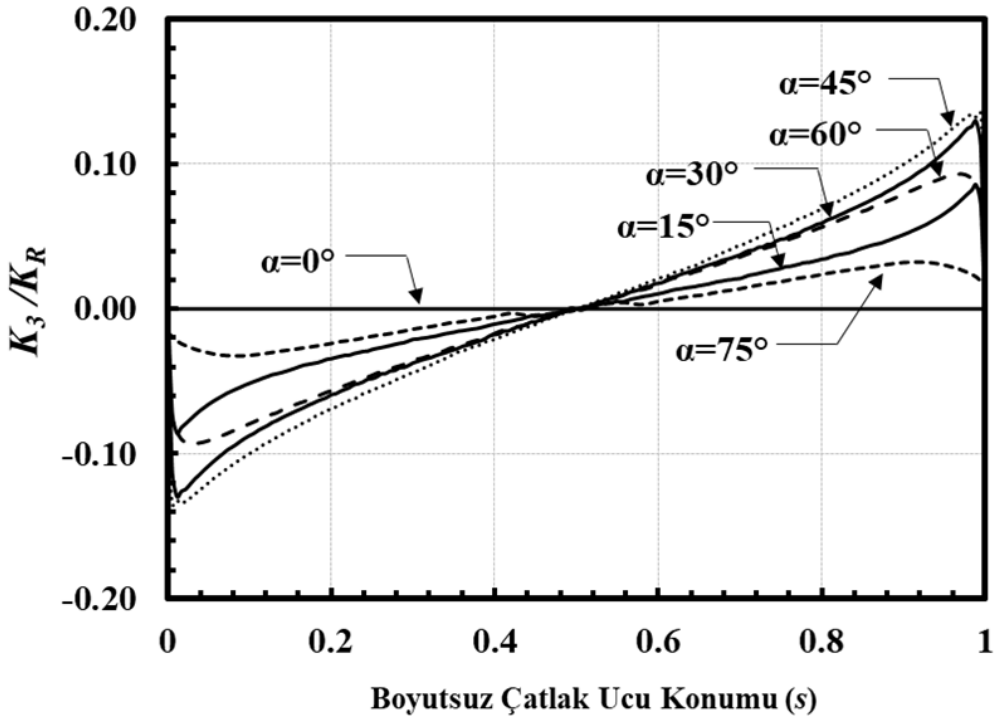
Şekil 2.199. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



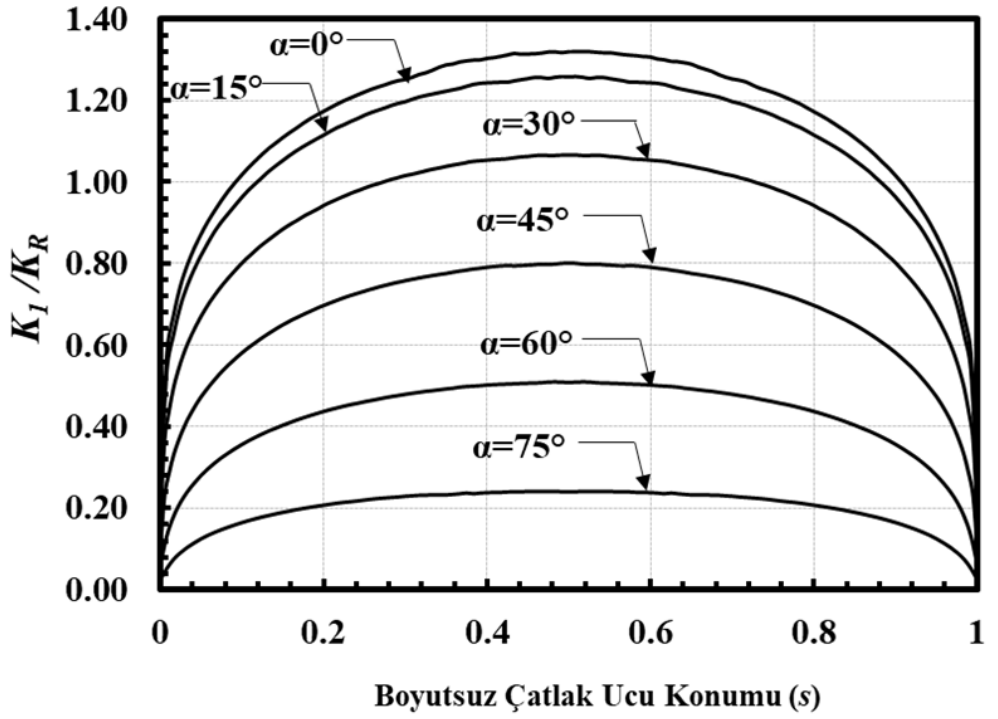
Şekil 2.200. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



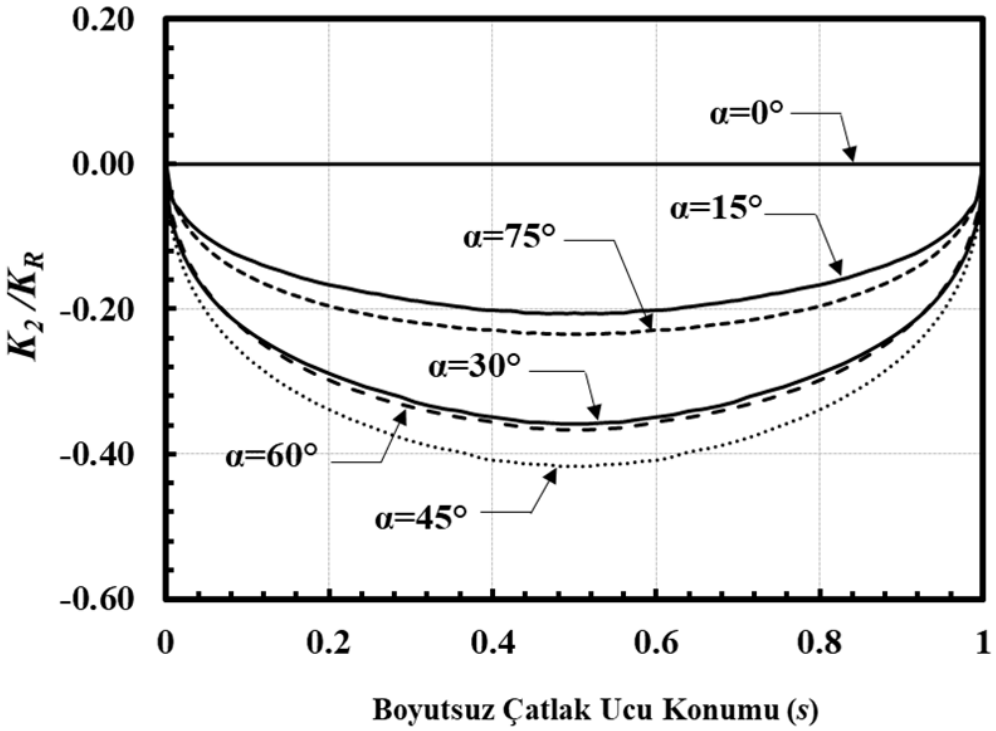
Şekil 2.201. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



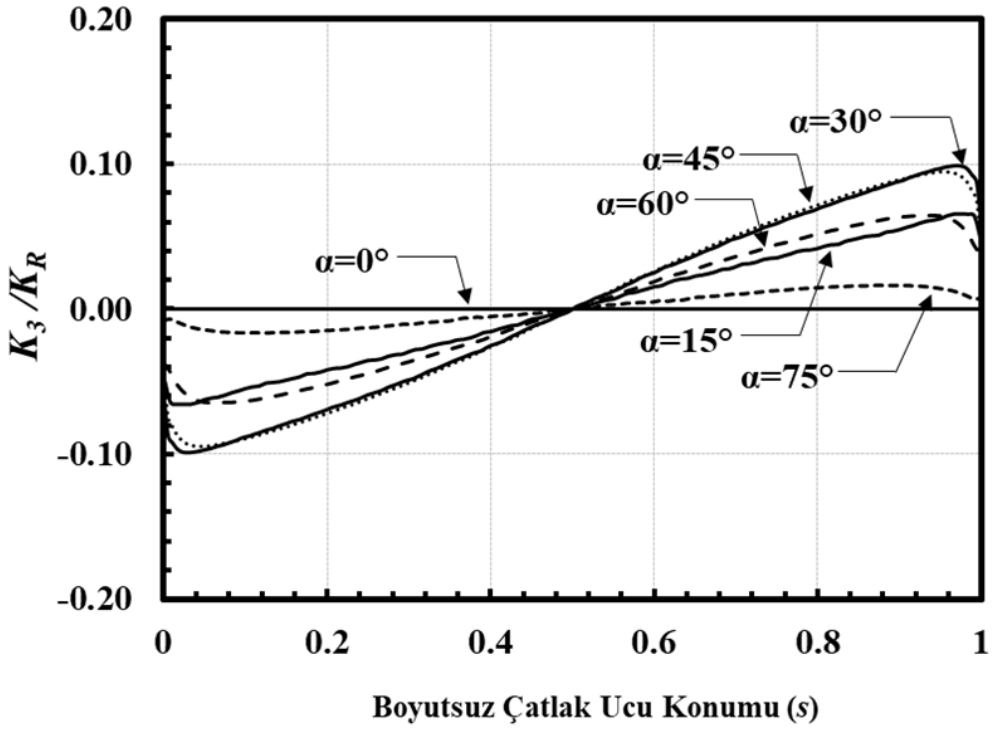
Şekil 2.202. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



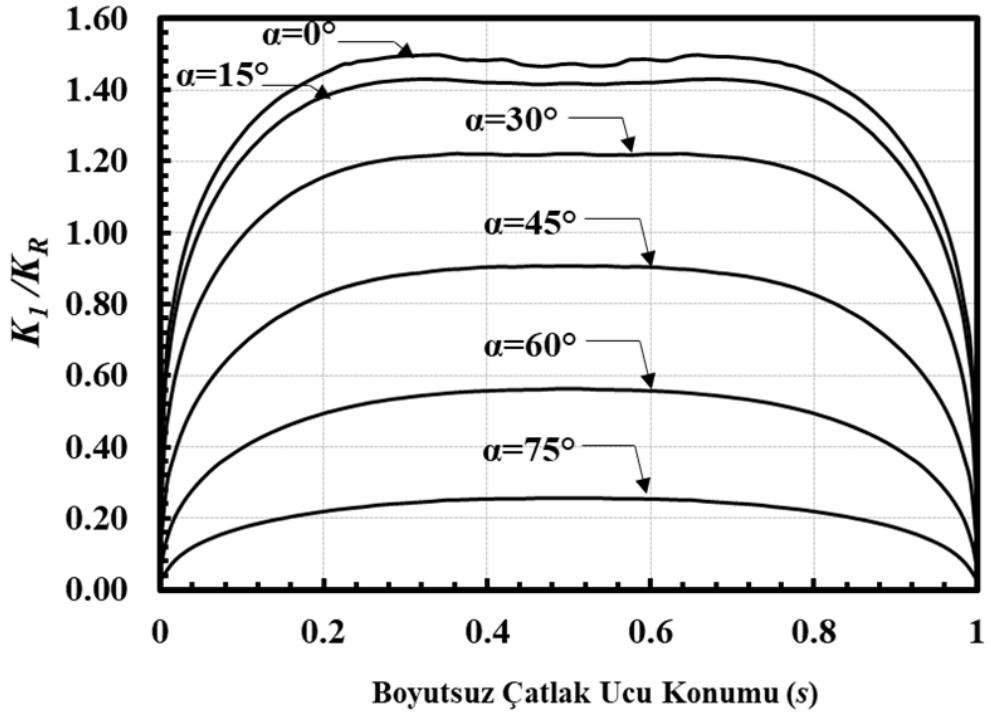
Şekil 2.203. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



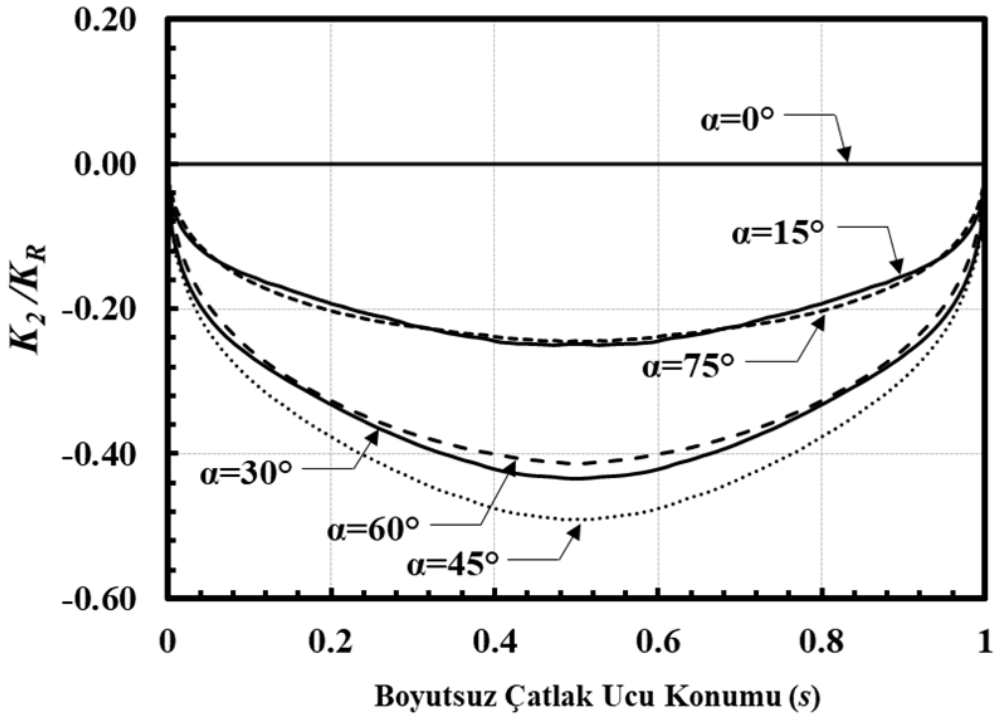
Şekil 2.204. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



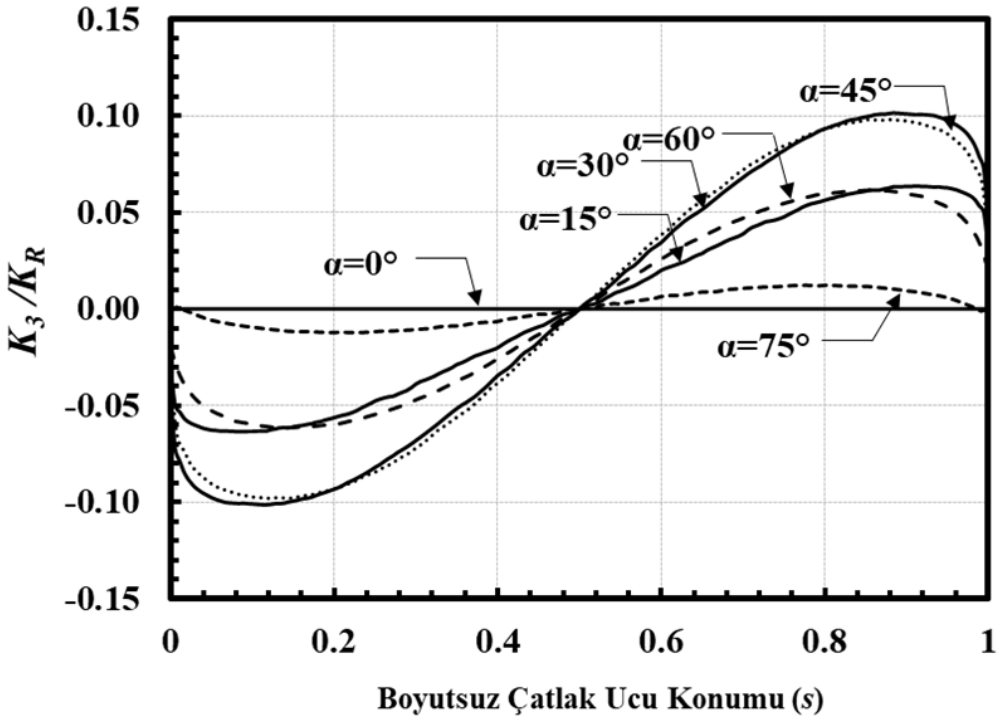
Şekil 2.205. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



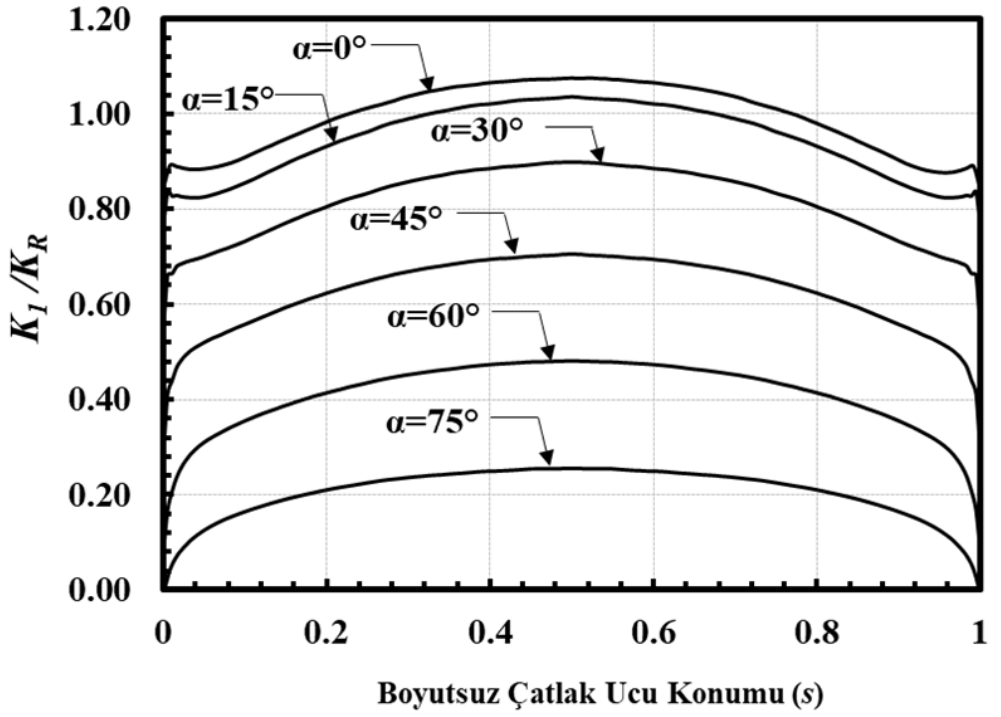
Şekil 2.206. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



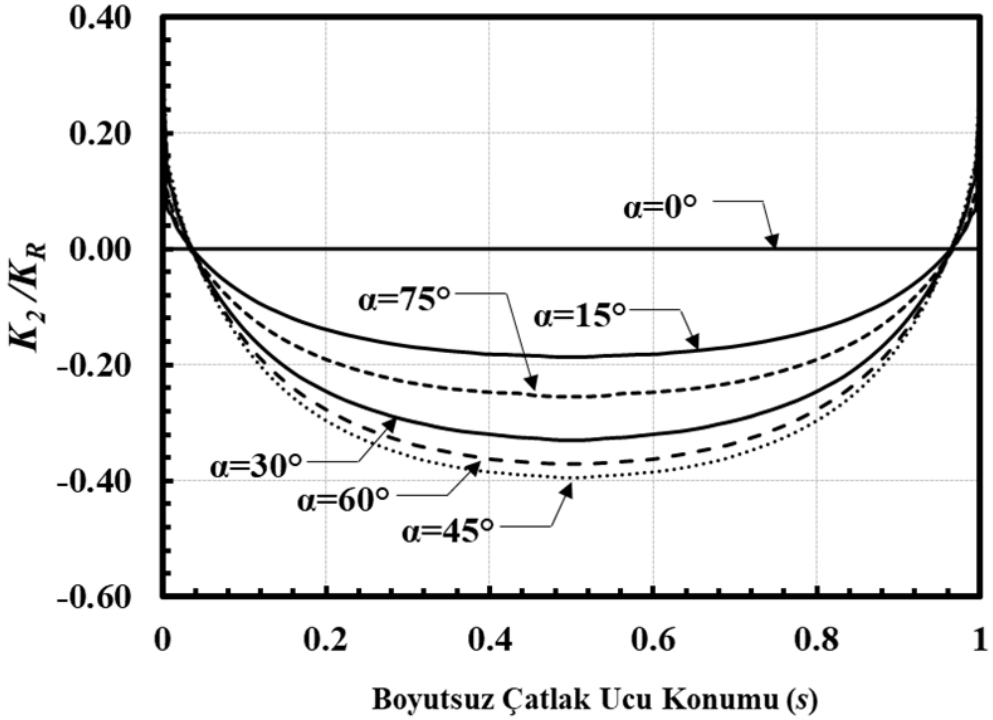
Şekil 2.207. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



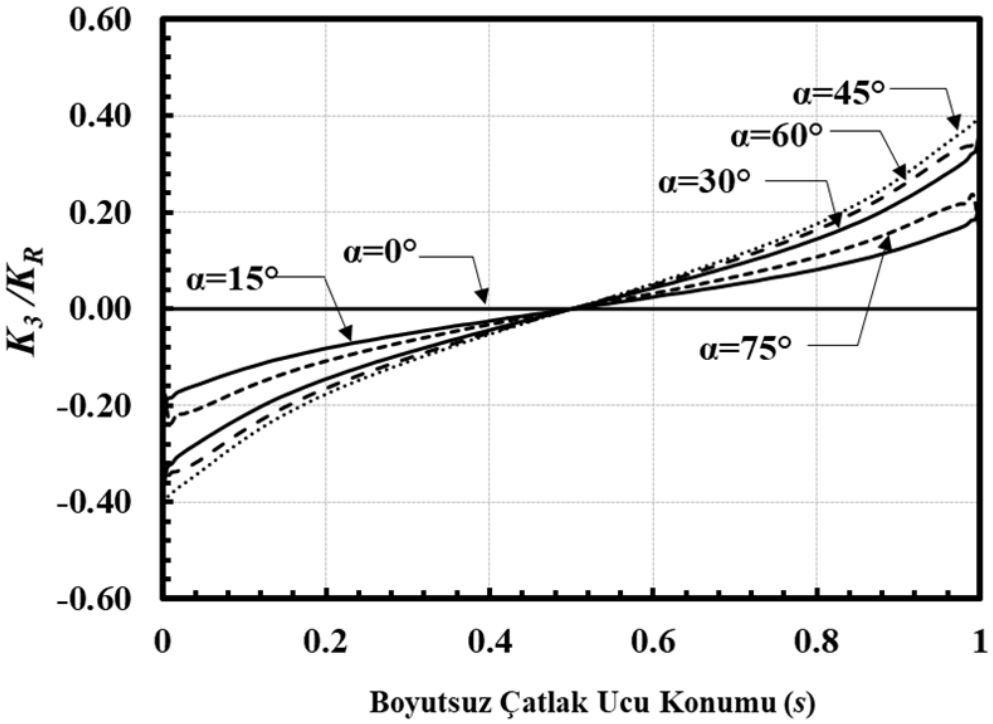
Şekil 2.208. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



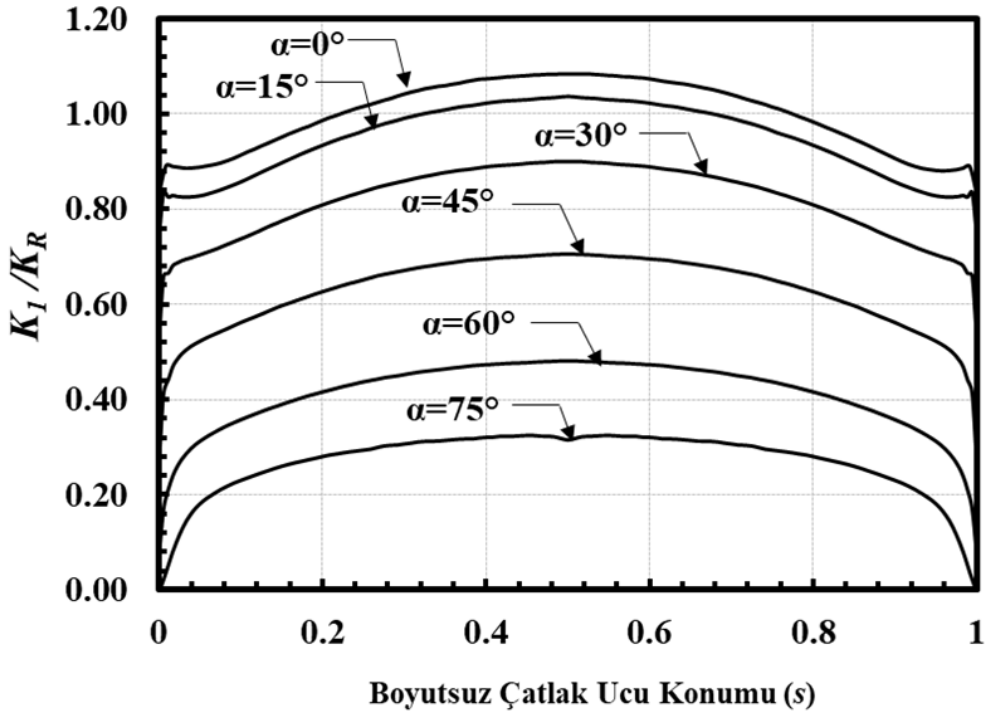
Şekil 2.209. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



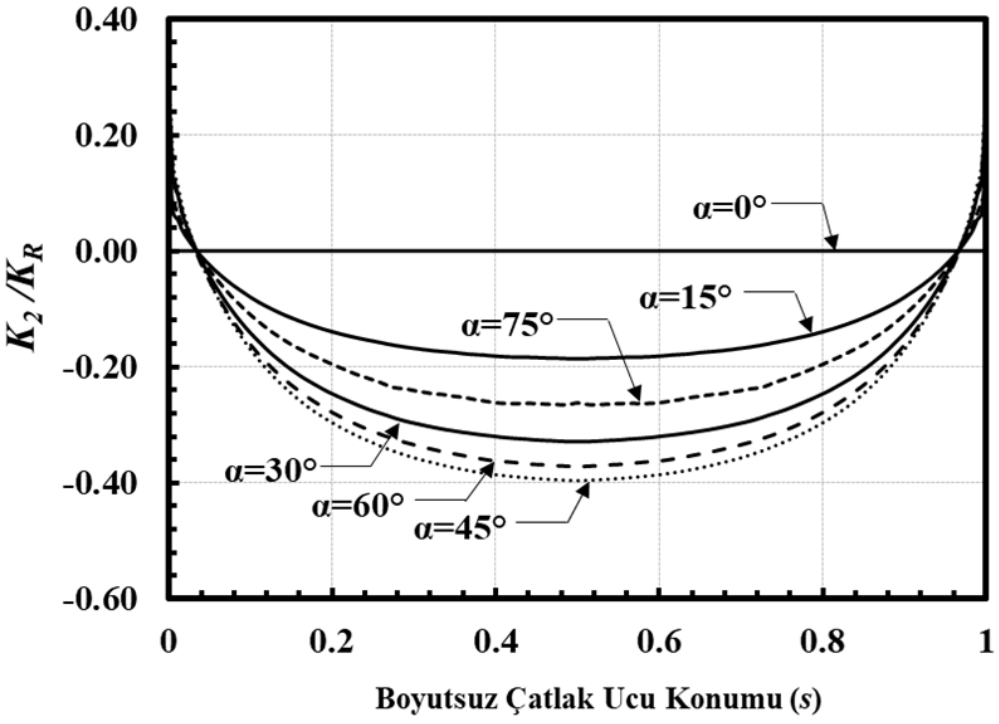
Şekil 2.210. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



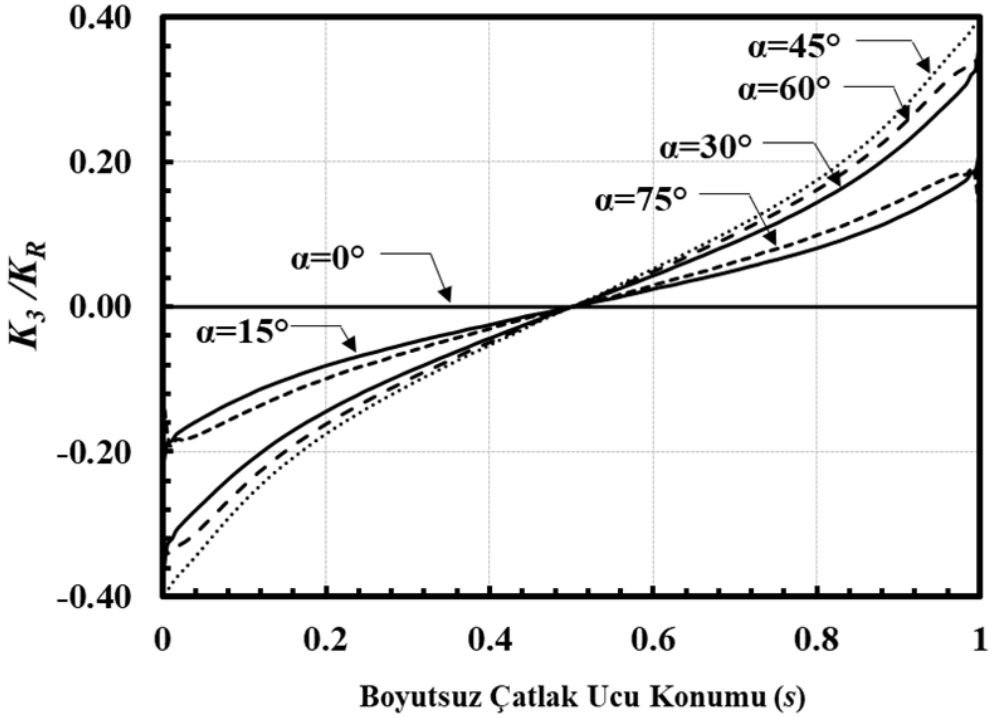
Şekil 2.211. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



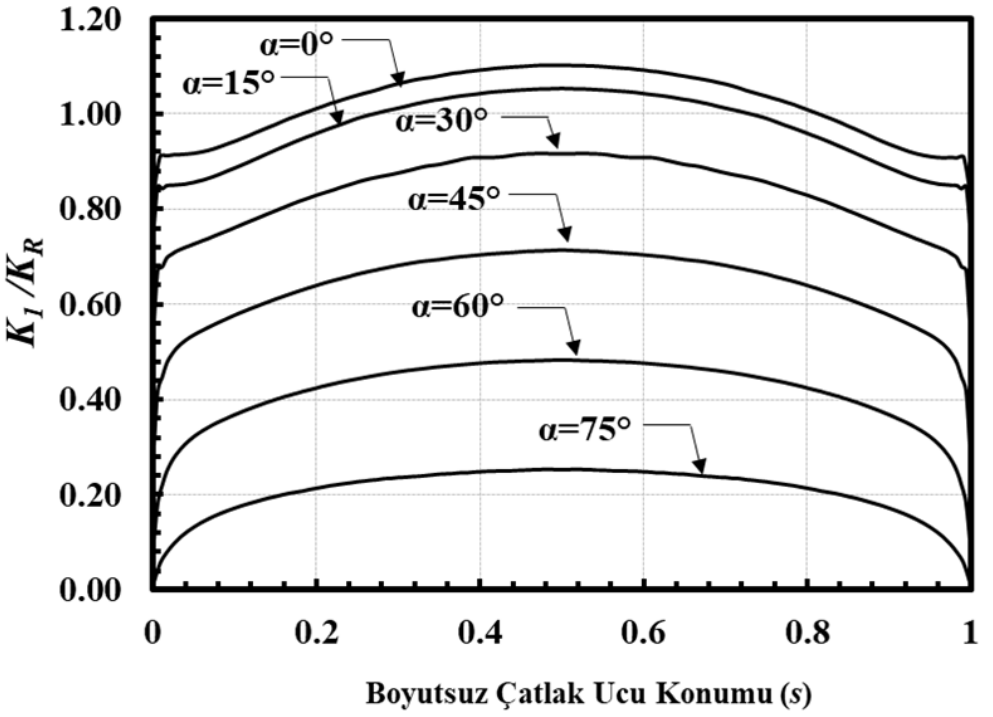
Şekil 2.212. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



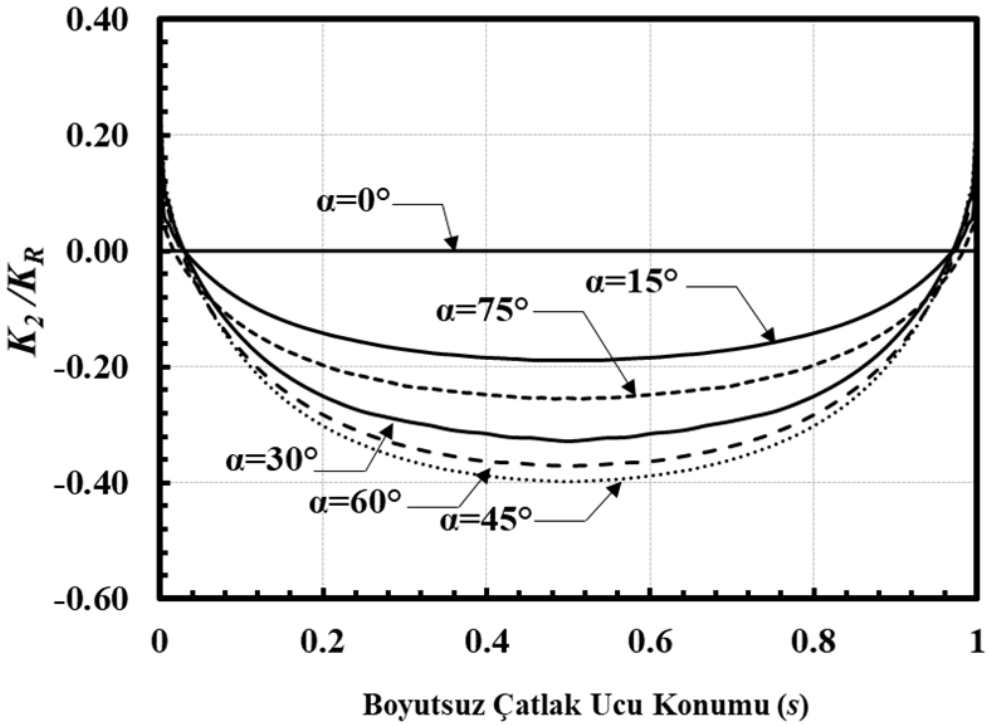
Şekil 2.213. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



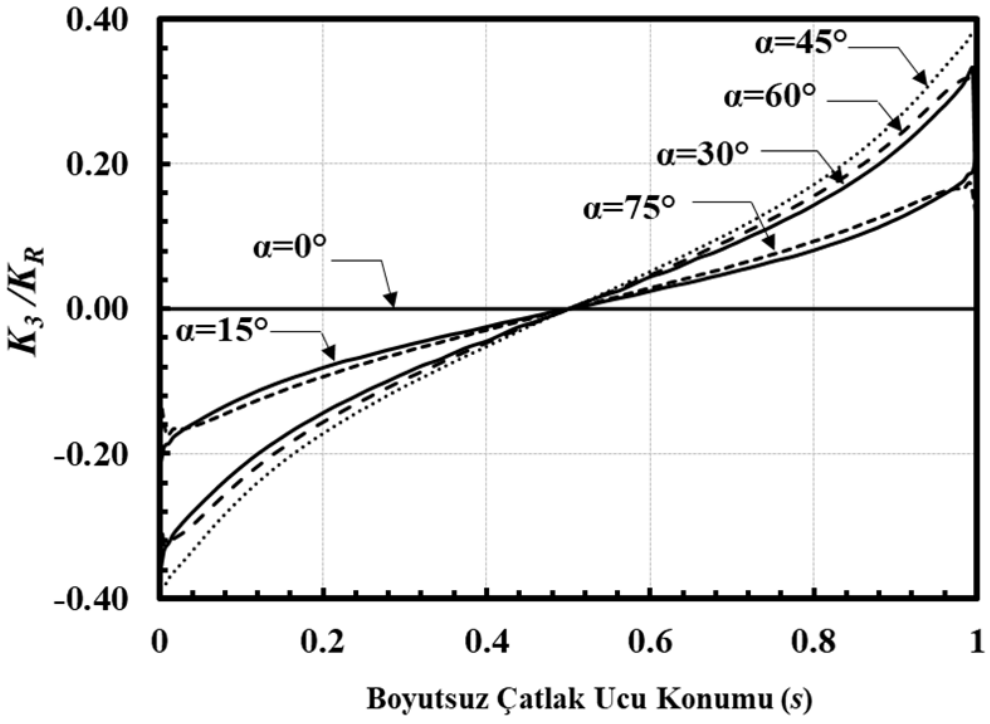
Şekil 2.214. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



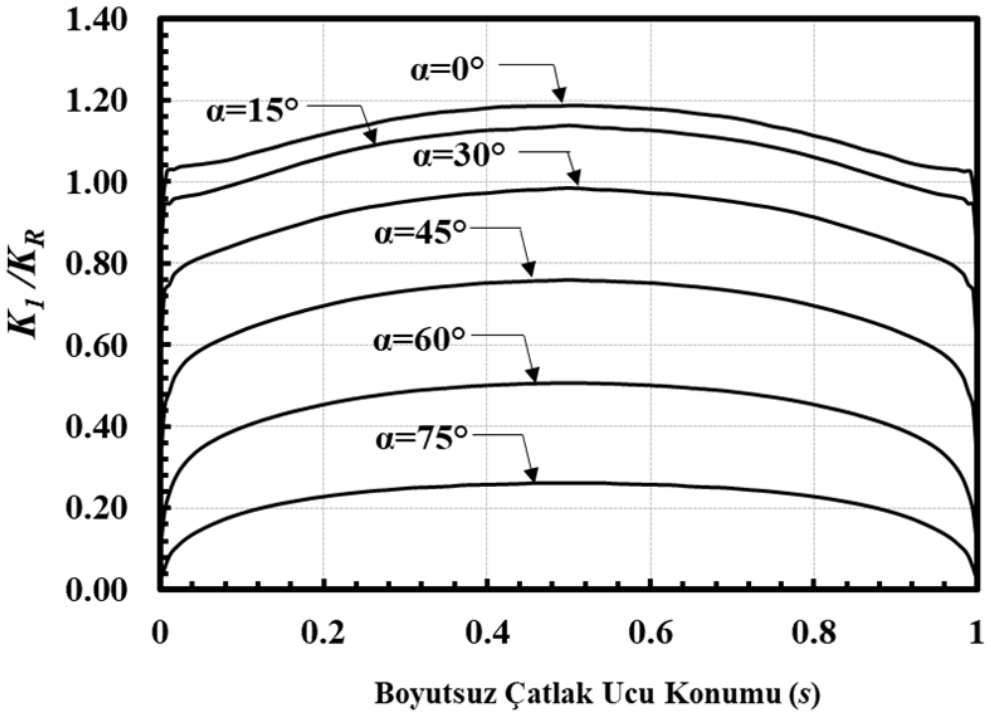
Şekil 2.215. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



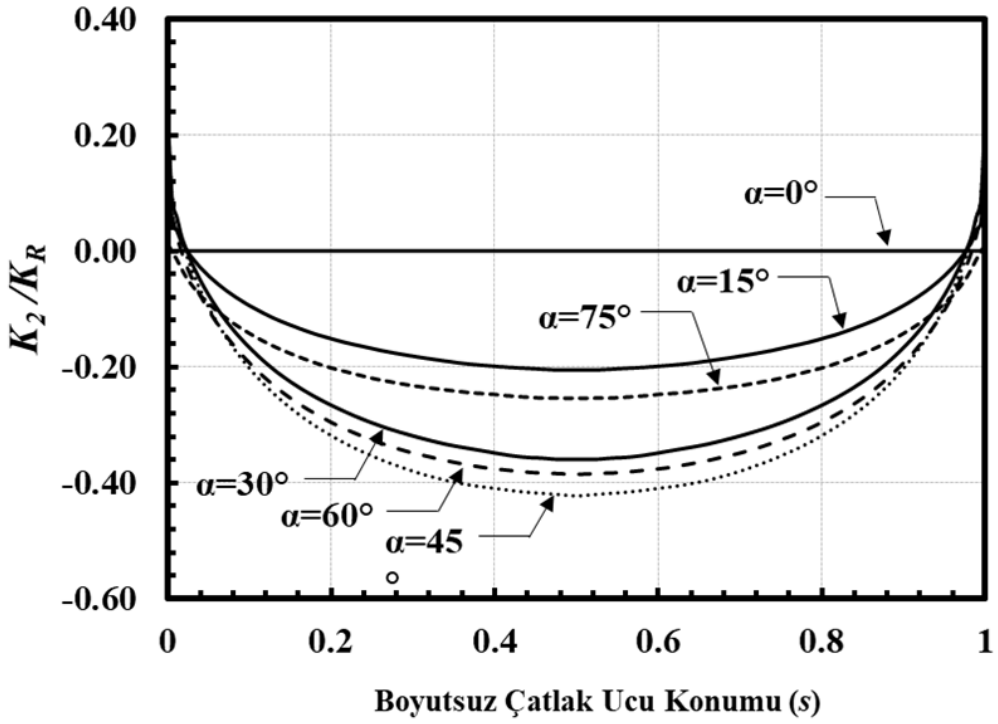
Şekil 2.216. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



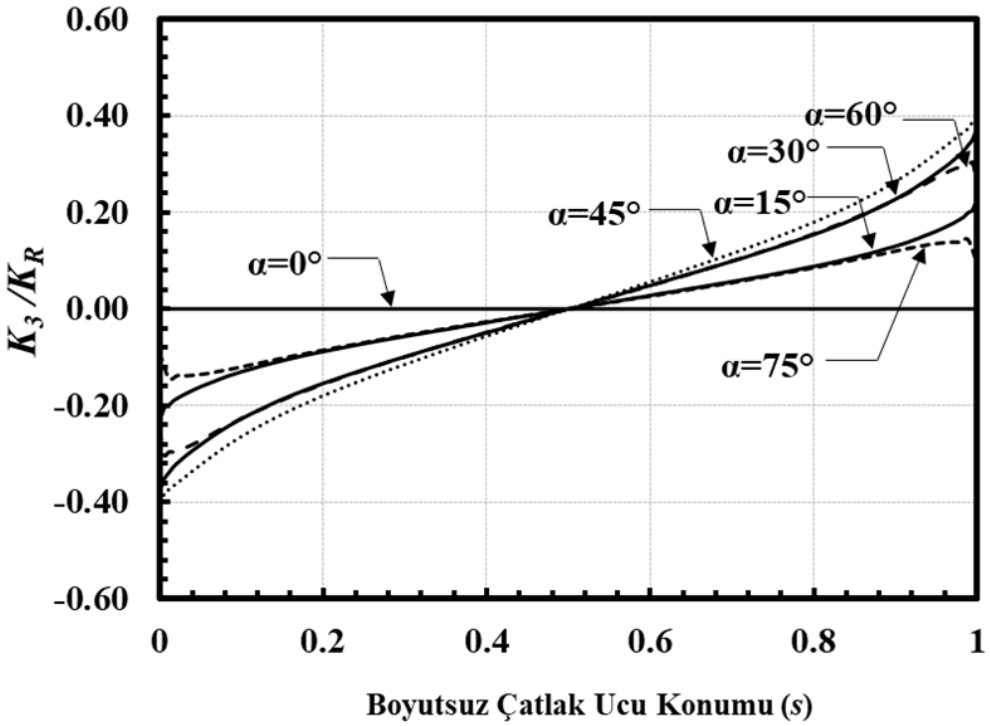
Şekil 2.217. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



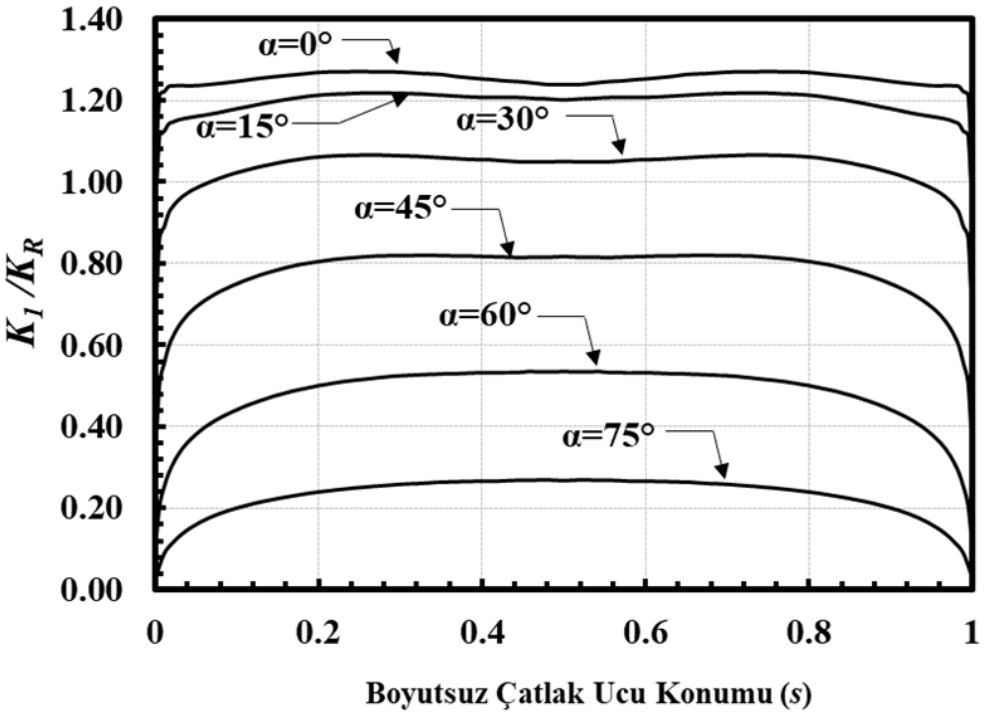
Şekil 2.218. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



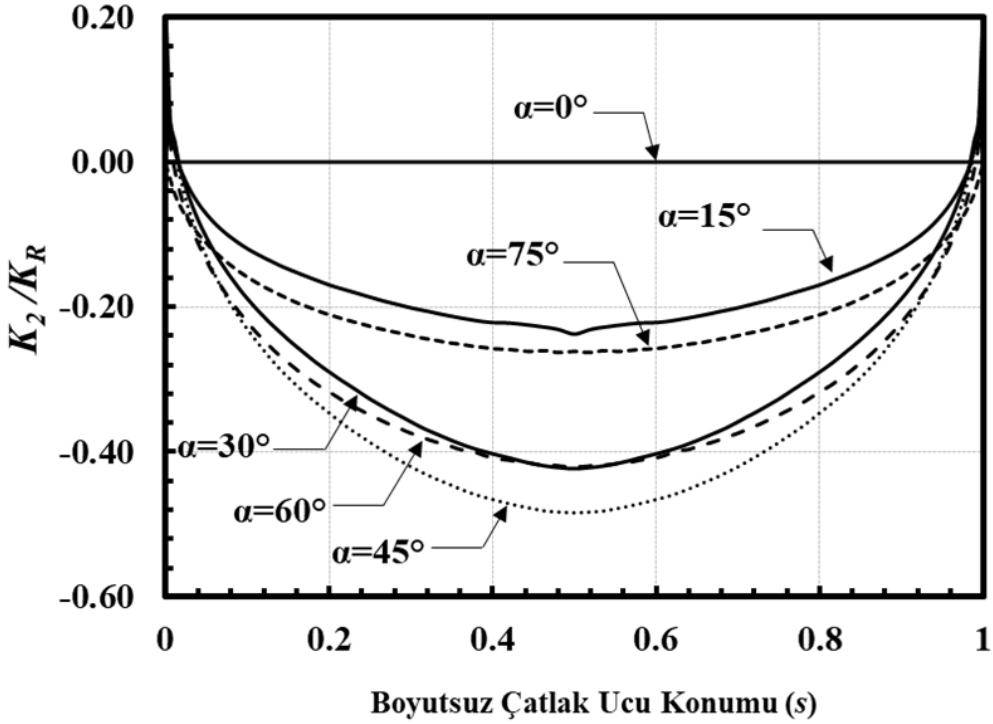
Şekil 2.219. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



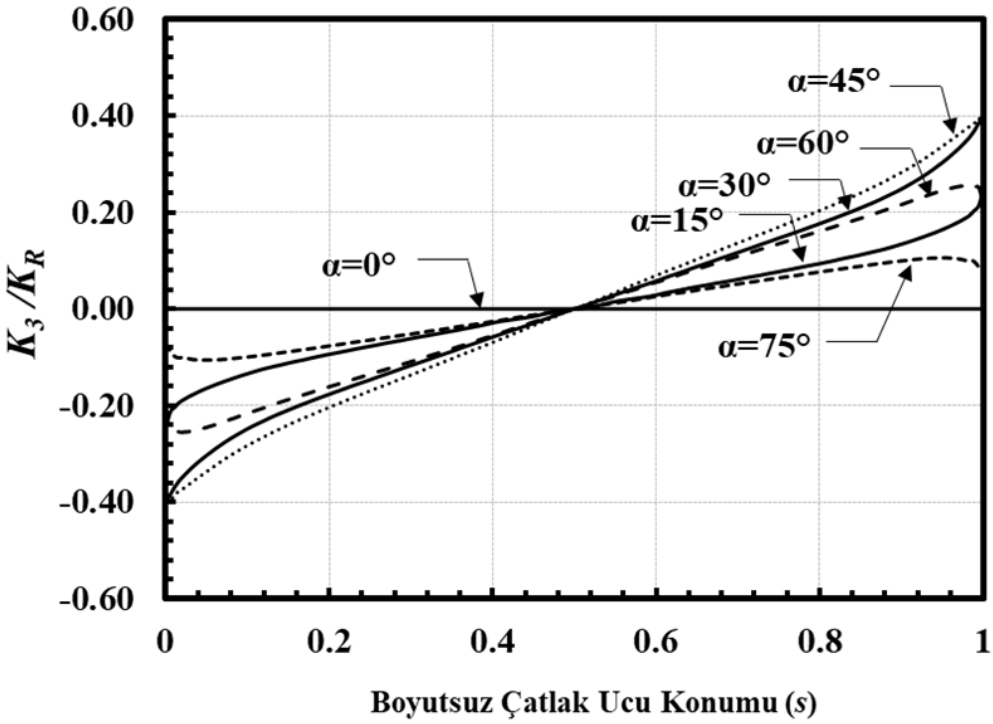
Şekil 2.220. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



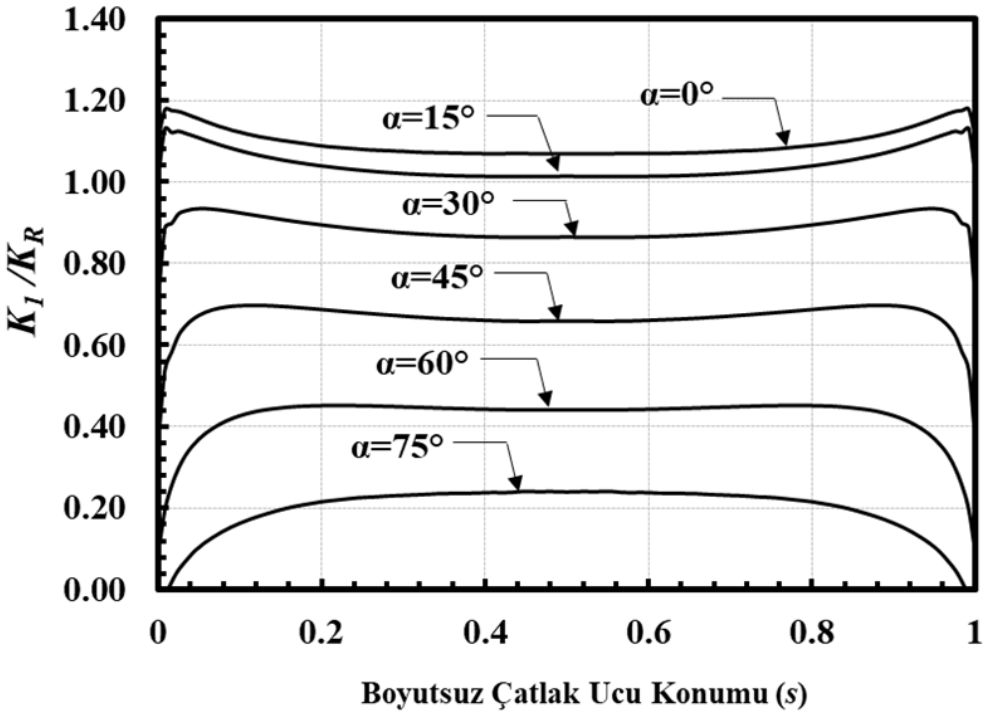
Şekil 2.221. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



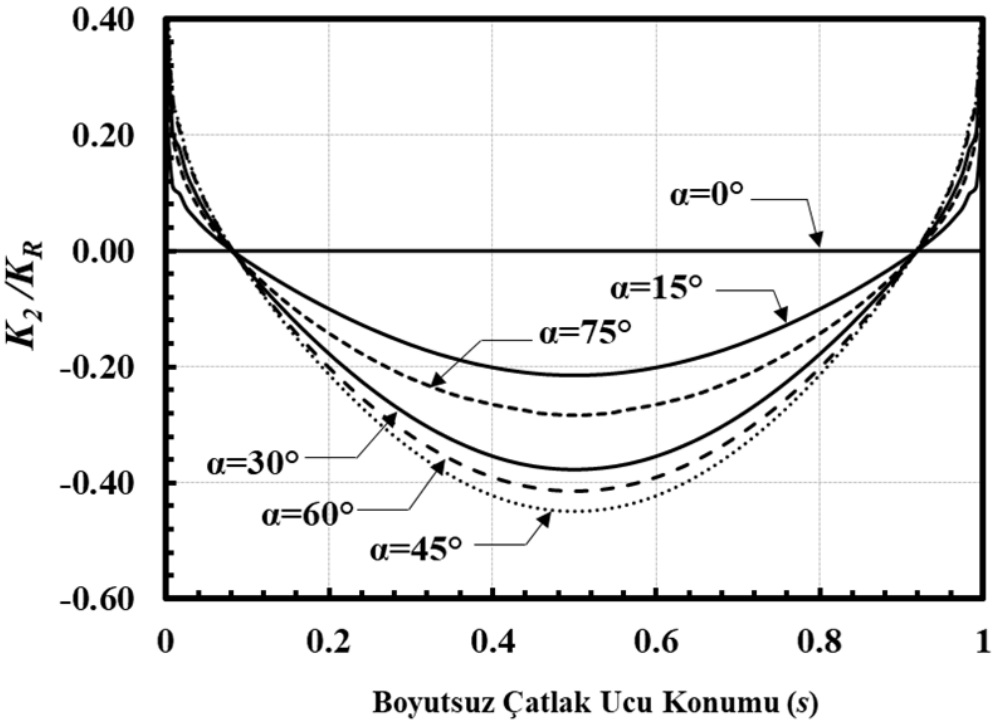
Şekil 2.222. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



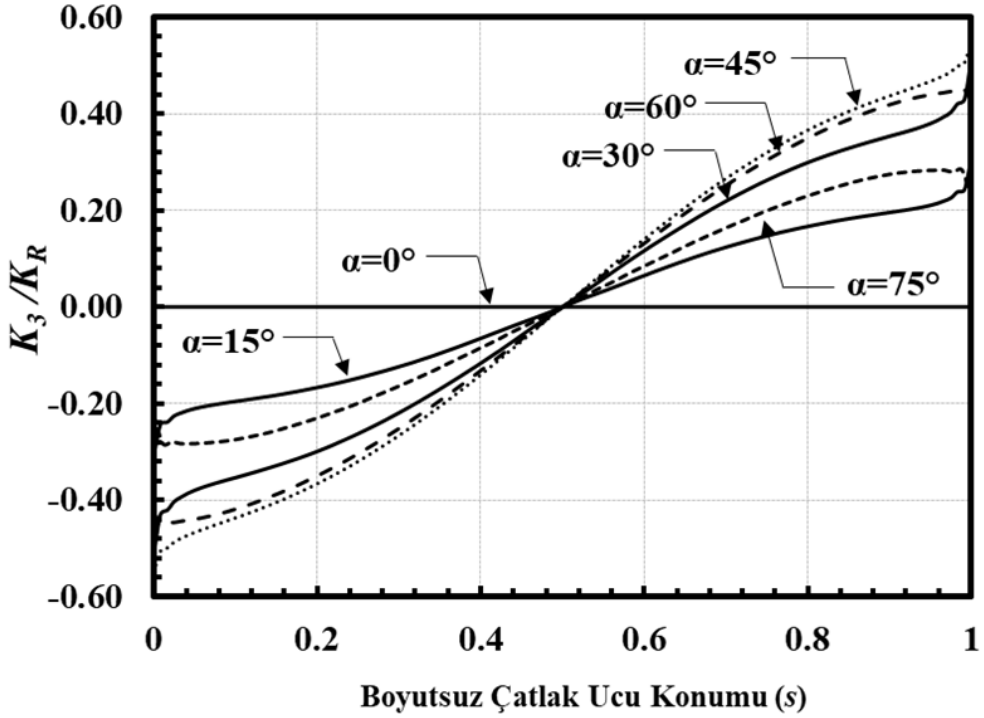
Şekil 2.223. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=0.50, *a/t*=0.8.



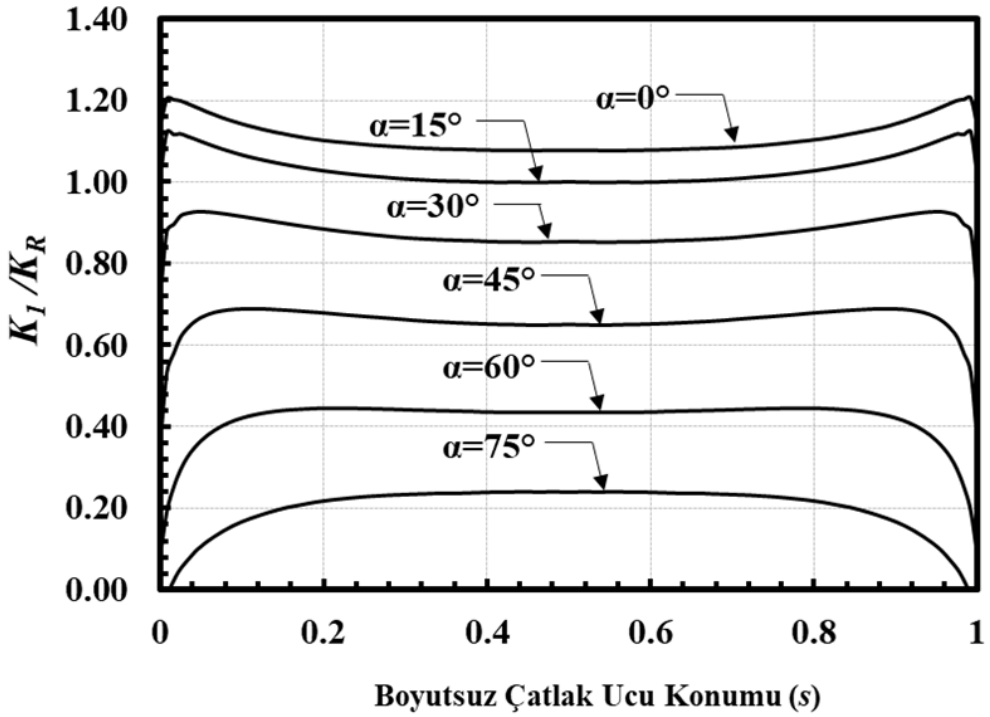
Şekil 2.224. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



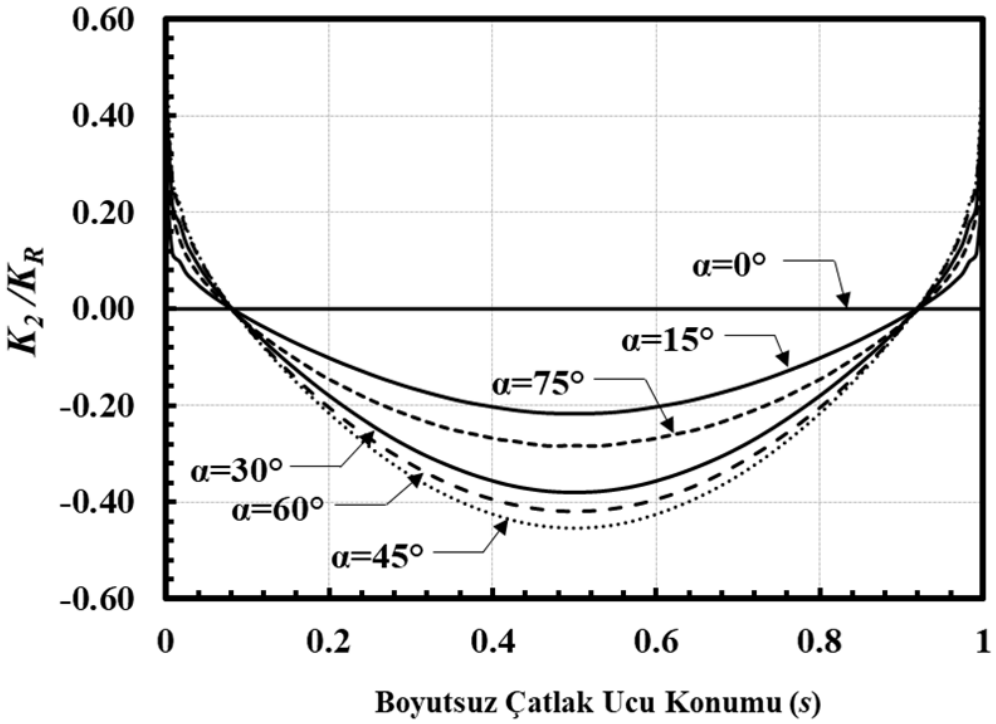
Şekil 2.225. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



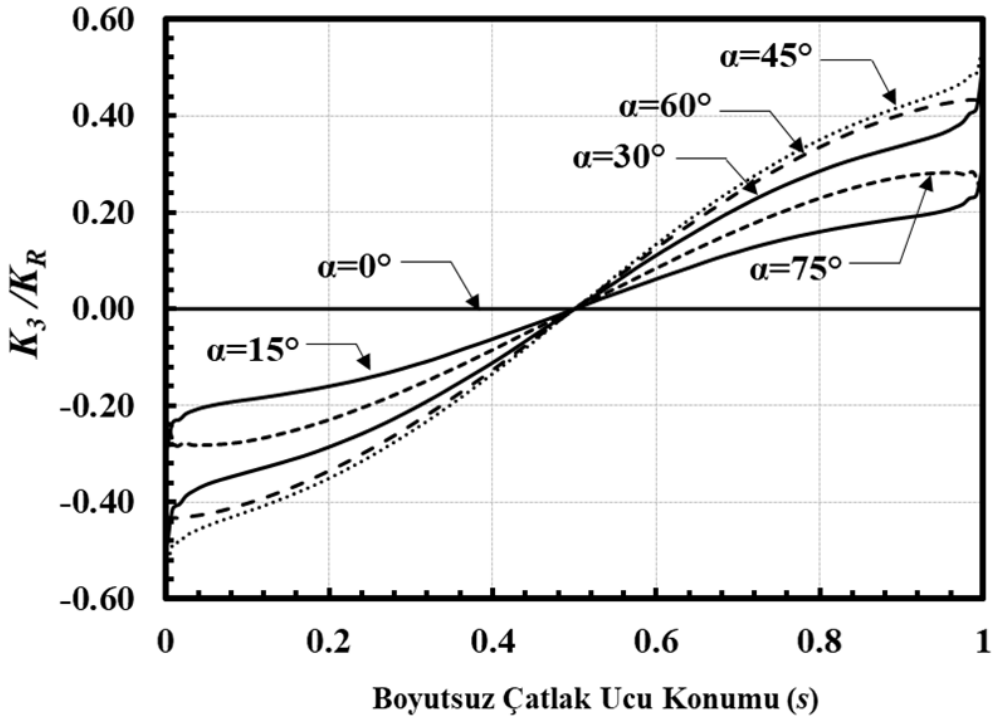
Şekil 2.226. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



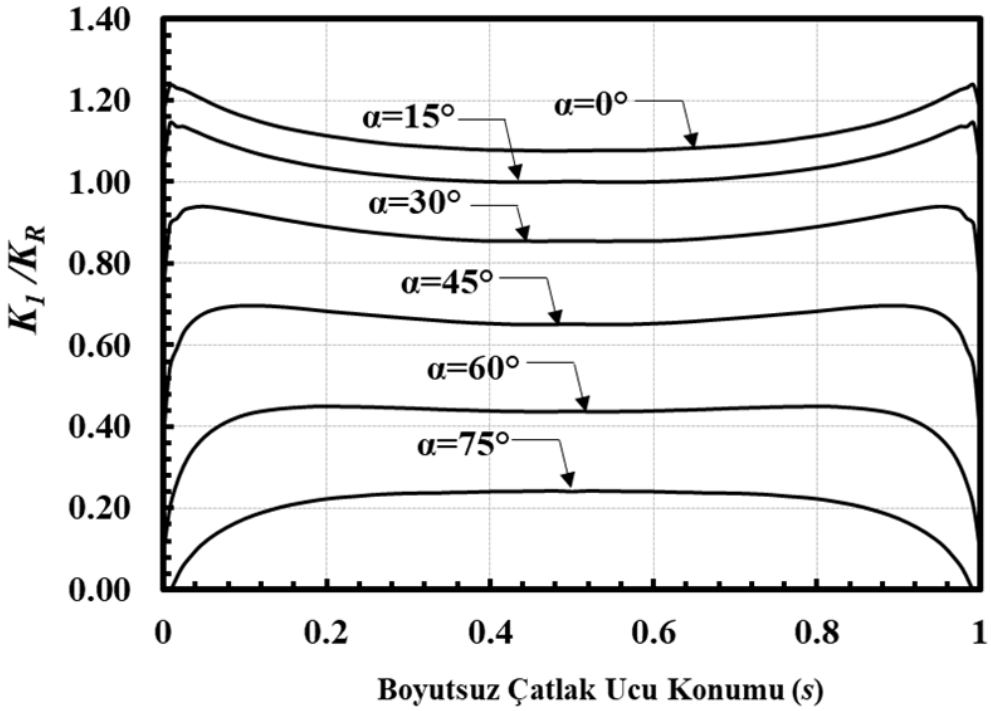
Şekil 2.227. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



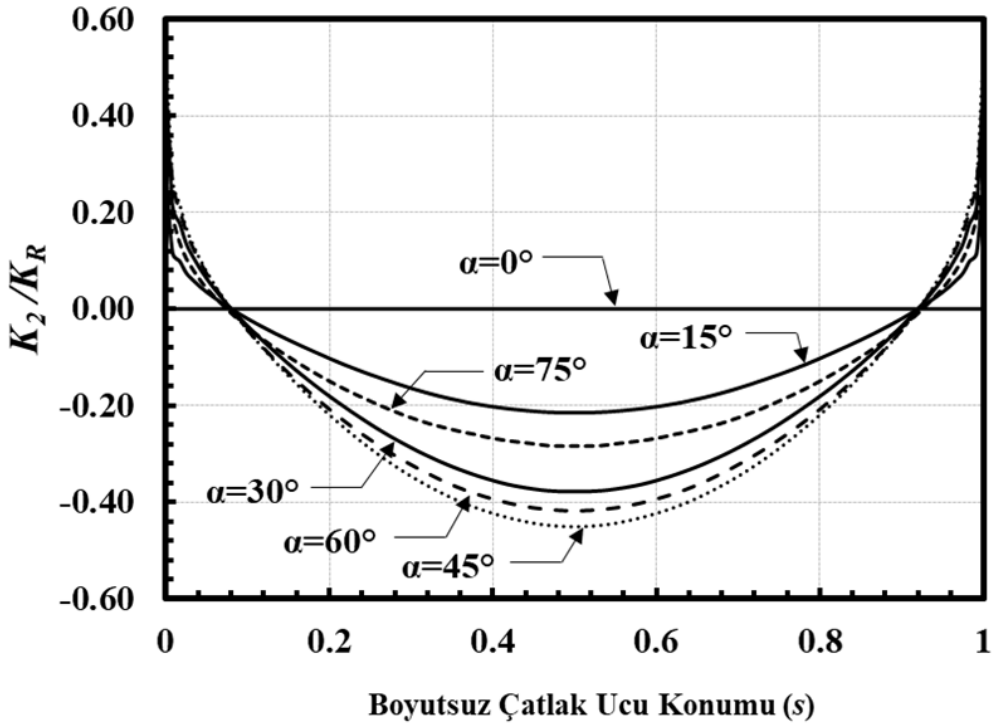
Şekil 2.228. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



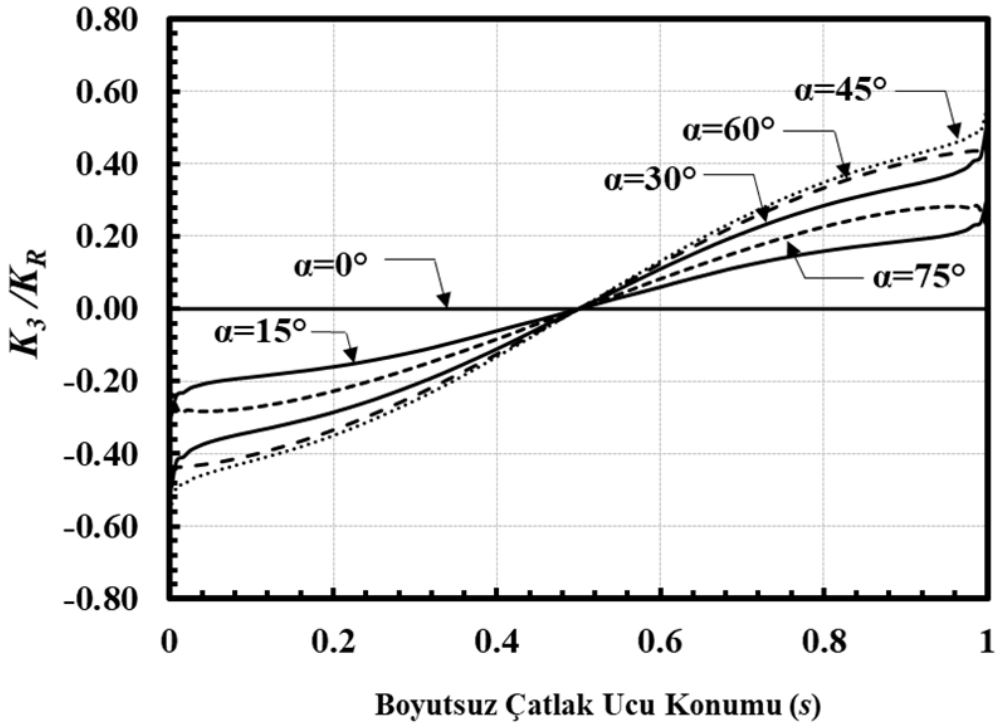
Şekil 2.229. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



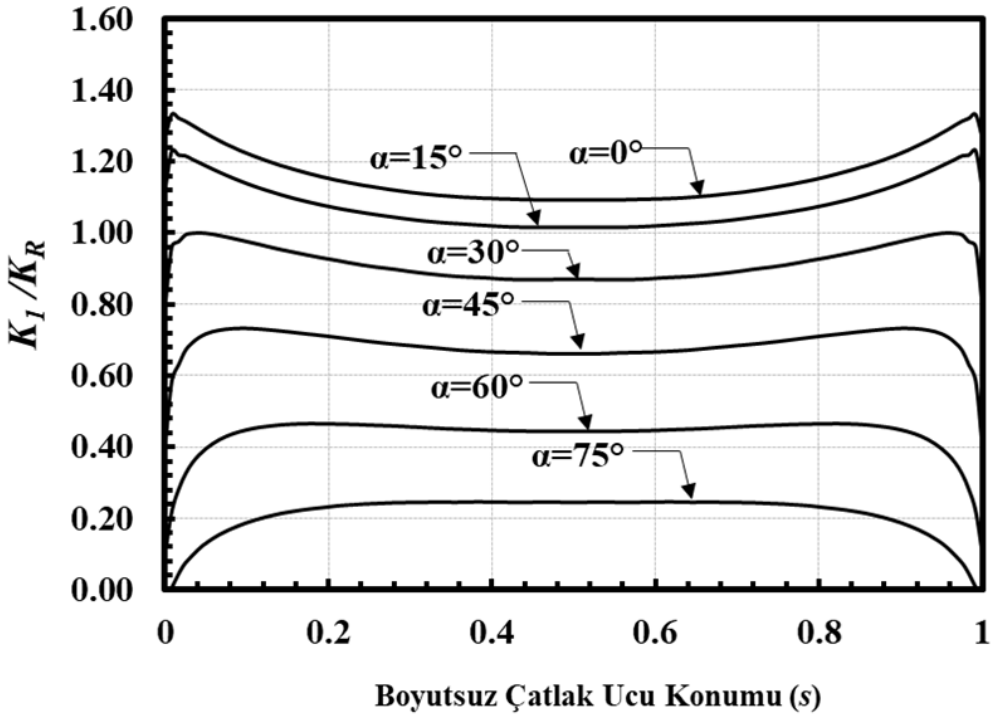
Şekil 2.230. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



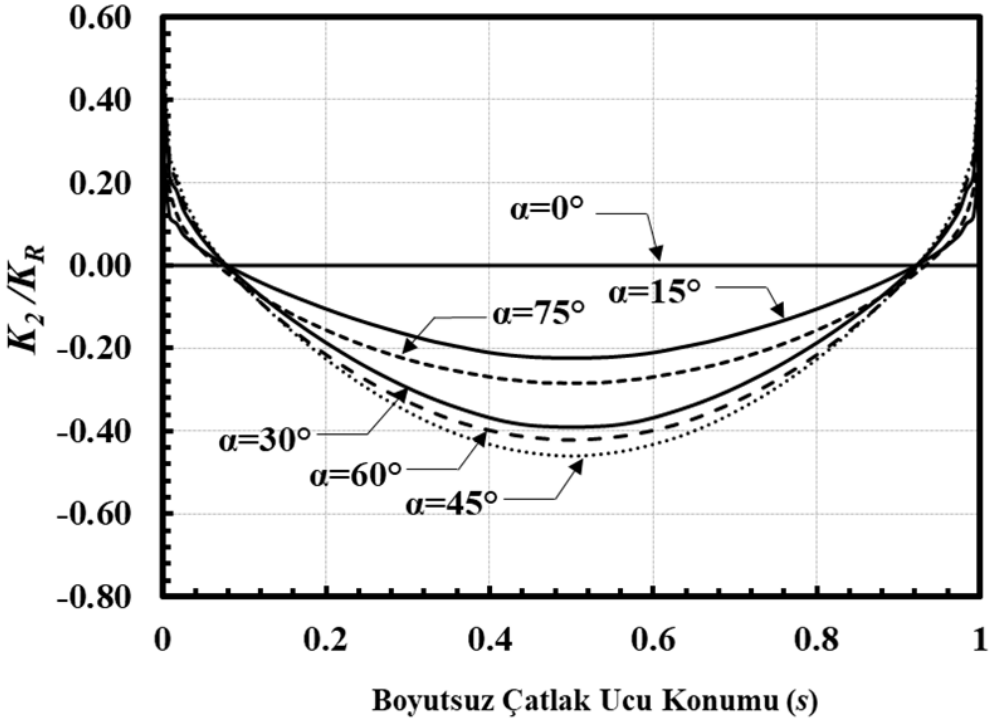
Şekil 2.231. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



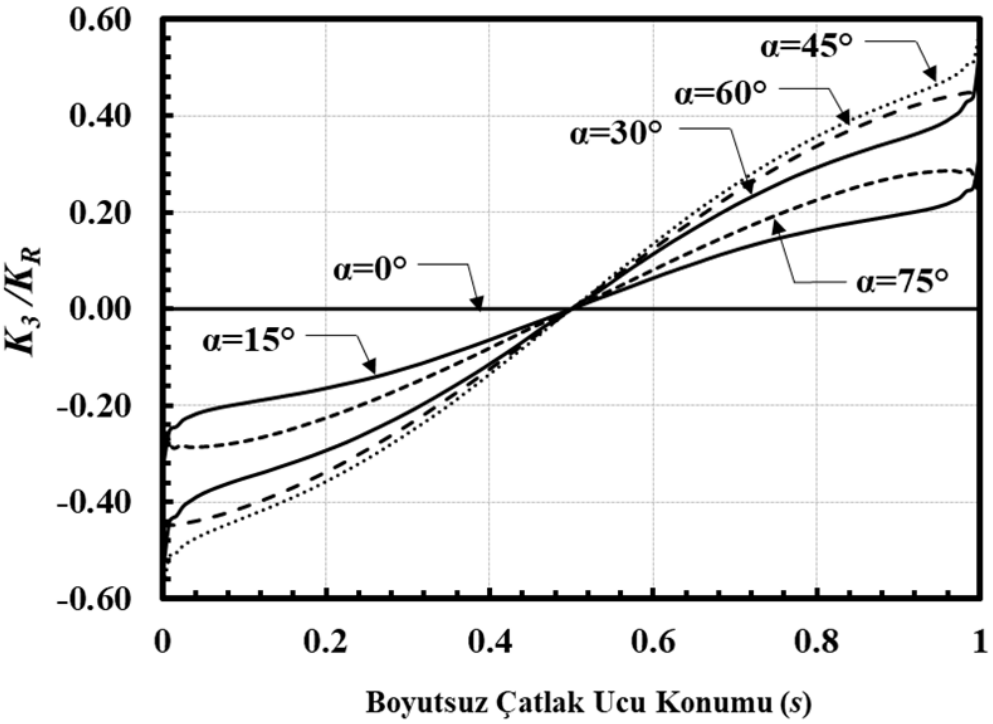
Şekil 2.232. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



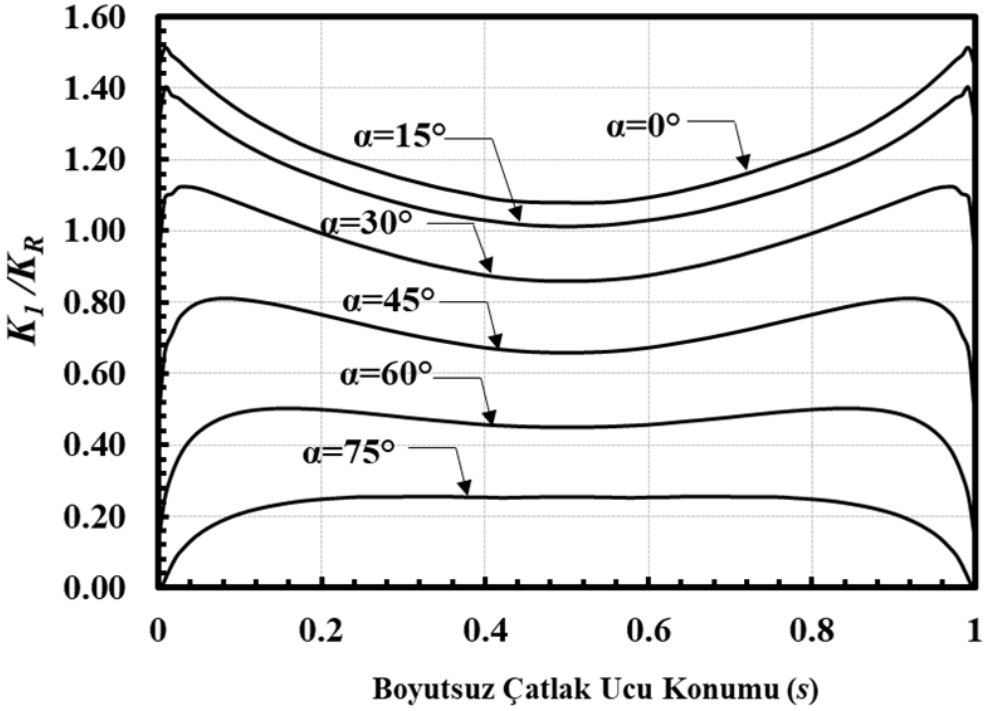
Şekil 2.233. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



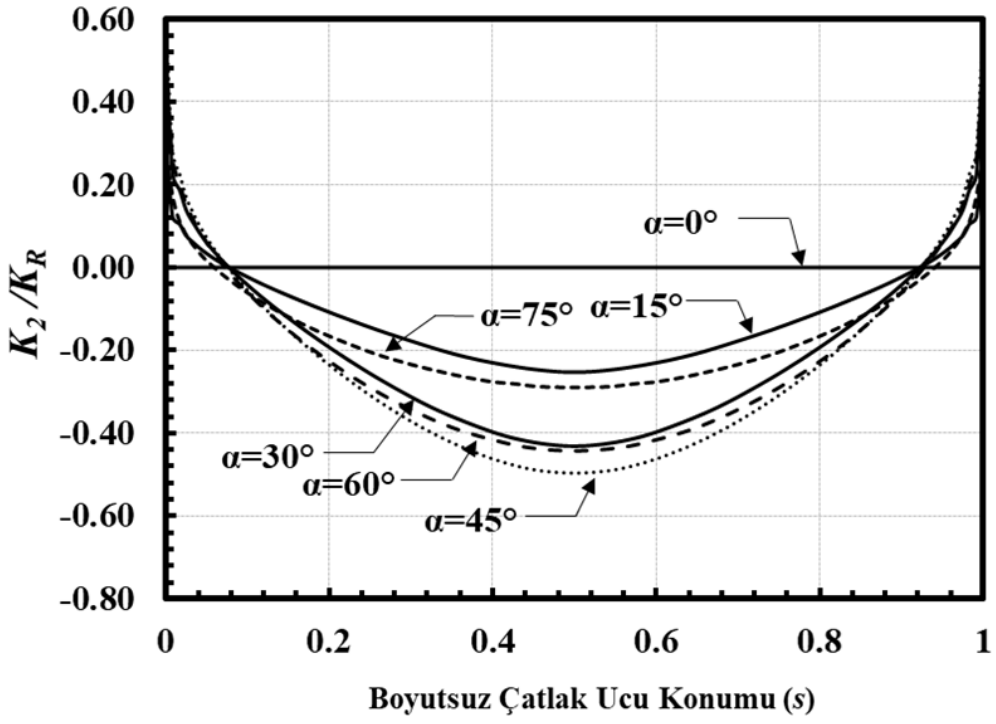
Şekil 2.234. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



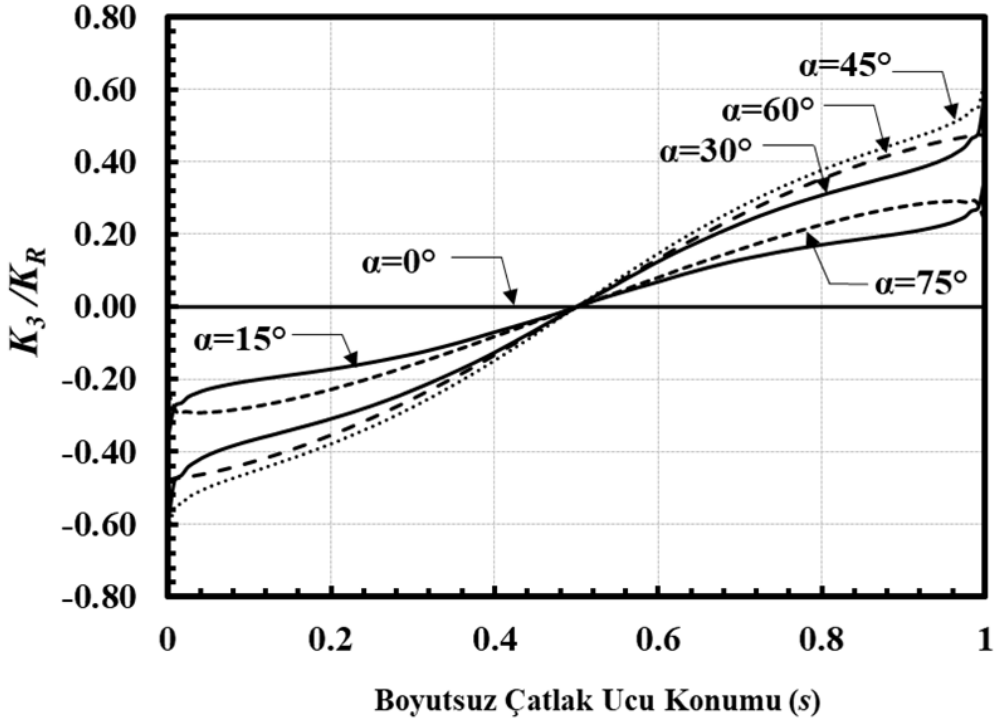
Şekil 2.235. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



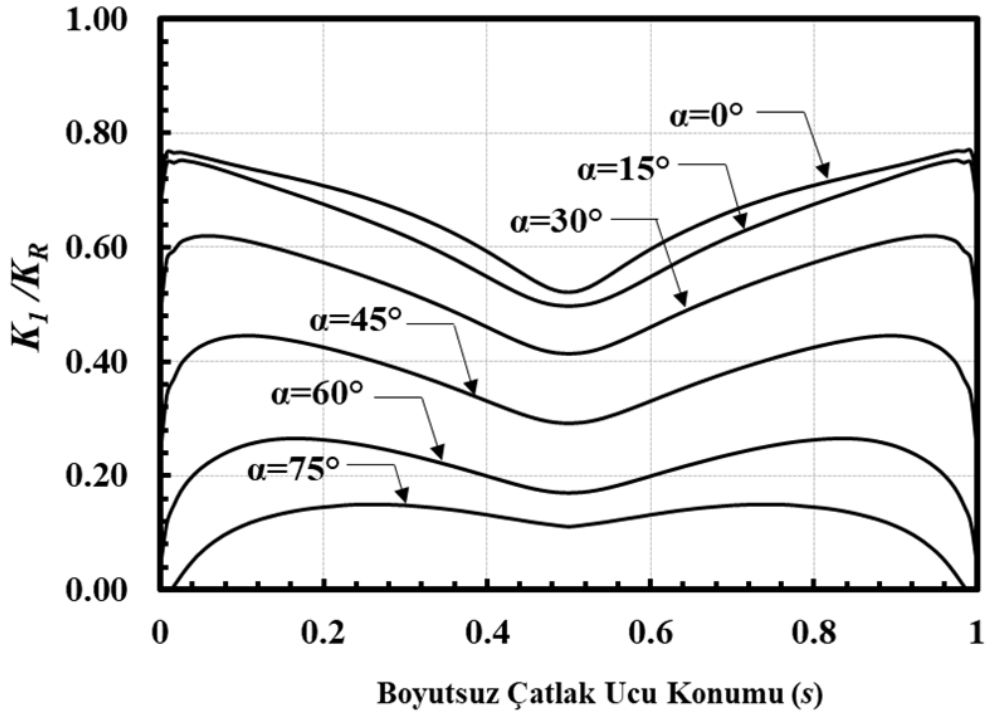
Şekil 2.236. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



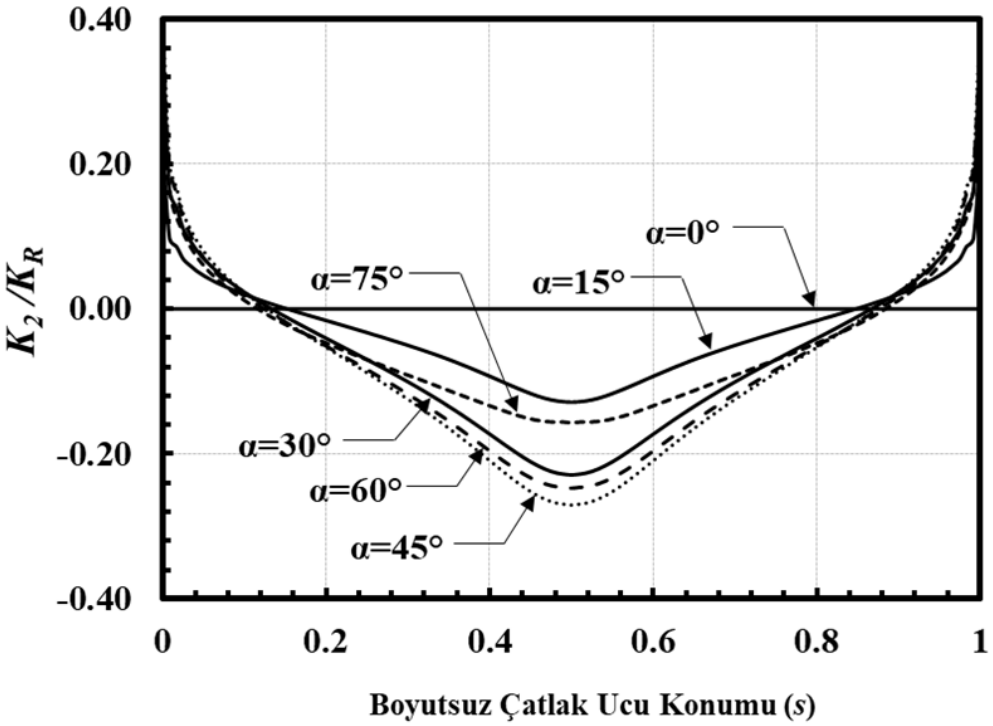
Şekil 2.237. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



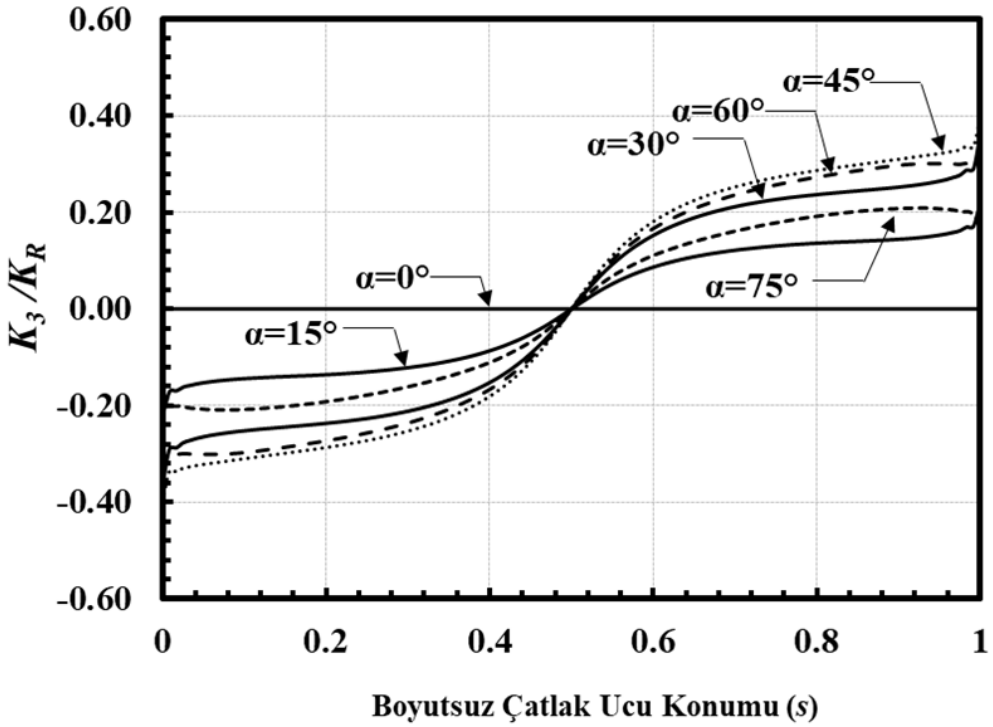
Şekil 2.238. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



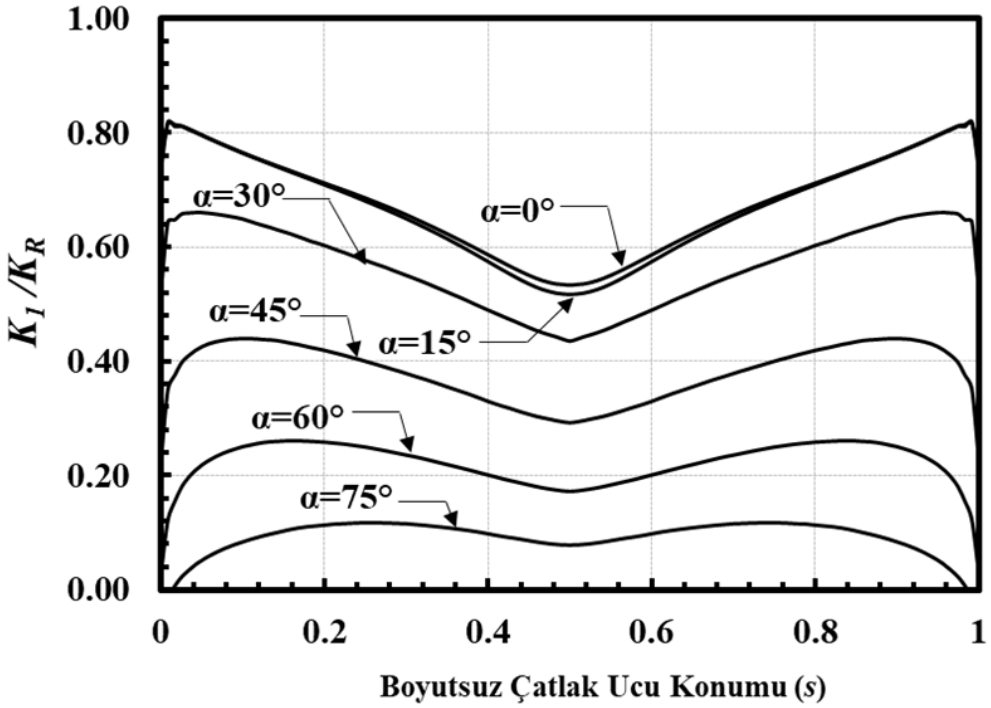
Şekil 2.239. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



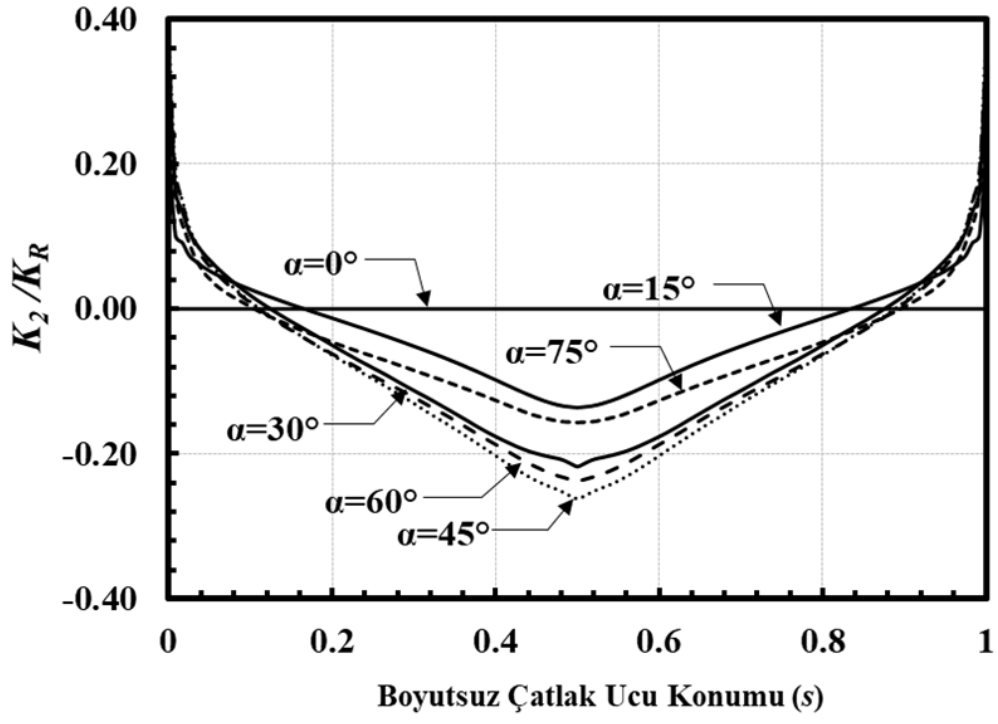
Şekil 2.240. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



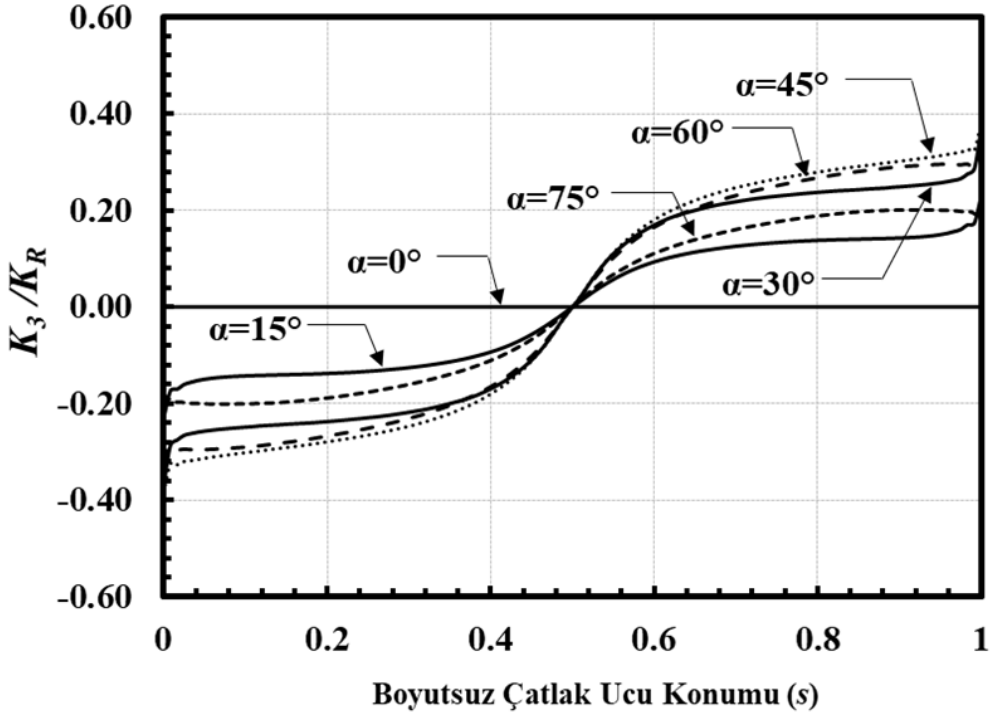
Şekil 2.241. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



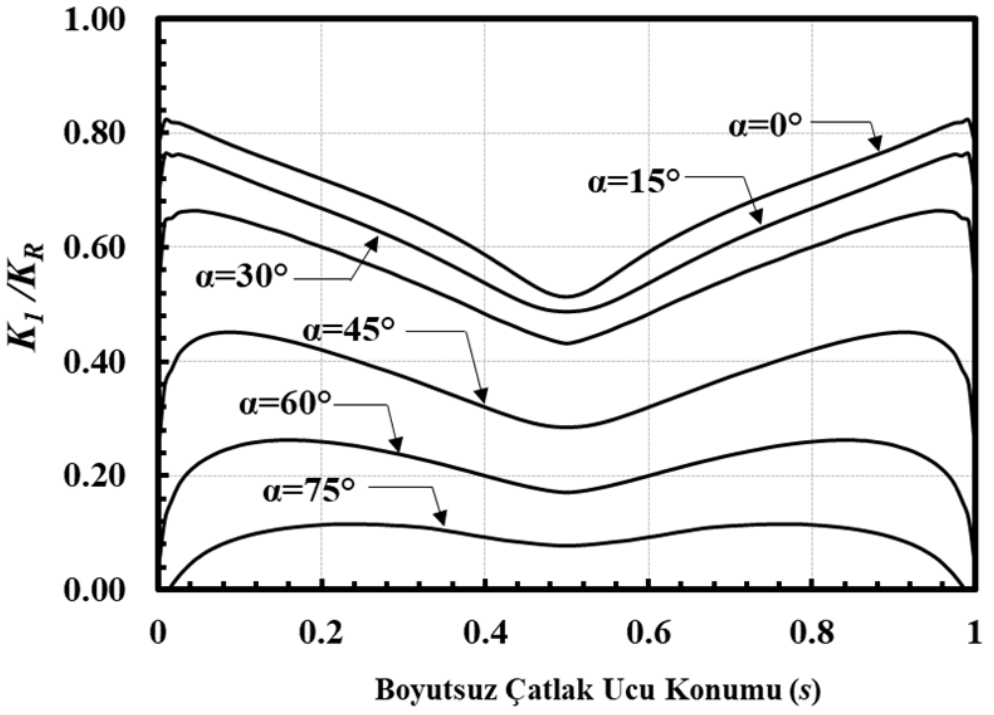
Şekil 2.242. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



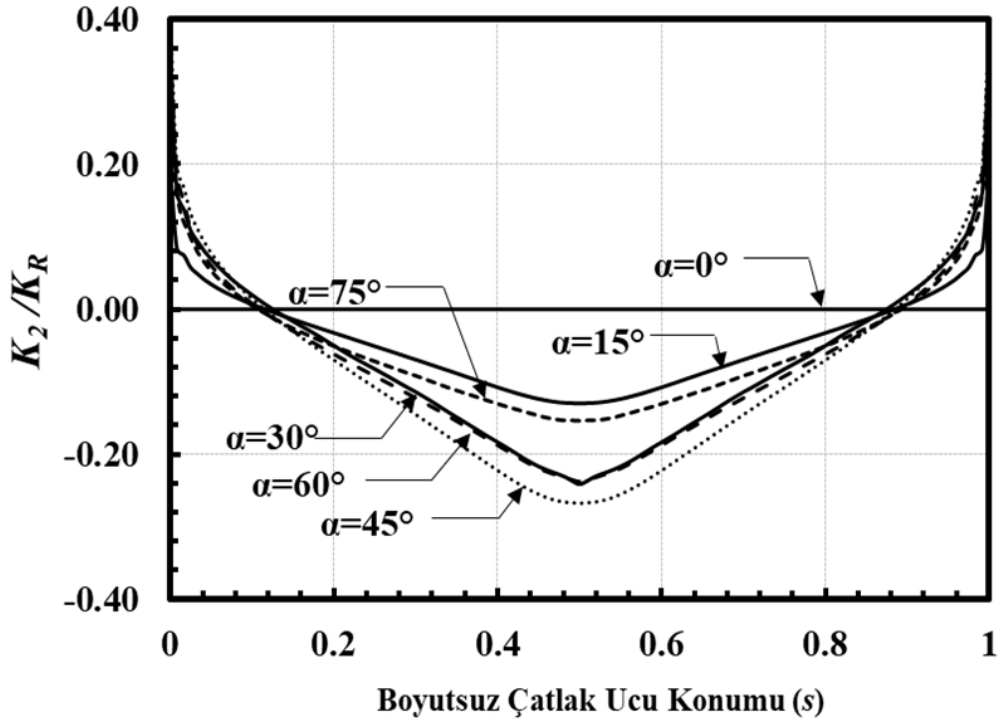
Şekil 2.243. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



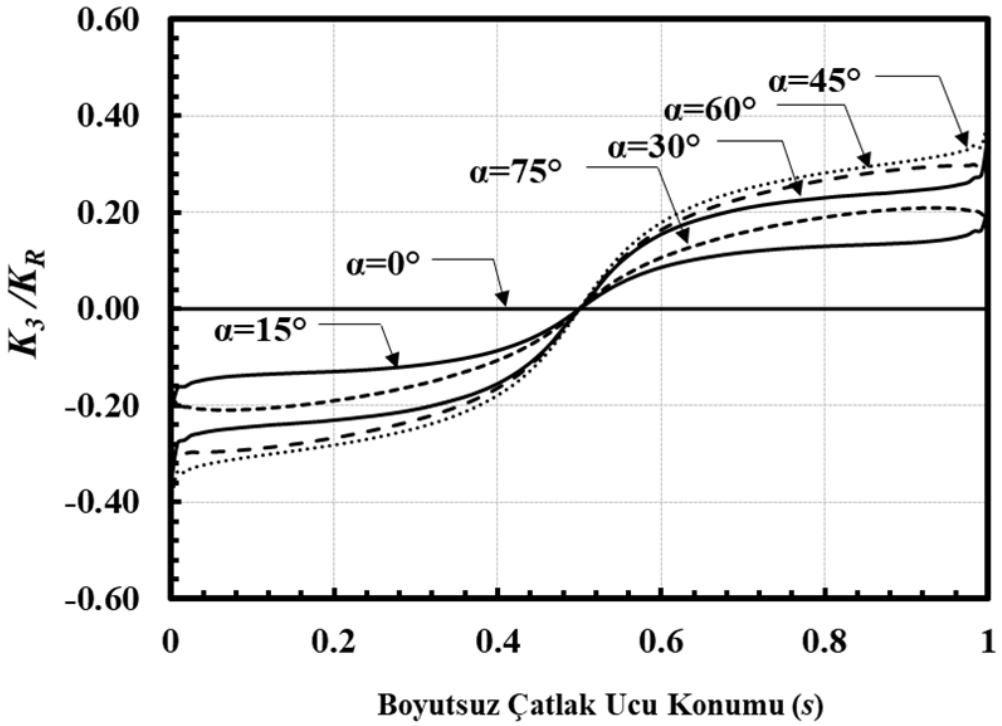
Şekil 2.244. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



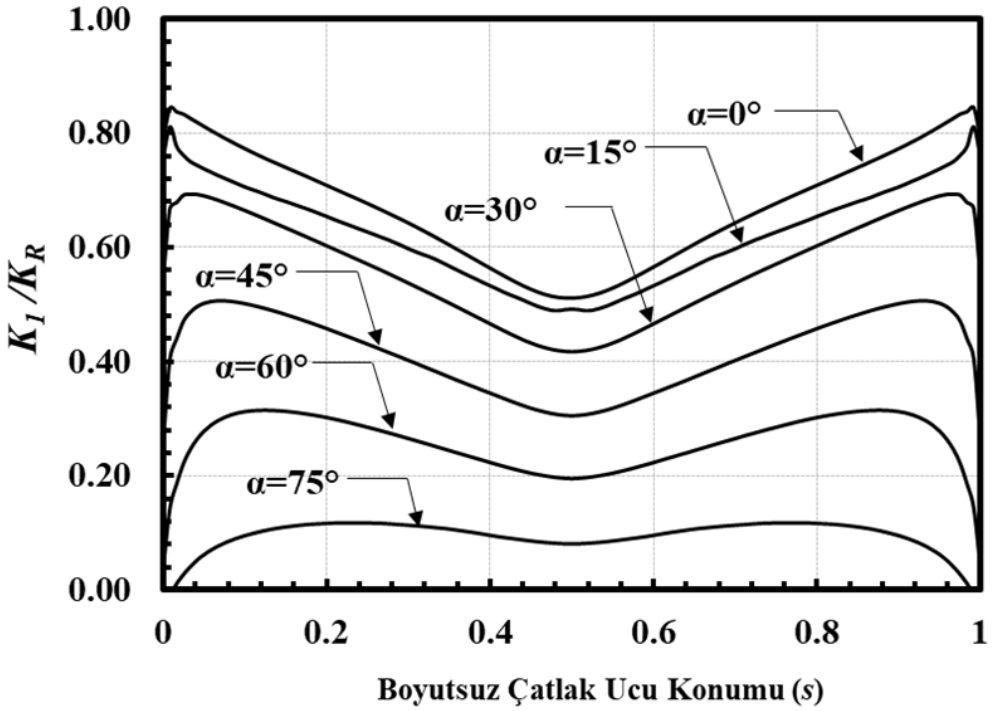
Şekil 2.245. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



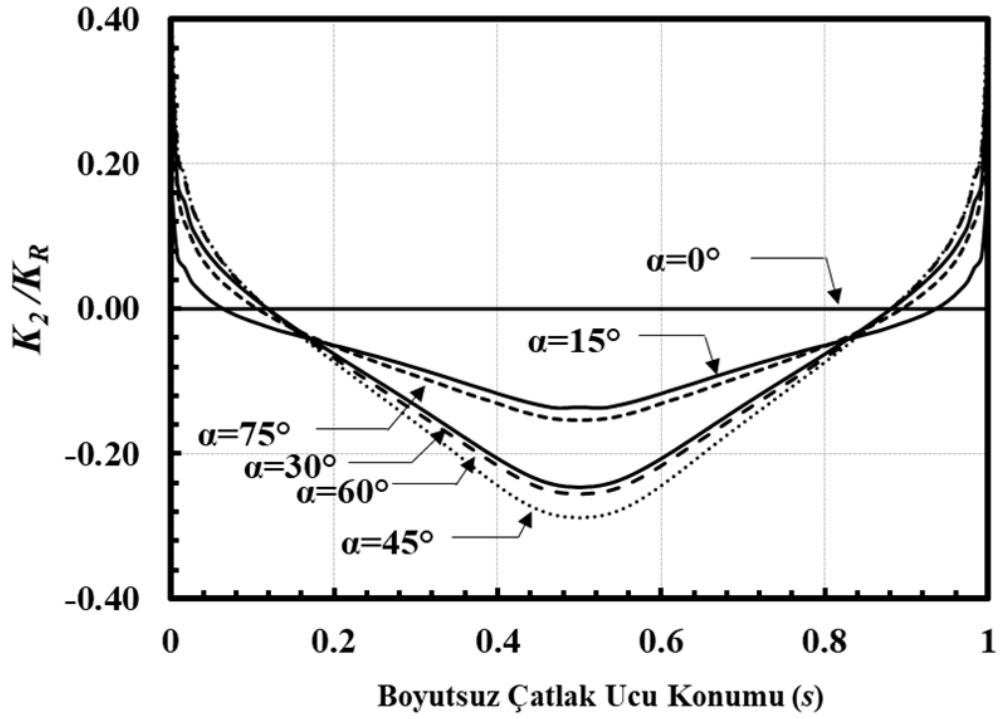
Şekil 2.246. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



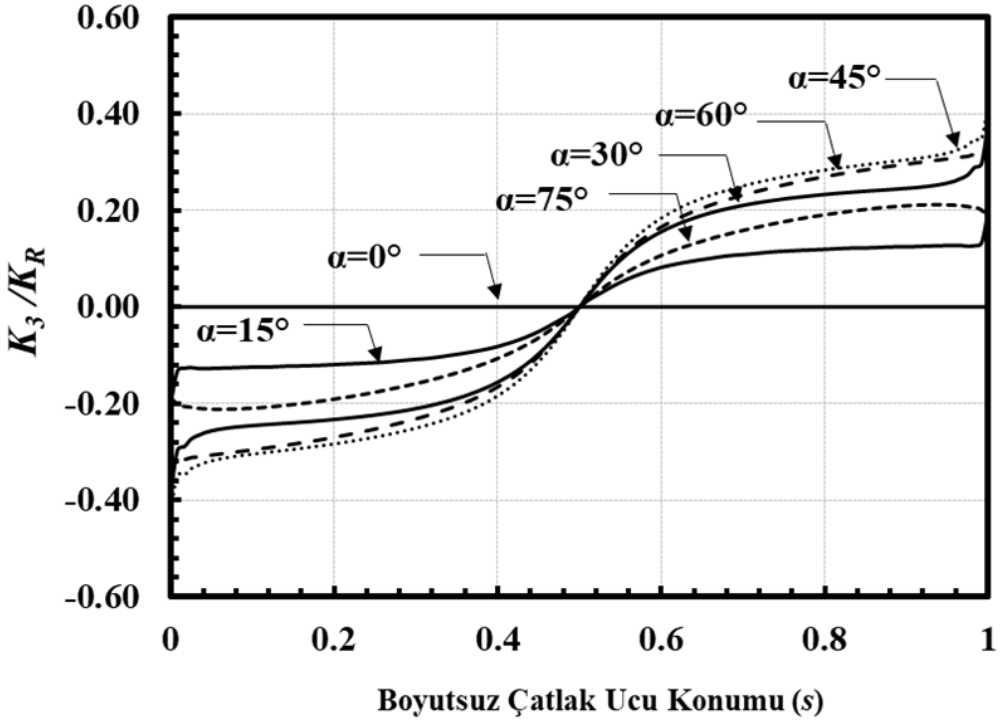
Şekil 2.247. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



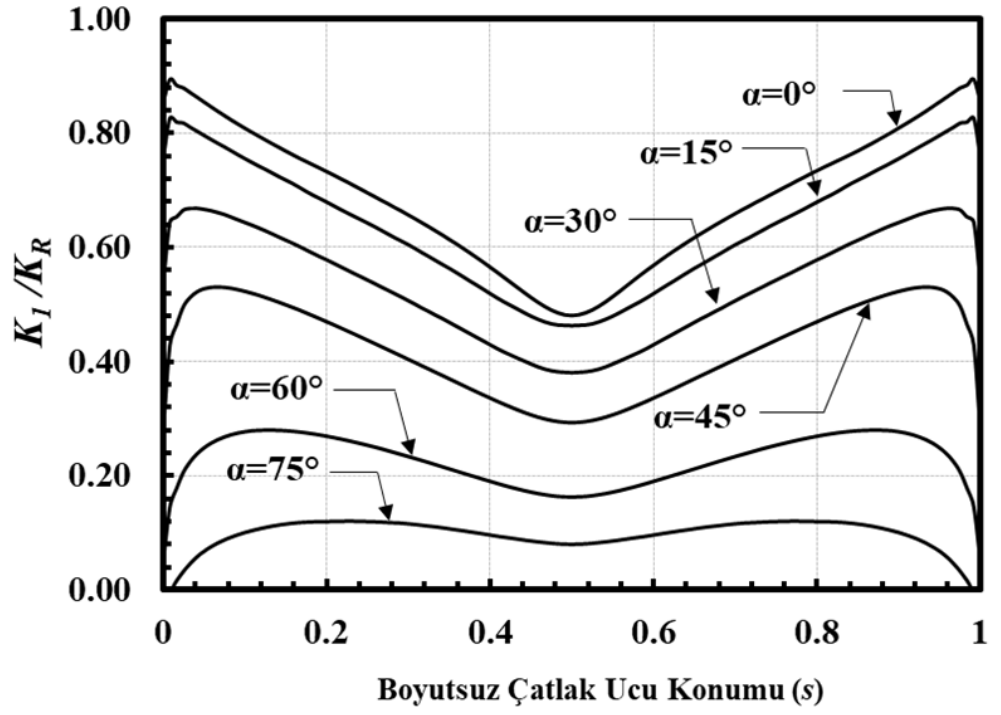
Şekil 2.248. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



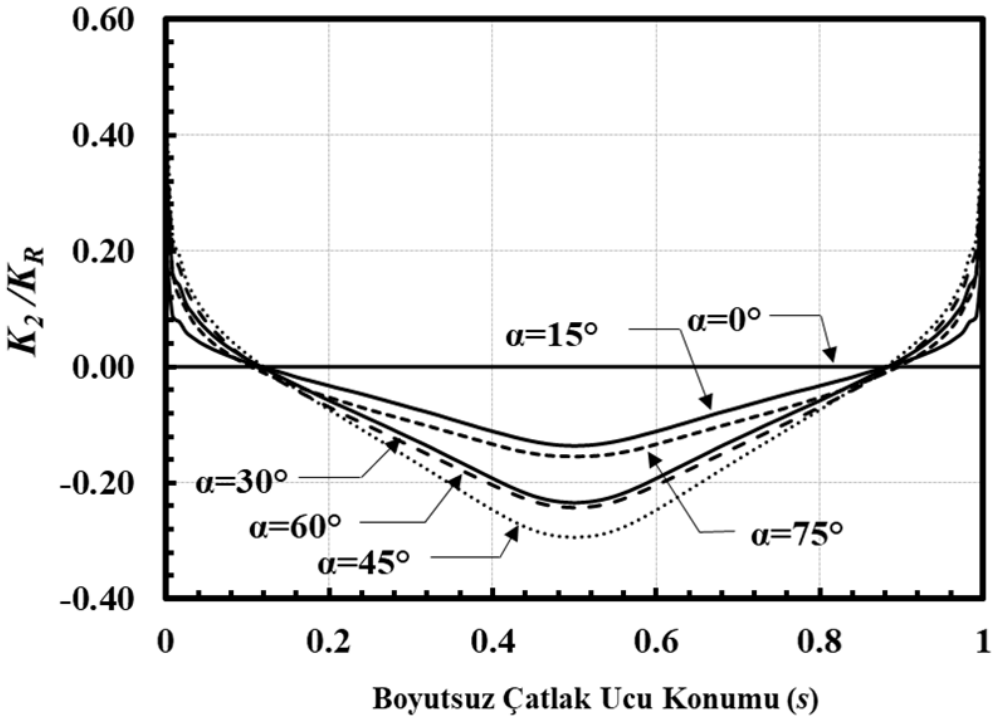
Şekil 2.249. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



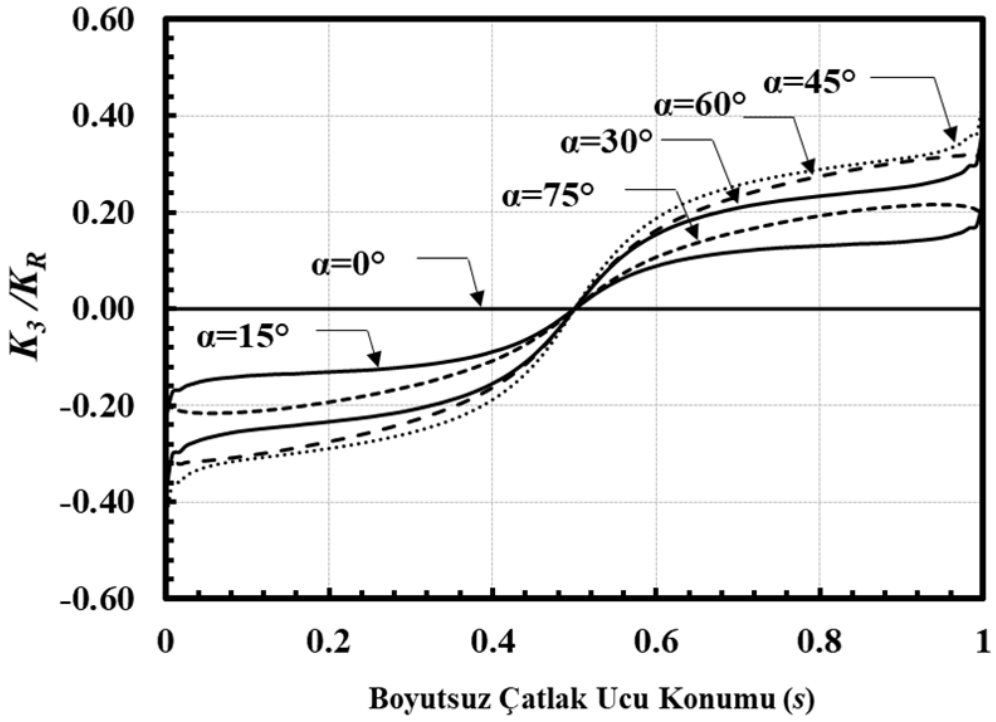
Şekil 2.250. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



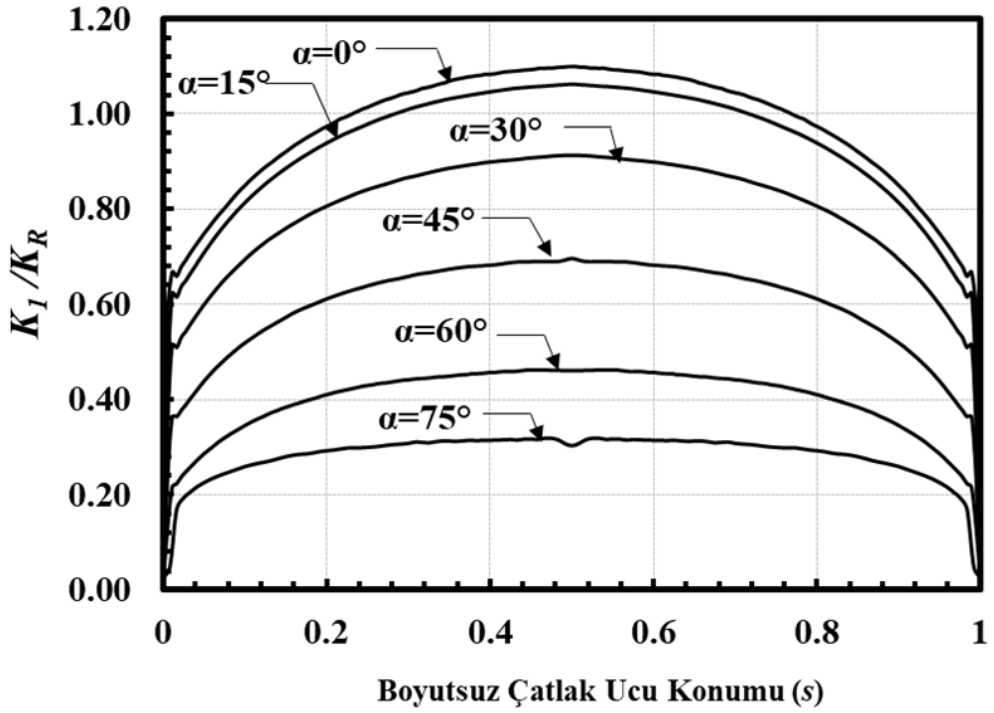
Şekil 2.251. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



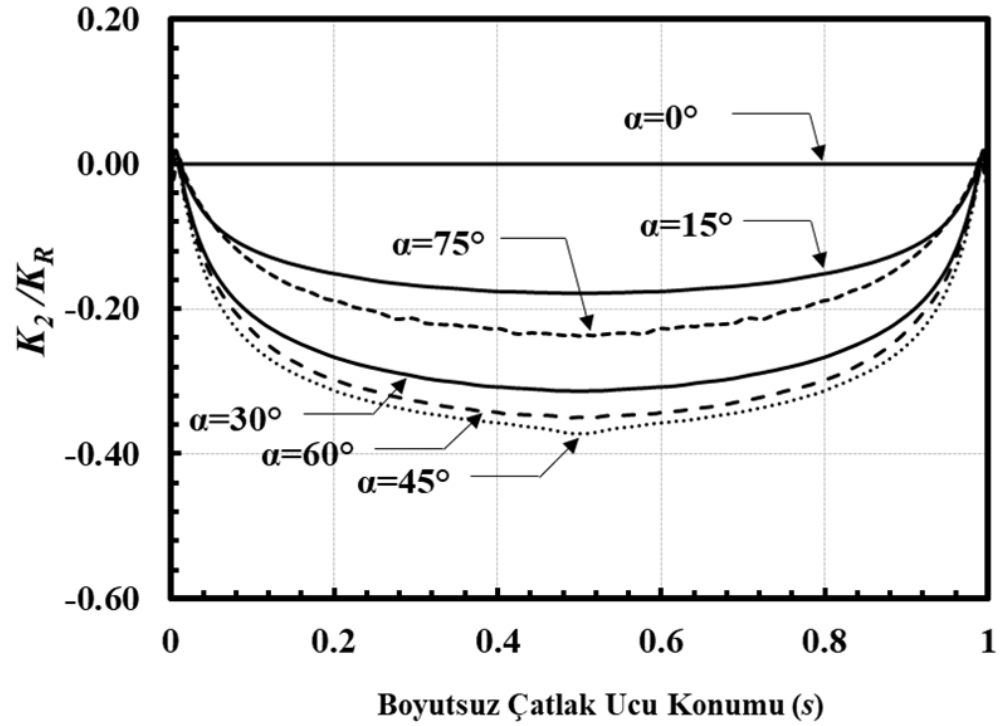
Şekil 2.252. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



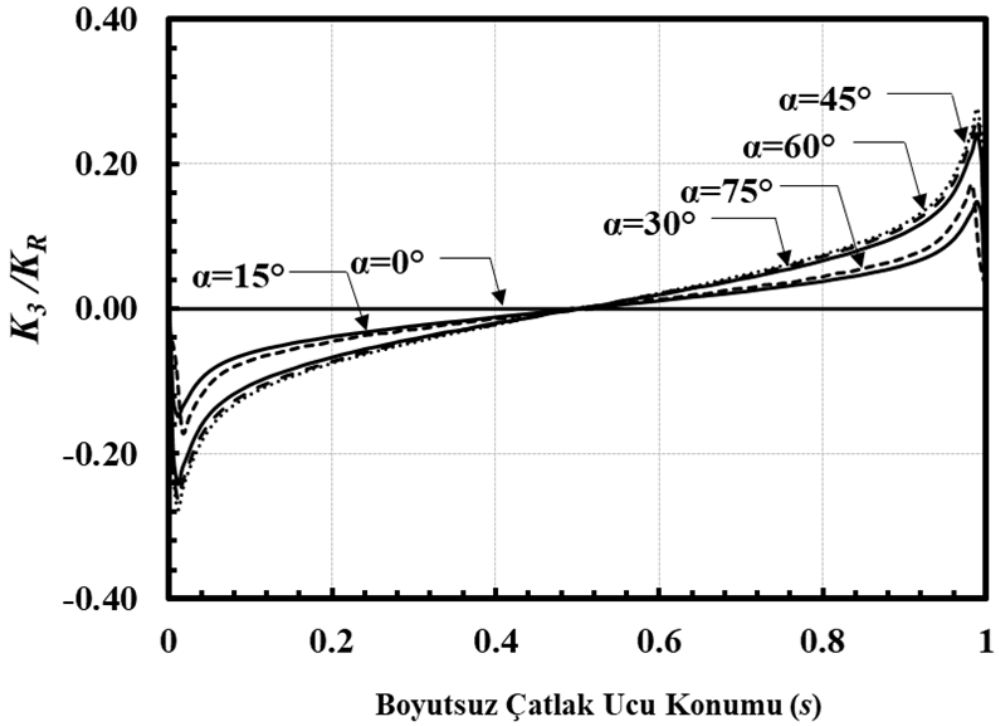
Şekil 2.253. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.9, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



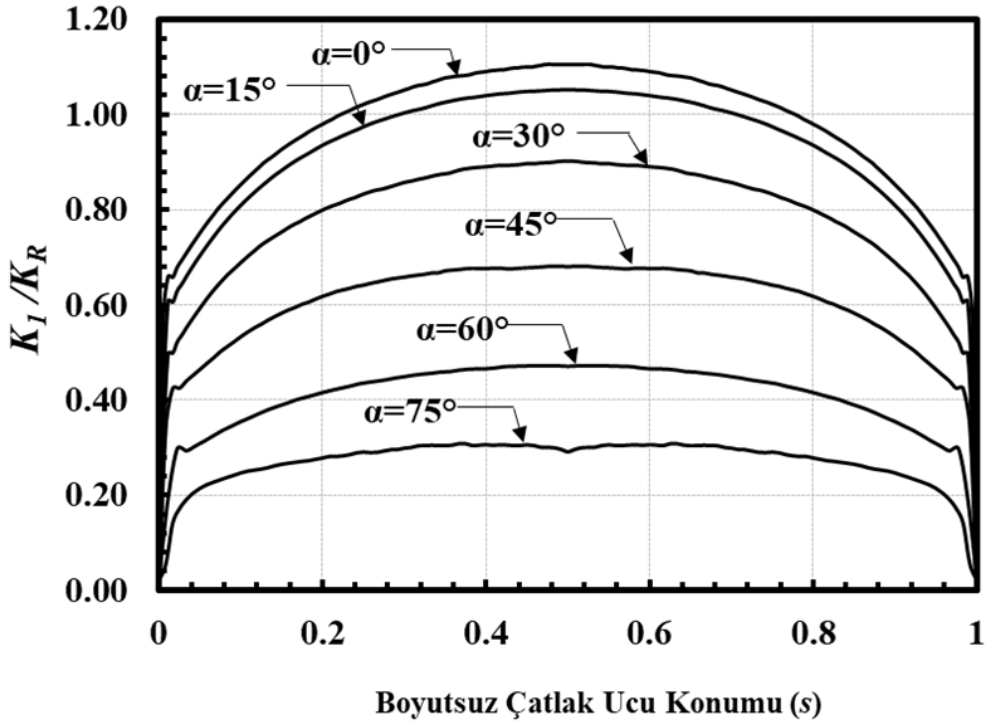
Şekil 2.254. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



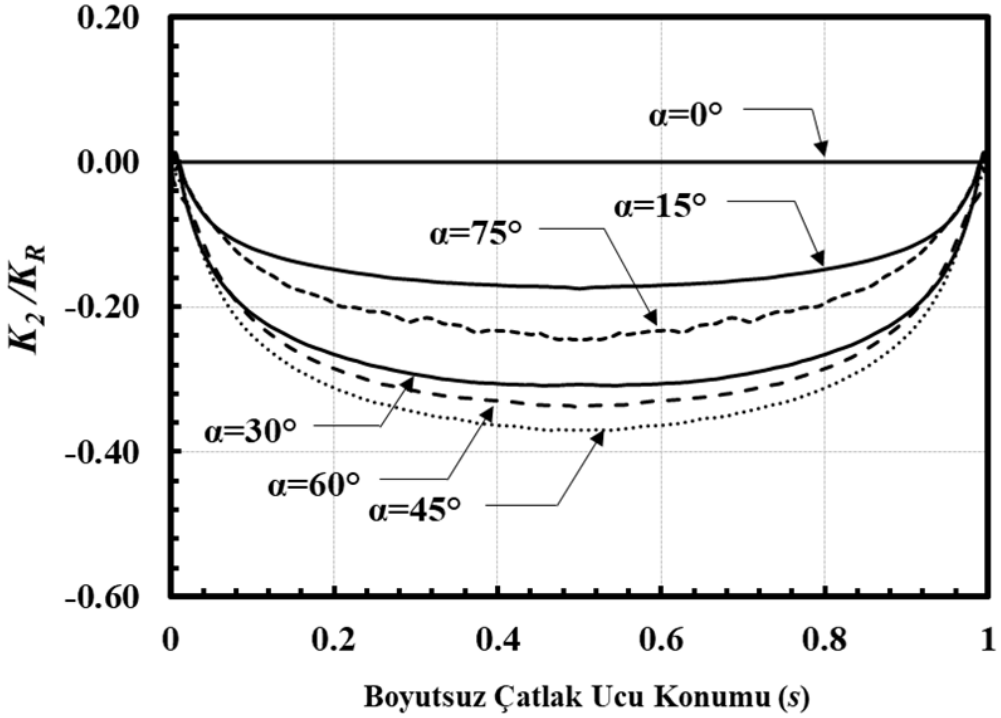
Şekil 2.255. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



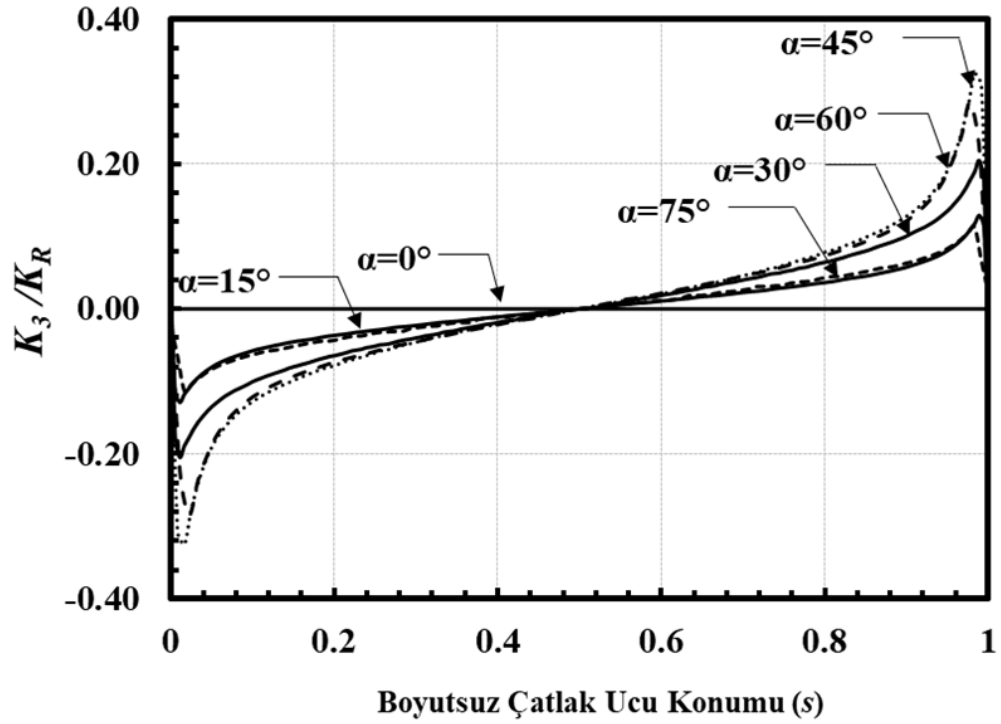
Şekil 2.256. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.05.



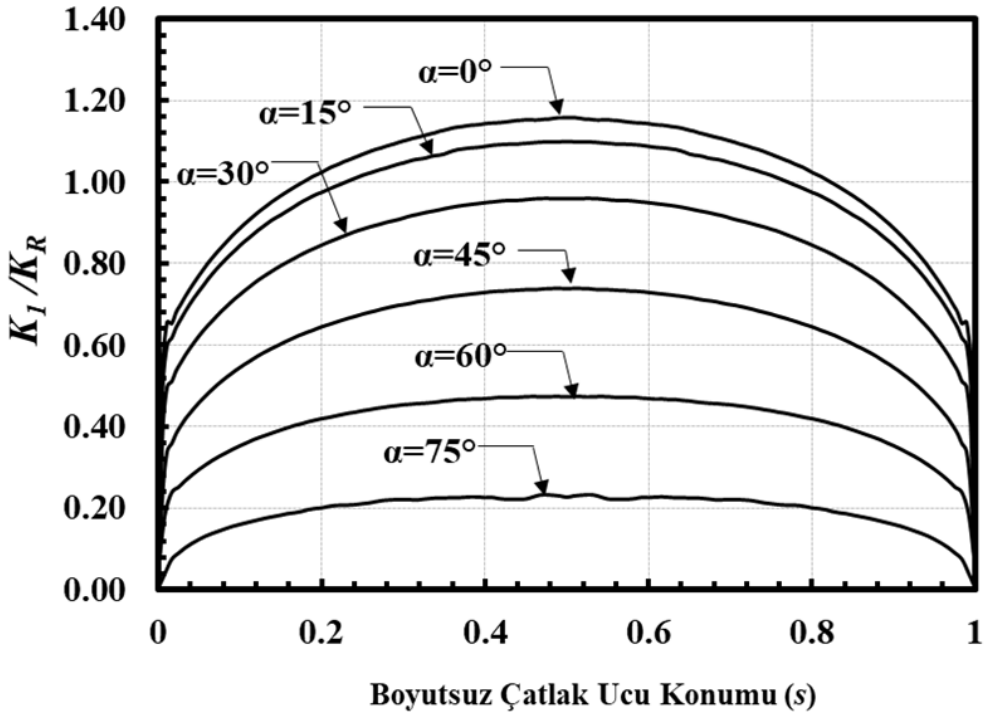
Şekil 2.257. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



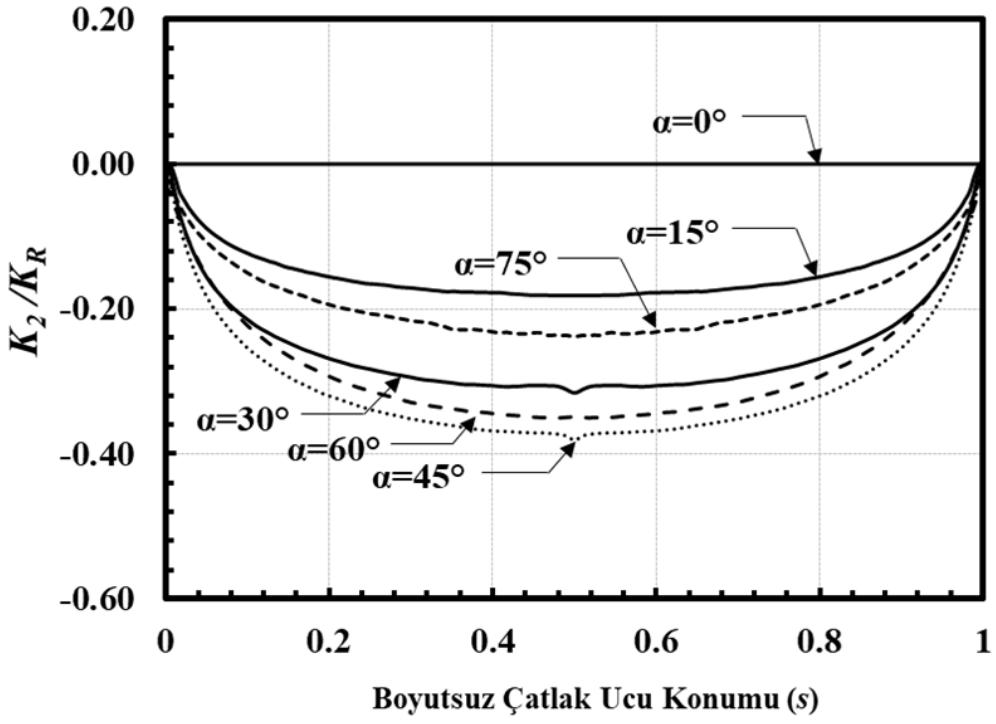
Şekil 2.258. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



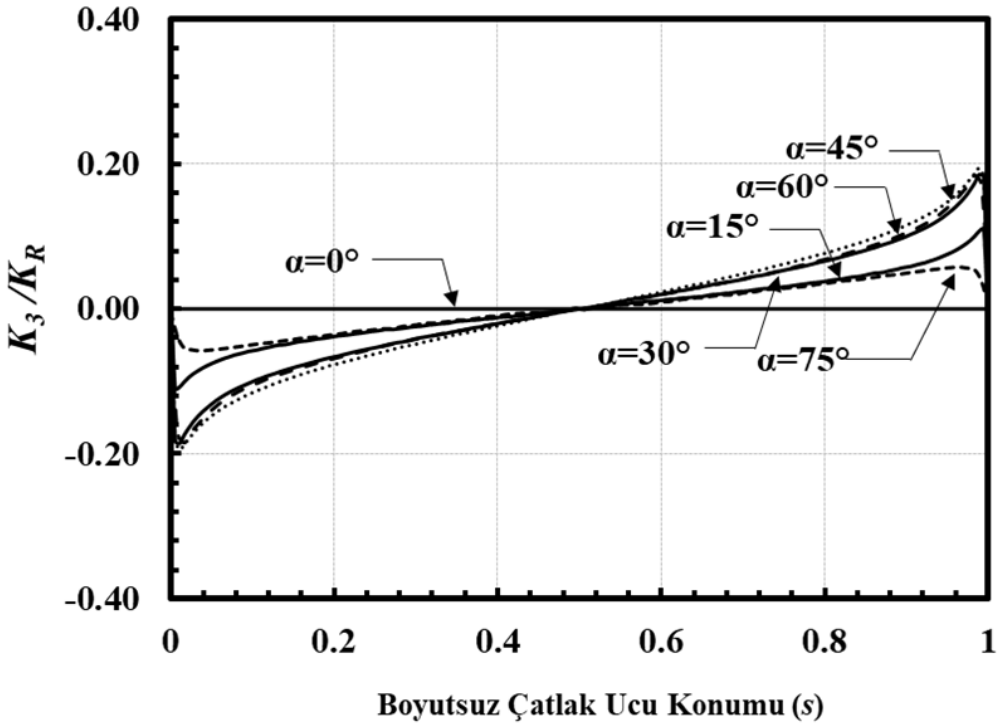
Şekil 2.259. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.1.



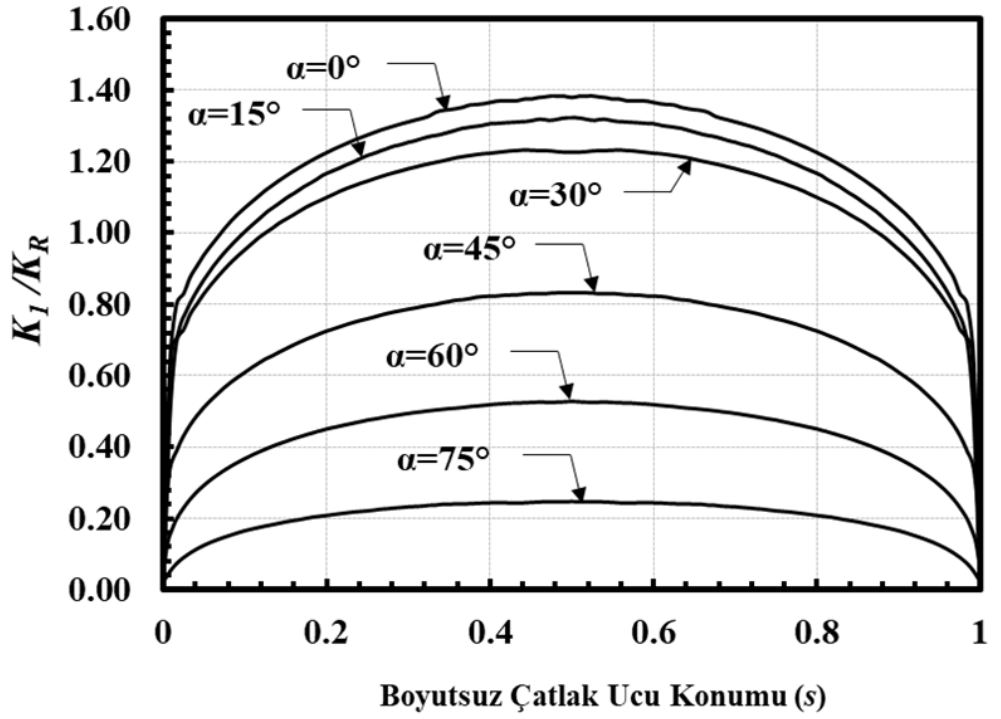
Şekil 2.260. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



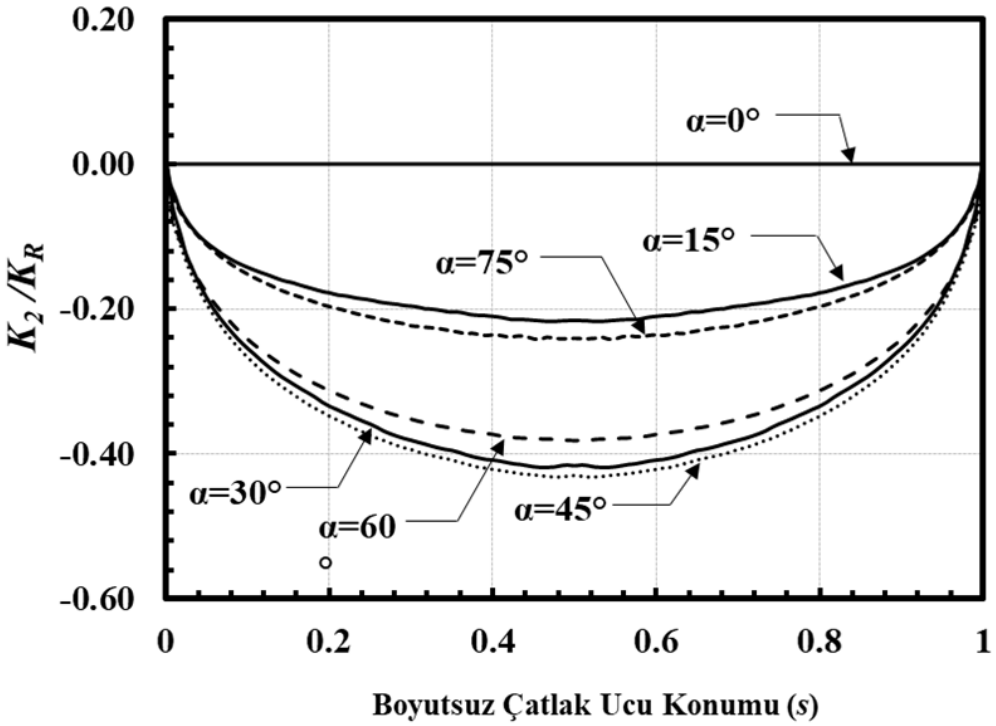
Şekil 2.261. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



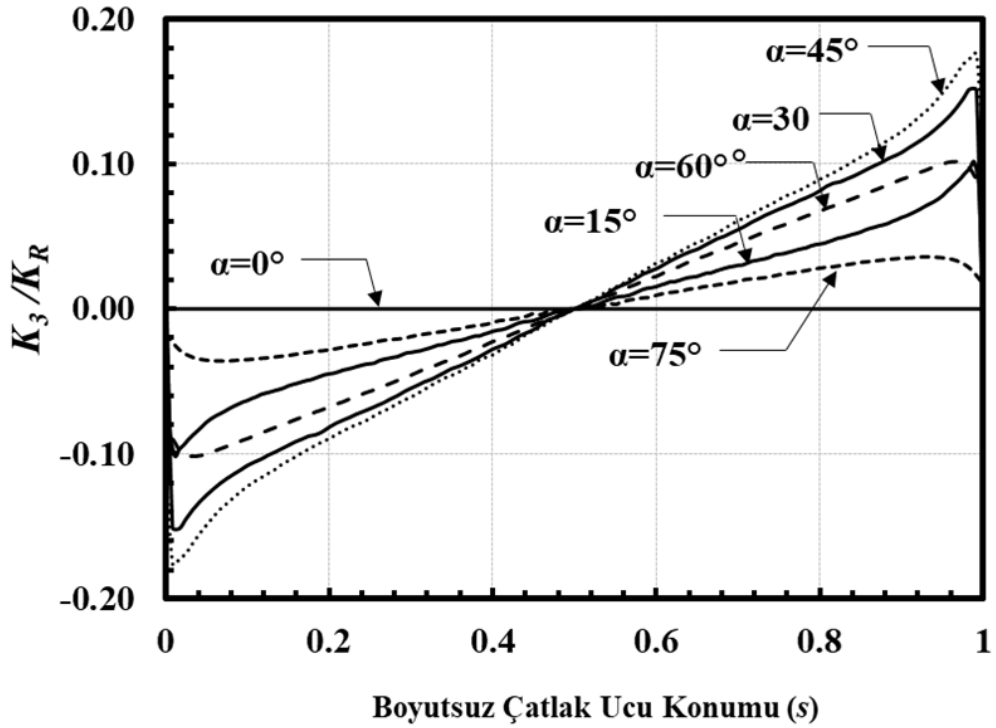
Şekil 2.262. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.25.



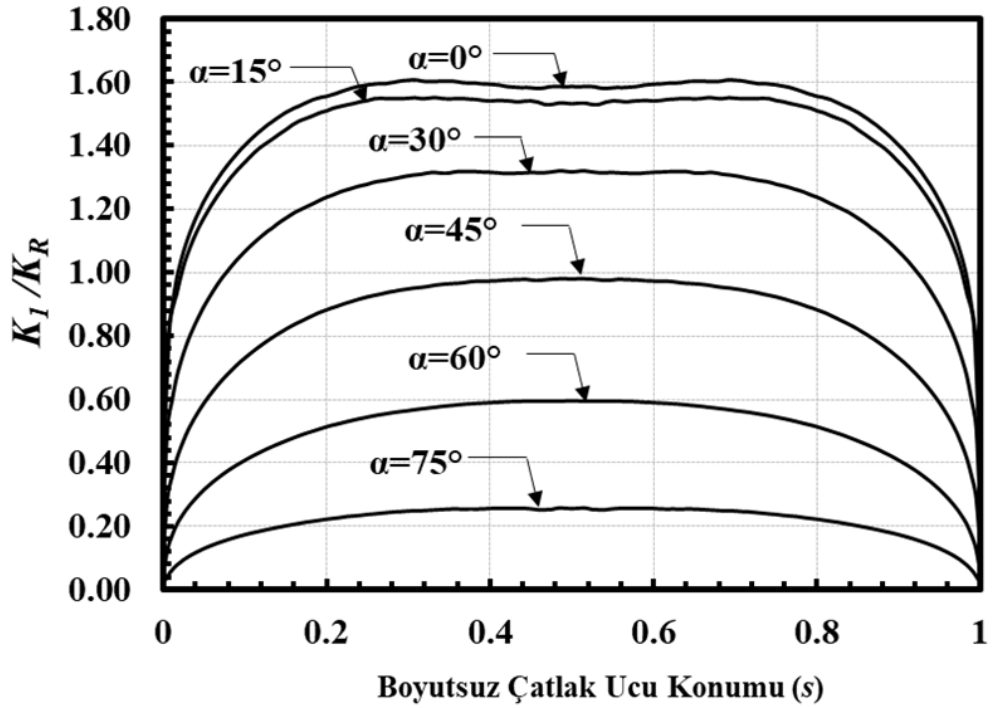
Şekil 2.263. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



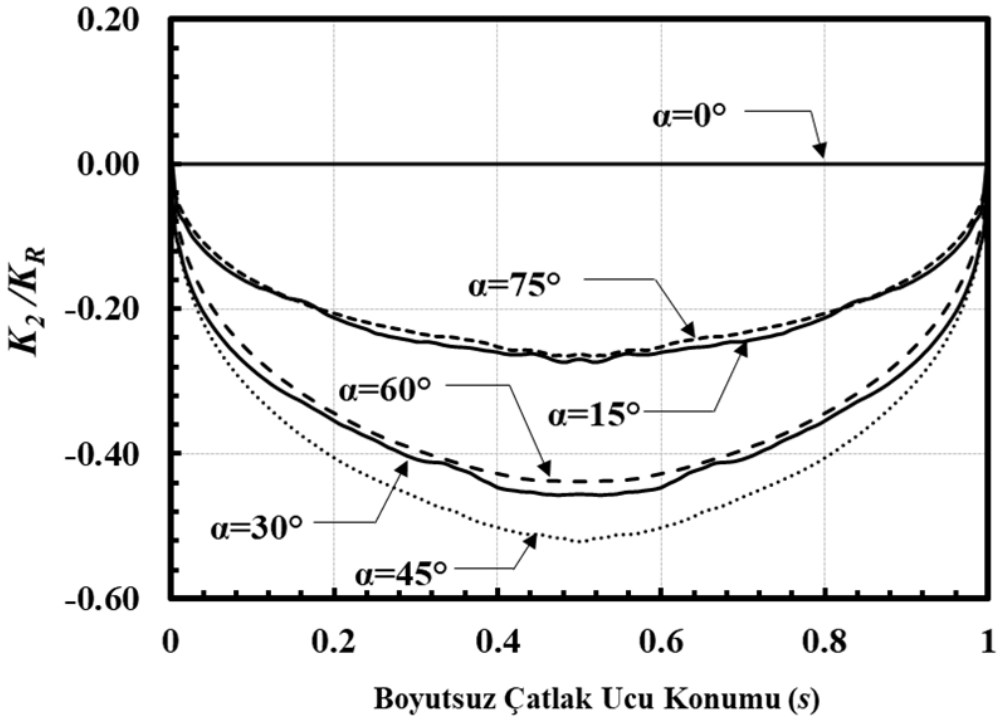
Şekil 2.264. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



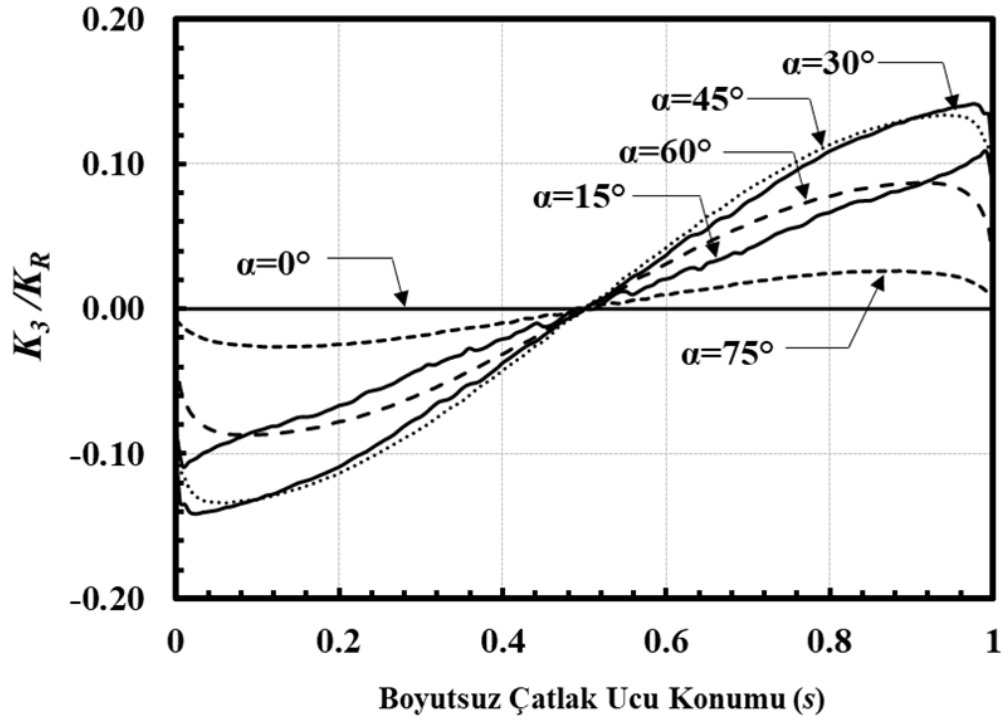
Şekil 2.265. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.5.



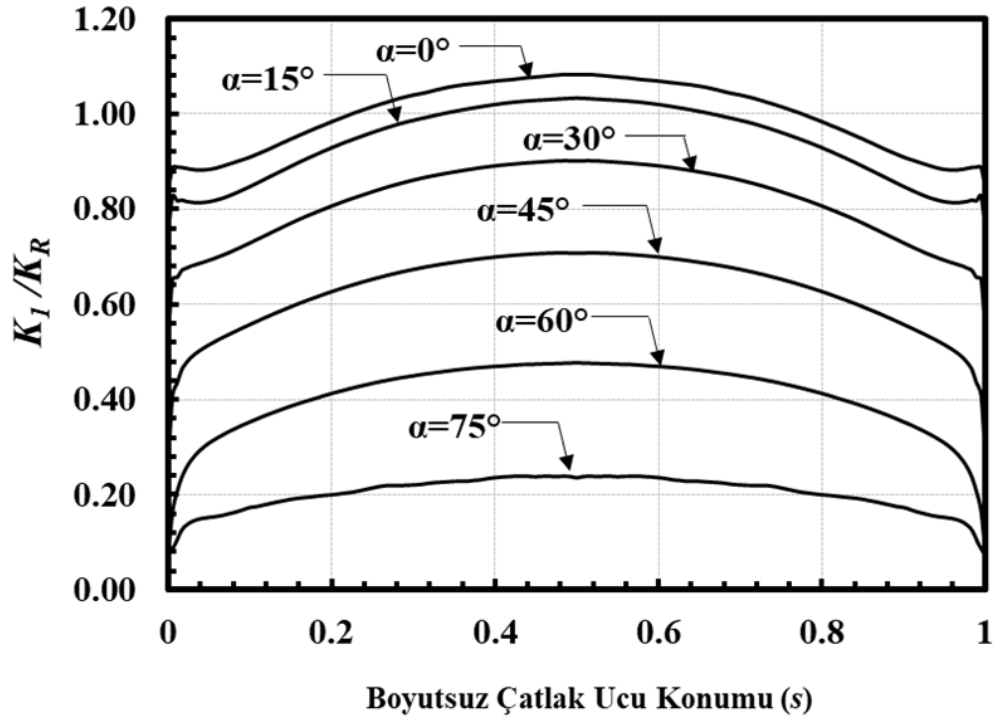
Şekil 2.266. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



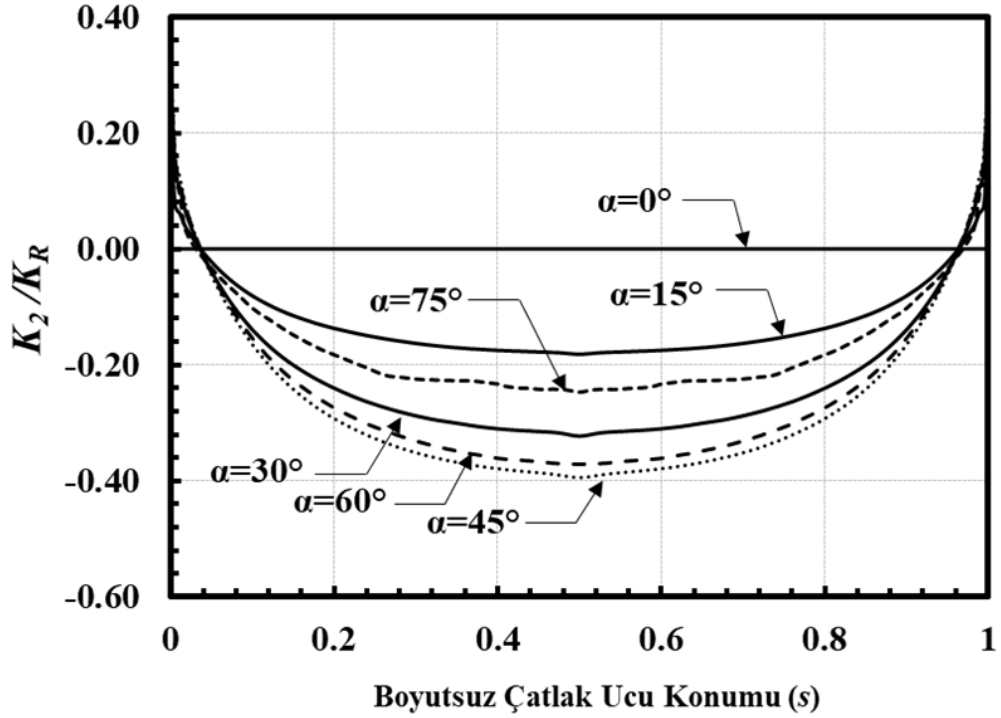
Şekil 2.267. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



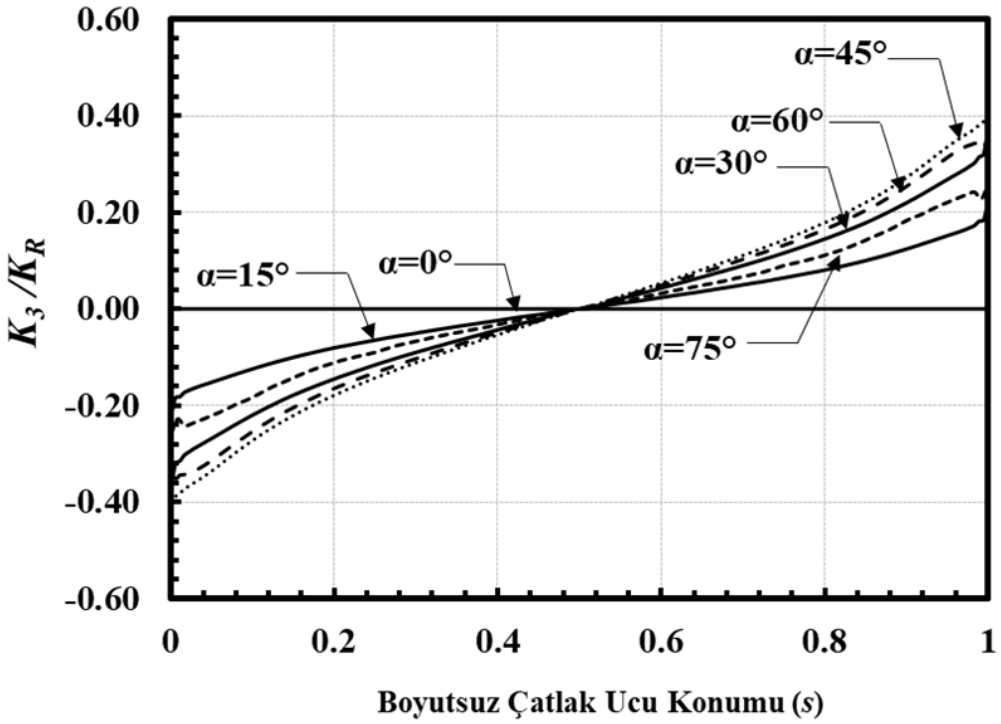
Şekil 2.268. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.25, *a/t*=0.8.



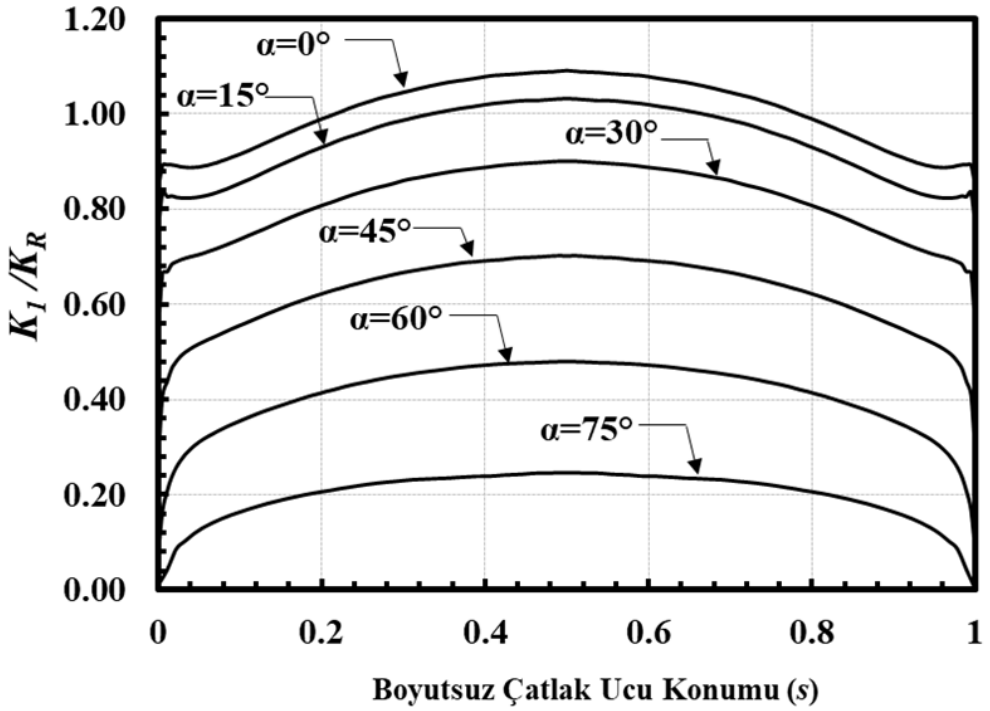
Şekil 2.269. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



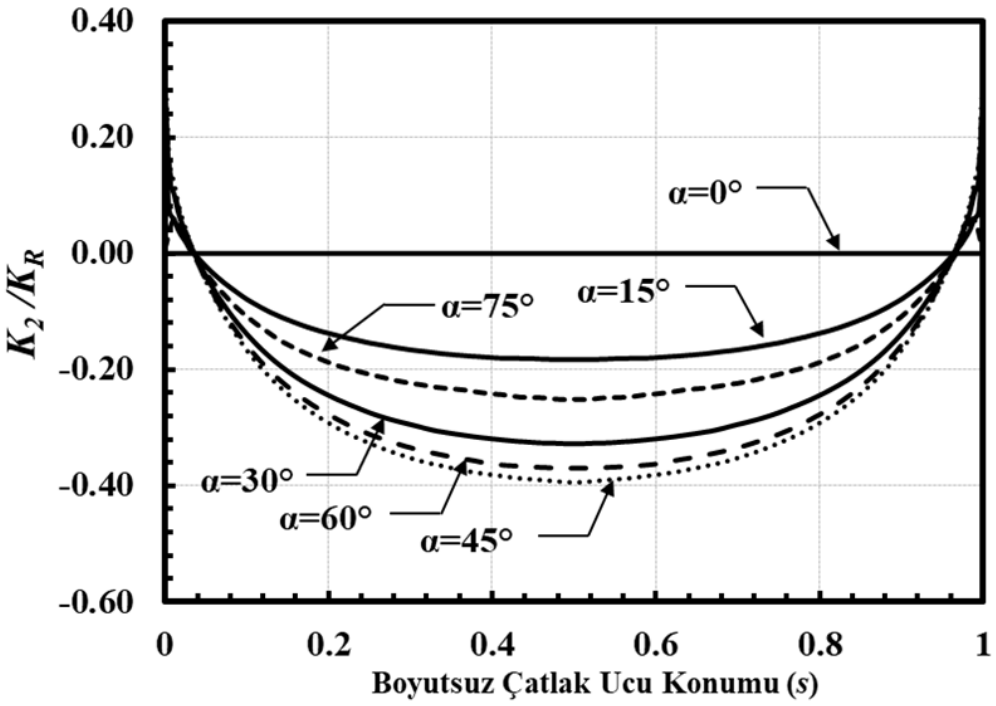
Şekil 2.270. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.50, *a/t*=0.05.



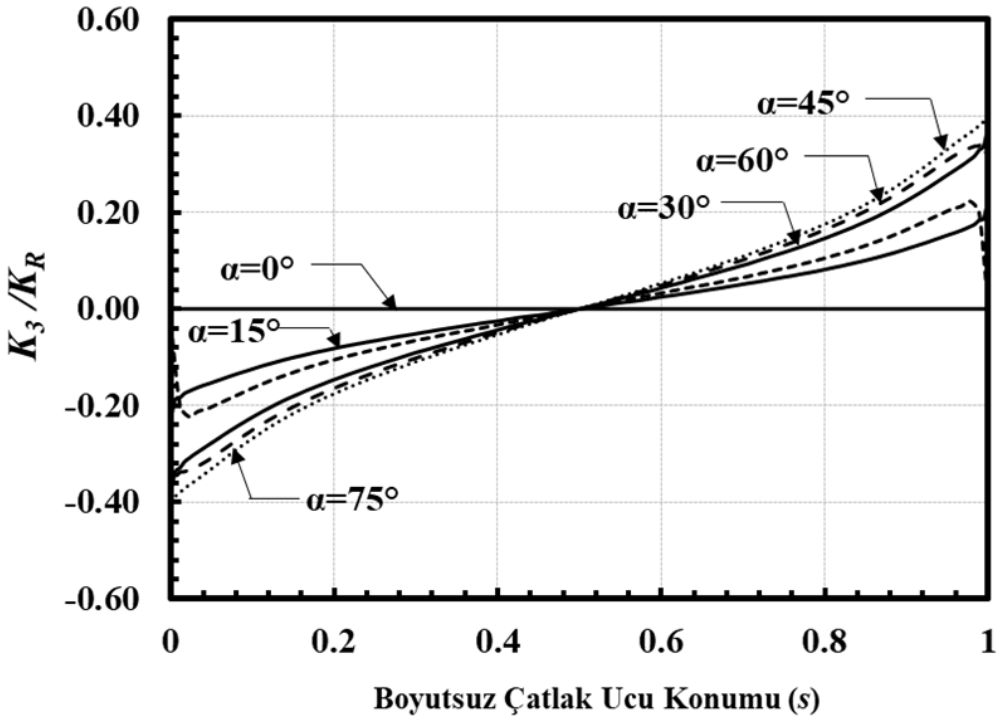
Şekil 2.271. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.05.



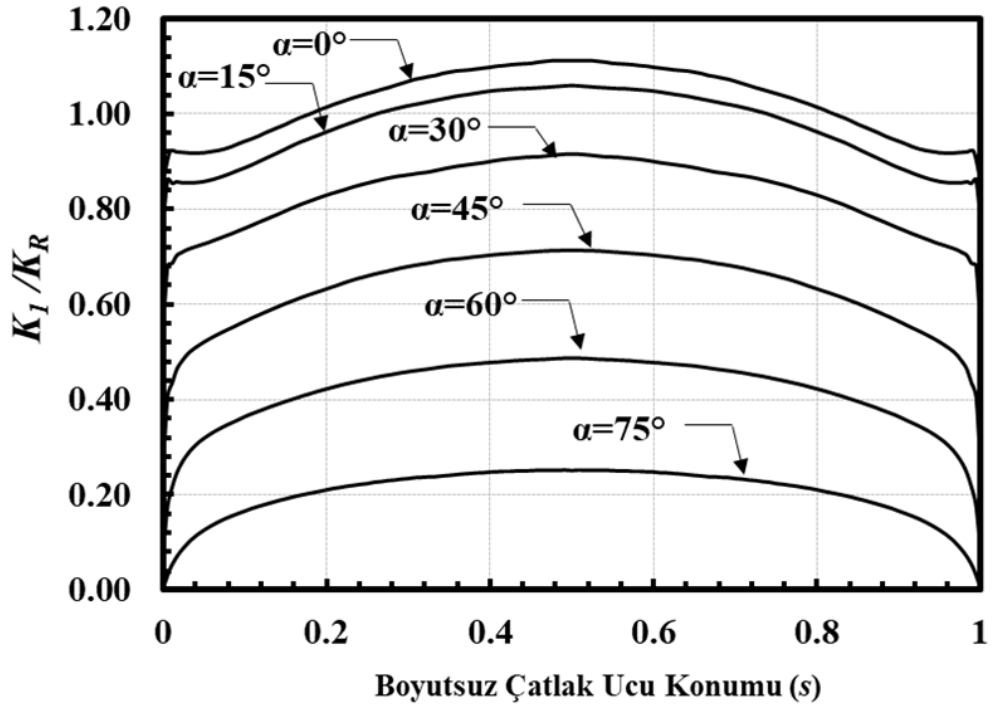
Şekil 2.272. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



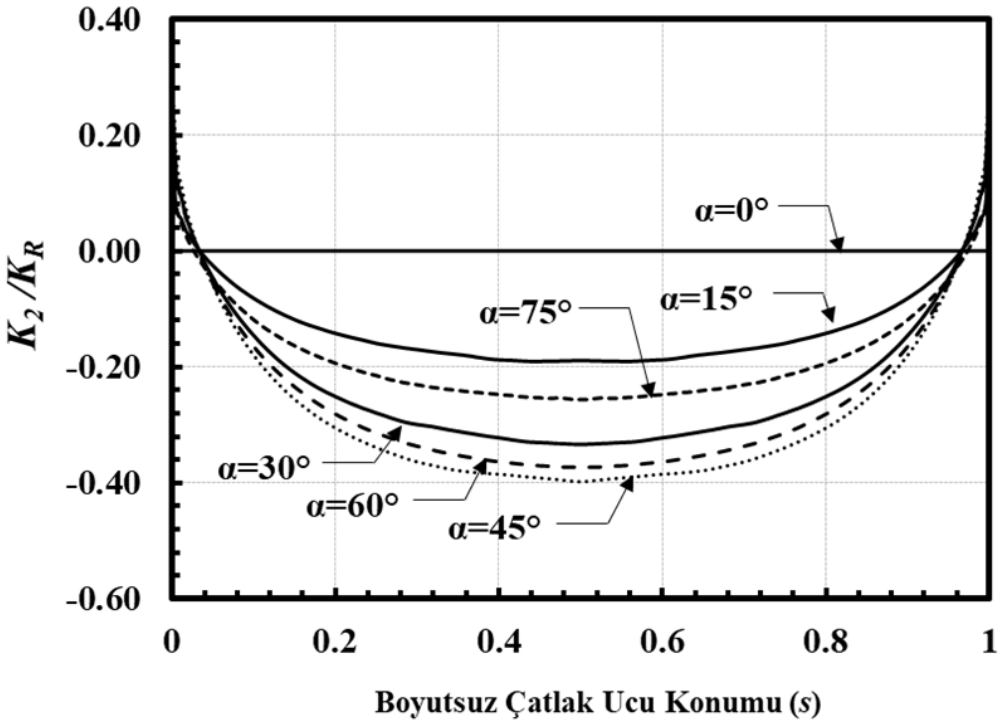
Şekil 2.273. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



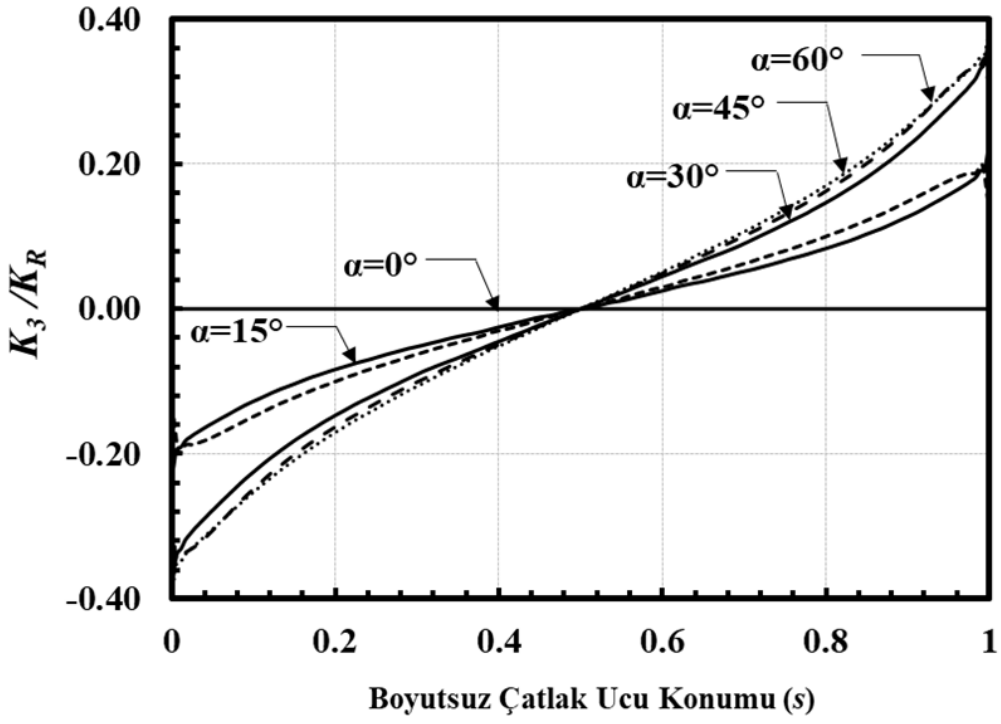
Şekil 2.274. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.1.



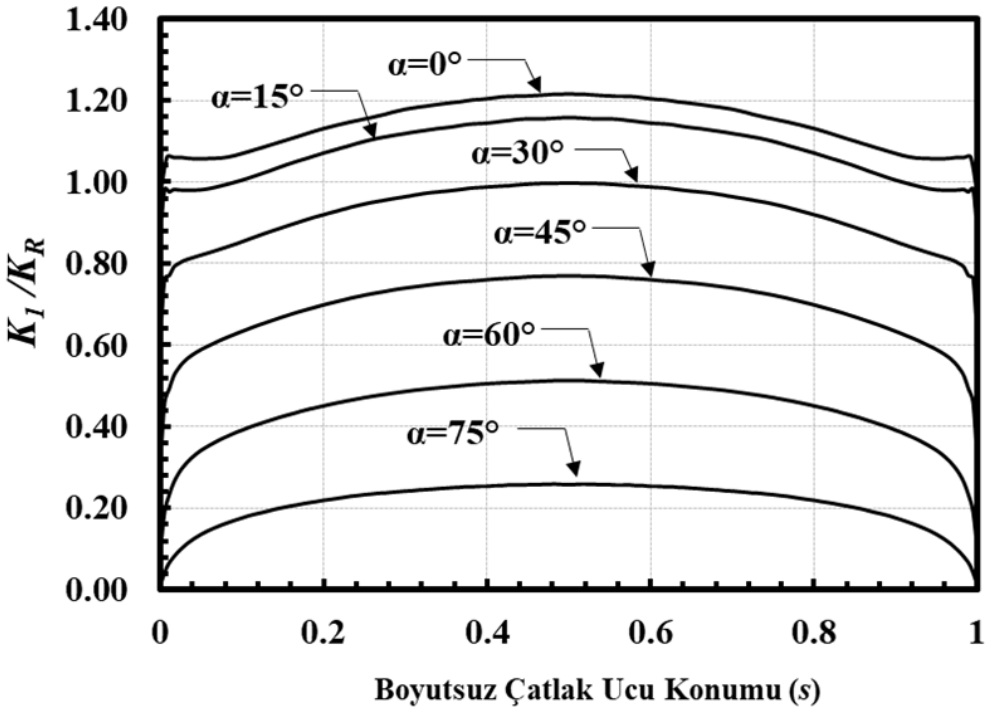
Şekil 2.275. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



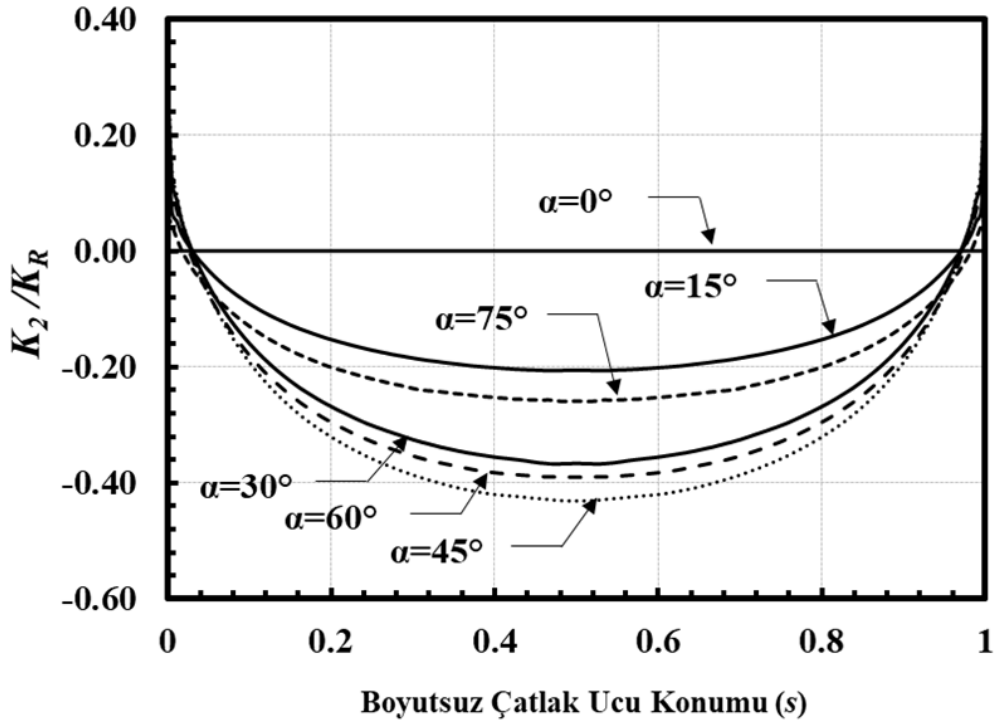
Şekil 2.276. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



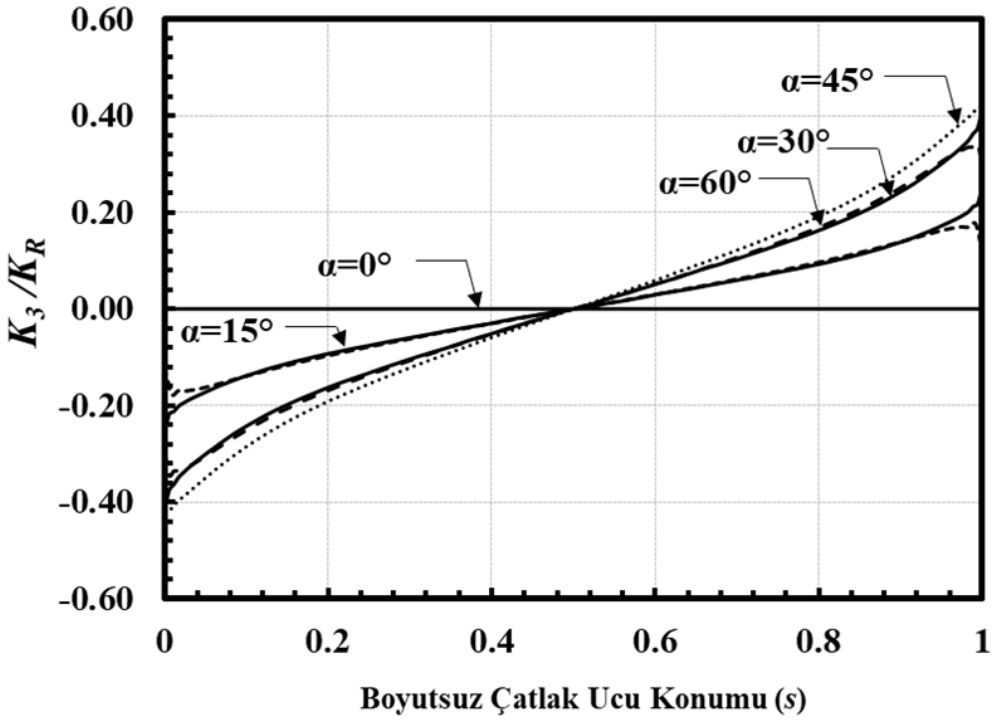
Şekil 2.277. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.25.



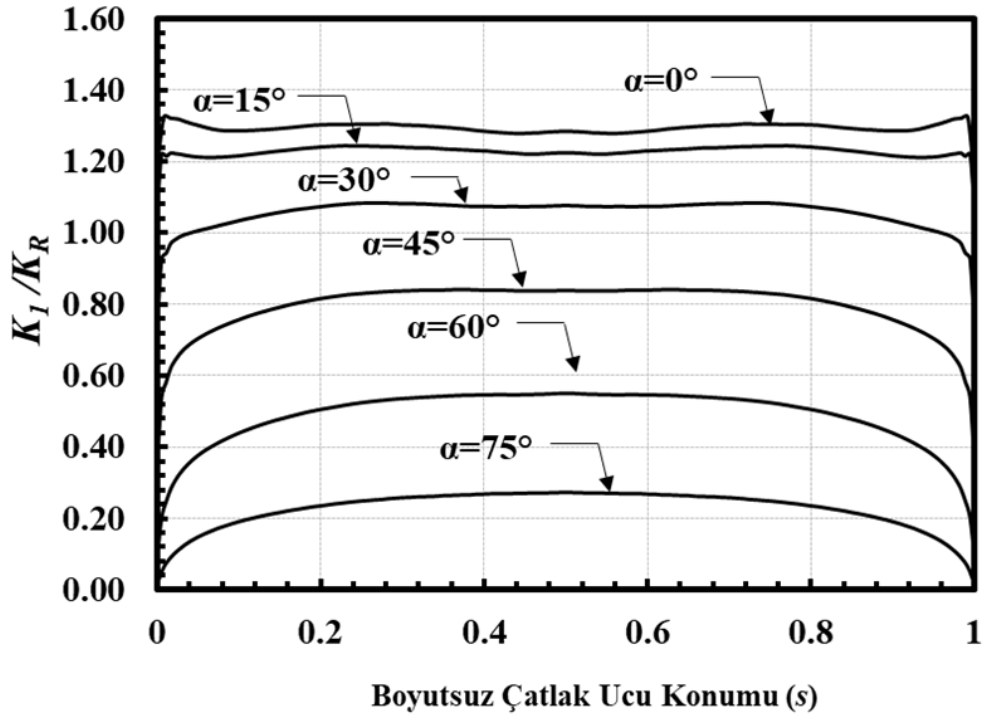
Şekil 2.278. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



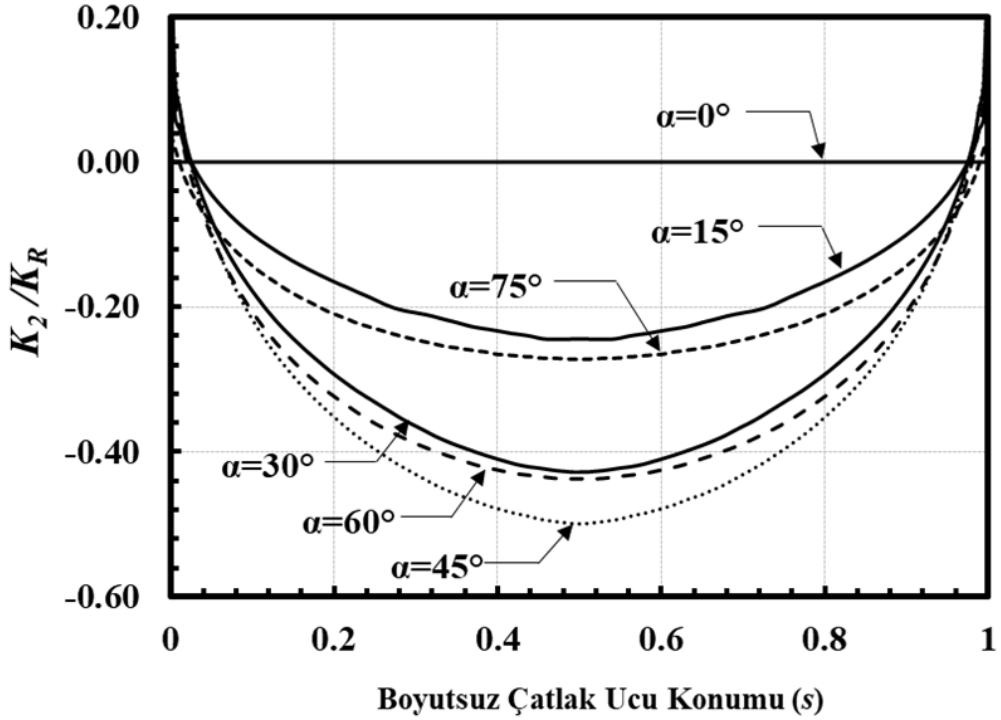
Şekil 2.279. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



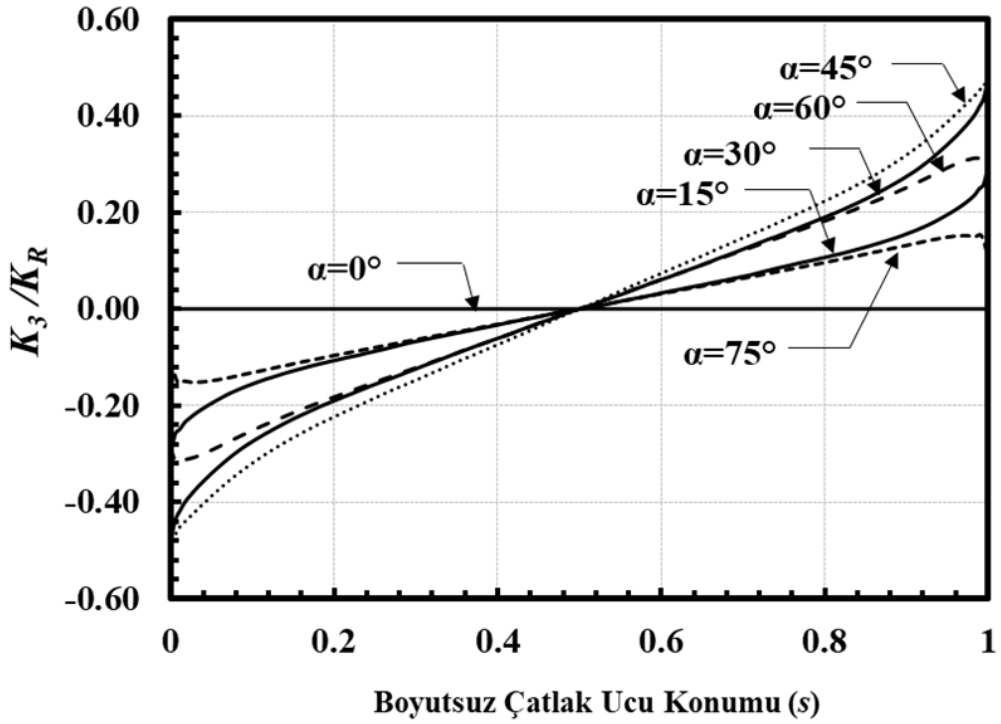
Şekil 2.280. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.5.



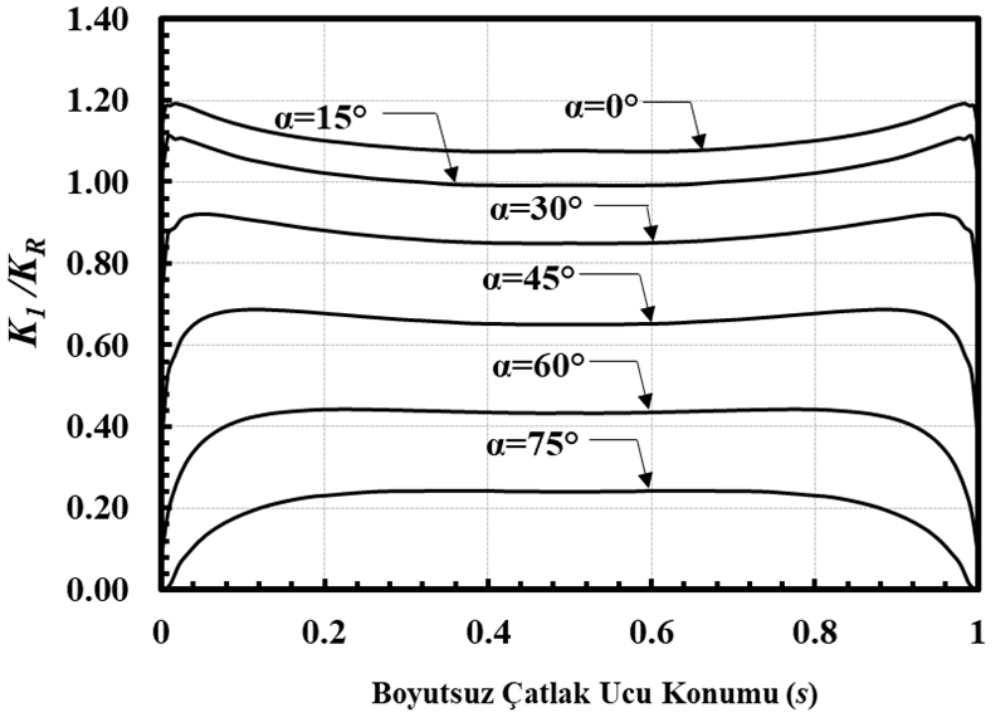
Şekil 2.281. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



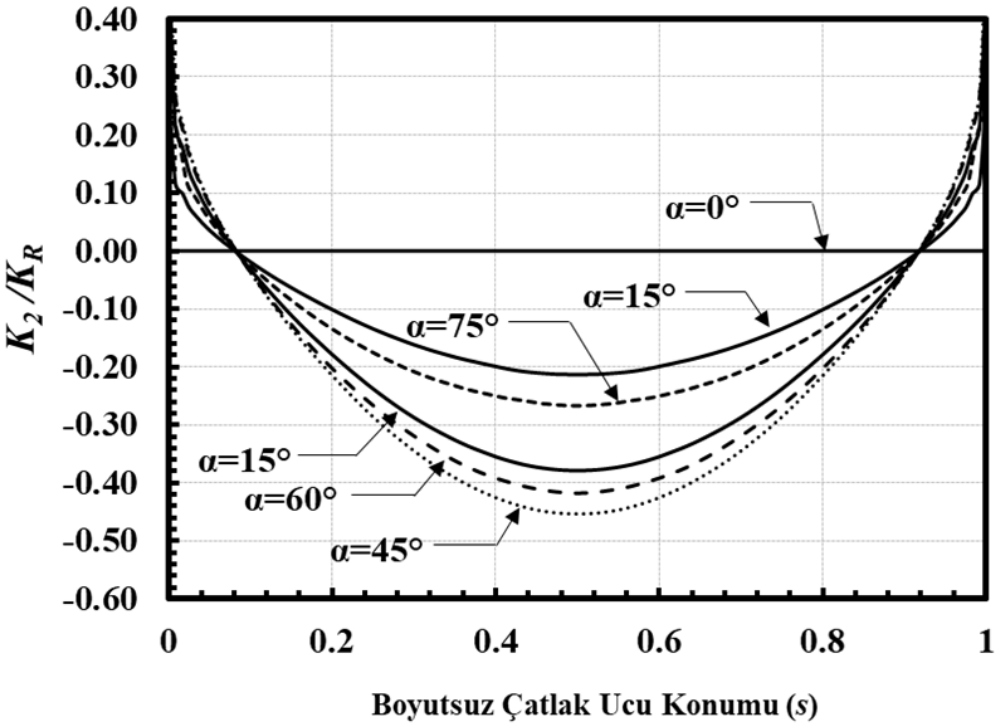
Şekil 2.282. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



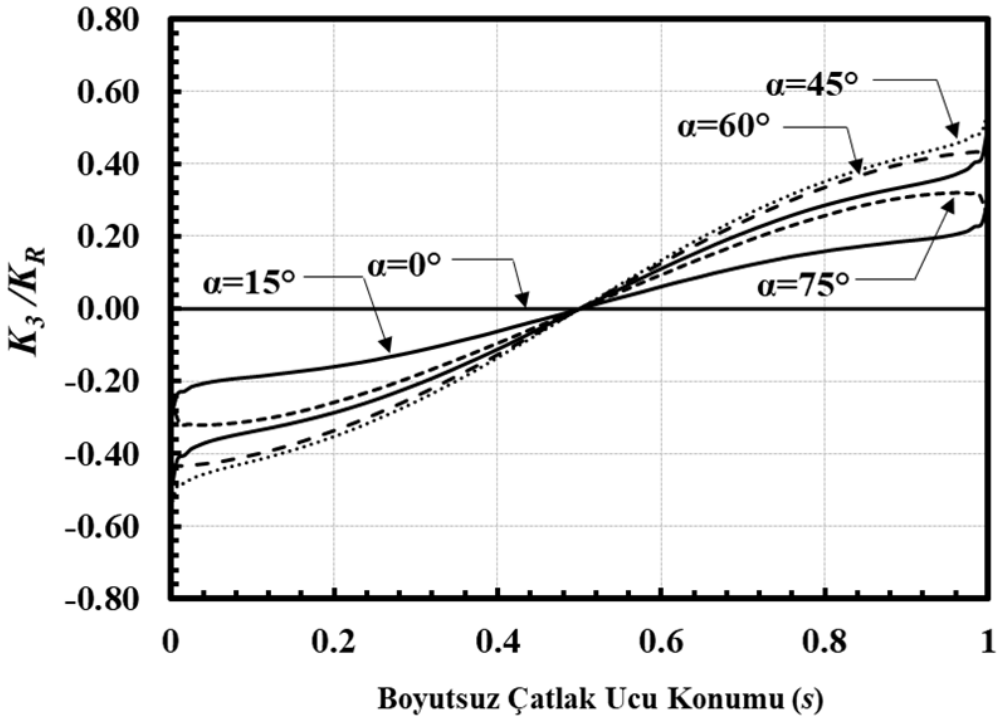
Şekil 2.283. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=0.5, *a/t*=0.8.



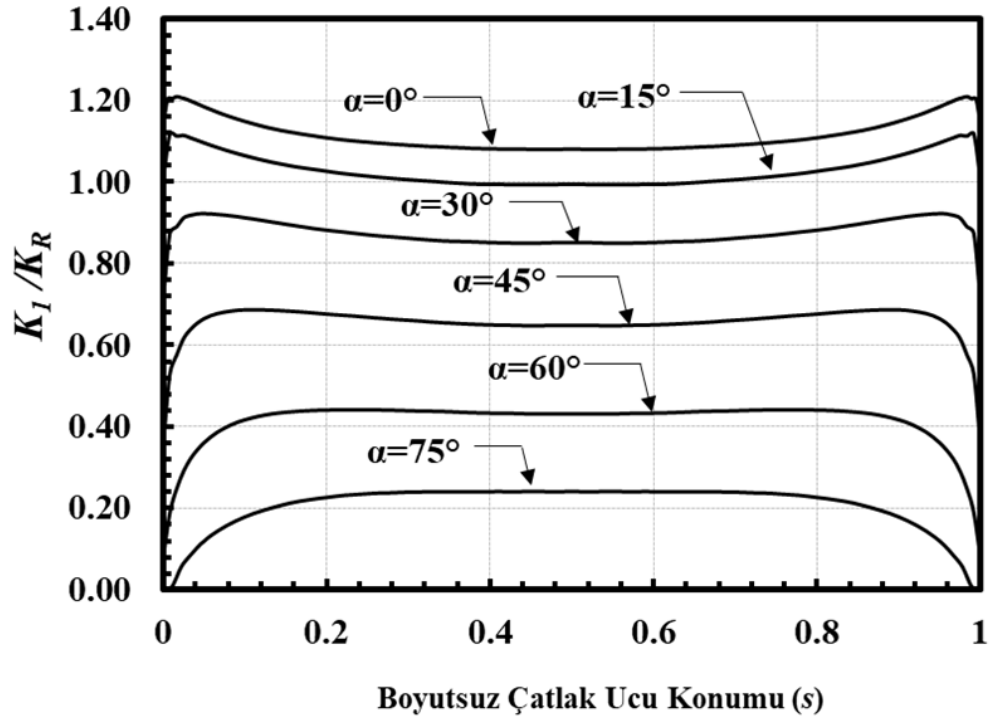
Şekil 2.284. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



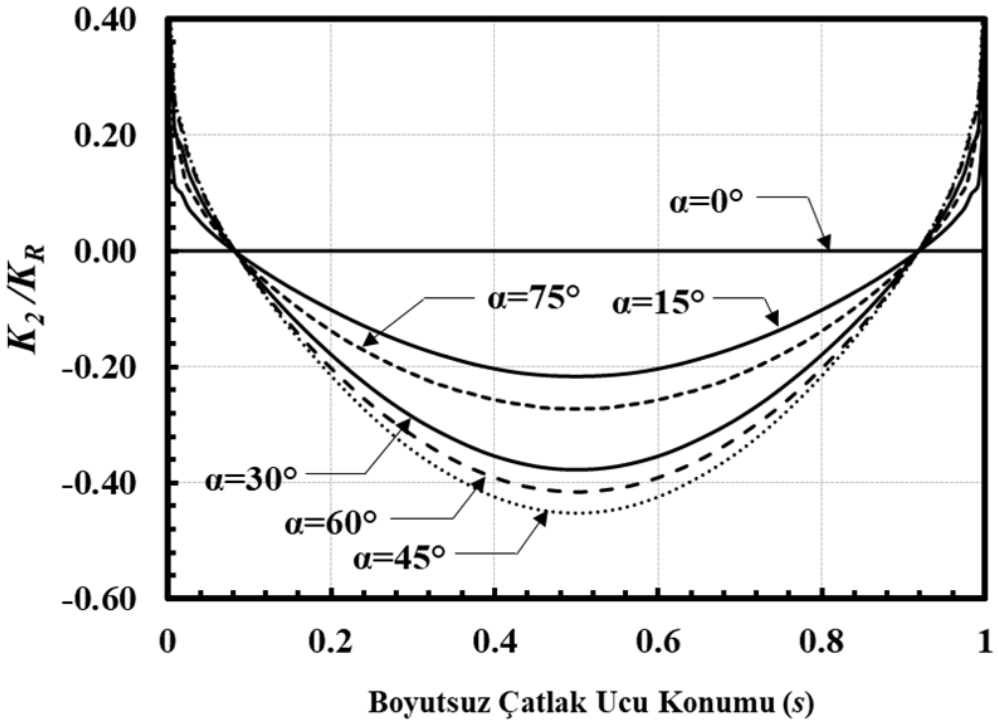
Şekil 2.285. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



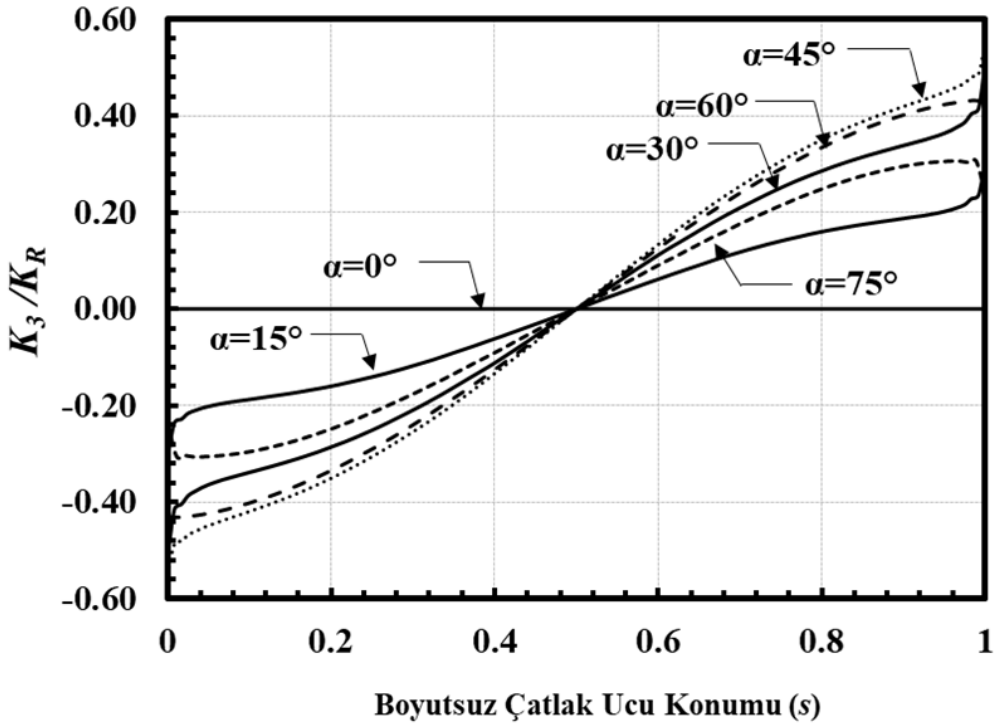
Şekil 2.286. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.05.



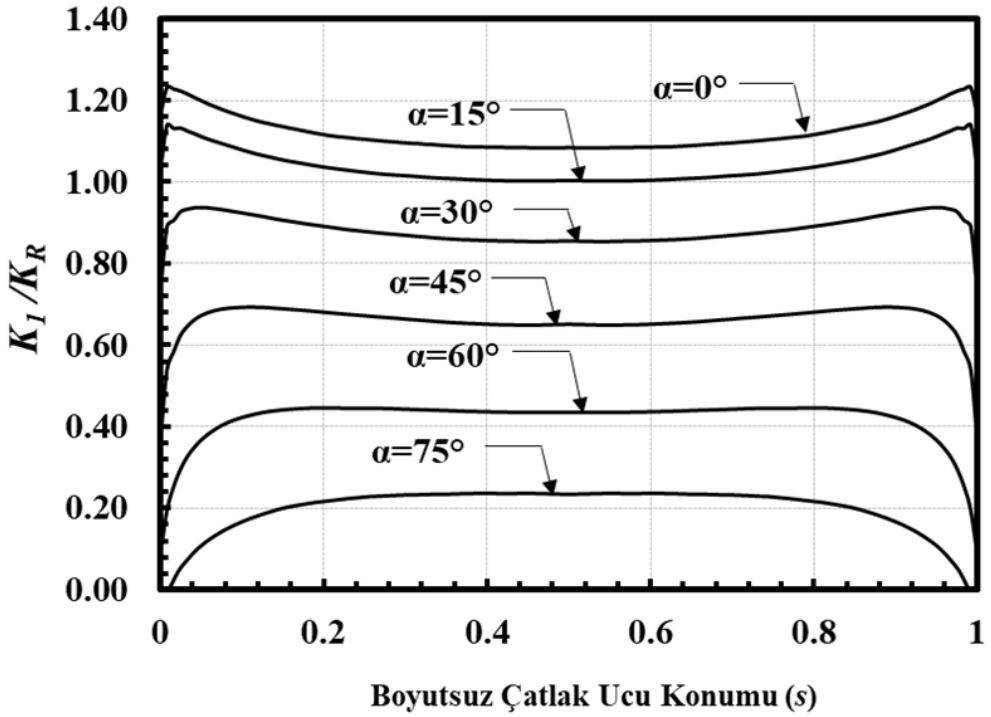
Şekil 2.287. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



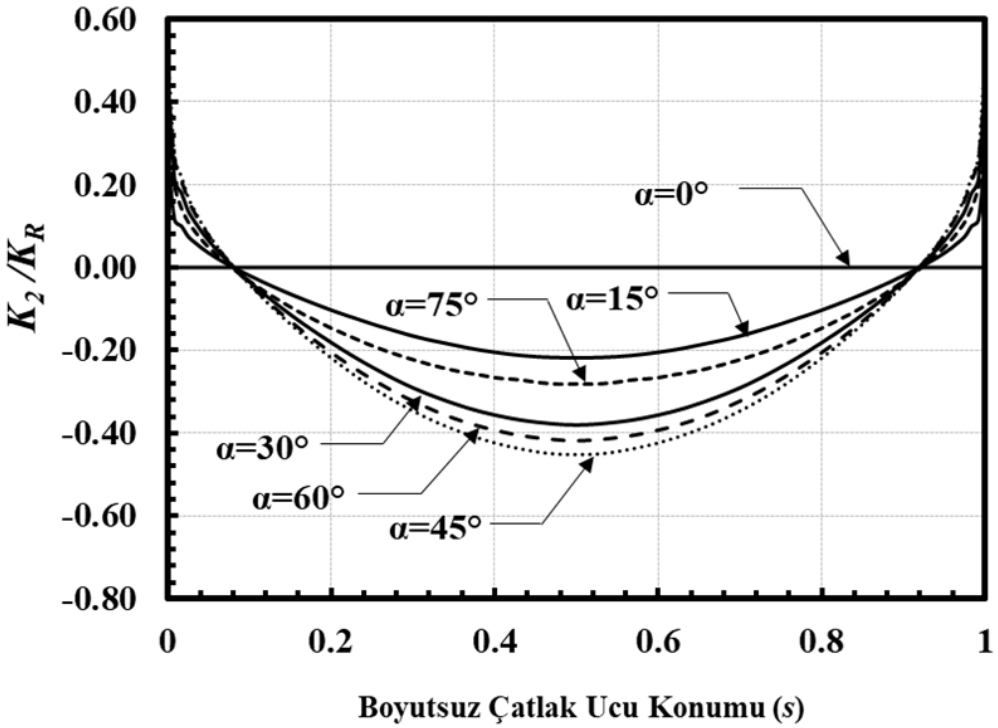
Şekil 2.288. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



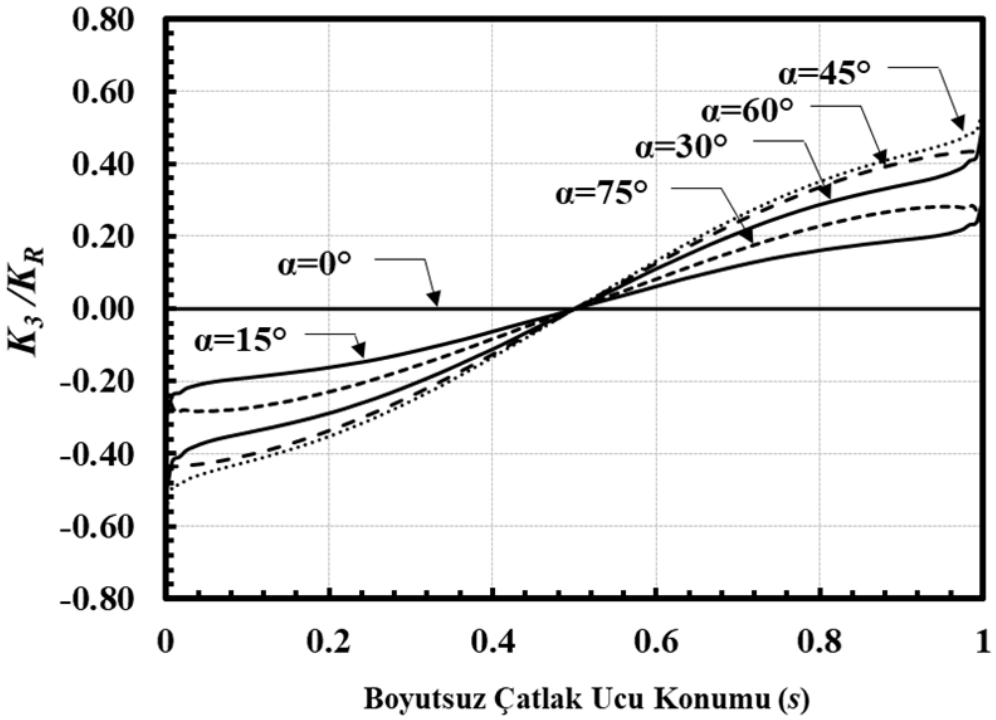
Şekil 2.289. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.1.



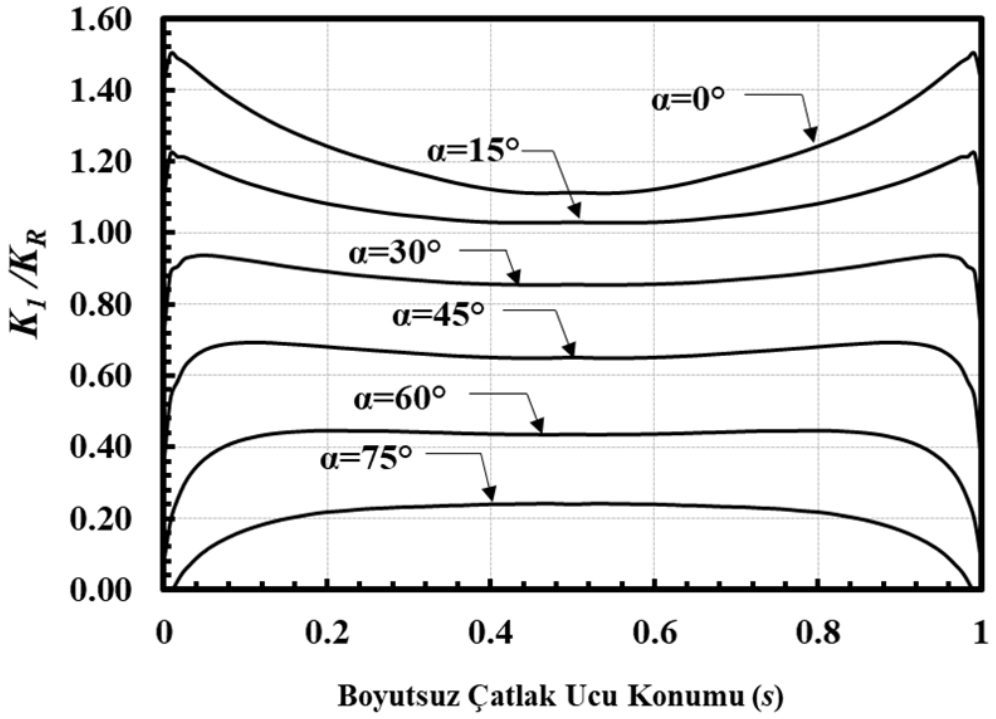
Şekil 2.290. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



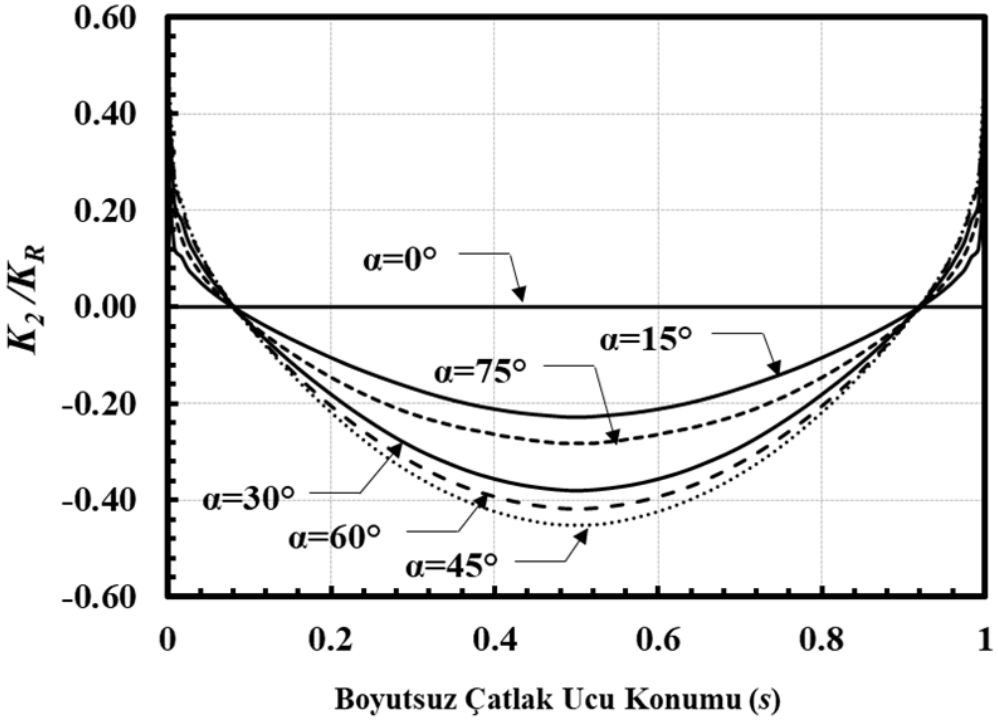
Şekil 2.291. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



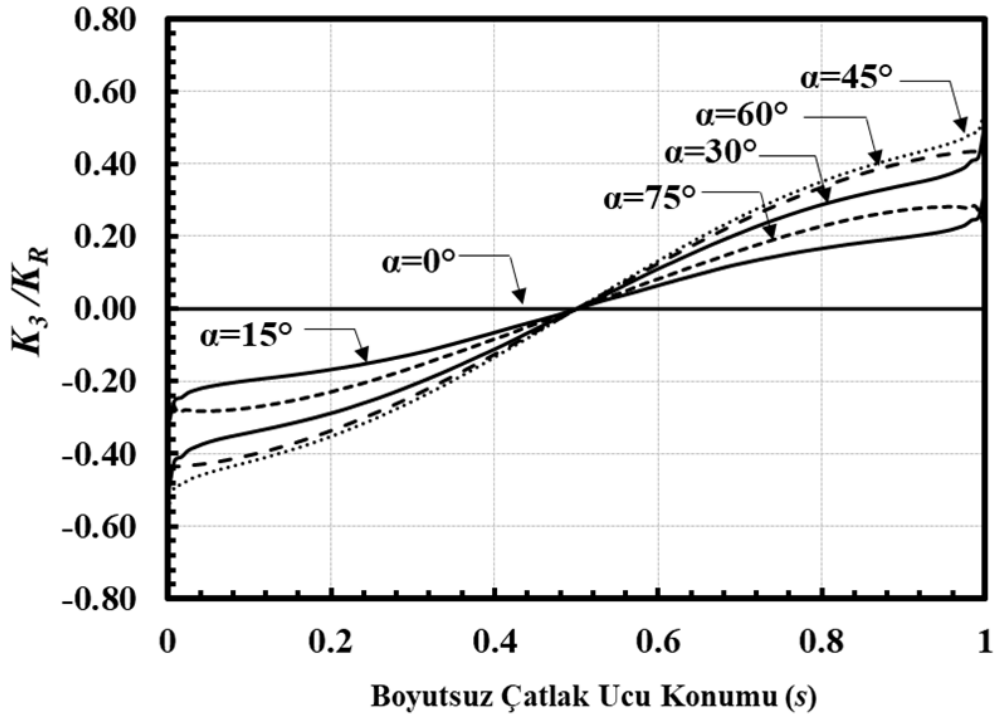
Şekil 2.292. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.25.



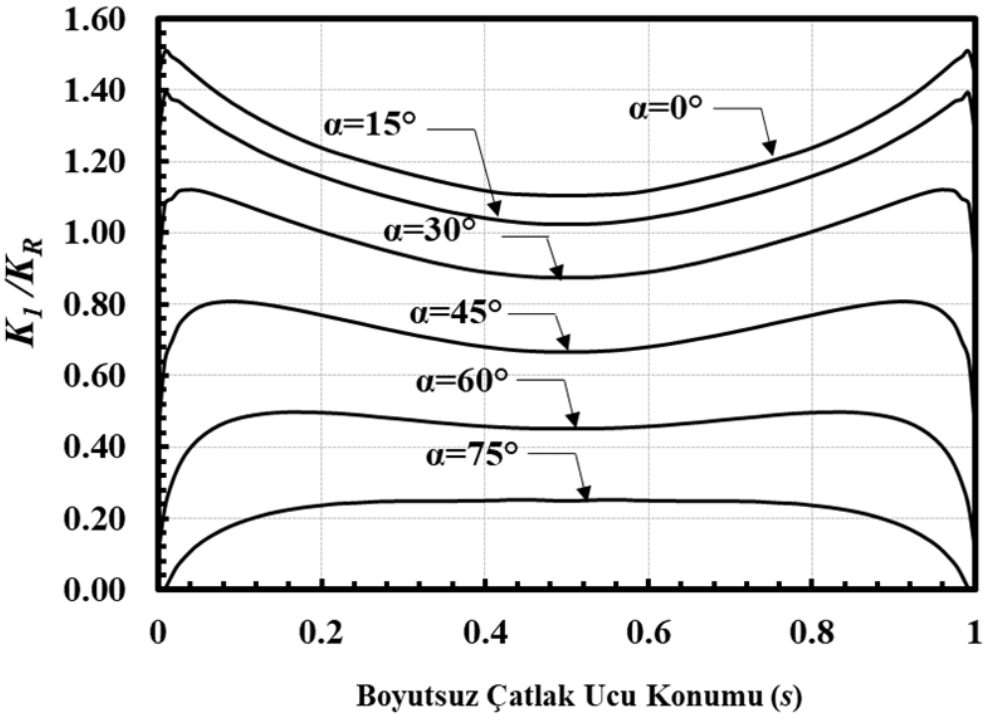
Şekil 2.293. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



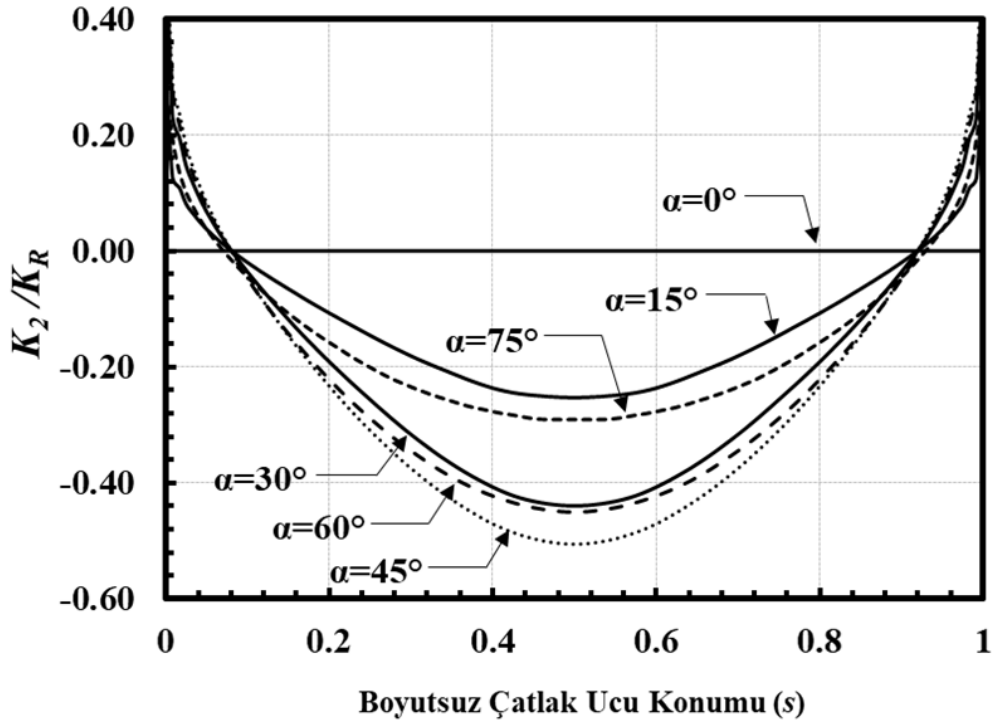
Şekil 2.294. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



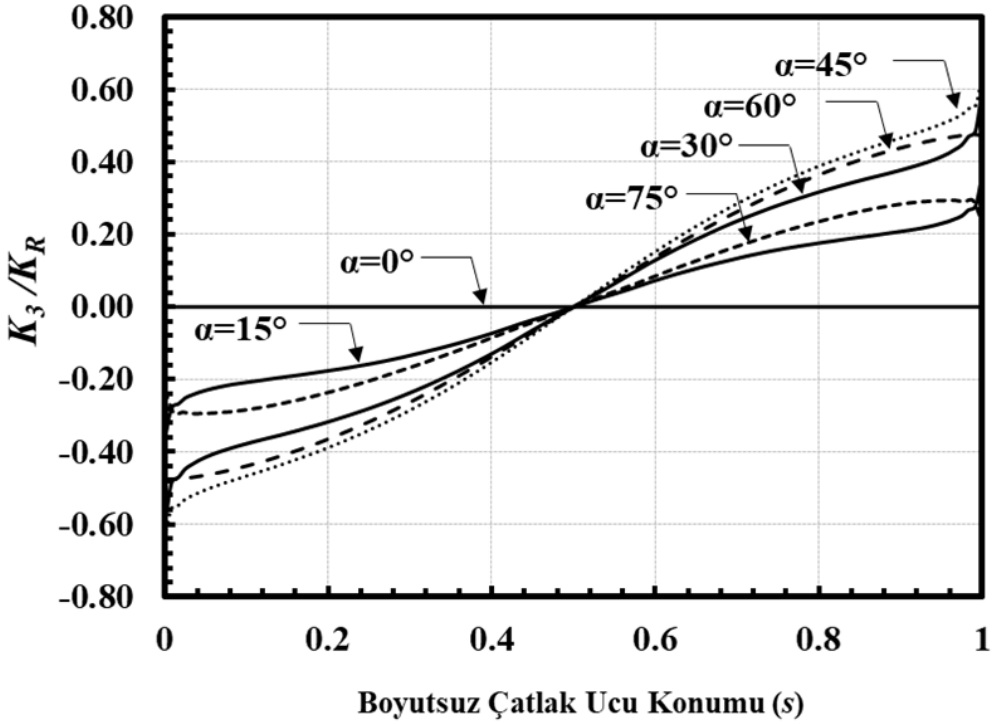
Şekil 2.295. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.5.



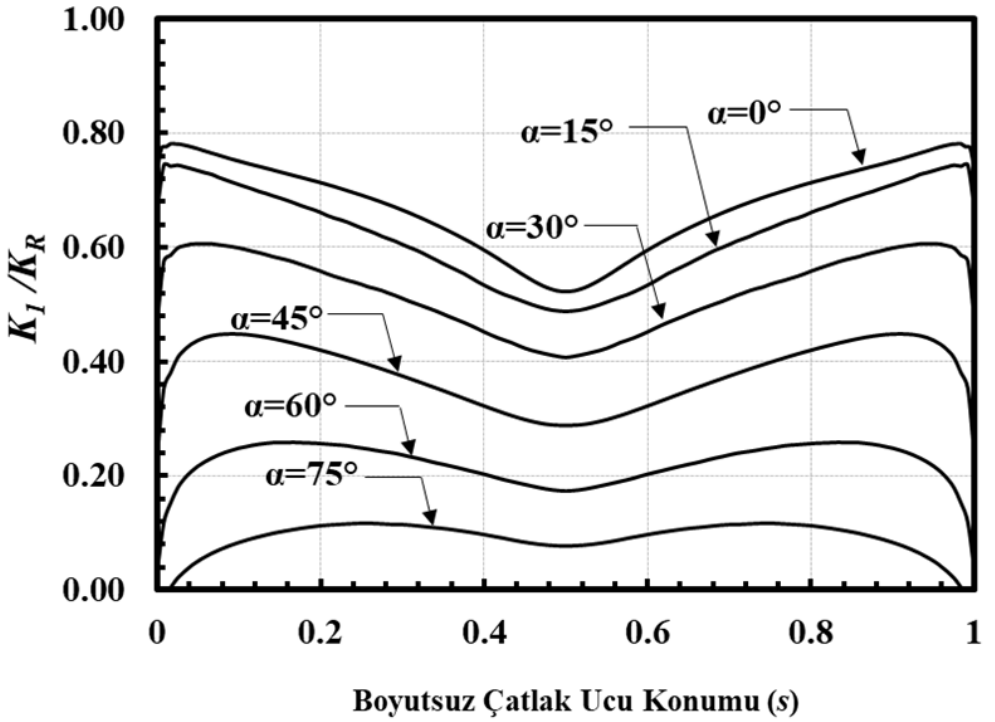
Şekil 2.296. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



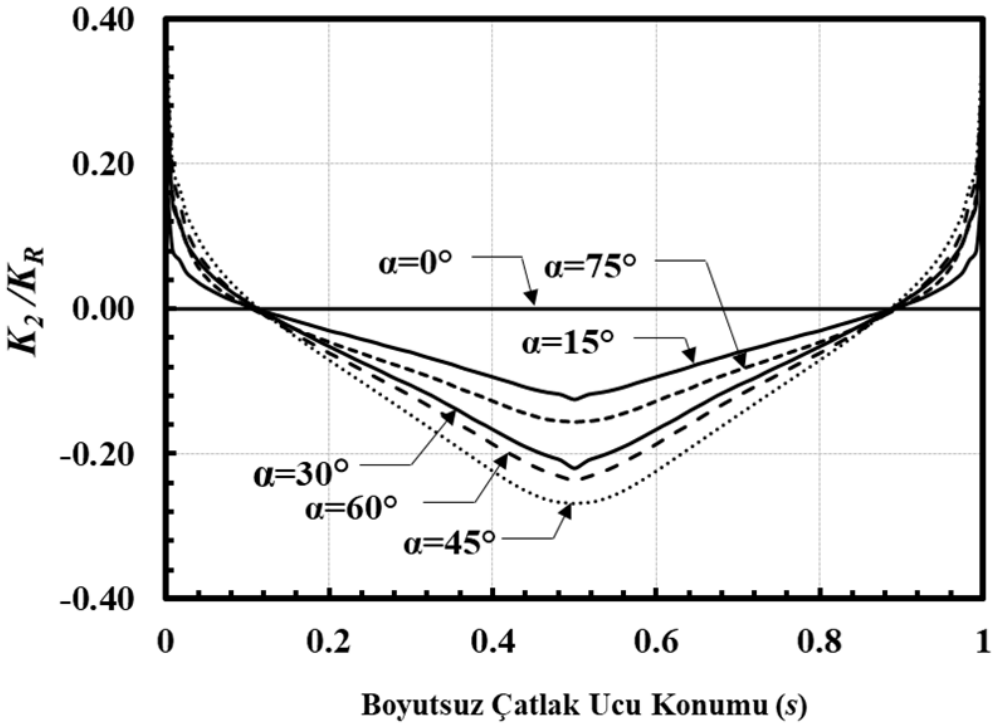
Şekil 2.297. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



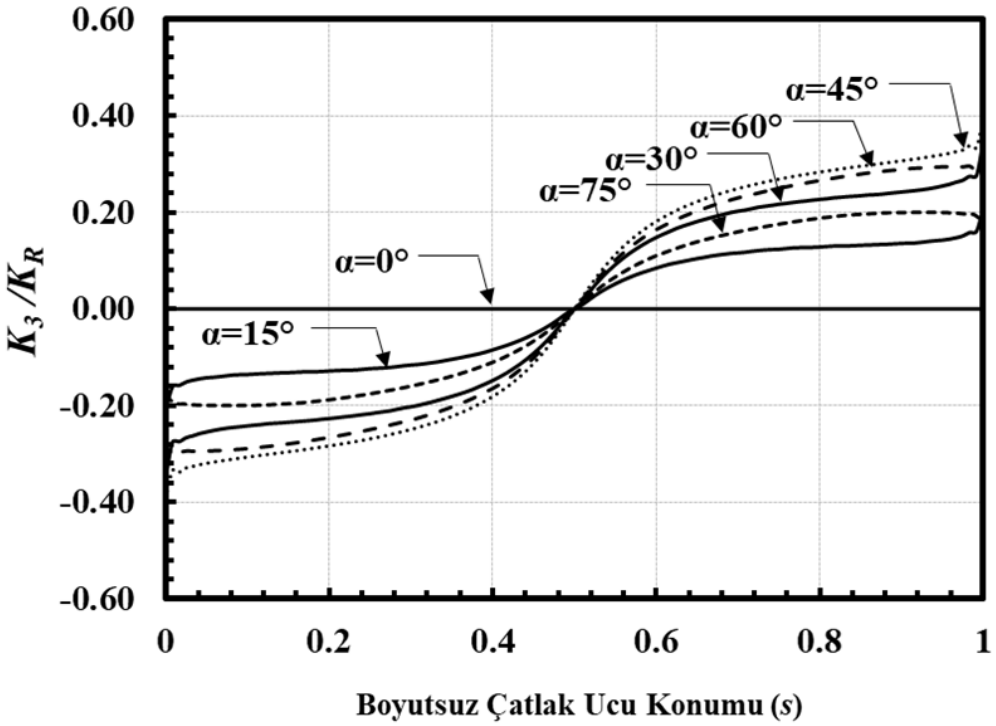
Şekil 2.298. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.8.



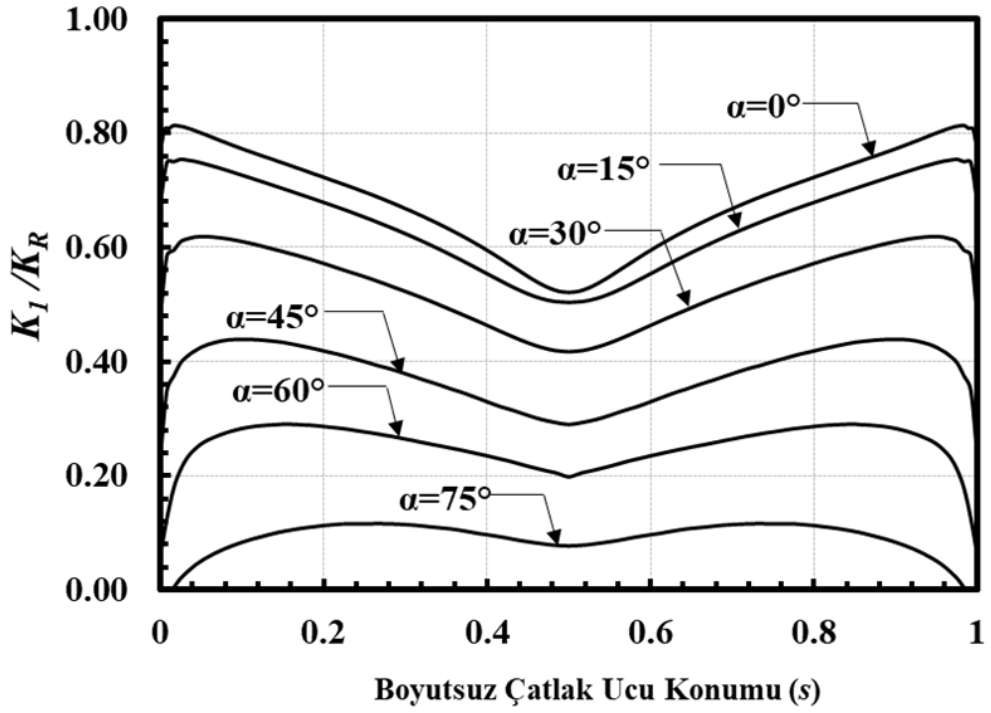
Şekil 2.299. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



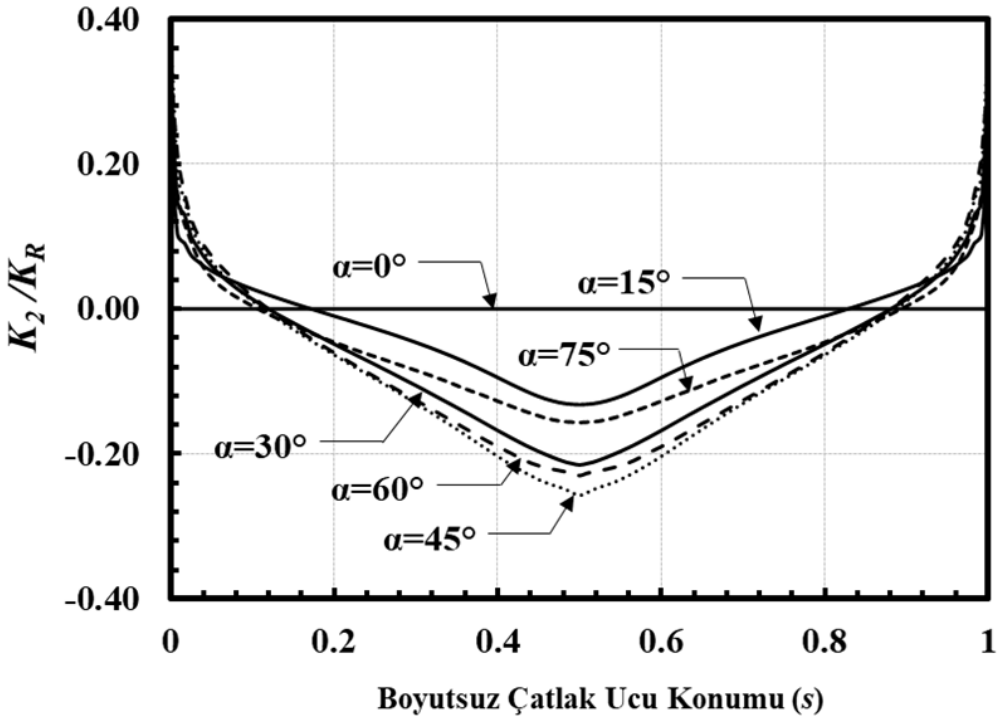
Şekil 2.300. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



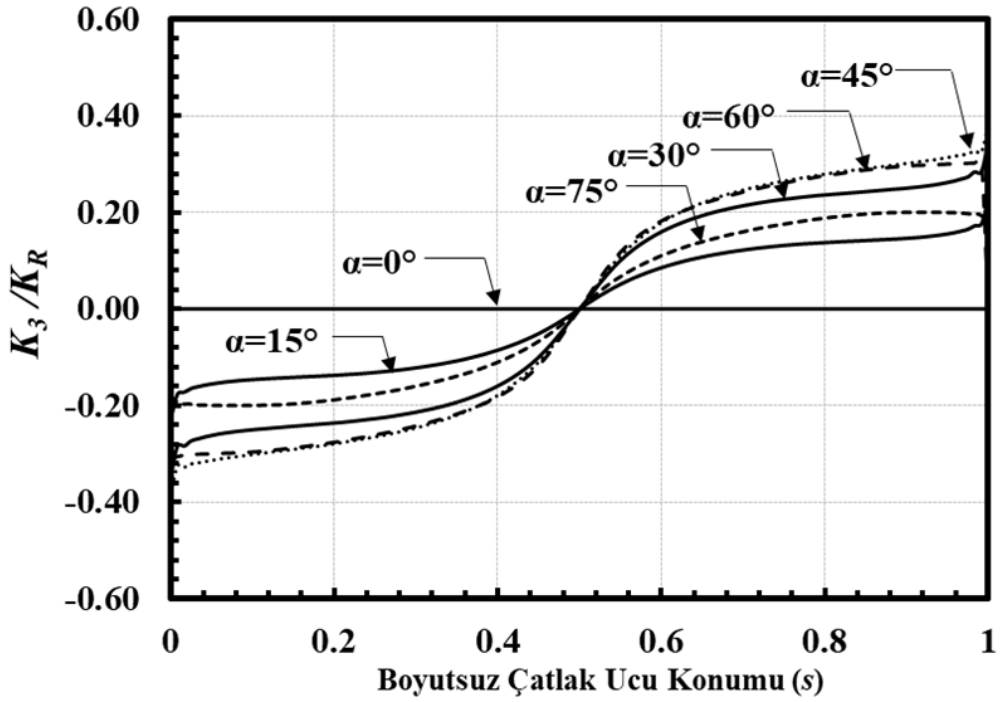
Şekil 2.301. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.05.



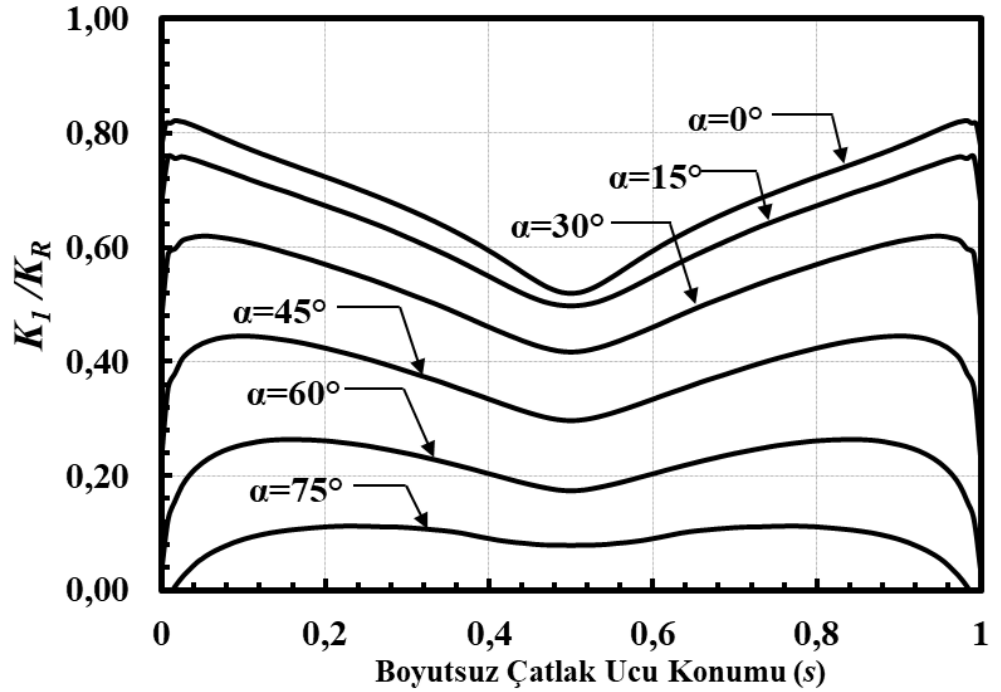
Şekil 2.302. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



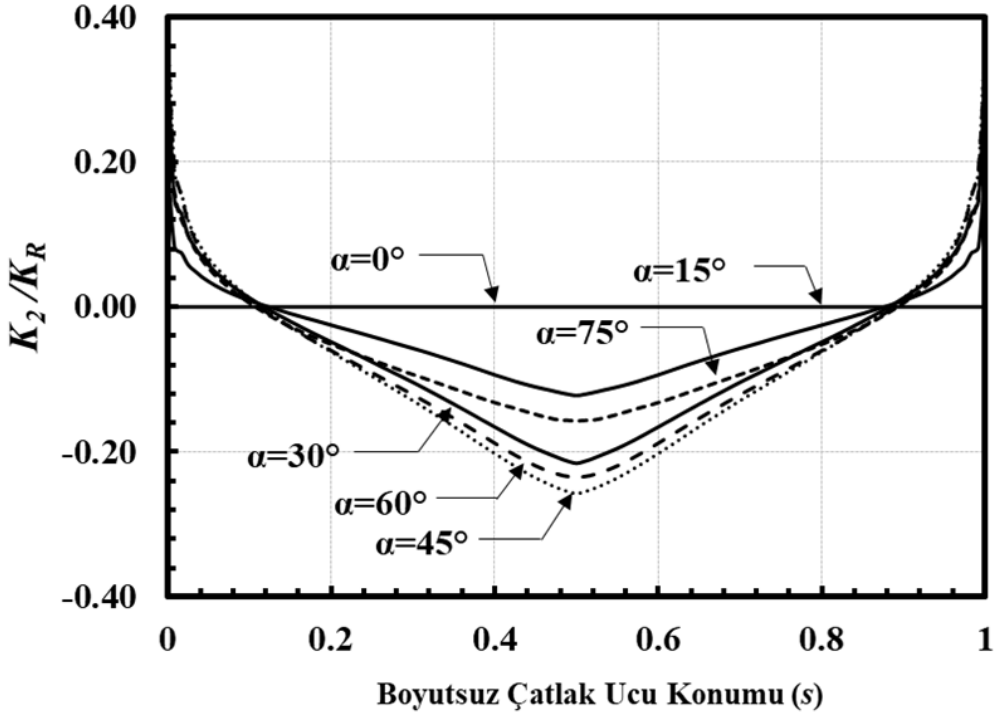
Şekil 2.303. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



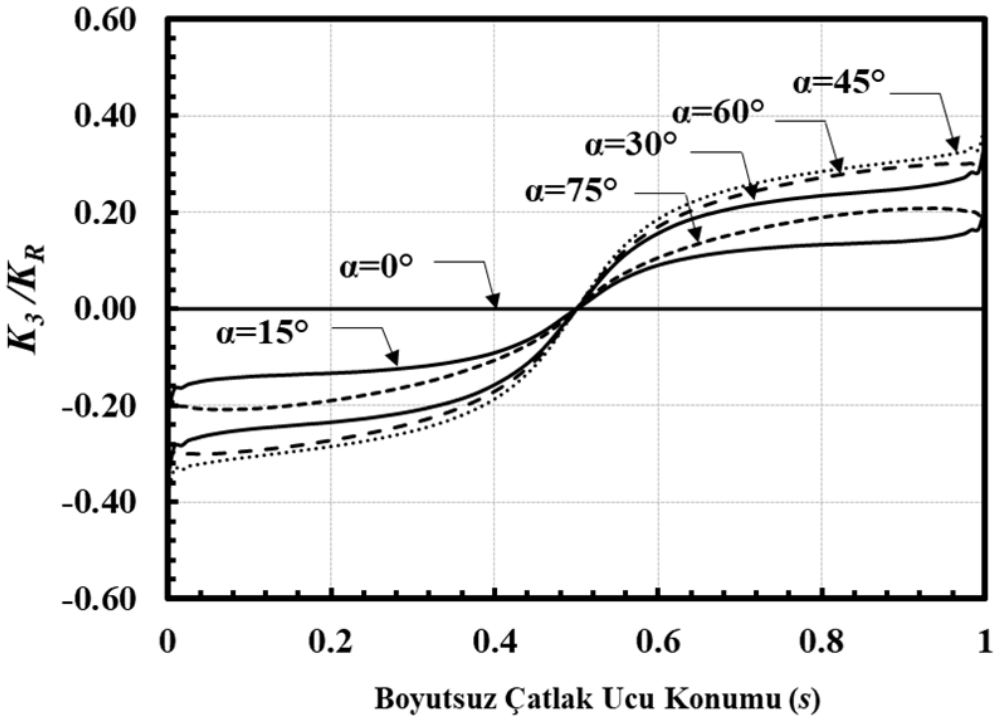
Şekil 2.304. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.1.



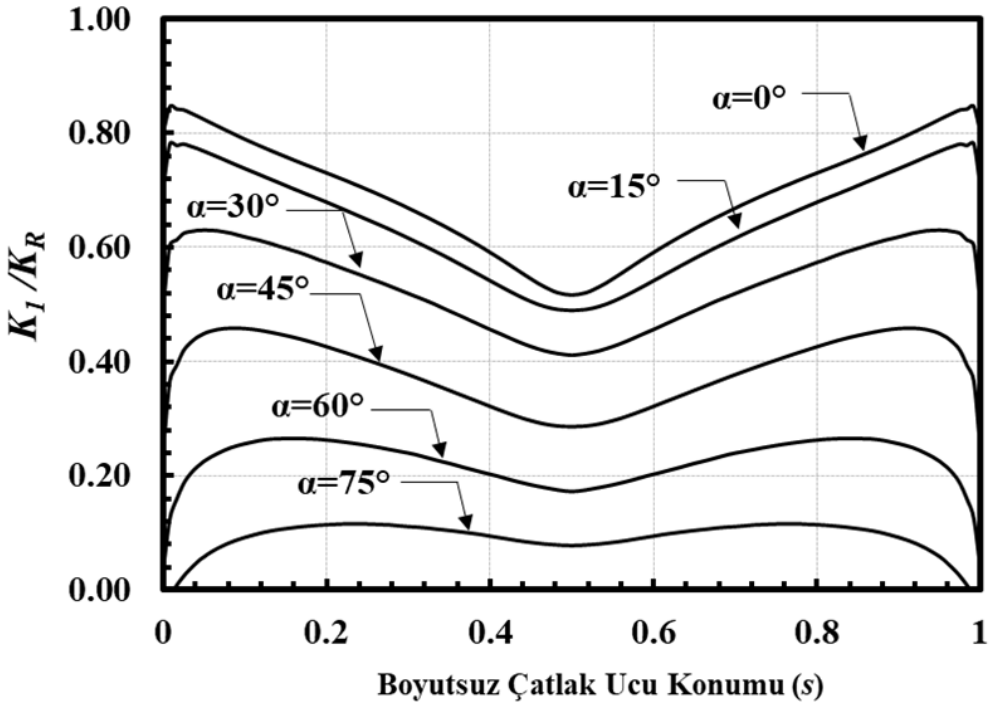
Şekil 2.305. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



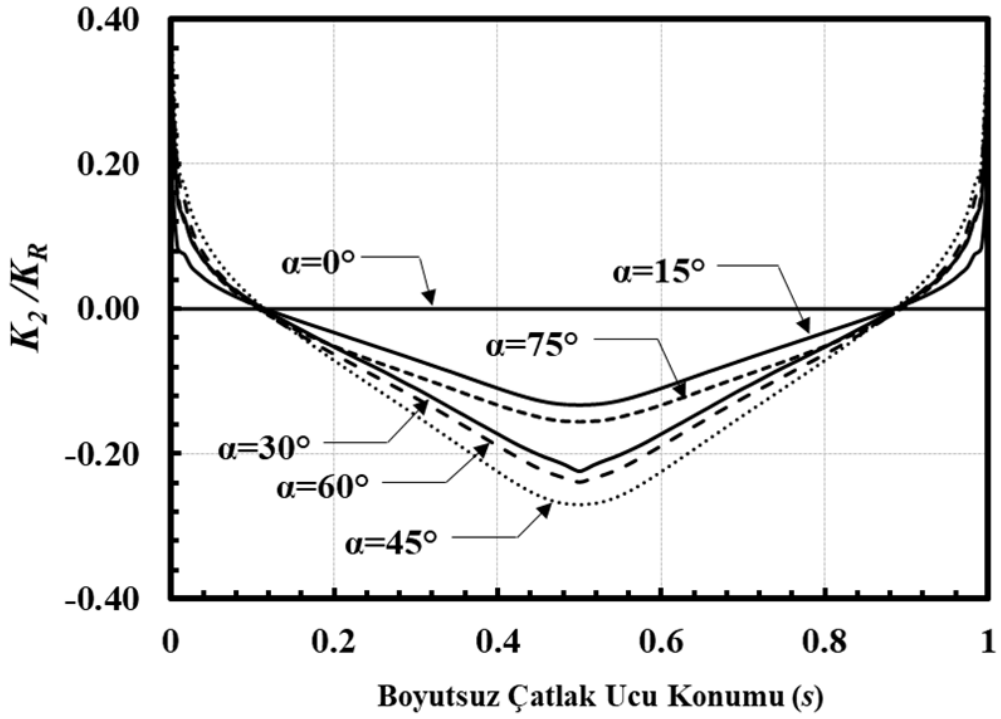
Şekil 2.306. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



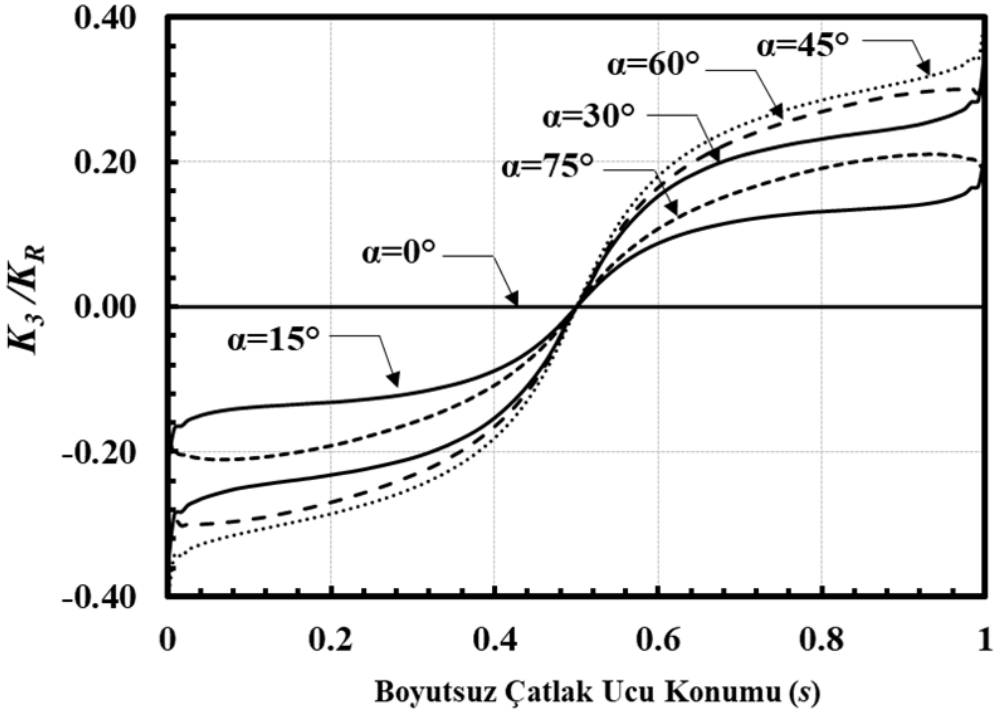
Şekil 2.307. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.25.



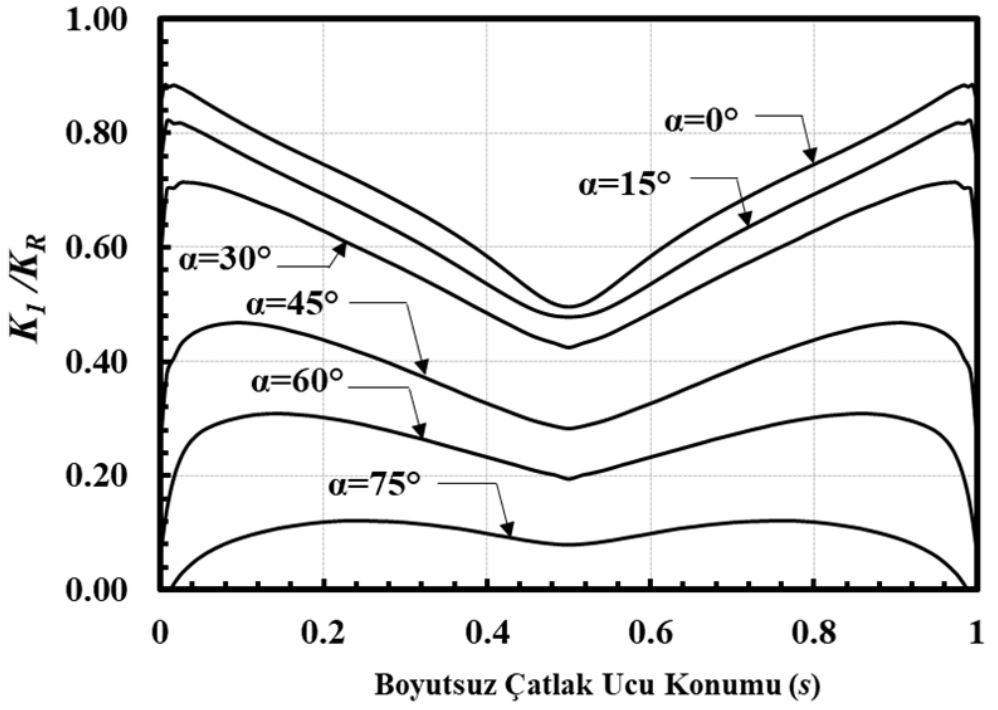
Şekil 2.308. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



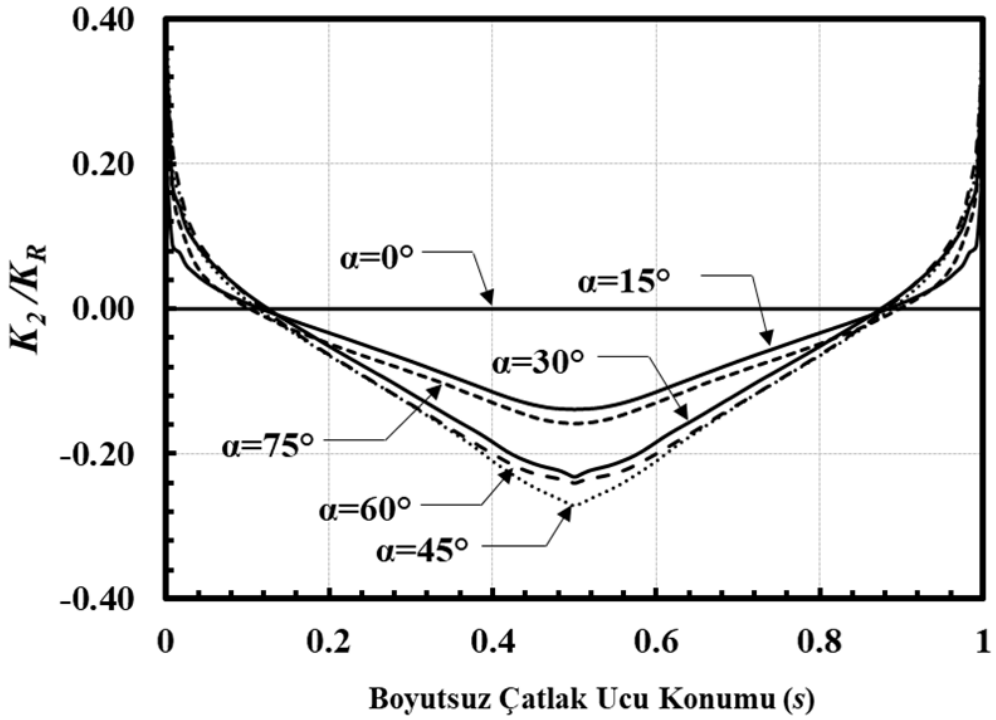
Şekil 2.309. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



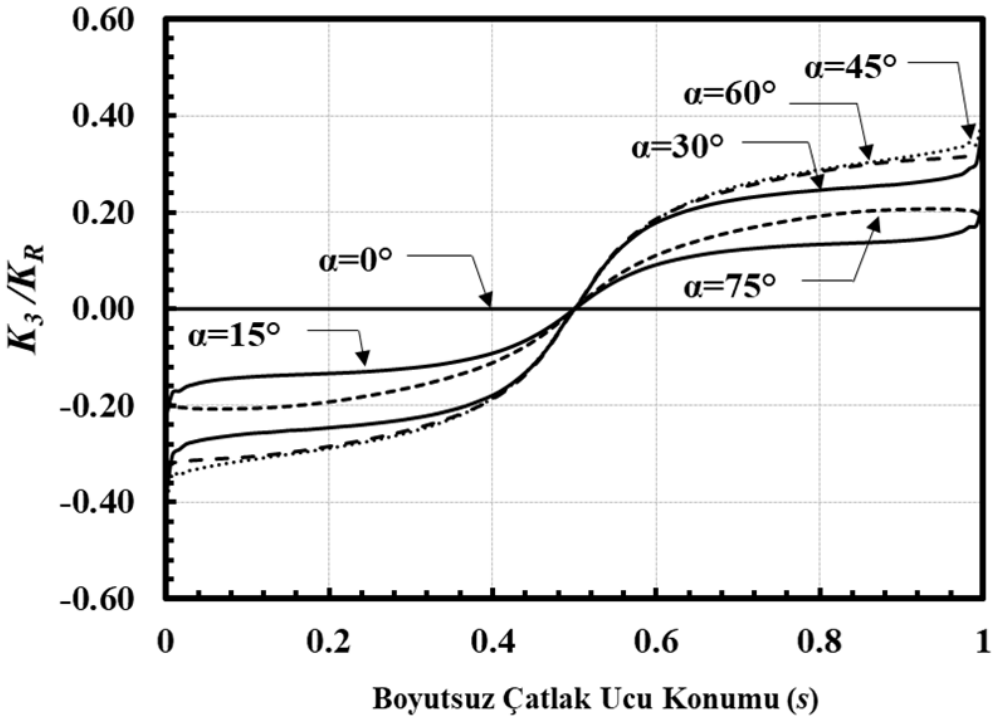
Şekil 2.310. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.5.



Şekil 2.311. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



Şekil 2.312. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.8.



Şekil 2.313. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.95, *a/c*=2, *a/t*=0.8.

Eğilme gerilmesi altında yüzey çatlağının, yatay pozisyonda yani α=0° açısal konumunda normal gerilme maksimum olduğu için sadece açılma modu (mod-I) meydana gelmektedir. Çatlağın dönme açısı α değeri arttıkça, çatlağın bulunduğu ilgili kesitte azalan normal gerilmenin yanı sıra kayma gerilmeleri de meydana gelmektedir. Bu kayma gerilmeleri etkisinde düzlem içi kayma modu (mod-II) ve düzlem dışı kayma modu (mod-III) olan GŞF'leri de meydana gelmektedir.

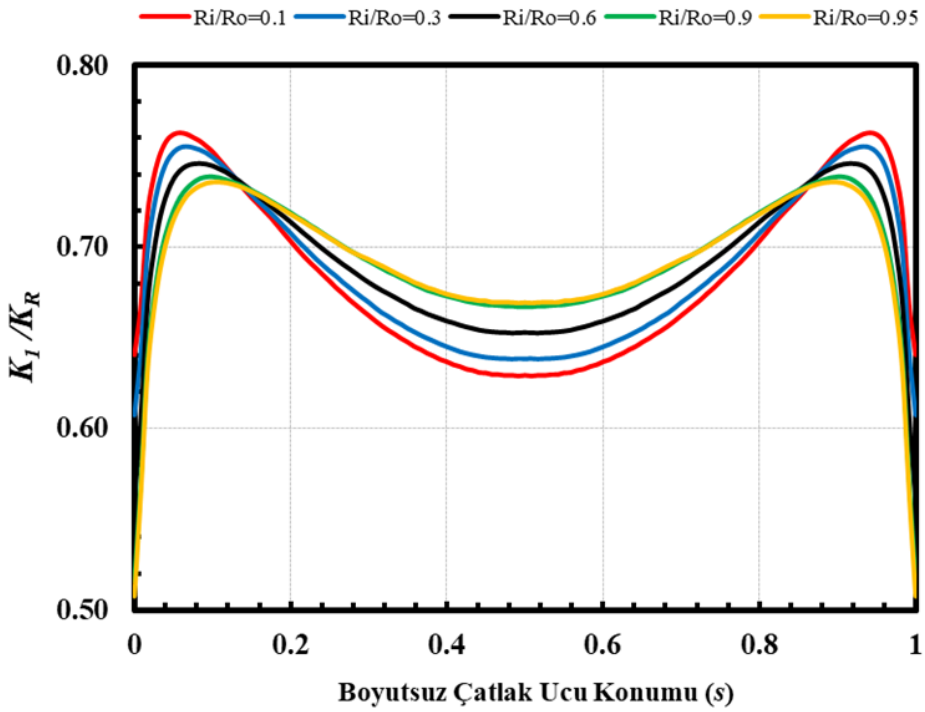
Şekil 2.14-2.313 incelendiğinde dönme açısının sıfır olması durumunda beklenildiği gibi normalize edilmiş K_1 değerinin maksimum olduğu, dönme açısının artması durumunda K_1 gerilme şiddet faktörünün giderek azaldığı görülmektedir. Maksimum kayma gerilmesi çatlağın dönme açısının 45° olması durumunda meydana geldiği için normalize edilmiş K_2 ve K_3 değerlerinin maksimum olduğu görülmektedir. Probleme etki eden diğer parametrelerinin etkileri ise Bölüm 2.6.'da açıklanmıştır.

2.6. Problem Parametrelerinin Gerilme Şiddet Faktörlerine Etkileri

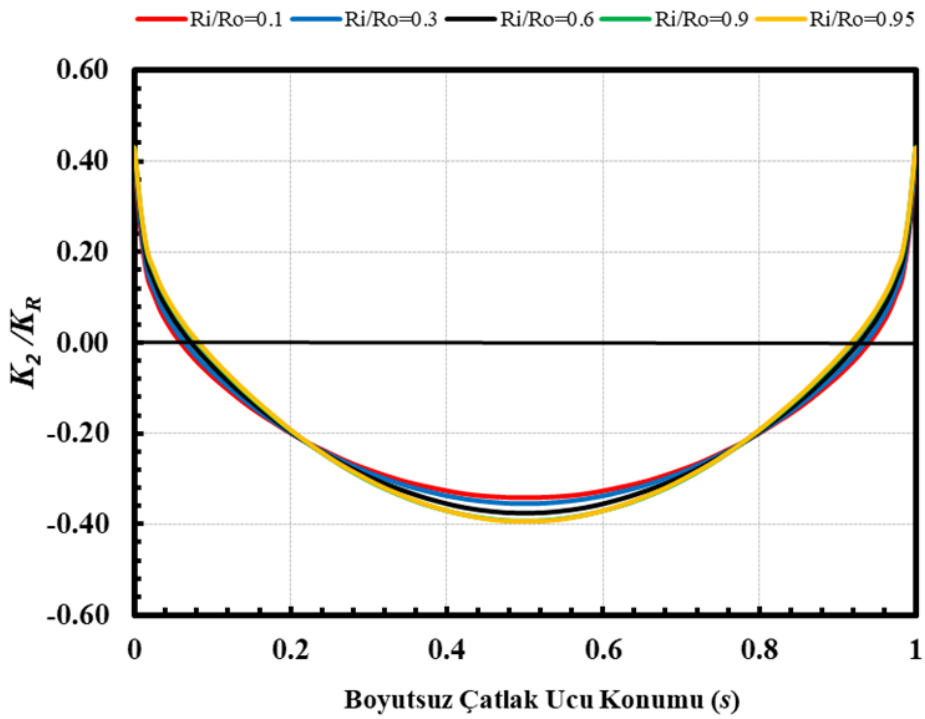
Bölüm 2.5.'te problemi tanımlayan parametrelere göre hazırlanmış 100 farklı modelde çatlak dönme açısınına göre (α) GŞF kıyaslamaları verilmişti. Bu bölümde ise çatlak dönme açısı orta değeri olan 45° ve diğer parametreler de orta değerlerinde alınarak, *Ri* /*Ro, a/c, a/t* parametrelerinin GŞF analizlerine olan etkileri incelenmiştir.

2.6.1. *Ri* /*Ro* parametresinin gerilme şiddet faktörlerine etkileri

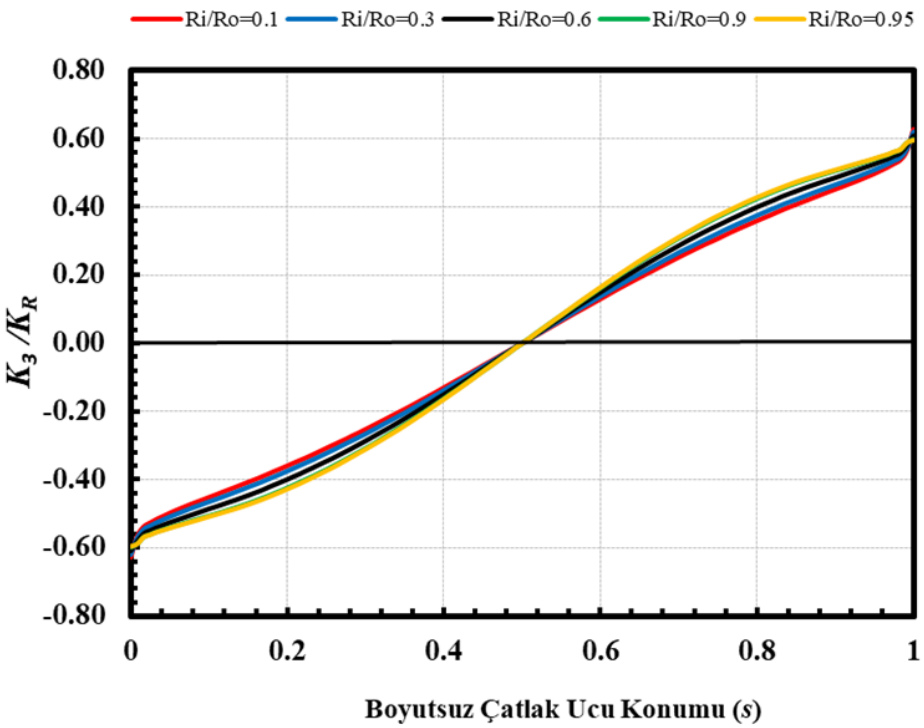
Bu kısımda silindir iç yarıçapı / silindir dış yarı çapı (*Ri* /*Ro*) değerleri 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 0.95 alınarak analizlere etkisi gösterilmiştir. Diğer parametreler ise sabit ve orta değerlerinde alınmıştır. Çatlak şekil oranı (*a/c*=1), çatlak derinliği/silindir et kalınlığı (*a/t*=0.25), çatlak dönme açısı (α=45°) olarak belirlenmiştir.Yapılan karşılaştırmada iç yarıçapın dış yarıçapa olan oranının büyümesi durumunda mod-I ve mod-II çatlak derinlik noktası değerinin arttığı görülmüştür. Mod-I serbest yüzey noktası değerlerinde düşüş olduğu, mod-II ve mod-III serbest yüzey noktaları değerlerinin birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır. İlgili sonuçlar, Şekil 2.314-2.316'da gösterilmiştir.



Şekil 2.314. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 0.95 , *a/c*=1, *a/t*=0.25, *α*=45° .



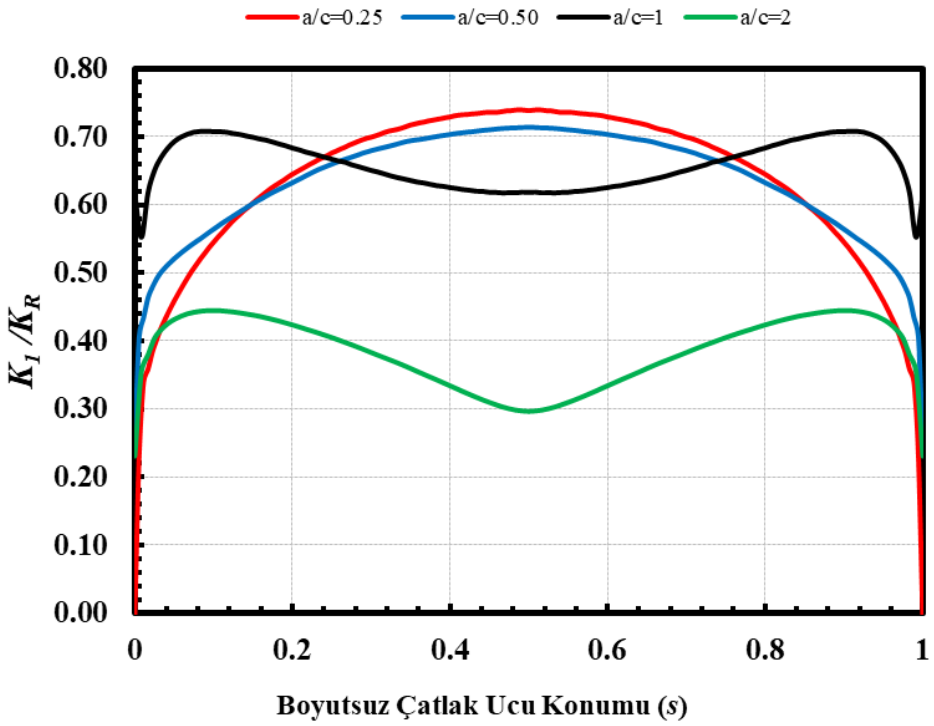
Şekil 2.315. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 0.95, *a/c*=1, *a/t*=0.25, *α*=45°.



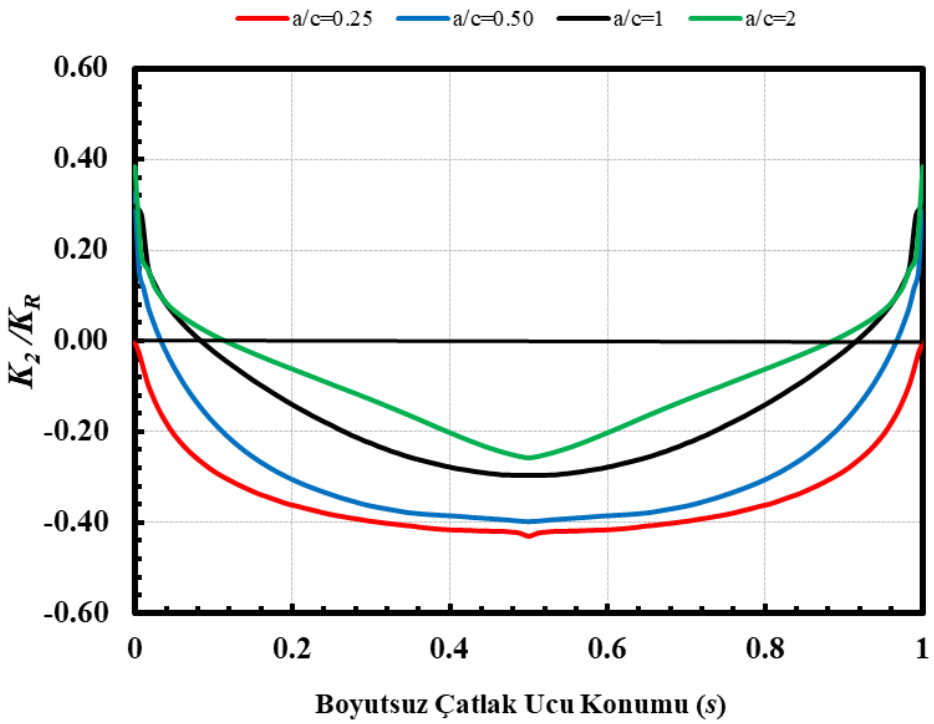
Şekil 2.316. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *Ri/Ro*=0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 0.95 , *a/c*=1, *a/t*=0.25, α=45°.

2.6.2. *a/c* parametresinin gerilme şiddet faktörlerine etkileri

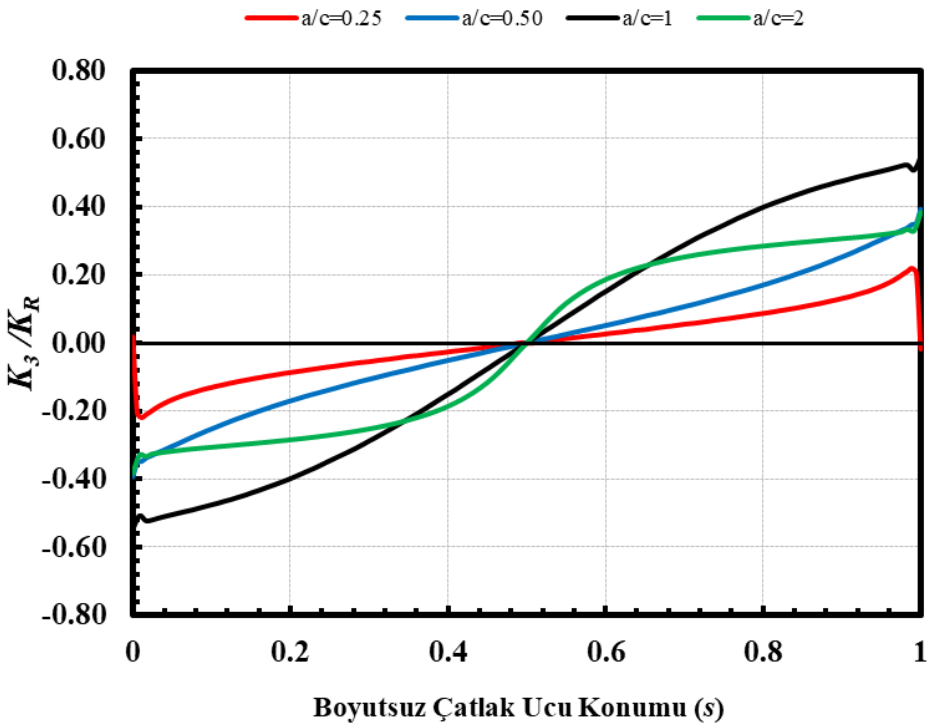
Bu kısımda *a* /*c* (çatlak şekil oranı) değerini 0.25, 0.5, 1, 2 alınarak, gerilme şiddet faktörlerine etkisi gösterilmiştir. Sabit ve orta değerlerinde alınan parametreler silindir iç yarıçapı / silindir dış yarı çapı (*Ri/Ro*=0.95), çatlak derinliği/silindir et kalınlığı (*a/t*=0.25), çatlak dönme açısı (α=45°) olarak belirlenmiştir. Yapılan karşılaştırmada *a/c*=0.25 olması durumunda mod-I ve mod-II çatlak derinlik noktası değerlerinin maksimum olduğu; mod-I, mod-II ve mod-III serbest yüzey noktası değerlerinin de *a/c*=1 olması durumunda maksimum olduğu görülmüştür. Sonuçlar, Şekil 2.317-3.319'da gösterilmiştir.



Şekil 2.317. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *a/c*=0.25, 0.5, 1, 2; *a/t*=0.25, *Ri/Ro*=0.95, *α*=45°.



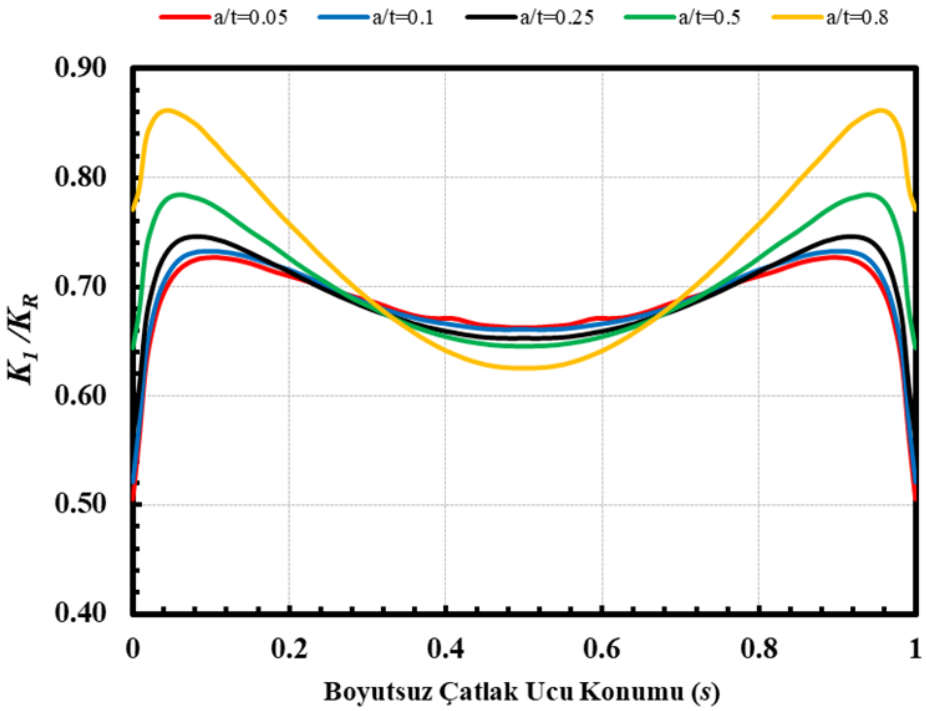
Şekil 2.318. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *a/c*=0.25, 0.5, 1, 2; *a/t*=0.25, *Ri/Ro*=0.95, *α*=45°.



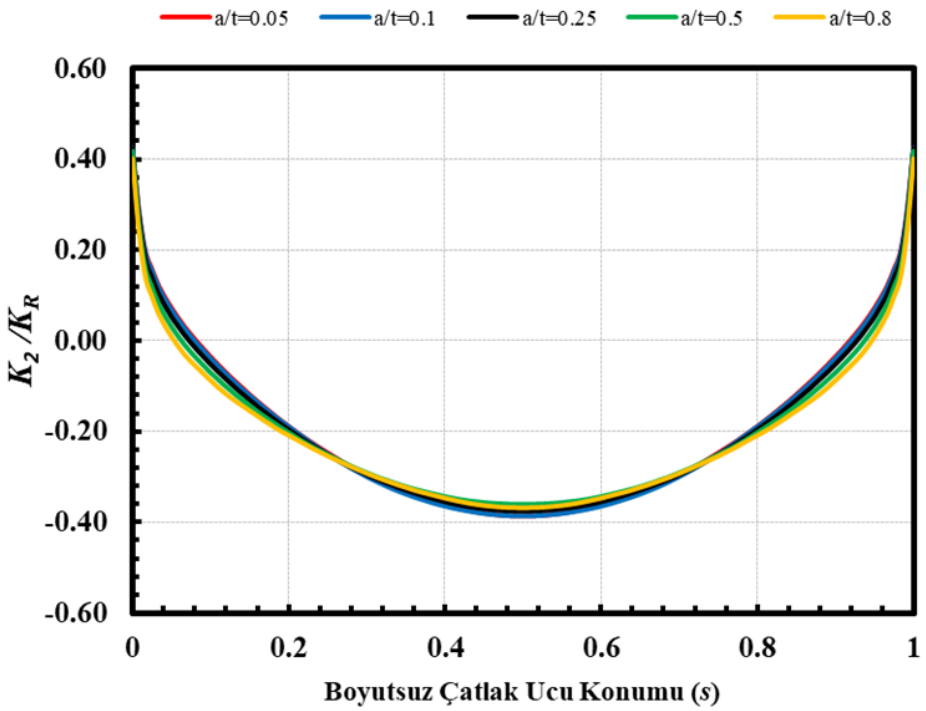
Şekil 2.319. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *a/c*=0.25, 0.5, 1, 2; *a/t*=0.25, *Ri/Ro*=0.95, α=45°.

2.6.3. *a/t* parametresinin gerilme şiddet faktörlerine etkileri

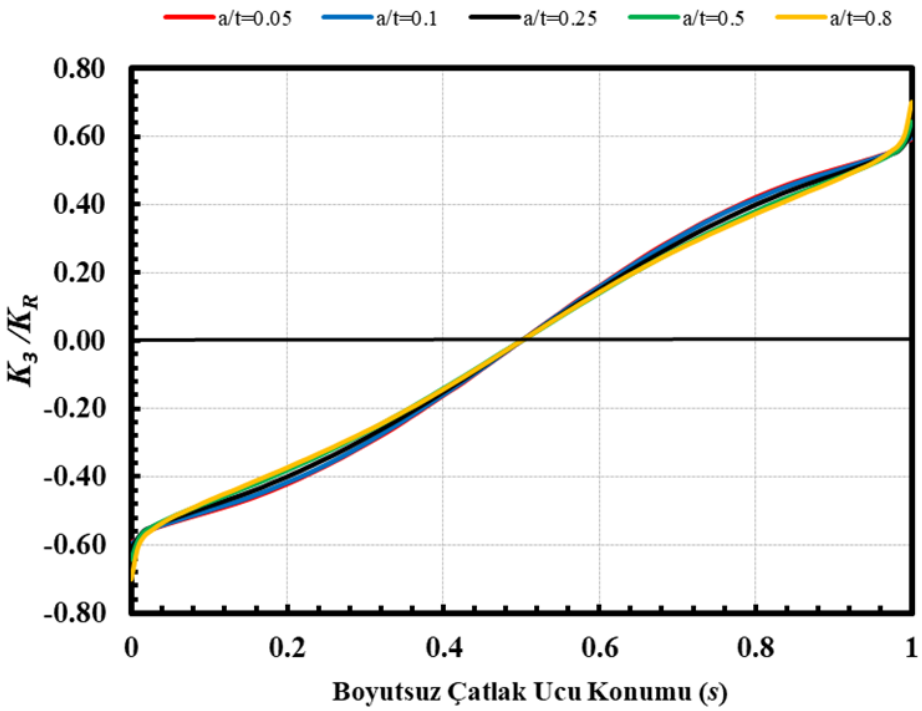
Bu kısımda (*a/t*) çatlak derinliği/silindir et kalınlığı parametresinin belirlenen 0.05, 0.1, 0.25, 0.50, 0.8 değerlerinde analizlere etkisi gösterilmiştir. Sabit parametreler silindir iç yarıçapı / silindir dış yarı çapı (*Ri/Ro*=0,6), çatlak şekil oranı (*a/c*=1), çatlak dönme açısı (α=45°) olarak belirlenmiştir. Yapılan karşılaştırmada *a/t* artması durumunda mod-I çatlak derinlik noktası değerinin azaldığı, serbest yüzey noktası değerlerinin ise arttığı görülmüştür. Mod-II GŞF çatlak derinlik noktası değerlerinin ve mod-II ve mod-III serbest yüzey noktası değerlerinin birbirine yakın değerlere sahip olduğu görülmüştür. Sonuçlar Şekil 3.320-3.322'de gösterilmiştir.



Şekil 2.320. Boyutsuz mod-I GŞF dağılımları; *a/t*=0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *α*=45°.



Şekil 2.321. Boyutsuz mod-II GŞF dağılımları; *a/t*=0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *α*=45°.



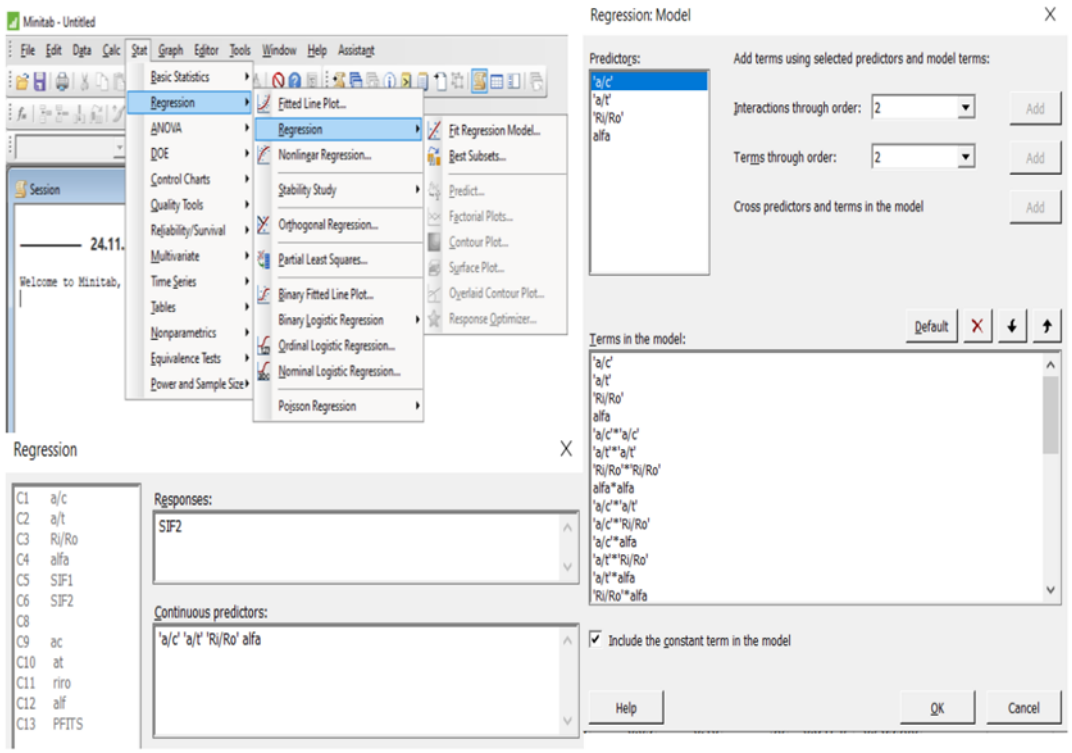
Şekil 2.322. Boyutsuz mod-III GŞF dağılımları; *a/t*=0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8; *Ri/Ro*=0.6, *a/c*=1, *α*=45°.

3. KARIŞIK MOD GERİLME ŞİDDET FAKTÖRLERİ İÇİN EMPİRİK DENKLEM GELİŞTİRİLMESİ

3.1. Minitab Programı ve Empirik Denklem Çalışması

Minitab programı, bir bağımlı değişken ile bağımsız değişken(ler) arasındaki ilişkiyi tahmin etmek ve istatistiksel analizler yapmak için kullanılan bir araçtır [12]. Bu tahminlerin sonucunda standart sapma ve varyans değerlerine göre istatiksel sonuç elde edilir. Mühendislik çalışmalarında, proses verimlilik ve optimizasyon çalışmalarında, maliyet analizleri çalışmalarında büyük kolaylık sağlamaktadır.

Bu bölümde, elde edilen analiz sonuçlarına göre Minitab programı kullanılarak serbest yüzey noktası ve çatlak ucu derinlik noktası değerleri için çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Program arayüzündeki C sütunlarına sırasıyla problem parametreleri olan *Ri/Ro, a/c, a/t* ve dönme açısı α değerleri ile girilmiştir. Sif kısmına ise bu parametrelere karşılık gelen çatlak ucu derinlik noktası değerleri girilmiştir. Programın model kısmında bu parametreleri içeren terimler elde edilerek regresyon analizi yapılmıştır. Aynı işlemler serbest yüzey noktası değerleri için tekrar edilmiştir.Terim oluşturma aşaması Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

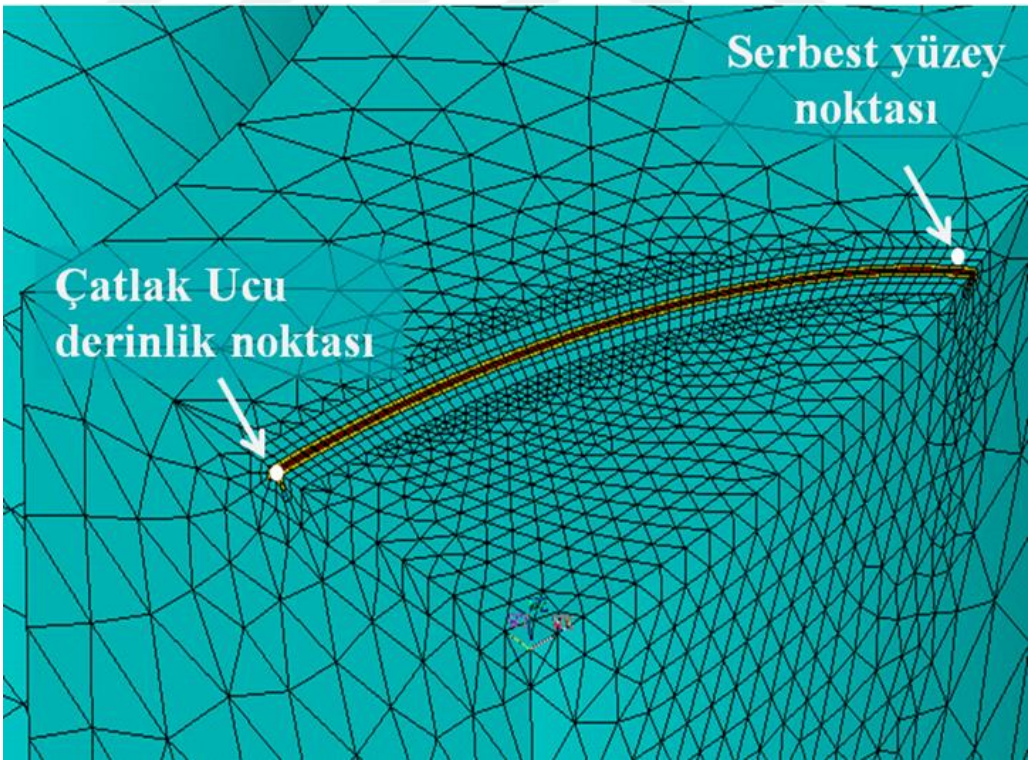


Şekil 3.1. Minitab Programı Regresyon analizi adımları [13].

Analizler sonucunda oluşturulan denklemlerin mevcut katsayılarından eksiltme ya da arttırma yapılıp yapılmayacağına katsayıların P değeri ve denklemin R^2 (adj) değerlerine bakılarak karar verilmiştir. Burada R, artık değerleri (residual) ifade etmektedir. Bağımlı değişkenin tahmin edilen değeri ile gözlenen değer arasındaki sapmalar için kullanılır[14]. Bir regresyon modelinin uygulanmasıyla ortaya çıkan R^2, verilerin uygun regresyon çizgisine ne kadar yakın olduğunun istatistiksel bir ölçüsüdür[15]. Denklemlerin R^2 değerlerinin en az şekilde etkilenmesine dikkat edilmiştir. Bu sebeple R^2 değerleri olabildiğince yüksek tutulmuştur. P parametresi ise, regresyon analizi sonucunda bulunan katsayıların geliştirilen empirik denklem ile ne kadar uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu parametrenin değeri 0.05'ten büyük olan katsayılar, empirik denklemin ifade edilmesinde yüksek uyumluluk göstermediği için denklemden çıkartılmıştır. Geliştirilen denkleme ara değer parametreleri girilerek, denklemden elde edilen GŞF değerleri ile analiz sonucu bulunan GŞF değerleri kıyaslanmıştır. Bu sonuçlar Bölüm 3.2.'de detaylı olarak açıklanmıştır.

3.2. Serbest Yüzey Noktası ve Çatlak Ucu Derinlik Noktası İçin Denklem Geliştirme Çalışmaları

Bu bölümde yapılan denklem geliştirme çalışmalarında çatlak ucu derinlik noktası değeri (s=0.5) ve silindirin yüzeyine göre % 5 içeriden alınarak serbest yüzey noktası (s=0.05) seçilmiştir. Seçilen bu noktaların konumu Şekil 3.2.3'te gösterilmiştir. Serbest yüzey noktasındaki K_1, K_2 ve K_3 gerilme şiddet faktörlerive ,çatlak ucu derinlik noktasındaki K_1 ve K_2 gerilme şiddet faktörleri için empirik denklemler geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek doğruluk oranı ile tek bir denklem ile ifade edilememektedir. Çatlak şekil oranı 1 ve 1'den büyük olması durumunda serbest yüzeylerdeki gerilme şiddet faktörü dağılımlarında ani değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimler, diğer parametreler kullanılarak geliştirilen empirik denklemlere yüksek oranda uyum sağlayamamaktadır. Bu yüzden belirlenen $0.25 \leq a/c \leq 1$ ve $2 \geq a/c \geq 1$ aralıklarına göre iki ayrı bölge tanımlanarak denklemler türetilmiştir. Buna göre derinlik noktaları için 4 denklem (derinlik noktasında K_3=0), serbest yüzey noktası için ise 6 denklem olmak üzere toplam 10 adet empirik denklem geliştirilmiştir.



Şekil 3.2. Çatlak ucu derinlik ve serbest yüzey noktaları.

Geliştirilen bu emrik denklemler in genel gösterimi denklem 3.1 ile ifade edilmiştir. C değeri denklemdeki her bir terimin katsayısını, T parametresi problem

parametrelerine bağlı değişkeni ifade etmektedir. *C* değerleri ve *T* parametreleri Tablo 3.1-10' da geliştirilen her bir empirik denklem için ifade edilmiştir.

$$K_{1,2,3} = C_0 + C_1T_1 + \ C_2T_2 \ + \ C_3T_3 + \ \dots\dots\dots\dots + C_nT_n \qquad (3.1)$$

Mod-I için R^2 değeri % 99.70 olan ve 26 katsayıdan oluşan serbest yüzey noktası denklem katsayıları, $0.25 \leq a/c \leq 1$ aralığı için Tablo 3.1.'de ifade edilmiştir.

Tablo 3.1. *s*=0.05 noktası için Mod-I denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	*sabit*	8,54E-01	14	$(a/c)^2(\alpha)^2$	-8,13E-04
2	(Ri/Ro)	3,15E-01	15	$(a/c)(a/t)^3$	7,87E-01
3	(a/c)	8,42E-01	16	$(a/c)(a/t)^2(\alpha)$	-7,78E-03
4	(α)	-6,17E-02	17	$(a/c)^5$	-3,63E-01
5	$(\alpha)^2$	2,94E-03	18	$(a/c)^2(\alpha)^3$	6,00E-06
6	$(Ri/Ro)(a/c)$	-7,15E-01	19	$(Ri/Ro)^3(a/t)^2$	7,52E-01
7	$(Ri/Ro)(\alpha)$	-1,56E-03	20	$(Ri/Ro)^2(a/c)(a/t)^2$	-1,74E+03
8	$(\alpha)^3$	-7,10E-05	21	$(Ri/Ro)^2(a/t)^3$	2,08E+03
9	$(Ri/Ro)(a/c)^2$	4,02E-01	22	$(Ri/Ro)^2(a/t)^2(\alpha)$	-3,71E-02
10	$(a/c)^2(\alpha)$	1,08E-02	23	$(Ri/Ro)(a/c)(a/t)^2(\alpha)$	3,84E-02
11	$(\alpha)^4$	1,00E-06	24	$(Ri/Ro)(a/t)^4$	-1,09E+03
12	$(a/c)^3\alpha)$	1,51E-02	25	$(Ri/Ro)(a/t)^2(\alpha)^2$	1,15E-04
13	$(a/c)^2(a/t)(\alpha)$	1,16E-02	26	$(a/c)^2(a/t)^2(\alpha)$	-2,14E-02

Mod-I için R^2 değeri % 99.38 olan ve 18 katsayıdan oluşan serbest yüzey noktası denklem katsayıları, $2 \geq a/c \geq 1$ aralığı için Tablo 3.2.'de ifade edilmiştir.

Tablo 3.2. *s*=0.05 noktası için Mod-I denklem katsayıları ($2 \geq a/c \geq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	*sabit*	1,48E+04	10	$(a/c)(\alpha)$	-1,89E-02
2	(Ri/Ro)	1,80E-02	11	$(a/t)(\alpha)$	-9,30E-04
3	(a/c)	-1,73E-01	12	$(\alpha)^3$	-1,70E-05
4	(a/t)	3,04E-01	13	$(Ri/Ro)(a/c)(\alpha)$	1,27E-03
5	(α)	-5,35E-03	14	$(a/c)(a/t)(\alpha)$	2,29E-03
6	$(a/t)^2$	2,64E-01	15	$(a/c)(\alpha)^2$	5,21E-04
7	$(Ri/Ro)(a/c)$	1,76E-02	16	$(a/t)^2(\alpha)$	-4,56E-03
8	$(Ri/Ro)(\alpha)$	-3,91E-03	17	$(a/c)(\alpha)^3$	-4,00E-06
9	$(a/c)(a/t)$	-2,16E-01	18	$(\alpha)^2$	3,70E-04

3.2.1. Mod- II serbest yüzey noktası (*s*=0.05) denklemleri

Mod-II için R^2 değeri % 98.50 olan ve 19 katsayıdan oluşan serbest yüzey noktası denklem katsayıları, $0.25 \leq a/c \leq 1$ aralığı için Tablo 3.3.'te ifade edilmiştir.

Tablo 3.3. *s*=0.05 noktası için Mod- II denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	(α)	-9,52E-03	11	$(Ri/Ro)(a/c)^2$	-2,11E-01
2	$(a/c)^2$	1,97E-01	12	$(Ri/Ro)(a/c)(a/t)$	3,24E-01
3	$(a/t)^2$	1,80E-01	13	$(Ri/Ro)(a/c)(\alpha)$	2,03E-03
4	$(\alpha)^2$	9,10E-05	14	$(Ri/Ro)(a/t)^2$	-1,63E-01
5	$(a/c)(a/t)$	-5,53E-01	15	$(a/c)^2(a/t)$	3,36E-01
6	$(a/c)(\alpha)$	1,12E-02	16	$(a/c)^2(a/c)(\alpha)$	2,79E-03
7	$(a/t)(\alpha)$	-2,76E-03	17	$(a/c)(a/t)(\alpha)$	-2,22E-03
8	$(Ri/Ro)^3$	-2,58E-02	18	$(a/c)(\alpha)^2$	-1,66E-04
9	$(a/c)^3$	-1,52E-01	19	$(a/t)(\alpha)^2$	3,70E-05
10	$(Ri/Ro)^2(a/c)$	1,34E-01			

Mod-II için R^2 değeri % 97 olan ve 16 katsayıdan oluşan serbest yüzey noktası denklem katsayıları, $2 \geq a/c \geq 1$ aralığı için Tablo 3.4.'de ifade edilmiştir.

Tablo 3.4. *s*=0.05 serbest yüzey noktası için Mod-II denklemi ($2 \geq a/c \geq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	(Ri/Ro)	-1,14E-01	9	$(a/c)(\alpha)$	7,91E-04
2	(a/c)	6,60E-02	10	$(a/t)(\alpha)$	-5,26E-03
3	(a/t)	-1,41E-01	11	$(Ri/Ro)(a/c)(a/t)$	-1,56E-01
4	$(a/c)^2$	-3,55E-02	12	$(Ri/Ro)(a/c)(\alpha)$	-2,01E-03
5	$(Ri/Ro)(a/c)$	6,82E-02	13	$(Ri/Ro)(a/t)(\alpha)$	2,48E-03
6	$(Ri/Ro)(a/t)$	2,47E-01	14	$(Ri/Ro)(\alpha)^2$	-1,90E-05
7	$(Ri/Ro)(\alpha)$	4,60E-03	15	$(a/c)(a/t)(\alpha)$	1,91E-03
8	$(a/c)(a/t)$	8,50E-02	16	$(a/c)(\alpha)^2$	6,00E-06

3.2.2. Mod- III serbest yüzey noktası (*s*=0.05) denklemleri

Mod-III için R^2 değeri % 99.60 olan ve 38 katsayıdan oluşan serbest yüzey noktası denklem katsayıları, $0.25 \leq a/c \leq 1$ aralığı için Tablo 3.5.'te ifade edilmiştir.

Tablo 3.5. *s*=0.05 noktası için Mod- III denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	(α)	8,09E-03	20	$(a/c)^2(\alpha)$	1,95E-02
2	$(Ri/Ro)^2$	-3,69E-01	21	$(a/c)(\alpha)^2$	3,93E-04
3	$(a/c)^2$	-5,21E-01	22	$(a/t)^2(\alpha)$	-1,61E-02
4	$(a/t)^2$	-1,89E+03	23	$(Ri/Ro)^3(\alpha)$	-2,49E-03
5	$(\alpha)^2$	-2,63E-04	24	$(Ri/Ro)^2(a/c)(a/t)$	5,74E-01
6	$(Ri/Ro)(a/c)$	4,52E-01	25	$(Ri/Ro)^2(a/t)^2$	-6,69E-01
7	$(a/c)(a/t)$	2,50E+03	26	$(Ri/Ro)(a/c)^2(a/t)$	1,66E+03
8	$(a/c)(\alpha)$	-4,41E-02	27	$(Ri/Ro)(a/c)^2(\alpha)$	1,01E-02
9	$(a/t)(\alpha)$	1,95E-02	28	$(Ri/Ro)(a/c)(\alpha)^2$	-1,33E-04
10	$(Ri/Ro)^3$	3,07E-01	29	$(Ri/Ro)(a/t)^3$	-1,44E+03
11	$(a/c)^3$	5,24E-01	30	$(Ri/Ro)(a/t)^2(\alpha)$	7,57E-03
12	$(a/t)^3$	1,73E+03	31	$(Ri/Ro)(a/t)(\alpha)^2$	1,75E-04
13	$(\alpha)^3$	4,00E-06	32	$(a/c)^2(a/t)^2$	1,20E+03
14	$(Ri/Ro)(a/c)^2$	-3,74E-01	33	$(a/c)^2(a/t)(\alpha)$	-3,06E-03
15	$(Ri/Ro)(a/c)(a/t)$	-2,72E+03	34	$(a/c)^2(\alpha)^2$	-3,10E-04
16	$(Ri/Ro)(a/t)^2$	2,41E+03	35	$(a/c)(a/t)^3$	-1,12E+03
17	$(Ri/Ro)(a/t)(\alpha)$	-1,94E-02	36	$(a/c)(\alpha)^3$	3,00E-06
18	$(Ri/Ro)(\alpha)^2$	5,30E-05	37	$(a/t)^2(\alpha)^2$	1,35E-04
19	$(a/c)^2(a/t)$	-2,32E+03	38	$(a/t)(\alpha)^3$	-2,00E-06

Mod-III için R^2 % 99.88 olan ve 18 katsayıdan oluşan serbest yüzey noktası denklem katsayıları, $2 \geq a/c \geq 1$ aralığı için Tablo 3.6.'da ifade edilmiştir.

Tablo 3.6. *s*=0.05 noktası için Mod-III denklem katsayıları ($2 \geq a/c \geq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	(α)	-2,22E-02	10	$(a/t)^2(\alpha)$	4,69E-03
2	$(a/t)^2$	1,01E-01	11	$(Ri/Ro)^2(a/t)^2$	-4,19E-02
3	$(\alpha)^2$	-1,93E-04	12	$(Ri/Ro)(a/c)(a/t)(\alpha)$	4,57E-03
4	$(Ri/Ro)(\alpha)$	9,29E-03	13	$(Ri/Ro)(a/c)(\alpha)^2$	7,90E-05
5	$(a/c)(\alpha)$	8,29E-03	14	$(Ri/Ro)(a/t)^2(\alpha)$	-4,47E-03
6	$(a/t)^3$	-1,12E-01	15	$(Ri/Ro)(\alpha)^3$	-1,00E-06
7	$(\alpha)^3$	7,00E-06	16	$(a/c)(a/t)(\alpha)^2$	-6,00E-05
8	$(Ri/Ro)(a/c)(\alpha)$	-7,41E-03	17	$(a/c)(\alpha)^3$	-1,00E-06
9	$(Ri/Ro)(a/t)(\alpha)$	-4,76E-03	18	$(a/t)(\alpha)^3$	1,00E-06

3.2.3. Mod-I çatlak ucu derinlik noktası (*s*=0.5) denklemleri

Mod-I için R^2 değeri 99.75 olan ve 38 katsayıdan oluşan derinlik noktası denklem katsayıları, $0.25 \leq a/c \leq 1$ aralığı için Tablo 3.7. 'de ifade edilmiştir.

Tablo 3.7. *s*=0.5 noktası için Mod-I denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	*sabit*	1,11E+05	20	$(Ri/Ro)^3(a/c)$	-3,40E-01
2	(a/t)	-1,33E+04	21	$(Ri/Ro)^3(a/t)$	6,54E-01
3	$(a/c)^2$	-4,67E-02	22	$(Ri/Ro)^2(a/c)^2$	2,97E-01
4	$(a/t)^2$	1,46E+03	23	$(Ri/Ro)^2(a/c)(a/t)$	-9,41E-01
5	$(\alpha)^2$	-2,40E-04	24	$(Ri/Ro)^2(a/c)(\alpha)$	3,83E-03
6	$(Ri/Ro)(a/t)$	9,64E-01	25	$(Ri/Ro)^2(a/t)^2$	6,54E-01
7	$(a/c)(a/t)$	1,46E+03	26	$(Ri/Ro)^2(a/t)(\alpha)$	-1,42E-02
8	$(a/c)(\alpha)$	-1,21E-03	27	$(Ri/Ro)(a/c)^2(a/t)$	1,38E+03
9	$(a/t)(\alpha)$	1,06E-02	28	$(Ri/Ro)(a/c)^2(\alpha)$	-1,12E-02
10	$(Ri/Ro)^3$	6,61E-02	29	$(Ri/Ro)(a/c)(a/t)(\alpha)$	8,56E-03
11	$(\alpha)^3$	1,00E-06	30	$(Ri/Ro)(a/c)(\alpha)^2$	4,30E-05
12	$(Ri/Ro)(a/c)(a/t)$	-1,60E+03	31	$(Ri/Ro)(a/t)^3$	-1,02E+03
13	$(Ri/Ro)(a/c)(\alpha)$	6,10E-03	32	$(Ri/Ro)(a/t)^2(\alpha)$	1,08E-02
14	$(Ri/Ro)(\alpha)^2$	-8,70E-05	33	$(Ri/Ro)(a/t)(\alpha)^2$	-1,05E-04
15	$(a/c)^2(a/t)$	-7,27E-01	34	$(Ri/Ro)(\alpha)^3$	1,00E-06
16	$(a/c)(a/t)^2$	-1,52E+03	35	$(a/c)^2(\alpha)^2$	4,20E-05
17	$(a/t)^2(\alpha)$	-2,33E-02	36	$(a/c)(a/t)^3$	9,33E-01
18	$(a/t)(\alpha)^2$	5,00E-05	37	$(a/c)(a/t)^2(\alpha)$	2,50E-03
19	$(a/t)^4$	-4,30E-01	38	$(a/t)^3(\alpha)$	9,57E-03

Mod-I için R^2 değeri %99.72 olan ve 10 katsayıdan oluşan derinlik noktası denklem katsayıları, $2 \geq a/c \geq 1$ aralığı için Tablo 3.8.'de ifade edilmiştir.

Tablo 3.8. *s*=0.5 noktası için Mod-I denklem katsayıları ($2 \geq a/c \geq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	*sabit*	1,61E+04	6	*(Ri/Ro)(a/t)*	3,77E-01
2	*(a/c)*	-5,40E-01	7	$(Ri/Ro)^2(\alpha)$	-8,97E-04
3	*(a/t)*	-3,34E-01	8	$(Ri/Ro)(a/c)(a/t)(\alpha)^2$	-3,80E-05
4	*(α)*	-3,35E-03	9	$(a/c)^4(\alpha)$	2,25E-04
5	$(\alpha)^2$	-1,30E-04	10	$(a/c)(a/t)(\alpha)^2$	3,60E-05

3.2.4. Mod-II çatlak ucu derinlik noktası (*s*=0.5) denklemleri

Mod-II için R^2 değeri % 99.9 olan ve 38 katsayıdan oluşan derinlik noktası denklem katsayıları, $0.25 \leq a/c \leq 1$ aralığı için Tablo 3.9.'da ifade edilmiştir.

Tablo 3.9. *s*=0.5 noktası için Mod-II denklem katsayıları ($0.25 \leq a/c \leq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	*(a/c)*	-1,84E-02	10	*(Ri/Ro)(α)2*	-1,30E-05
2	*(a/t)*	8,09E-02	11	$(a/c)^2(a/t)$	3,37E-02
3	*(α)*	-1,19E-02	12	$(a/t)(\alpha)^2$	-1,00E-06
4	$(a/t)^2$	-1,08E-01	13	$(Ri/Ro)^2(a/t)(\alpha)$	-3,73E-03
5	*(Ri/Ro)(α)*	1,39E-03	14	*(Ri/Ro)(a/c)(a/t)(α)*	2,38E-03
6	*(a/t)(α)*	5,33E-03	15	$(Ri/Ro)(a/c)(\alpha)^2$	3,60E-05
7	*(α)3*	2,00E-06	16	$(Ri/Ro)(a/t)(\alpha)^2$	1,89E-04
8	*(Ri/Ro)(a/c)(α)*	-3,86E-03	17	$(a/c)(a/t)(\alpha)^2$	-1,60E-05
9	*(Ri/Ro)(a/t)(α)*	-1,28E-02			

Mod-II için R^2 değeri % 99.86 olan ve 13 katsayıdan oluşan derinlik noktası denklem katsayıları , $2 \geq a/c \geq 1$ aralığı için Tablo 3.10.'da ifade edilmiştir.

Tablo 3.10. *s*=0.5 noktası için Mod-II denklem katsayıları ($2 \geq a/c \geq 1$).

No	Terim	Katsayı	No	Terim	Katsayı
1	(α)	-1,54E-02	8	$(a/c)^2(a/t)(\alpha)$	-2,40E-03
2	$(a/c)(\alpha)$	3,27E-03	9	$(Ri/Ro)(a/t)^4$	-4,29E-02
3	$(\alpha)^3$	2,00E-06	10	$(Ri/Ro)^2(a/c)^2(\alpha)$	1,28E-03
4	$(Ri/Ro)^2(\alpha)$	-4,97E-03	11	$(Ri/Ro)^2(a/c)(\alpha)^2$	-5,30E-05
5	$(Ri/Ro)(a/t)(\alpha)$	-9,15E-03	12	$(Ri/Ro)(a/c)(a/t)(\alpha)^2$	6,00E-05
6	$(a/c)(a/t)(\alpha)$	8,76E-03	13	$(a/c)^2(a/t)(\alpha)^2$	-2,50E-05
7	$(Ri/Ro)^2(\alpha)^2$	1,04E-04			

3.3. Empirik Denklem Doğrulama Çalışması

Bölüm 3.2. 'de elde edilen empirik denklemlerin doğruluğunu teyid etmek amacıyla Tablo 3.11'de verilen ara değer parametreleri ile 24 adet ilave model oluşturulmuştur. FCPAS ile bu modellerin karışık mod kırılma analizleri yapılmıştır. Tablo 3.11'deki ara değer parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre elde edilen çatlak ucu derinlik noktasındaki (*s*=0.5) GŞF değerleri ve serbest yüzey noktasındaki (*s*=0.05) GŞF değerleri ile geliştirilen empirik denklemlerin sonuçları kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde Şekil 3.3-3.28'de gösterilmiştir. Ayrıca bu kıyaslamanın sonuçları özet olarak Tablo 3.11-3.16'da verilmiştir.

Tablo 3.11. Ara değerler içeren doğrulama model parametreleri.

Model No	*Ri/Ro*	*a/c*	*a/t*	*α*	Model No	*Ri/Ro*	*a/c*	*a/t*	*α*
1	0,2	0,4	0,2	25°	1	0,4	0,8	0,6	50°
2	0,2	0,4	0,2	55°	2	0,4	1,25	0,2	25°
3	0,2	0,8	0,2	25°	3	0,4	1,25	0,2	55°
4	0,2	0,8	0,2	40°	4	0,8	0,4	0,6	10°
5	0,2	0,8	0,4	35°	5	0,8	0,4	0,6	35°
6	0,2	0,8	0,4	50°	6	0,8	0,4	0,6	65°
7	0,4	0,4	0,4	25°	7	0,8	0,8	0,4	25°
8	0,4	0,4	0,4	35°	8	0,8	0,8	0,4	55°
9	0,4	0,4	0,2	20°	9	0,8	1,25	0,6	20°
10	0,4	0,4	0,2	40°	10	0,8	1,25	0,6	40°
11	0,4	0,4	0,2	65°	11	0,8	1,25	0,2	35°
12	0,4	0,8	0,6	35°	12	0,8	1,25	0,2	55°

Tablo 3.12. Çatlak ucu serbest yüzey noktası K_1 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması.

Model No	K_1 Analiz	K_1 Denklem	% Fark	Model No	K_1 Analiz	K_1 Denklem	% Fark
1	0,6811	0,6674	2,0094	13	0,6271	0,6667	-6,3179
2	0,3717	0,3759	-1,1367	14	0,8945	0,9204	-2,8895
3	0,9418	0,9851	-4,5946	15	0,4383	0,4769	-8,7990
4	0,7576	0,7982	-5,3554	16	0,9671	1,0485	-8,4172
5	0,8525	0,8930	-4,7537	17	0,7181	0,6798	5,3309
6	0,6375	0,6416	-0,6477	18	0,2694	0,2619	2,8137
7	0,6930	0,6895	0,4985	19	0,9828	0,9655	1,7630
8	0,6065	0,6098	-0,5347	20	0,5166	0,4910	4,9557
9	0,7287	0,7157	1,7817	21	1,0037	1,0505	-4,6637
10	0,5513	0,5491	0,3973	22	0,7229	0,7902	-9,3111
11	0,2530	0,2698	-6,6395	23	0,7472	0,7936	-6,2094
12	0,8614	0,9208	-6,8936	24	0,4054	0,4417	-8,9540

Tablo 3.13. Çatlak ucu serbest yüzey noktası K_2 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması.

Model No	K_2 Analiz	K_2 Denklem	% Fark	Model No	K_2 Analiz	K_2 Denklem	% Fark
1	-0,1217	-0,1115	8,3893	13	-0,1006	-0,0899	10,6718
2	-0,1730	-0,1591	8,0315	14	0,0498	0,0450	9,5918
3	-0,0085	-0,0066	22,4422	15	0,0608	0,0523	13,9634
4	-0,0169	-0,0210	-24,3976	16	-0,0642	-0,0609	5,0403
5	-0,0524	-0,0555	-5,9832	17	-0,1632	-0,1533	6,0970
6	-0,0762	-0,0775	-1,8148	18	-0,1608	-0,1501	6,6595
7	-0,1145	-0,1282	-11,9755	19	0,0072	-0,0008	111,2611
8	-0,1659	-0,1564	5,7222	20	0,0007	-0,0143	2228,65
9	-0,0963	-0,0890	7,5179	21	0,0450	0,0457	-1,4133
10	-0,1554	-0,1393	10,3049	22	0,0679	0,0655	3,6151
11	-0,1550	-0,1377	11,1897	23	0,0688	0,0723	-5,0488
12	-0,0709	-0,0685	3,4431	24	0,0718	0,0786	-9,5546

Tablo 3.14. Çatlak ucu serbest yüzey noktası K_3 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması.

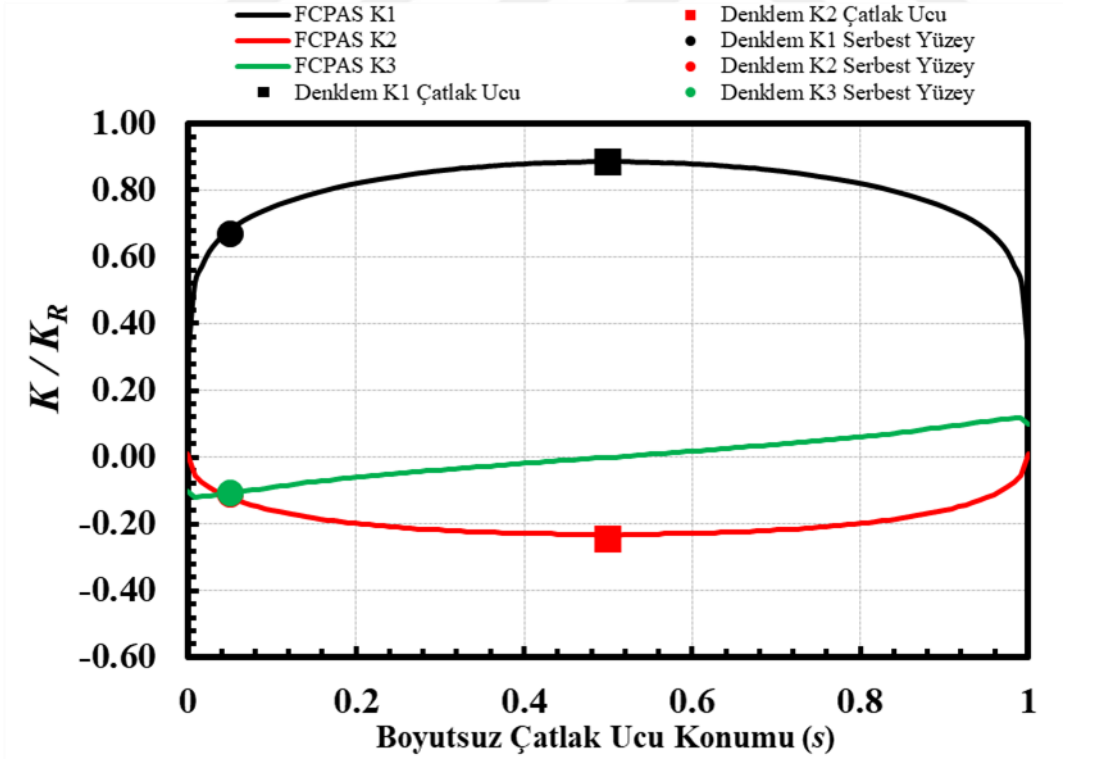
Model No	K_3 Analiz	K_3 Denklem	% Fark	Model No	K_3 Analiz	K_3 Denklem	% Fark
1	-0,1075	-0,1070	0,4238	13	-0,3152	-0,3545	-12,4707
2	-0,1062	-0,1197	-12,6650	14	-0,2954	-0,3193	-8,0718
3	-0,3160	-0,3111	1,5607	15	-0,4208	-0,4656	-10,6590
4	-0,4284	-0,4151	3,0995	16	-0,0731	-0,0833	-13,8839
5	-0,3512	-0,3354	4,5126	17	-0,1911	-0,1972	-3,1742
6	-0,3806	-0,3593	5,5977	18	-0,0976	-0,1082	-10,9054
7	-0,1304	-0,0978	25,0215	19	-0,3501	-0,3320	5,1754
8	-0,0964	-0,1166	-20,8783	20	-0,4832	-0,4247	12,1025
9	-0,1099	-0,1087	1,0907	21	-0,2468	-0,2433	1,4295
10	-0,1591	-0,1698	-6,7177	22	-0,4006	-0,4189	-4,5561
11	-0,0861	-0,0961	-11,5227	23	-0,3613	-0,3887	-7,5884
12	-0,2965	-0,3381	-14,0233	24	-0,3977	-0,4262	-7,1744

Tablo 3.15. Çatlak ucu derinlik noktası K_1 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması.

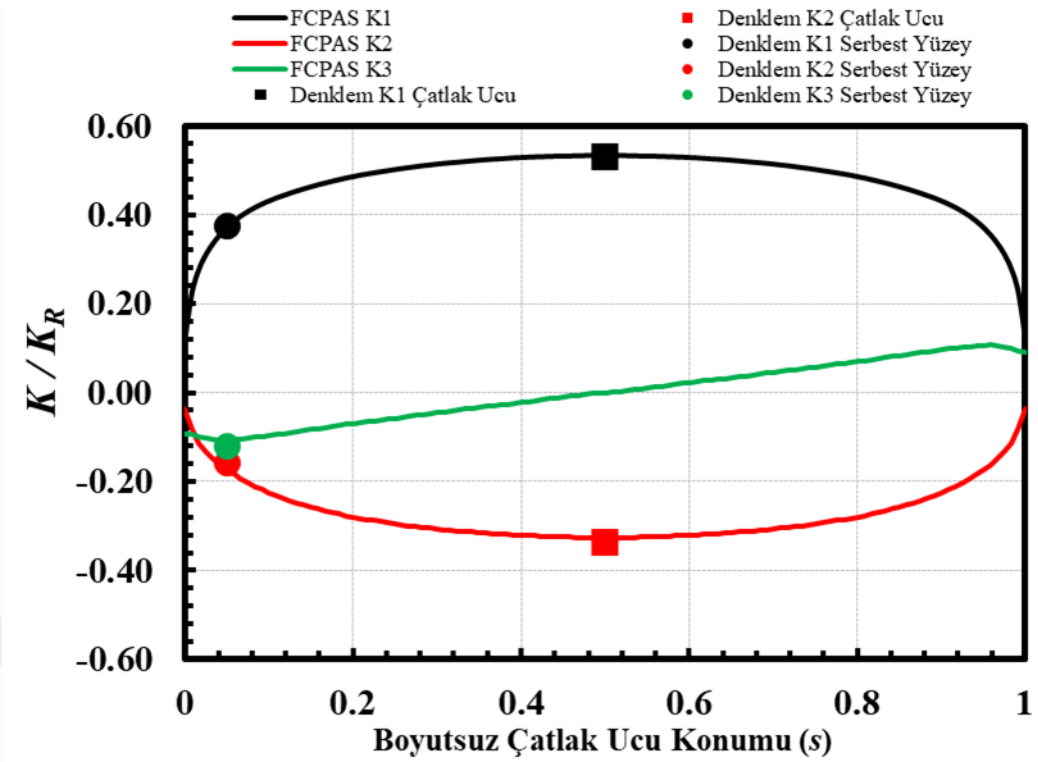
Model No	K_1 Analiz	K_1 Denklem	% Fark	Model No	K_1 Analiz	K_1 Denklem	% Fark
1	0,8858	0,8819	0,4485	13	0,5782	0,5957	-3,0276
2	0,5326	0,5293	0,6245	14	0,6957	0,7479	-7,5099
3	0,8830	0,8792	0,4372	15	0,3846	0,4111	-6,9009
4	0,7276	0,7259	0,2321	16	1,1832	1,1765	0,5638
5	0,7504	0,7514	-0,1276	17	0,9242	0,9196	0,4930
6	0,5874	0,5862	0,2108	18	0,4187	0,4185	0,0460
7	0,9051	0,8793	2,8522	19	0,9490	0,9252	2,5127
8	0,7833	0,7800	0,4222	20	0,5505	0,5386	2,1693
9	0,9472	0,9421	0,5441	21	0,7412	0,7974	-7,5777
10	0,7468	0,7374	1,2578	22	0,5556	0,5949	-7,0815
11	0,3929	0,3920	0,2369	23	0,6181	0,6619	-7,0874
12	0,7427	0,7642	-2,8904	24	0,3838	0,4140	-7,8748

Tablo 3.16. Çatlak ucu derinlik noktası K_2 GŞF'nin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarının karşılaştırılması.

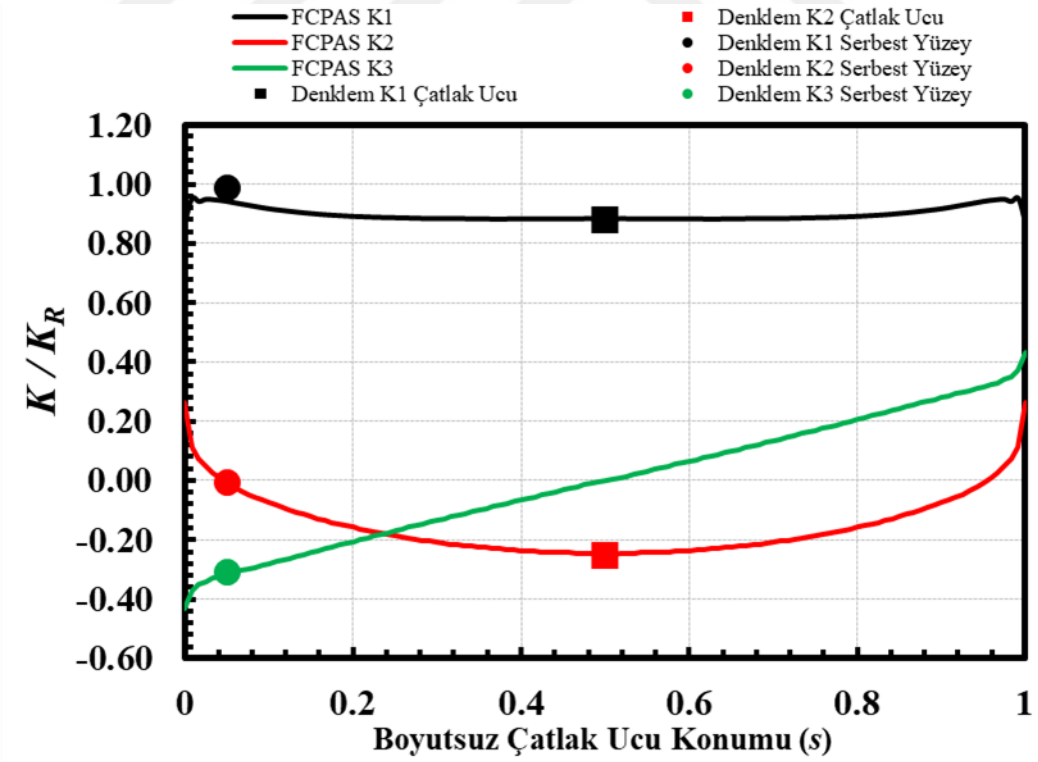
Model No	K_2 Analiz	K_2 Denklem	% Fark	Model No	K_2 Analiz	K_2 Denklem	% Fark
1	-0,2354	-0,2448	-3,9965	13	-0,3596	-0,3325	7,5266
2	-0,3308	-0,3363	-1,6552	14	-0,2325	-0,2476	-6,5133
3	-0,2523	-0,2547	-0,9573	15	-0,3208	-0,3341	-4,1452
4	-0,3402	-0,3401	0,0335	16	-0,1358	-0,1433	-5,5338
5	-0,2851	-0,2911	-2,1023	17	-0,3703	-0,3811	-2,9182
6	-0,3259	-0,3243	0,4889	18	-0,3261	-0,3308	-1,4571
7	-0,2462	-0,2443	0,8019	19	-0,2824	-0,3104	-9,8898
8	-0,2907	-0,3041	-4,6174	20	-0,3802	-0,4020	-5,7479
9	-0,2061	-0,2121	-2,9111	21	-0,2248	-0,2417	-7,5180
10	-0,3283	-0,3390	-3,2533	22	-0,3560	-0,3698	-3,8984
11	-0,3020	-0,3024	-0,1040	23	-0,3356	-0,3561	-6,1063
12	-0,3213	-0,3069	4,5021	24	-0,3613	-0,3800	-5,1811



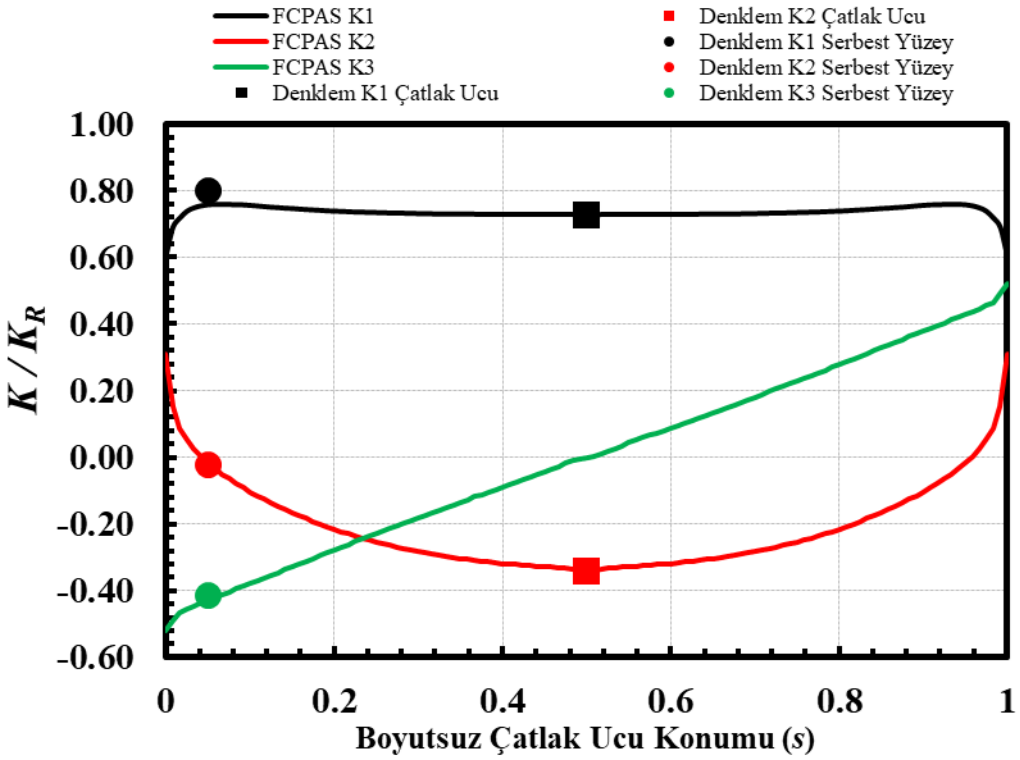
Şekil 3.3. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.2, *a/c*=0.4, *a/t*=0.2, α=25°.



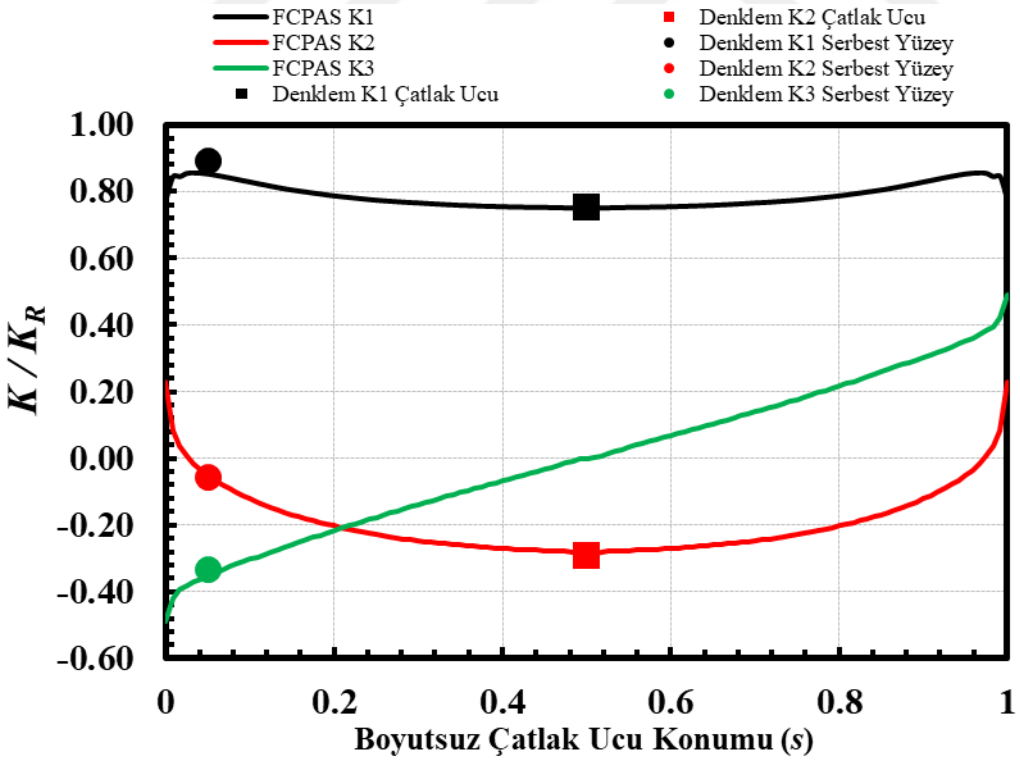
Şekil 3.4. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.2, *a/c*=0.4, *a/t*=0.2, *α*=55°.



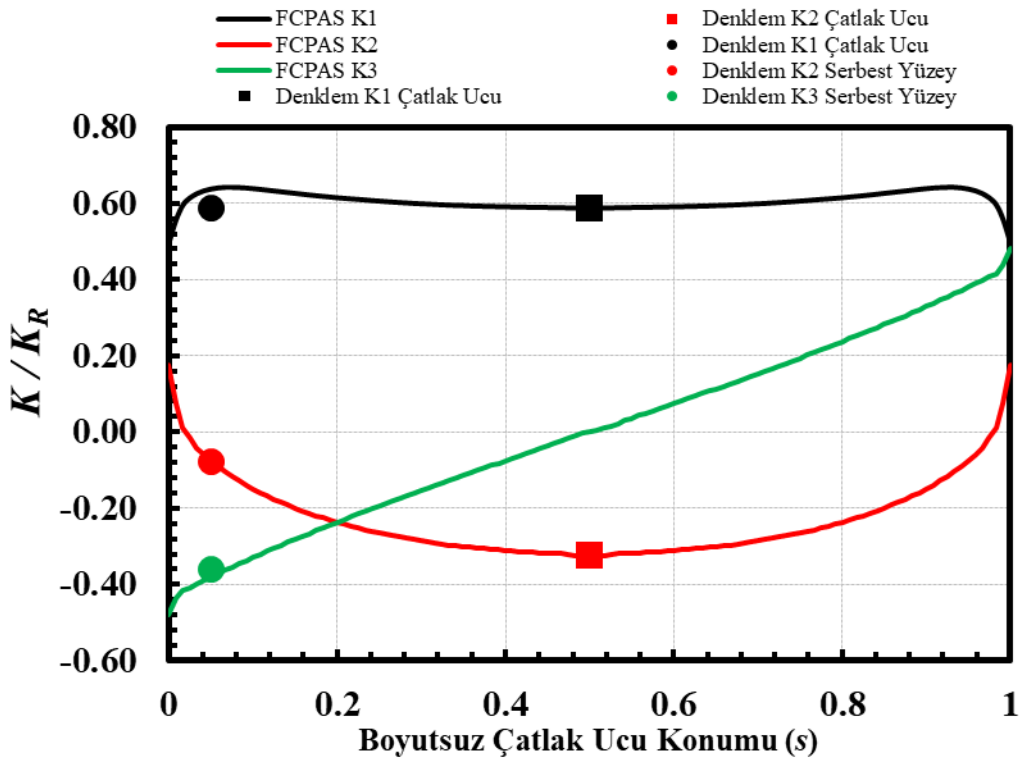
Şekil 3.5. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.2, *a/c*=0.8, *a/t*=0.2, *α*=25°.



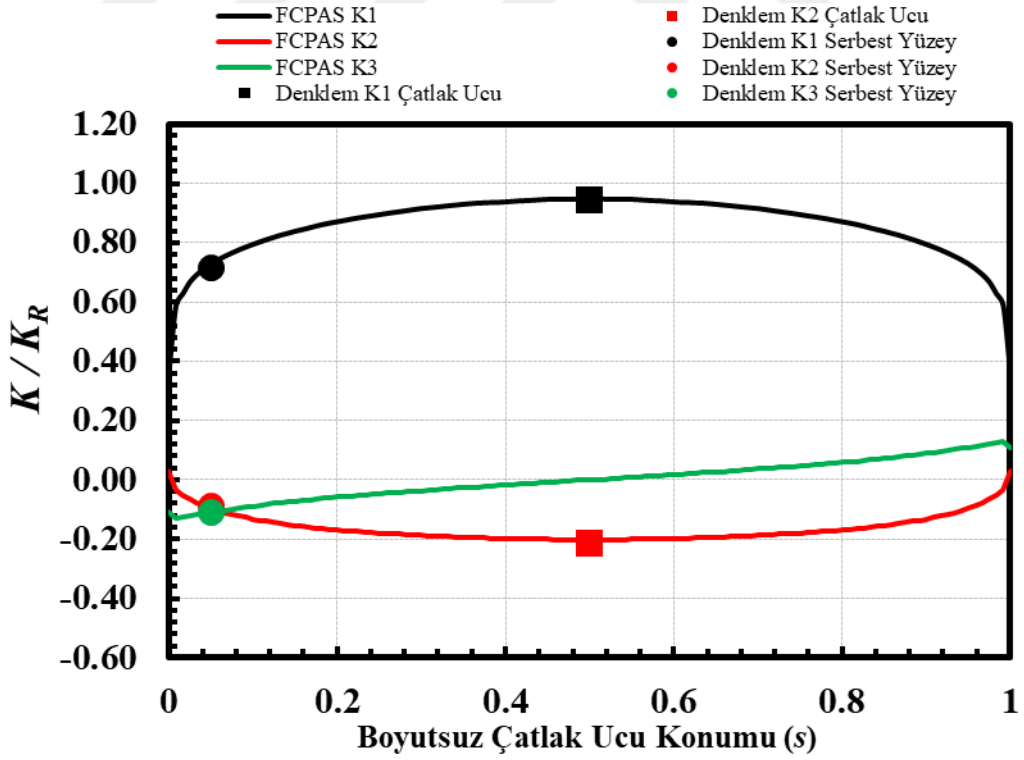
Şekil 3.6. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.2, *a/c*=0.8, *a/t*=0.2, *α*=40°.



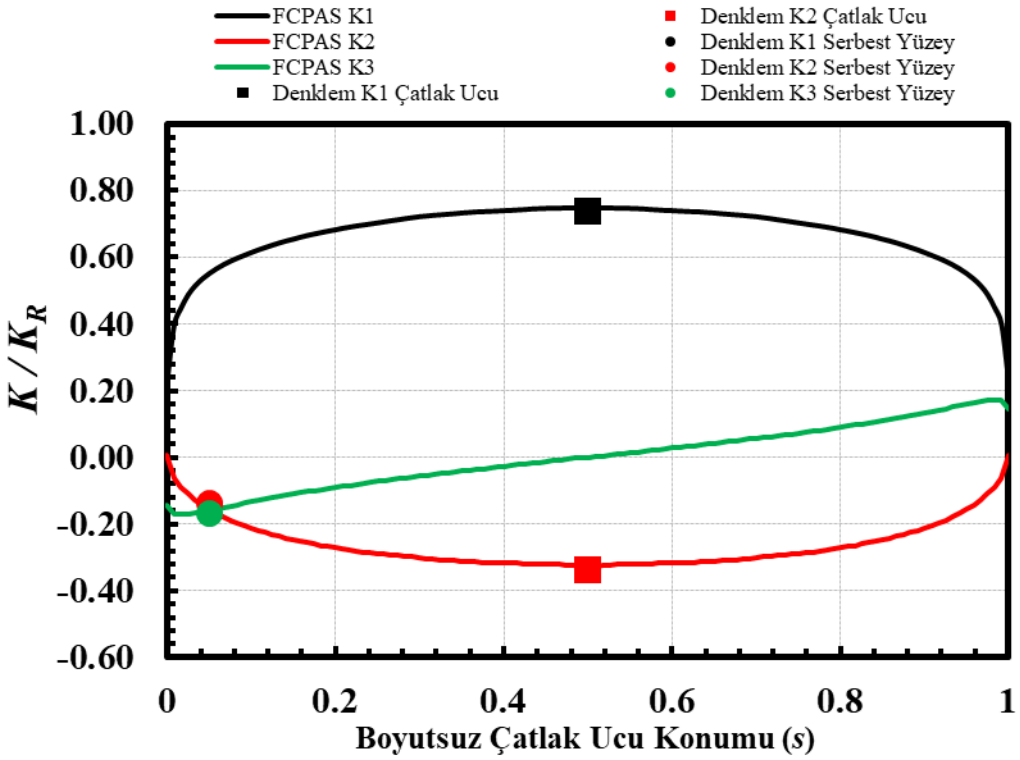
Şekil 3.7. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.2, *a/c*=0.8, *a/t*=0.4, *α*=35°.



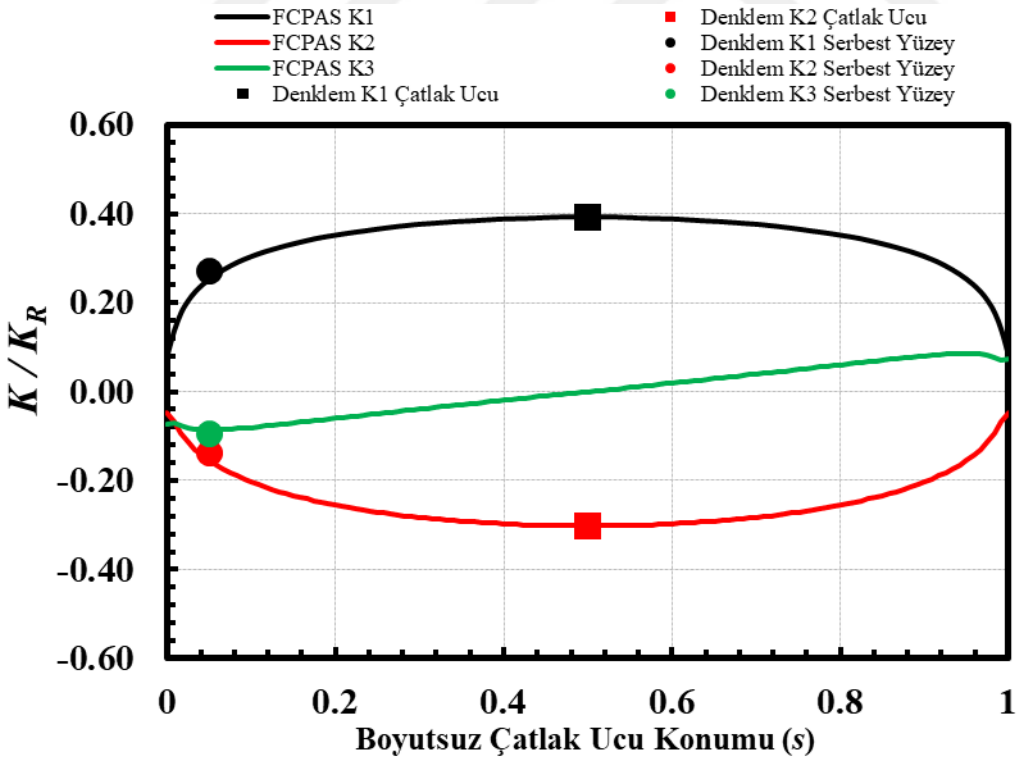
Şekil 3.8. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.2, *a/c*=0.8, *a/t*=0.4, α=50°.



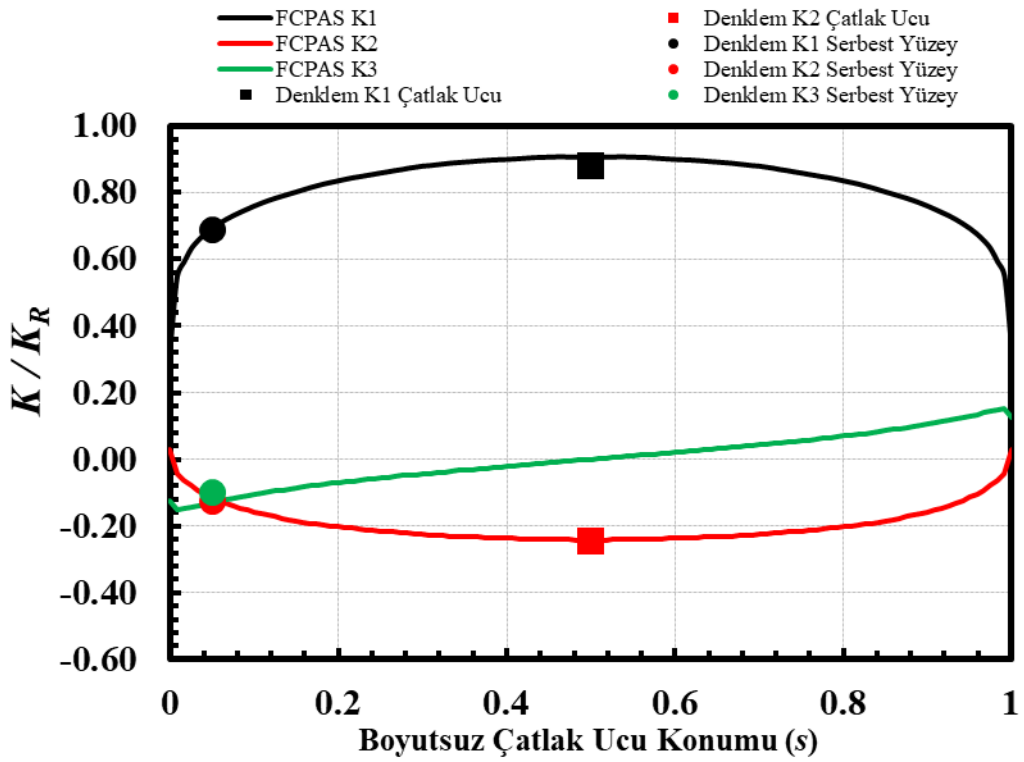
Şekil 3.9. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.4, *a/c*=0.4, *a/t*=0.2, α=20°.



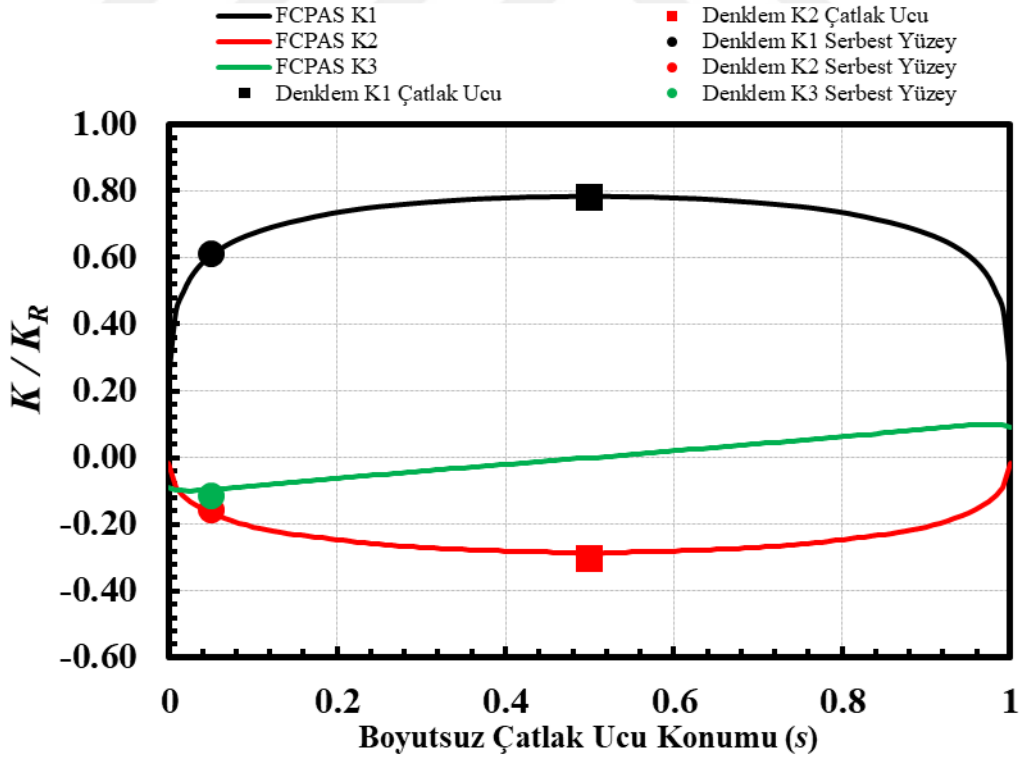
Şekil 3.10. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.4, *a/c*=0.4, *a/t*=0.2, α=40°.



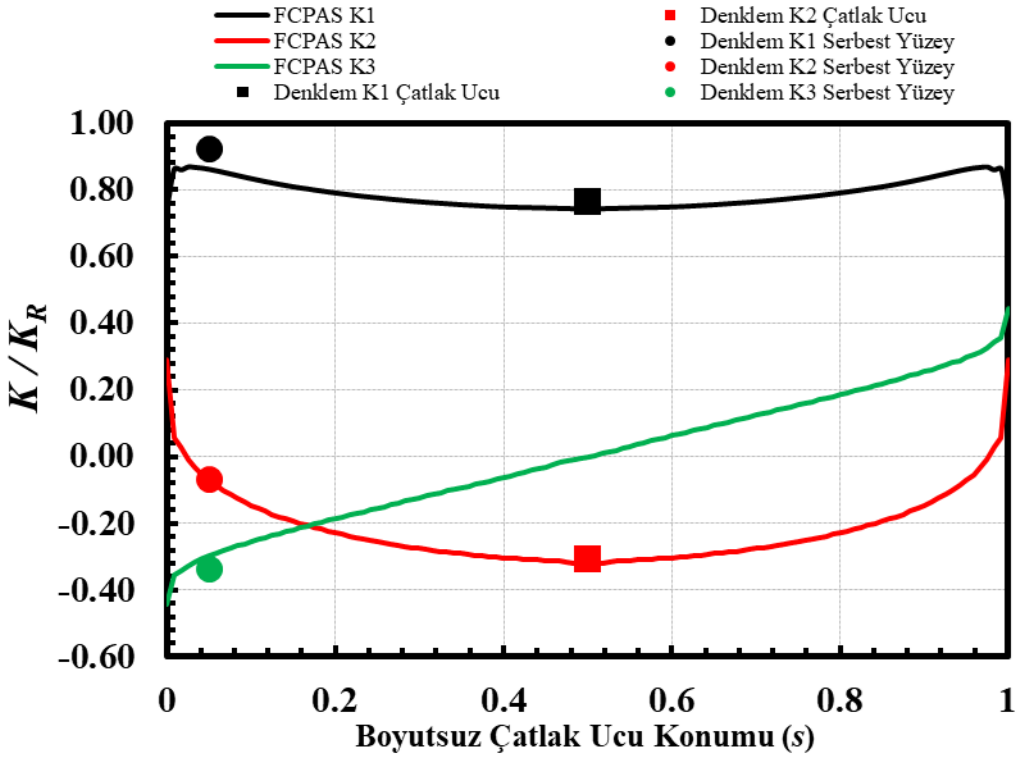
Şekil 3.11. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.4, *a/c*=0.4, *a/t*=0.2, α=65°.



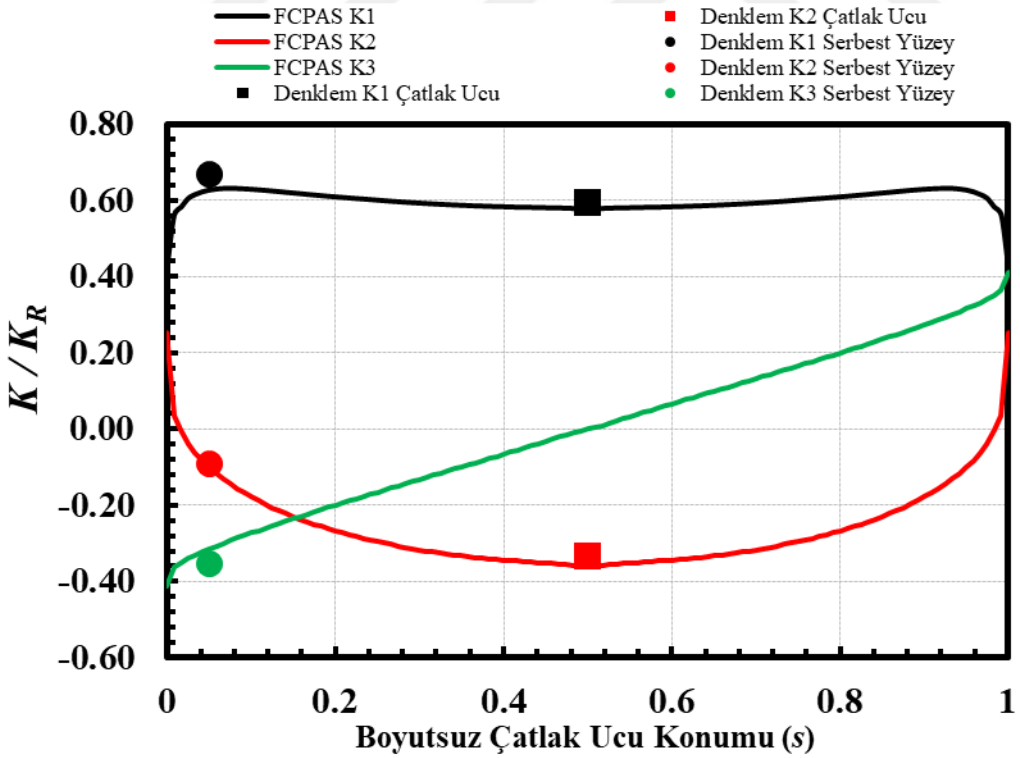
Şekil 3.12. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.4, *a/c*=0.4, *a/t*=0.4, *α*=25°.



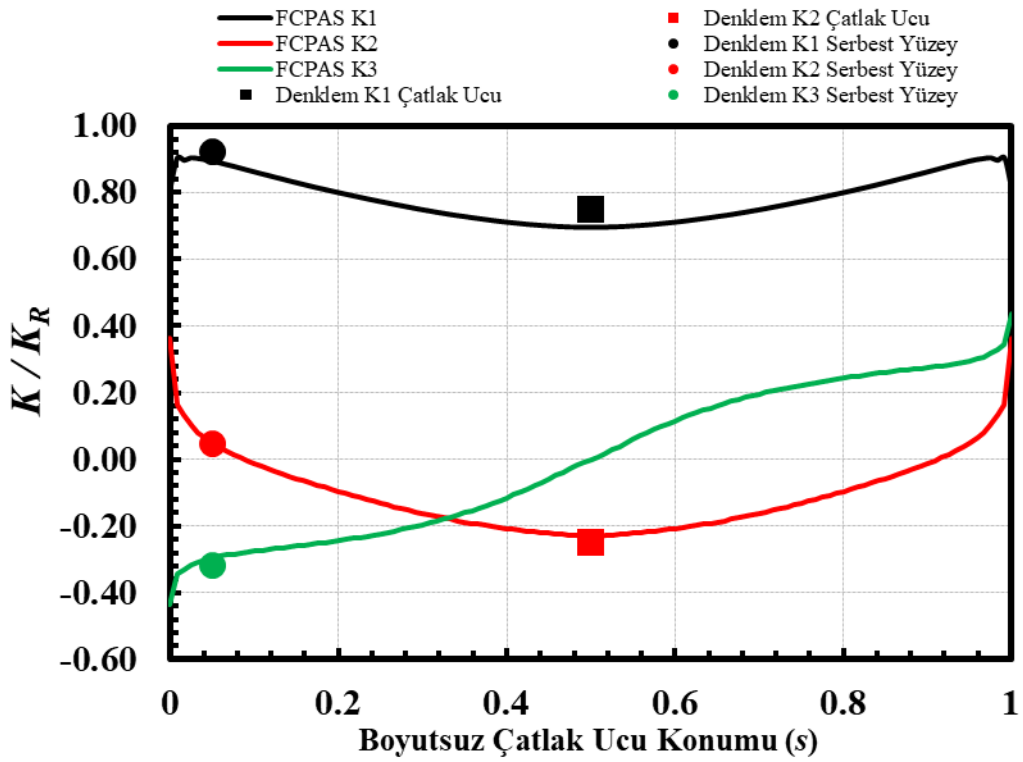
Şekil 3.13. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.4, *a/c*=0.4, *a/t*=0.4, *α*=35°.



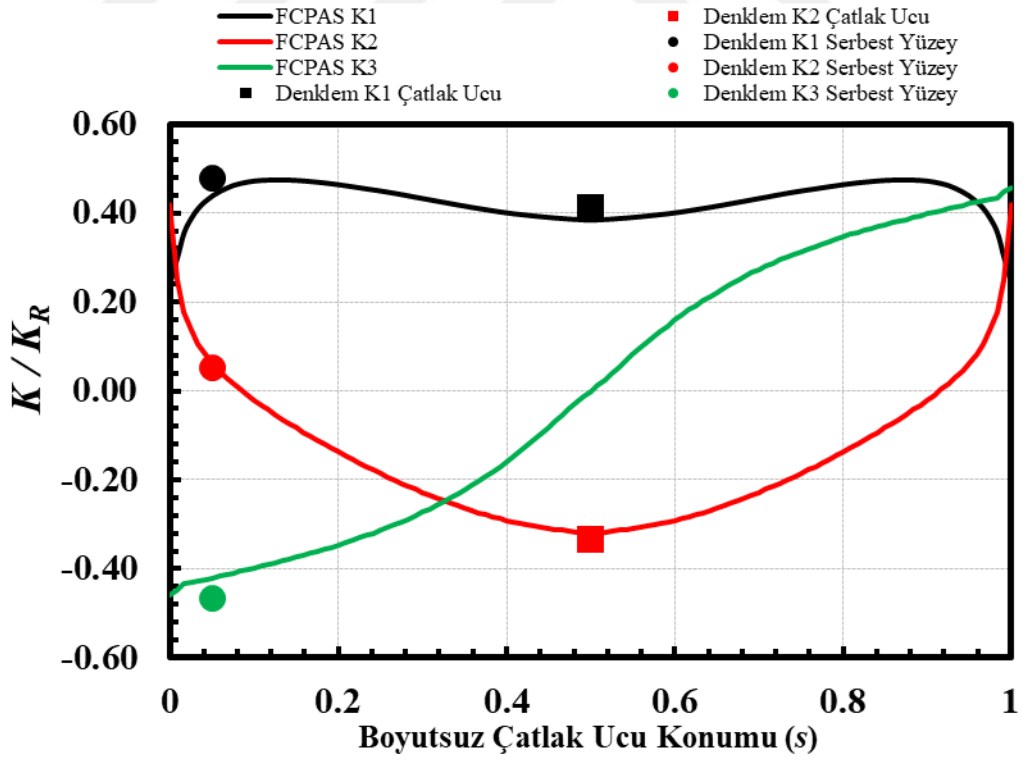
Şekil 3.14. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.4, *a/c*=0.8, *a/t*=0.6, *α*=35°.



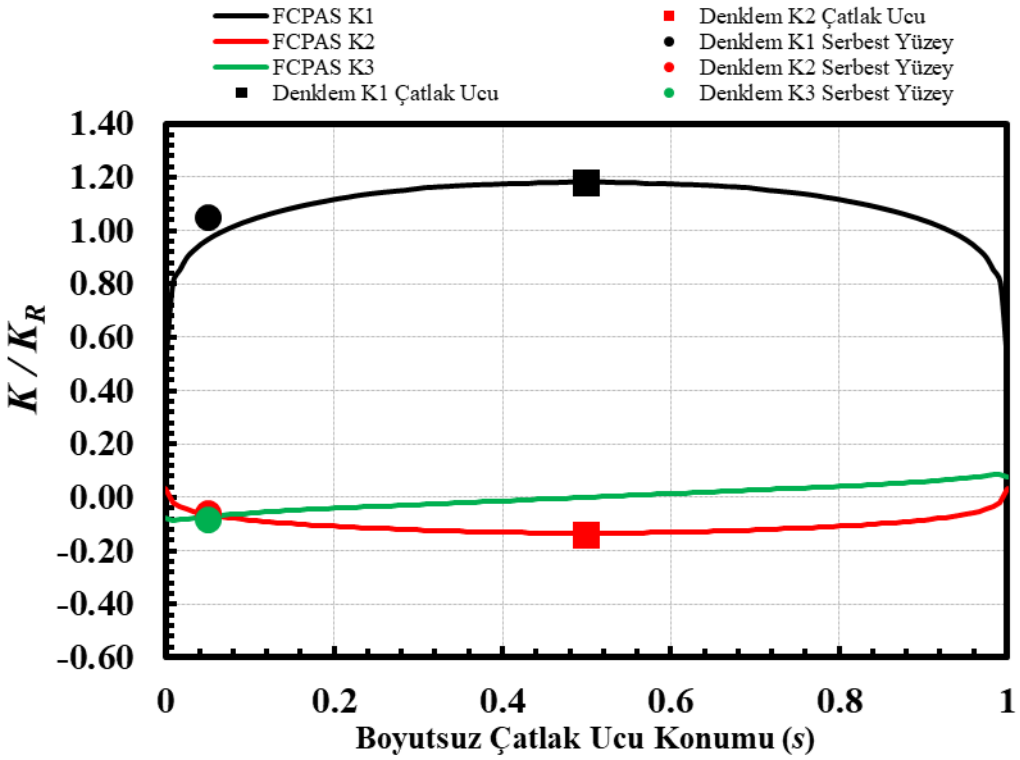
Şekil 3.15. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.4, *a/c*=0.8, *a/t*=0.6, *α*=50°.



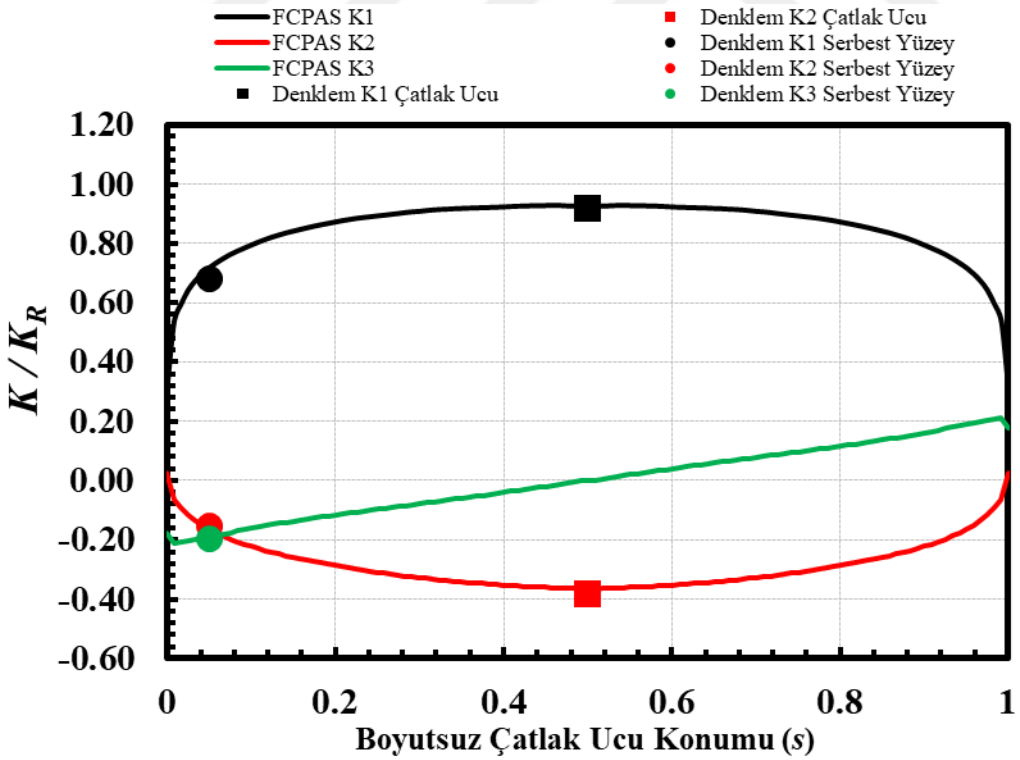
Şekil 3.16. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.4, *a/c*=1.25, *a/t*=0.2, *α*=25°.



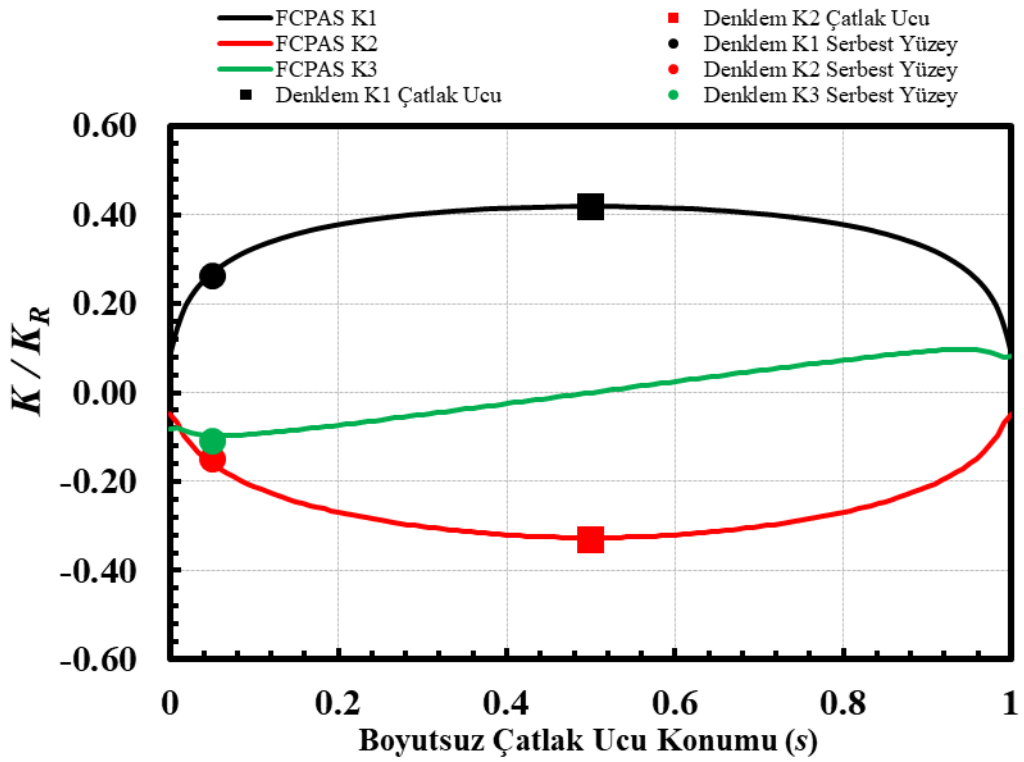
Şekil 3.17. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.4, *a/c*=1.25, *a/t*=0.2, *α*=55°.



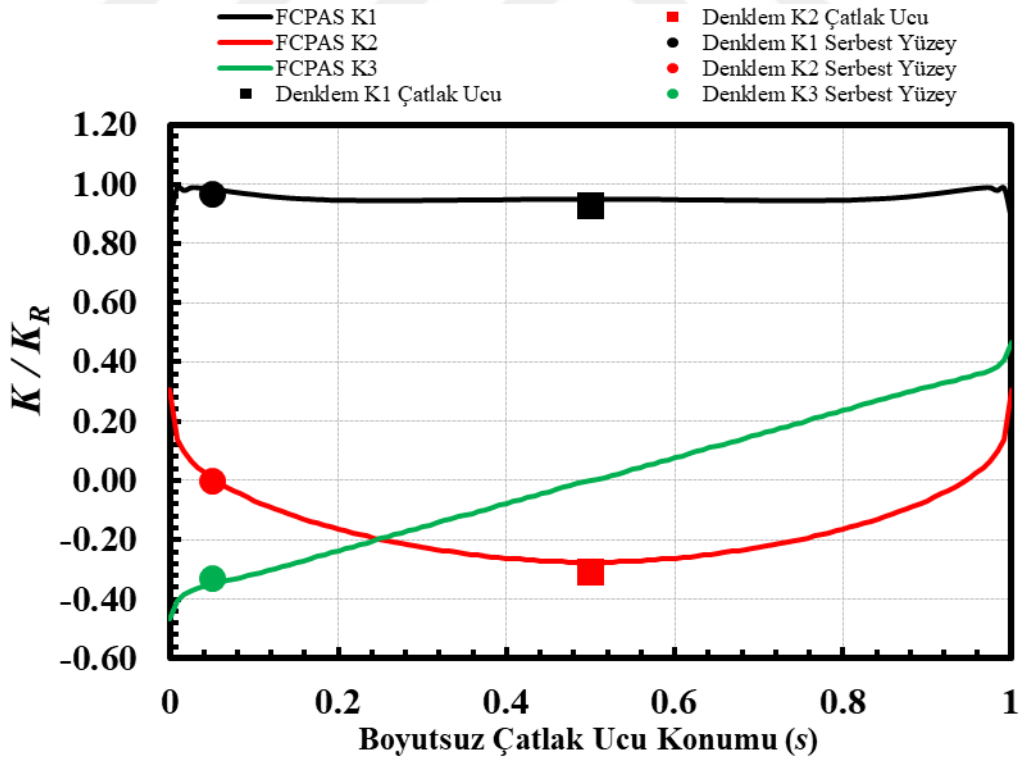
Şekil 3.18. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=0.4, *a/t*=0.6, *α*=10°.



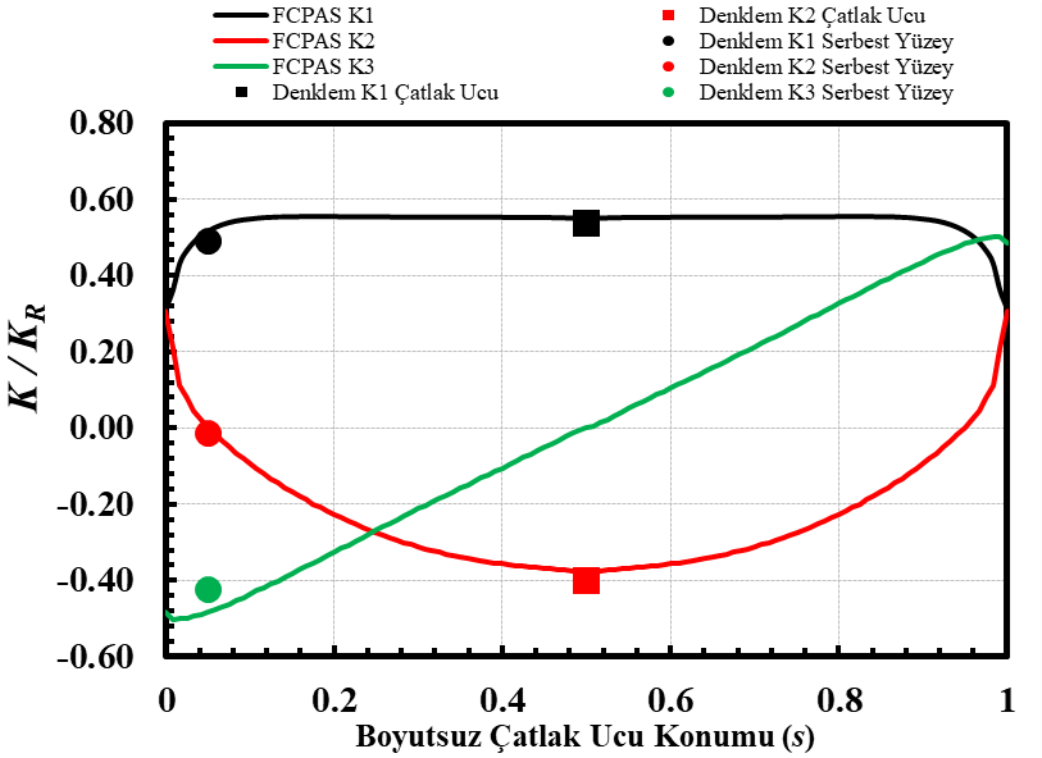
Şekil 3.19. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=0.4, *a/t*=0.6, *α*=35°.



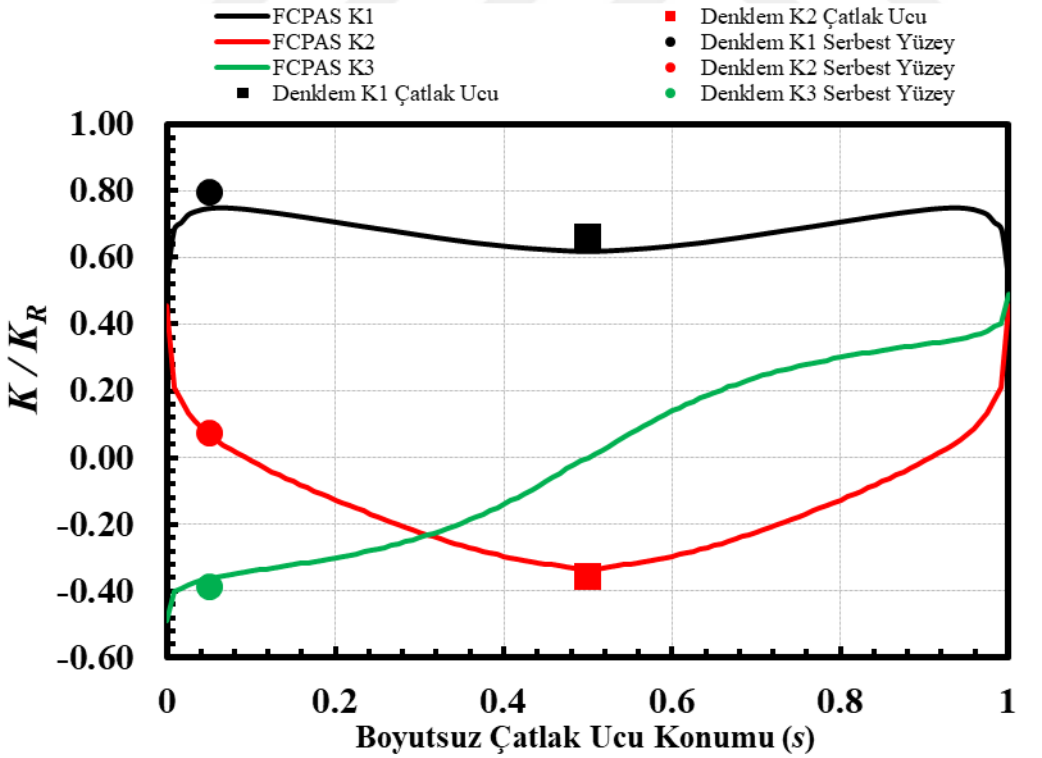
Şekil 3.20. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=0.4, *a/t*=0.6, *α*=65°.



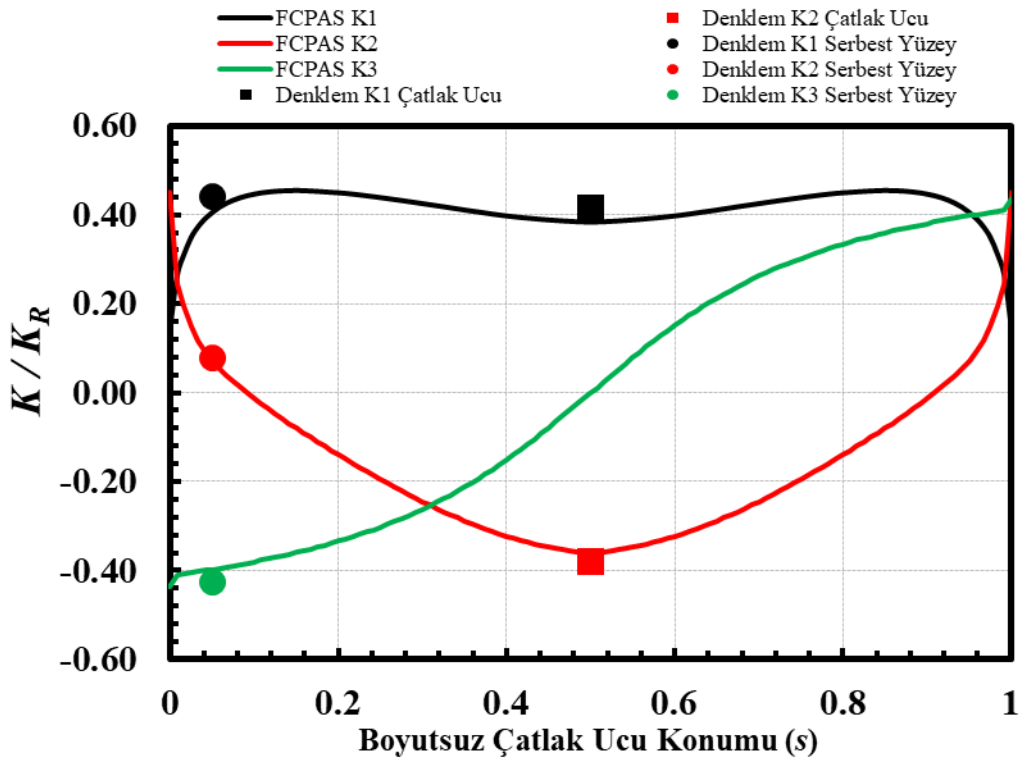
Şekil 3.21. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=0.8, *a/t*=0.4, *α*=25°.



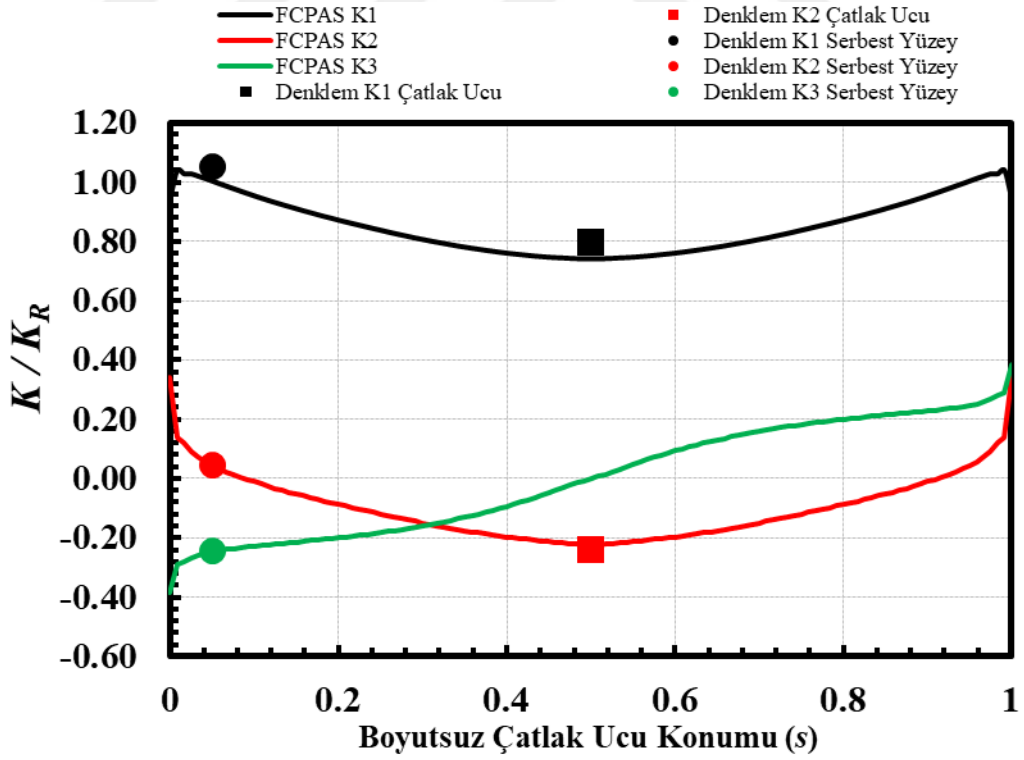
Şekil 3.22. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=0.8, *a/t*=0.4, *α*=55°.



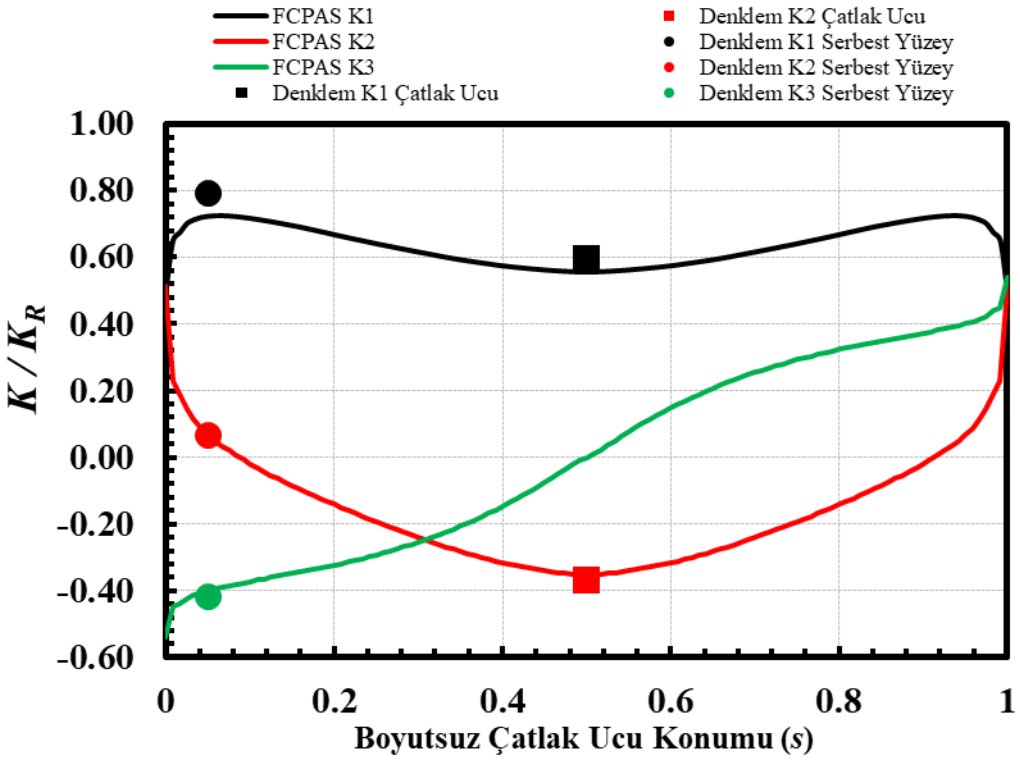
Şekil 3.23. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=1.25, *a/t*=0.2, *α*=35°.



Şekil 3.24. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=1.25, *a/t*=0.2, *α*=55°.



Şekil 3.25. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=1.25, *a/t*=0.6, *α*=20°.



Şekil 3.26. Boyutsuz GŞF dağılımları karşılaştırması; *Ri/Ro*=0.8, *a/c*=1.25, *a/t*=0.6, α=40°.

Ara değer parametrelerinin FCPAS sonuçları ile empirik denklem sonuçlarını kıyaslanması Tablo 3.12.'de verilmişti. Bütün sonuçlara bakıldığında çatlak ucu dip noktalarında, maksimum yüzde farkların K_1 için % 7.9, K_2 için % 9.9 olduğu görülmektedir.

Tablo 3.13.'e bakıldığında; serbest yüzey noktalarında maksimum yüzde farklarının K_1 için % 9.3 olduğu görülmektedir. K_2 için bazı modellerde yüzde farkların ortalamaya göre yüksek görülmüş olup model 3'te %22, model 4'te 24.4, model 19'da 111.3, model 20'de % 2228.6; K_3 için yüzde farklar incelendiğinde model 7'de %25, model 8'de % 20.8 olduğu görülmektedir. Bu modellerin analiz sonuçları ile emprik denklem sonuçları sıfıra çok yakın değerlerdir. Bu nedenle her iki değer arasındaki farklar bindelik değerdedir. Bu durum, kıyaslama tablosundaki yüzde fark değerlerinin ortalama değerlere göre fazla olmasının nedenini açıklamaktadır. Bu özel durumların dışında K_2 ve K_3 serbest yüzey noktası GŞF değerleri arasındaki farkın maksimum %14 olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak Şekil 3.3-3.26.'daki grafiklere bakıldığında, FCPAS çözücüsünün GŞF sonuçları ile geliştirilen empirik denklemlerin GŞF değerlerinin yakın sonuçlar

verdiği ve dolayısıyla geliştirilmiş olan empirik denklemlerin doğrulanmış olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma kapsamında, FCPAS programı kullanılarak dış yüzeyinde eliptik dönmüş yüzey çatlağı bulunan, içi boş ve eğilme gerilmesine maruz silindirlerin karışık mod kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Model parametrelerine bağlı olarak 6 farklı dönme açısı için gerilme şiddet faktörleri. hesaplanmıştır. Ayrıca dönme açısının etkisi dışında diğer model parametrelerinin (*Ri/Ro, a/c, a/t*) gerilme şiddet faktörlerine etkileri de irdelenmiş olup, analiz sonuçları kıyaslamalar içeren grafikler halinde verilmiştir. 600 farklı modelin analizi ile elde edilen analiz sonuçları kullanılarak oldukça geniş bir gerilme şiddet faktörü çözüm kütüphanesi oluşturulmuştur. Bu çözüm kütüphanesi kullanılarak, problemde var olan her bir mod için serbest yüzey noktası ve çatlak ucu derinlik noktası değerlerini tahmin eden empirik denklemler de geliştirilmiştir. Çalışma sonunda varılan sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

1. K_1 gerilme şiddet faktörünün, maksimum değerleri dönme açısına göre 0°'de oluşmaktadır. Dönme açısı değeri arttıkça boyutsuz mod-I gerilme şiddet faktörü değerinin azaldığı görülmüştür. Diğer parametreler sabit iken *a/t* oranının artmasıyla çatlak ucu derinlik noktası değerinin azaldığı, serbest yüzey noktası değerinin ise arttığı görülmüştür. Diğer parametreler sabit iken *a/c* oranının 0.25'ten 2'ye doğru artması durumunda serbest yüzey noktası ve çatlak ucu derinlik noktası değerlerinin azaldığı görülmüştür. Diğer parametreler sabit iken *Ri/Ro* oranının büyümesi durumunda çatlak ucu derinlik noktası değerinin arttığı, serbest yüzey noktası değerlerinde ise düşüş olduğu görülmüştür.
2. K_2 gerilme şiddet faktörü değerleri, yüzey çatlağının dönme açısı (α=0°) sıfır olması durumunda sıfırdır. Çatlak ucu derinlik noktası maksimum değerlerin 45°'de olduğu görülmekte olup 60°, 30°, 75°, 15° şeklinde giderek azalmaktadır. a/c oranının 0.25'ten 2'ye doğru artması durumunda çatlak ucu derinlik noktası değerinin azaldığı görülmüştür. Serbest yüzey noktası ve çatlak ucu derinlik noktası değerleri için a/t ile Ri/Ro değişimine bağlı olarak yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür.

3. K3 gerilme şiddet faktörü değerleri, yüzey çatlağının dönme açısı ($\alpha=0°$) sıfır olması durumunda sıfırdır. Maksimum değerlerin 45°'de olduğu görülmekte olup 60°, 30°, 75°, 15° şeklinde giderek azalmaktadır. a/c oranının 1 olması durumunda serbest yüzey noktası değerinin maksimum olduğu görülmüştür. Serbest yüzey noktası değerleri için a/t ile Ri/Ro değişimine bağlı olarak yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür.

4. Geliştirilen empirik denklemlerin ara değer modelleri ile doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Parametrelerin ara değerlerini içeren modellerin analiz sonuçlarından elde edilen çatlak ucu derinlik noktası değerleri ile denklem sonuçları arasındaki farkın %10'un altında kaldığı, serbest yüzey noktası değerlerinin ise Bölüm 3.3'te açıklanan durumlar dışında %15'in altında kaldığı görülmüştür

KAYNAKLAR

[1] Yayla P., (2019) Kırılma Mekaniği (Fracture Mechanics), Birsen Yayınevi 2. BASKI.

[2] Erdogan F., (2000), Fracture mechanics, International Journal of Solids and Structures 37, pp. 171-183.

[3] Anderson T. L., (2017) Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Fourth Edition, c. 76.

[4] Coêlho, G. C., Silva, A. A., Santos, M. A., Lima, A. G. B. ve Santos, N. C. "Stress Intensity Factor of Semielliptical Surface Crack in Internally Pressurized Hollow Cylinder—A Comparison between BS 7910 and API 579/ASME FFS-1 Solutions," Materials, vol. 12, no. 7, Art. no. 7, Jan. 2019, doi: 10.3390/ma12071042.

[5] Raju I. S. and Newman J. C., (1986) Stress intensity factors for circumferential surface cracks in pipes and rods under tension and bending loads, Fracture mechanics: vol. 17., ASTM STP 905 Underwood J.H., Chait R., Smith C. W., Wilhem D.P., Andrews W. A. and Newman J. C., Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.789-805.

[6] Barrinaya M.A., Alfiyuranda M. N. , Ramezani M., Putra I. S. , Ramesh S., Kadarno P., Hastutya S. and 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 10. Pp.399-406.

[7] Fu G., Yang W., ve Li C. Q., (2017) Stress intensity factors for mixed mode fracture induced by inclined cracks in pipes under axial tension and bending, Theor. Appl. Fract. Mech., c. 89, pp.100-109.

[8] Ramezani M.K., Purbolaksono J., Andriyana A. , Ramesh S. , Putra I.S., (2018) Empirical solutions for stress intensity factors of a surface crack in a solid cylinder under pure torsion, Engineering fracture mechanics vol. 193 pp.122-136.

[9] Fakhri O. M., Kareem A K, Ismail A. E., Jamian S., Mohammed Najeh Nemah, (2019), Mode I SIFs for internal and external surface semi-elliptical crack located on a thin cylinder, Test engineering and management vol. ISSN: 0193-4120 pp. 586 – 596.

[10] ANSYS, Version 12.0. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA, 2009.

[11] "CEFM Lab Web Page". http://www.cefmlab.sakarya.edu.tr/computational_capabilities.htm (Erişim Tarihi: 26 Kasım 2022).

[12] Ayhan, A. O., & Nied, H. F.(2002), Stress intensity factors for three-dimensional surface cracks using enriched finite elements. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 54(6), 899-921.

[13] I. Minitab, “MINITAB release 17: statistical software for windows”, Minitab Inc USA, c. 371, 2014.

[14] ’’Acedemia Web Page’’ https://www.academia.edu/42734174/Regresyon_Analizi_Varsay%C4%B1mlar%C4%B1 (Erişim Tarihi: 20.05.2023)

[15] ’’Minitab Web Page’’ https://blog.minitab.com/en/adventures-in-statistics-2/regression-analysis-how-do-i-interpret-r-squared-and-assess-the- goodness-of-fit (Erişim Tarihi: 20.05.2023)

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Muhammet ÇALIK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2015, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** **:** Devam ediyor, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Anabilim Dalı, Makine Tasarım ve İmalat

MESLEKİ DENEYİM

- 2020-halen Ark Pres Emniyet Kemeri AŞ.'de araştırma ve geliştirme mühendisi olarak çalışıyor.
- 2016-2020 Neser Metal Makine İmalat İnş. Taah. Tic. Ltd. Şti.'de tasarım mühendisi olarak çalıştı.
- 2014-2016 Türk Pirelli Lastikleri A.Ş.'de kalite mühendisi olarak çalıştı.