

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NÜKLEER REAKTÖR BASINÇ KABI NOZULUNDAKİ KÖŞE ÇATLAKLARININ
KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ABDURREZZAK BOZ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. OĞUZHAN DEMİR

BİLECİK, 2022

10423794

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NÜKLEER REAKTÖR BASINÇ KABI NOZULUNDAKİ KÖŞE ÇATLAKLARININ
KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ABDURREZZAK BOZ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. OĞUZHAN DEMİR

BİLECİK, 2022

10423794

BEYAN

“Nükleer Reaktör Basınç Kabı Nozulundaki Köşe Çatlaklarının Karışık Mod Kırılma Analizleri” adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	
		X	
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Abdurrezzak BOZ

.../.../2022

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının tüm aşamalarında akademik bilgi birikimini esirgemeyen, her zaman iletişime açık olup sorularımı cevaplayan danışmanım Sayın Doç. Dr. Oğuzhan Demir'e ve ailesine teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca derslerini almış olduğum, tüm öğretmenlerime ve akademisyenlere şükranlarımı sunarım.

Kırılma analizlerini gerçekleştirdiğim FCPAS sonlu elemanlar yazılımı geliştiricisi Sayın Prof. Dr. Ali Osman Ayhan'a ve bu programın gelişimine katkı sağlamış herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında analizlerin daha kısa sürede gerçekleştirilmesi için yüksek işletim sistemine sahip bilgisayar imkânı sağladığından dolayı abim Abdurrahman Talha Boz'a, deneyimlerinden, fikir ve görüşlerinden istifade ettiğim eniştem ve ablama teşekkür ederim. Ayrıca ömrüm boyunca maddi manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen aileme ve aile büyükleri eşrafıma minnet ve hürmetlerimi sunuyorum.

Tez çalışmasını bitirmeme yakın basınçlı kaplar alanında yaptığım çalışmamın sanayide üretim aşamalarını görmemi sağlayan, bana kapılarını açan Kartal Bombe ve Basınçlı Kaplar SAN. TİC. A.Ş'ye ve tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Abdurrezzak BOZ

ÖZET

NÜKLEER REAKTÖR BASINÇ KABI NOZULUNDAKİ KÖŞE ÇATLAKLARININ KARIŞIK MOD KIRILMA ANALİZLERİ

Gerçek mühendislik yapı ve makine parçalarında üretim hataları, yapısal kusurlar, öngörülemeyen çevresel etkiler, çok eksenli gerilme durumları ve aşırı yüklemeler yapıda mikro çatlakların oluşmasına sebep olmakta ve mikro çatlaklar zamanla ilerleyerek makro çatlaklara dönüşmektedir. Çatlak kritik boyuta ulaştığı zaman kararsız bir şekilde ani ilerleyerek kırılma gerçekleşmektedir. Çatlaklı bir yapının farklı yük ve sınır şartları altında nasıl davranacağını bilmesi, olası facia ve kazaların önüne geçilmesi için önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında, AP1000 reaktör basınçlı kabında nozul – silindir bölgesinde farklı boyutlardaki üç boyutlu yarı eliptik köşe çatlaklarının farklı eğim ve dönme açılarında karışık mod kırılma analizleri gerçekleştirilerek çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörleri, K_I , K_{II} ve K_{III} elde edilmiştir. Elde edilen gerilme şiddet faktörü değerlerini kullanarak empirik denklemler geliştirilmiştir. Geliştirilen empirik denklemler literatürdeki çalışmalara uygulanarak geliştirilen denklemlerin ve nümerik analiz sonuçlarının doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kırılma Analizi, Gerilme Şiddet Faktörü, Karışık Modlu Kırılma, Basınçlı Kap, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

MIXED MODE FRACTURE ANALYSES FOR CORNER CRACKS IN NUCLEAR REACTOR PRESSURE VESSEL

In real engineering structures and machine parts, manufacturing defects, structural defects, unpredictable environmental effects, multi-axial stress conditions, and overloads cause micro cracks formation in the structure, and micro cracks propagate over time and turn into macro cracks. When the crack reaches a critical size, it suddenly becomes unstable and fracture occurs. Knowing how a cracked structure will behave under different load and boundary conditions is essential to prevent possible disasters and accidents. In this thesis, mixed mode fracture analyses for three-dimensional semi-elliptical corner cracks with different sizes and different inclination and deflection angles in the nozzle-cylinder region of the AP1000 reactor pressure vessel were performed, and stress intensity factors, K_I , K_{II} and K_{III} , along the crack front were obtained. Empirical equations were developed using the obtained stress intensity factor values. The developed empirical equations were applied to the studies in the literature, and the verification of the developed equations and numerical analysis results was carried out.

Keywords: Fracture Analysis, Stress Intensity Factor, Mixed Mode Fracture, Pressure Vessel, Finite Element Analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kırılma Mekanîği	3
1.2. Kırılma Mekanîği Tarihsel Gelişimi ve Karşılaşılan Hasarlar	5
1.3. Karışık Mod Kırılma Analizlerinin Önemi	10
1.4. Literatürde Yapılan Çalışmalar	10
2. MATERYAL VE METOT	14
2.1. Problem Tanımı.....	14
2.1.1. Çatlak Şekil Oranı (a/c).....	18
2.1.2. Çatlak Derinlik Oranı (a/t).....	18
2.1.3. Çatlak Eğim Açısı (β).....	19
2.1.4. Çatlak Dönme Açısı (α).....	21
2.2. Gerilme Şiddet Faktörlerinin Hesaplanması.....	23
3. NÜMERİK ANALİZLER	24
3.1. Sonlu Eleman Ağ Hassasiyet Analizi.....	24
3.2. Analiz Sonuçlarının Literatür ile Doğrulanması.....	26
3.3. Eğik Çatlak Analizleri	30
3.4. 0° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizleri.....	43

3.5. 45° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizleri.....	57
3.6. 90° Eğim açısında Dönmüş Çatlak Analizleri	70
4. EMİRİK DENKLEM GELİTİRİLMESİ VE DOĞRULANMASI	84
5. ANALİZLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE BULGULAR	87
5.1. Eğik Çatlak Analizlerinin İrdelenmesi.....	87
5.2. 0° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizlerinin İrdelenmesi.....	90
5.3. 45° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizlerinin İrdelenmesi.....	92
5.4. 90° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizlerinin İrdelenmesi.....	95
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	97
KAYNAKÇA	99

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Farklı a/c ve a/t oranlarına bağlı tanımlı köşe çatlaklarının ağ yapısı.....	19
Tablo 2.2. FCPAS için çözüm parametreleri.....	22
Tablo 3.1. Polinom eğrisinin katsayıları ve hesaplanan K_I değerleri	28
Tablo 4.1. Empirik denklemlerin, ara değerdeki parametreler için doğrulanması	86
Tablo 5.1. Eğik çatlak analizlerinde $a/c=1$, $a/t=0.0625$ durumunda mod-I GŞF empirik denkleminin açığa göre yüzde sapması.....	90



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. AP1000 muhafaza bileşenleri	2
Şekil 1.2. AP1000 reaktör soğutma sistemi	2
Şekil 1.3. Kırılma modları.....	4
Şekil 1.4. Kırılma modlarının çatlak ucu boyunca gösterimi	4
Şekil 2.1. Reaktör basınç kabının detay ölçüleri (mm).....	14
Şekil 2.2. Sınır koşulları ve basınç dağılımı	15
Şekil 2.3. Kırılma analiz için gerçekleştirilen işlem adımları.....	16
Şekil 2.4. RBK ağ yapısı; a) Genel modelde b) Alt-modelde c) Köşe çatlağı civarında d) Çatlağı tanımlayan hacimlerde.....	16
Şekil 2.5. Model üzerinde "a" ve "c" 'nin gösterilmesi.....	18
Şekil 2.6. Model üzerinde çatlak derinlik oranı(a/t) gösterilmesi.....	18
Şekil 2.7. Alt model ve düzlem üzerinde çatlak eğim açısının "β" gösterimi.....	20
Şekil 2.8. a/t=0.25, a/c=0.5 için yarı eliptik köşe çatlağının farklı açılarda görünümü	20
Şekil 2.9. Düzlem üzerinde dönme açısı "α" gösterimi	21
Şekil 2.10. a) Eğik çatlaklar b) 0° Eğim açısında dönmüş çatlaklar c) 45° Eğim açısında dönmüş çatlaklar d) 90° Eğim açısında dönmüş çatlaklar	22
Şekil 2.11. Çatlak ucundaki zenginleştirilmiş elemanların görünümü	23
Şekil 3.1. a/t=0.125, a/c=2 oranlarında 45° eğik çatlağın çatlak ucundaki farklı eleman boyutu değerlerinde mod-I gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımları	24
Şekil 3.2. a/t=0.125, a/c=2 oranlarında 45° eğik çatlağın çatlak ucundaki farklı eleman boyutu değerlerinde mod-II gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımları.....	25
Şekil 3.3. a/t=0.125, a/c=2 oranlarında 45° eğik çatlağın çatlak ucundaki farklı eleman boyutu değerlerinde mod-III gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımları	25
Şekil 3.4. Literatür verileri ile sonuçların doğrulanması	26
Şekil 3.5. Et kalınlığı boyunca çevresel gerilme dağılımı	27
Şekil 3.6. K _I GŞF değerlerinin farklı yöntemler ve literatür ile doğrulanması.....	28
Şekil 3.7. K _{II} GŞF değerlerinin karşılaştırması.....	29
Şekil 3.8. K _{III} GŞF değerlerinin karşılaştırması.....	29
Şekil 3.9. a/t=0.25, a/c=0.5 için mod-I gerilme şiddet faktörleri (α=0°)	30
Şekil 3.10. a/t=0.25, a/c=0.5 için mod-II gerilme şiddet faktörleri (α=0°).....	30
Şekil 3.11. a/t=0.25, a/c=0.5 için mod-III gerilme şiddet faktörleri (α=0°).....	31

Şekil 3.12. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)	31
Şekil 3.13. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	32
Şekil 3.14. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	32
Şekil 3.15. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)	33
Şekil 3.16. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	33
Şekil 3.17. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	34
Şekil 3.18. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)	34
Şekil 3.19. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	35
Şekil 3.20. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	35
Şekil 3.21. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)	36
Şekil 3.22. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	36
Şekil 3.23. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	37
Şekil 3.24. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)	37
Şekil 3.25. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	38
Şekil 3.26. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	38
Şekil 3.27. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)	39
Şekil 3.28. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	39
Şekil 3.29. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	40
Şekil 3.30. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)	40
Şekil 3.31. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	41
Şekil 3.32. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	41
Şekil 3.33. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)	42
Şekil 3.34. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	42
Şekil 3.35. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$).....	43
Şekil 3.36. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)	43
Şekil 3.37. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	44
Şekil 3.38. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	44
Şekil 3.39. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)	45
Şekil 3.40. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	45
Şekil 3.41. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	46
Şekil 3.42. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)	46
Şekil 3.43. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	47
Şekil 3.44. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	47
Şekil 3.45. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)	48

Şekil 3.46. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	48
Şekil 3.47. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	49
Şekil 3.48. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	49
Şekil 3.49. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	50
Şekil 3.50. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	50
Şekil 3.51. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	51
Şekil 3.52. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	51
Şekil 3.53. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	52
Şekil 3.54. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	52
Şekil 3.55. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	53
Şekil 3.56. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	53
Şekil 3.57. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	54
Şekil 3.58. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	54
Şekil 3.59. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	55
Şekil 3.60. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	55
Şekil 3.61. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	56
Şekil 3.62. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$).....	56
Şekil 3.63. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	57
Şekil 3.64. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	57
Şekil 3.65. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	58
Şekil 3.66. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	58
Şekil 3.67. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	59
Şekil 3.68. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	59
Şekil 3.69. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	60
Şekil 3.70. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	60
Şekil 3.71. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	61
Şekil 3.72. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	61
Şekil 3.73. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	62
Şekil 3.74. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	62
Şekil 3.75. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	63
Şekil 3.76. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	63
Şekil 3.77. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	64
Şekil 3.78. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	64
Şekil 3.79. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	65

Şekil 3.80. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	65
Şekil 3.81. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)	66
Şekil 3.82. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	66
Şekil 3.83. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	67
Şekil 3.84. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)	67
Şekil 3.85. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	68
Şekil 3.86. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	68
Şekil 3.87. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)	69
Şekil 3.88. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	69
Şekil 3.89. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$).....	70
Şekil 3.90. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)	70
Şekil 3.91. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	71
Şekil 3.92. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	71
Şekil 3.93. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)	72
Şekil 3.94. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	72
Şekil 3.95. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	73
Şekil 3.96. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)	73
Şekil 3.97. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	74
Şekil 3.98. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	74
Şekil 3.99. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)	75
Şekil 3.100. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	75
Şekil 3.101. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	76
Şekil 3.102. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)	76
Şekil 3.103. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	77
Şekil 3.104. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	77
Şekil 3.105. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)	78
Şekil 3.106. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	78
Şekil 3.107. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	79
Şekil 3.108. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)	79
Şekil 3.109. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	80
Şekil 3.110. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	80
Şekil 3.111. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)	81
Şekil 3.112. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	81
Şekil 3.113. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	82

Şekil 3.114. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)	82
Şekil 3.115. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	83
Şekil 3.116. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$).....	83
Şekil 4.1. Mod-I GŞF'lerinin $a/t=0.25$ 'de sabit, a/c 'nin değişken olması durumunda empirik denklemin doğrulanması	85
Şekil 4.2. Mod-I GŞF'lerinin $a/c=0.6$ 'da sabit, a/t 'nin değişken olması durumunda empirik denklemin doğrulanması	85
Şekil 5.1. Eğik çatlak analizlerinin GŞF K_I (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği	87
Şekil 5.2. Eğik çatlak analizlerinin GŞF K_{II} (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği	88
Şekil 5.3. Eğik çatlak analizlerinin GŞF K_{III} (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği.....	89
Şekil 5.4. Eğik çatlak analizlerinde ara değerlerde empirik denklemin doğrulanması.....	89
Şekil 5.5. 0° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_I (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği.....	90
Şekil 5.6. 0° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{II} (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği.....	91
Şekil 5.7. 0° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{III} (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği....	92
Şekil 5.8. a) Çatlağı tanımlayan elipsin hacimleri b) "VOVLAP" komutu ile kesişen hacimlerin ayrılması.....	93
Şekil 5.9. 45° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_I (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği....	93
Şekil 5.10. 45° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{II} (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği.	94
Şekil 5.11. 45° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{III} (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği	94
Şekil 5.12. 90° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_I (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği..	95
Şekil 5.13. 90° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{II} (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği.	95
Şekil 5.14. 90° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{III} (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği	96

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

RBK	: Reaktör basınç kabı
GŞF	: Gerilme şiddet faktörü
a	: Çatlak derinliğinin uzunluğu
c	: Yarı çatlak genişliğinin uzunluğu
t	: Nozulun merkezinden 45° açıdaki nozul – silindir bölgesindeki et kalınlığı
a/c	: Çatlak şekil oranı
a/t	: Çatlak derinlik oranı
β	: Çatlak eğim açısı
θ	: Parametrik çatlak ucu açısı
α	: Çatlak dönme Açısı
FCPAS	: (Fracture and Crack Propagation Analysis System - Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi)
K_I	: Mod-I gerilme şiddet faktörü
K_{II}	: Mod-II gerilme şiddet faktörü
K_{III}	: Mod-III gerilme şiddet faktörü
APDL	: (ANSYS Parametric Design Language-ANSYS Parametrik Tasarım Dili)
MAPDL	: (Mechanical ANSYS Parametric Design Language-Mekanik ANSYS Parametrik Tasarım Dili)
LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
HDKM	: Hesaplamalı ve Deneysel Kırılma Mekaniği
EPKM	: Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği
CTOD	: (Crack Tip Opening Displacement-Çatlak Ucu Açılma Yer Değişimi)
LOCA	: (Loss of Coolant Accident-Soğutucu Kaybı Kazası)
DBA	: (Design Basis Accident-Tasarıma Dayalı Kaza)
DEGB	: (Double-Ended Guillotine Break-Çift-Taraflı Giyotin Kırık)
PWR	: (Pressurized Water Reactor-Basınçlı Su Reaktörü)

1. GİRİŞ

Tarih boyunca savaşların arka plandaki temel nedeni enerji ve güç üzerine olmuştur. Dünyada artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte enerji tüketimi artmaktadır. Bu tüketimi karşılamak için insanlık zaman içerisinde fosil yakıtlardan, yenilenebilir enerji kaynaklarından, nükleer enerji ve geliştirilmekte olan yeni teknolojiler ile çözümler bulmaktadır.

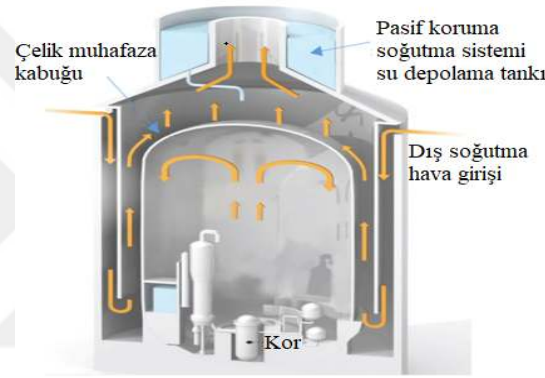
Ülkemiz için enerjide dışa bağıllığın azaltılması ve enerjide çeşitliliğin sağlanması önem arz etmektedir. Bu kapsamda Türkiye ile Rusya arasında ikili hükümetler arası anlaşmaya göre 4 adet VVER-1200/V-491 basınçlı su reaktörü ile 4800 MWe'lık enerji üretebilecek kapasiteye sahip Akkuyu Nükleer Güç Santrali kurulması planlanmıştır. VVER (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) tipi reaktörler batının Basınçlı Su Reaktörlerinin (PWR - Pressurized Water Reactor) Rusya versiyonudur. Bitirildiğinde Türkiye'nin elektrik ihtiyacının %5'ini karşılaması beklenmektedir. VVER-1000 modelinden gelen tecrübeyle yeni nesil VVER-1200 modeli geliştirilmiştir. VVER-1200 modeli geliştirilmesiyle birlikte daha uzun tasarım ömrü, gelişmiş pasif güvenlik sistemi ve veriminde artış sağlanmaktadır. VVER-1200 tipi reaktör hesaplamaları bilgisayar simülasyonları ve kâğıt üzerindedir. Farklı ülkelerde inşaatı devam eden VVER-1200 reaktörünün işletimde olan herhangi bir nükleer güç santrali bulunmamaktadır. Bu nedenle beklenmeyen santral arızaları veya öngörülemeyen fiziksel veya kimyasal süreçler nedeniyle yapım ve/veya işletim sırasında yeni ve beklenmeyen sorunlar ortaya çıkabilir (Kaya ve Göral, 2016: 434).

Ülkemizde kurulan nükleer enerji santralinin; hasar, soğutma çevrimi, termal, yapısal, radyasyon, deprem, kırılma, yorulma ömür tahmini, LOCA (Loss of Coolant Accident - Soğutucu Kaybı Kazası), DEGB (Double-Ended Guillotine Break - Çift-Taraflı Giyotin Kırık), DBA (Design Basis Accident - Tasarıma Dayalı Kaza), vb. analizlerinin yapılarak güvenilirliği sorgulanıp, gerekli iyileştirmeler için raporların akademi tarafından sunulması santralin yapısal bütünlüğü açısından önem arz etmektedir.

Her ne kadar mühendisliğini ve üretimini yüzde yüz yerli olarak yaptığınız bir ürün dahi olsa ARGE'sinde kullandığınız simülasyon, analiz ve yazılım programlarının yerli olmaması sadece sizi bir noktaya kadar taşımakta ve o teknolojiye ait gelişmelere yön vermenizi engellemektedir.

Bu kapsamda bu tez çalışmasında III+ nesil (geliştirilmiş) AP1000 reaktör basınç kabı için karışık mod kırılma analizleri Prof. Dr. Ali Osman Ayhan tarafından geliştiren FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System-Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi) sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Türkiye’de kurulan VVER-1200 reaktörü yerine AP1000 reaktörü literatür verileri ile karşılaştırma imkânı sağladığı için çalışma kapsamında tercih edilmiştir.

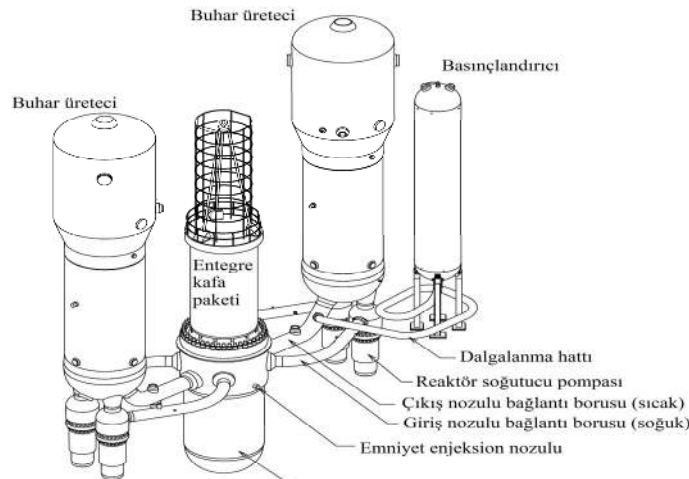
AP1000 reaktör muhafazası çift katmanlı yapıya sahiptir. İç tabaka silindirik çelikten dış tabaka ise betonarmedendir. Şekil 1.1’de reaktörün muhafaza bileşenleri gösterilmiştir. AP1000 nükleer reaktöründe oluşabilecek ciddi kazalarda kırılma olayı hidrojen, buhar ve havanın karışmasıyla hızlı türbülanslı yanma ve patlamayla birlikte içeri girerek radyoaktif maddelerin sızıntısına neden olabilmektedir (Sheykhi vd., 2017: 2).



Şekil 1.1. AP1000 muhafaza bileşenleri

Kaynak: (Sheykhi vd., 2017: 2)

Şekil 1.2’de AP1000 reaktör soğutma sistemi ve reaktör basınç kabı nozul bağlantıları gösterilmiştir. Bu çalışma reaktör basınç kabı nozulunda farklı boyut ve yönelimlere sahip köşe çatlaklarının kırılma analizlerini kapsamaktadır.



Şekil 1.2. AP1000 reaktör soğutma sistemi

Kaynak: (Schulz, 2006: 1549)

1.1. Kırılma Mekaniki

Tanım olarak kırılma; bilim ve teknolojiye, ham hali ile bozulmamış bir cismin veya yapının tamamen veya kısmen iki veya daha çok parçaya ayrılması olarak tanımlanabilmektedir. Genel olarak; bir cismin ayrılması, malzeme boyunca bir veya daha fazla çatlağın ilerlemesi ile gerçekleşmektedir. Gerçek mühendislik yapılarında; malzemede çatlak başlangıcını oluşturacak kusurlar, farklı boyutlardaki çatlaklar ve diğer kusurlar her zaman mevcuttur.

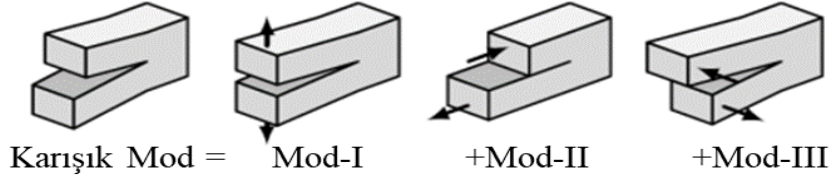
Kırılma mekaniki; katı cisimler mekaniklerinin alt dalı olarak mikro boyuttan makro boyuta çatlağın hangi durumlarda ilerleyeceğini, hangi durumlarda kırılmaya yol açacağını incelemektedir. Bunlara ilaveten; bir sonraki çatlak ilerleme profilinin tahmin edilmesini ve çatlağın yayılma hızını inceleyen, kırılma olayının malzemenin mekanik davranışına etkilerini araştıran bilim dalıdır.

Sürekli ortam mekanikinde bir katının mekanik davranışını tanımlamak için genellikle gerilme ve gerinimler kullanılmaktadır. Kırılma mekanikinde de çok önemli olan gerilme ve gerinim değerleri, kırılma süreçlerinin karakterizasyonu için her zaman doğrudan kullanılamaz. Bunun nedenlerinden biri; gerilme ve gerinimlerin çatlak ucu boyunca lineer analizlerde sonsuz olup lineer olmayan analizlerde çok fazla yüksek olmasıdır. Bu durum aynı zamanda sonlu elemanlar analizi ile doğrudan kırılma hasar analizlerinin gerçekleştirilemeyeceğini açıklamaktadır. İkinci neden ise; farklı uzunluktaki iki çatlaka aynı dış kuvvet uygulandığında farklı davranmasıdır. Artan yük altında uzun çatlak kısa çatlaka göre daha düşük bir gerilimde yayılmaya başlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı enerji salınım hızı ve gerilme şiddet faktörü gibi ek nicelikler, kırılma mekanikine kazandırılmasıyla birlikte ek hesaplama yöntemleri (teorik, deneysel, nümerik metodlar) geliştirilmiştir (Gross ve Seelig, 2017: 1).

Deneysel metotlara örnek olarak Fotoelastisite metodu ve Moire metodu verilebilir. Kompleks potansiyeller metodu ve Westergard metodu teorik metotlar arasındadır. Nümerik metotlara örnek olarak ise, İntegral transformları metodu, Green fonksiyonu metodu ve Sonlu elemanlar metodu verilebilir. Domain integral metodu, J integral metodu ve zenginleştirilmiş sonlu elemanlar metodu gerilme şiddet faktörü (GŞF) elde etmede kullanılan üç farklı sonlu elemanlar metodudur (Uslu, 2011: 5).

Bu çalışmada nümerik hesaplama yapabilen FCPAS paket programı kapsamında GŞF hesaplanması için zenginleştirilmiş sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmıştır.

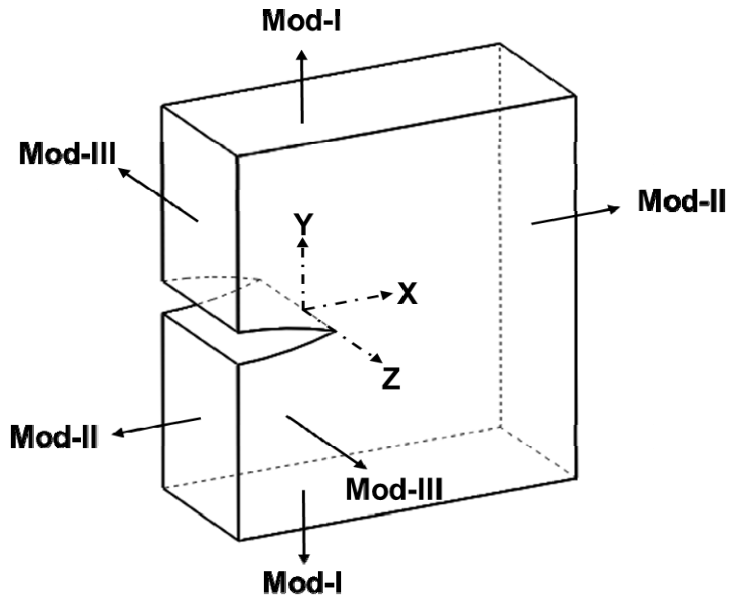
Kırılma mekaniğinde 3 tür zorlama şekli vardır. Bunlar; açılma modu (mod-I), düzlem içi kayma modu (mod-II), düzlem dışı yırtılma modudur (mod-III). Şekil 1.3'deki modele göre mod-I'de çekme kuvvetleri, mod-II'de düzlem içi kesme kuvvetleri, mod-III'te düzlem dışı kesme kuvvetleri etkilidir.



Şekil 1.3. Kırılma modları
Kaynak: (Wood vd., 2016:3)

Şekil 1.4'de çatlak ucunda tanımlı kartezyen koordinat sistemine göre açılma modunda çatlak yüzeyleri yüzeylere dik yönde olarak (y eksen) birbirinden uzaklaşmaktadır. Düzlem içi kayma modunda kayma gerilmeleri çatlak düzlemine paralel olarak (x eksen) ve çatlak ucuna dik olarak etki etmektedir. Düzlem dışı yırtılma modunda kayma gerilmeleri çatlak düzlemine (z eksen) ve çatlak ucuna paralel yönde etki etmektedir.

Mod-I yüklemesi sonucu çatlak ucunda oluşan gerilme şiddet fakötörü K_I , mod-II yüklemesi sonucu çatlak ucunda oluşan gerilme şiddet fakötörü K_{II} , mod-III yüklemesi sonucu çatlak ucunda oluşan gerilme şiddet fakötörü K_{III} olarak adlandırılmaktadır. Gerçek malzeme sınır şartlarında çatlak temel kırılma modlarının bir kombinasyonu olarak etki etmektedir.



Şekil 1.4. Kırılma modlarının çatlak ucu boyunca gösterimi

1.2. Kırılma Mekanikği Tarihsel Gelişimi ve Karşılaşılan Hasarlar

1860-1870 yılları arasında İngiltere’de demiryollarındaki trenlerin ray, aks ve tekerlerindeki arızalar yılda ortalama 200 kişinin ölümüne neden oldu. 1866 yılında Manchester tren istasyonunun çatısının dökme demir malzemede oluşan elemanlarındaki hasar sonucu çatı çöktü ve iki kişi öldü. 19.yy’da Montrö asma köprüsünde tekne yarışını izlemek için toplanan 700 kişi köprü zincirlerinin birinde görülen hasar sebebiyle çok sayıda insan hayatına kaybetti. 1887 yılında vagonlar arası tren çeki demirinin (kuplör) kırılması sonucu kaza meydana geldi. Üç kişinin ölmesine sebep oldu. 1898 yılında New York’ta büyük bir gaz tankının patlaması sonucu çok sayıda insan yaralandı ve öldü. Çevredeki binalarda büyük hasara sebep oldu. 19.yy son çeyreğinde Birleşik Karalık’ta her yıl ortalama 55 kazan patlaması gerçekleşti. Patlamalar çok sayıda can ve mal kaybına neden oldu (Broek, 1982).

1912 yılında Nisan ayında 'Tanrı Bile Batıramaz' denilen Titanik gemisi büyük bir buz dağına çarpma sonucu üç saatten kısa sürede battı. Titanik buz dağına çarptığında; gövde çeliği ve perçin bağlantılarında gevrek kırılma sonucu hasar meydana geldi. Gevrek kırılmaya sebep olan düşük sıcaklık, yüksek hızlı darbe yüklemesi ve çelikteki yüksek sülfür içeriğinin etkileri Titanik gemisinde görülmektedir. Geminin batmasının temel sebebi; o dönemde sünek - gevrek geçiş sıcaklığının bilinmediği, ısıtım işlem tekniklerinin mevcut olmayışı ve gövde çeliğinin soğuk - sıcak ortamdaki malzeme özelliklerine göre tasarım yapılmadığından kaynaklanmaktadır. Foecke'nin (1998) görüşüne göre, geminin inşası sırasında mühendisler için mevcut olan bilgi tabanı göz önüne alındığında o dönemde Titanik gemisinin yapımında hiçbir belirgin metalürjik hata yapılmamıştır. Kaza sonucu 2200 yolcu ve mürettebattan sadece 705 kişi hayatta kalmıştır.

1919 yılında Boston’da 13 ton ağırlığındaki bir şeker pekmezi tankı patladı ve bölgede patlamanın etkisiyle 2.3 milyon galon pekmez yayılmasıyla yıkıcı bir tsunami etkisi oldu. 100 yıl sonra patlamanın asıl sebebinin; pekmezin eklenmesi ve boşaltılması işleminden dolayı tankın alt kısmında yorulma başlangıç çatlağından kaynaklandığı anlaşıldı (McGinty, 2021).

Bu olayların çoğunluğunun yanlış tasarımdan kaynaklandığı sanılıyordu. Ancak asıl sebebi; malzeme içerisindeki düzensizlikler ve mikro boşlukların yük altında başlangıç çatlağını oluşturması ile çatlak kırılana kadar çatlağın ilerleyip, büyümesinden kaynaklandığı yıllar sonra anlaşıldı.

Tarihsel açıdan yorulma arızaları ilk defa periyodik dış yüklemeye maruz kalan tren aksları ve buharlı motor bileşenlerinde gözlemlenmiştir. Wöhler 1852- 1870 yılları arasında ilk sistematik deneyleri gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmalar sonucunda 1900'lü yıllarda yorulma çatlak oluşum mekanizmasını optik mikroskop kullanarak gözlemlemiştir (Kashyzadeh, 2020).

Inglis (1913) ve Kolosoff (1914) uniform eksenel gerilmeye maruz kalmış sonsuz genişlikte ve eliptik delik içeren plakadaki, eliptik delik boyutları ile gerilme dağılımının ilişkisini teorik olarak hesaplamışlardır.

Griffith (1921) çatlak içeren sonsuz bir plakanın gerinim enerjisinin hesaplanmasında Inglis tarafından elde edilen çözümler kullanmıştır. Griffith Lineer elastik, izotropik ve gevrek malzemeler için düzlem gerilme durumunda enerji denge denklemleri ile teorisini ortaya koymuştur. Bu teoriye göre farklı çatlak yüzeylerinin oluşması için minimum bir enerjiye ihtiyaç vardır ve çatlak içeren sonsuz bir plakada çatlak “a” kadar büyüdüğünde, plakanın elastik gerinim enerjisi azalmaktadır (Griffith, 1921). Griffith teorisini, önceden çatlak içeren cam problemine uygulamıştır. Böylelikle literatürdeki ilk başarılı kırılma analizi olması sebebiyle önde gelen kırılma mekaniği uzmanları tarafından Griffith, kırılma mekaniğinin başlatıcısı olarak görülmektedir. Ne yazık ki genç yaşta yaptığı çalışmalar o dönem önemslenmemiştir.

Inglis'in çalışmaları makro düzeyde, delik, çentik, kesit değişimi ve keskin köşelerde gerilme yığılması olduğunu göstermekteyken, Griffith ise yaptığı çalışmalarda, teorik mukavemet ile deneysel mukavemet değerleri arasında ciddi farkın mikro düzeyde çatlaklardan, süreksizliklerden ve boşluklardan kaynaklandığı ispat etmiştir (Yayla, 2019: 29).

Inglis ve Griffith'in çalışmaları sonucu görüldü ki çatlak ucu bölgesinde gerilme sabit değildir. Griffith çalışmalarında cam levhanın kırılma yükünü, çatlağın uzunluğunun kareköküyle ters orantılı olduğunu kanıtlarken, kesin bir sonuç için çatlak ucu gerilme dağılımının gerektiği anlaşılmaktaydı.

Griffith yaklaşımı, malzemelerin akma dayanımında plastik bölgenin küçük ($r_p/a < 0.02$) olduğu durumlarda kullanılabilir. Dolayısıyla metal malzemeler için kullanılamamaktadır. Bu konu üzerine çalışan Hollomon ve Zener (1944), Griffith'in yaklaşımını geliştirerek metal malzemelerin gevrek kırılması problemlerinde uygulamışlardır.

Westergaard (1939), çatlak içeren sonsuz bir plakada eş eksenli gerilme durumunda kartezyen koordinatları karmaşık sayı olarak kullanılmıştır. Airy gerilme fonksiyonları ile sonsuz bir plakadaki bir çatlağın çözümünü gerilme bileşenlerinin fonksiyonu olarak ifade etmiştir.

Orowan (1945; 1949) ve Irwin (1948) sünek kırılma durumunda plastik deformasyonun etkisini gösteren çalışmalarda bulunmuştur.

1950’li yıllarda Irwin, Griffith’in enerji dengesi yaklaşımına plastik gerinim enerjisini ilave ederek Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği’nin (LEFM) gelişmesine katkıda bulunmuştur. Bu yaklaşımı göre; çatlak içeren sonsuz bir plakada çatlak “ Δa ” kadar büyüdüğünde plakanın toplam enerjisi (elastik gerinim enerjisi + plastik gerinim enerjisi) azalacaktır. Bu sayede çatlak uzunluğundaki bir artış için gereken yüzey enerjisini hesaplamıştır. Yüzey enerjisinin, kritik enerji salıverme miktarına (çatlak ilerleme enerjisine) ulaşıldığında çatlak ilerlemesinin gerçekleştiğini ortaya koymuş ve bunu bir malzeme sabiti olarak “G” tanımlamıştır (Perez, 2004: 35).

Irwin (1957), Westergaard’ın eş eksenli gerilme durumunda sonsuz bir plakadaki bir çatlak probleminin kesin çözümünü basite indirgeyerek, çatlak ucu bölgesinde yaklaşık çözüm için gerilme fonksiyonlarını formüle etmiştir. Kesin çözümü yaklaşık çözüme çevirmesindeki amaç, kesin çözümün içinde çatlağın ne kadar hızlı büyüyeceği ve hangi yönde ilerleyeceğinin saklı olmasıydı. Griffith’in yaptığı araştırmalarda elde edilen çatlak ucundaki gerilmenin $\sqrt{\pi a}$ ile ters orantılı olduğunu hatırlayacak olursak, Irwin elde ettiği çatlağı tanımlayan asal gerilmelerin payında aynı ifadenin olduğunu görmüştür. Böylelikle çatlak ucundaki gerilmeyi tanımlayan üç yöndeki asal gerilmeleri, GSF’nin bir bileşimi olarak tanımlamıştır. Böylelikle Irwin tarafından GSF yaklaşımı ortaya atılmıştır.

Irwin bu çalışmalarından sonra “G” ile “K” arasında bağlantı olabileceğini görmüş ve enerji dengesi yaklaşımı ile gerilme şiddeti yaklaşımı için her iki durumda da çatlak ilerleme profilinin aynı olduğunu yaptığı çalışmalar ile literatüre kazandırmıştır. “G” ile “K” arasında bir ilişki olduğunun ispatı ile kırılmayı yöneten kritik malzeme özelliği olarak, enerji dengesi yaklaşımı için “G_c”, gerilme şiddeti yaklaşımı için “K_c” yi tanımlamıştır. Böylelikle lineer elastik kırılma mekanikliği disiplininin temeli oluşturulmuştur.

Malzeme özelliği olan “K_c” ‘yi tespit etmek için standart testlerin geliştirilmesiyle birlikte, farklı yük ve sınır şartları altında çatlaklı yapıların kırılma ve çatlak ilerleme davranışının anlaşılmasına yönelik önemli gelişmeler sağlanmıştır.

Dugdale (1960), Wells (1961), Barenblatt (1962) ve Bilby vd. (1963) yaptıkları çalışmalarda çatlak ucu bölgesinde kırılmadan önce plastik deformasyon oluşacağını belirterek yeni kırılma kriterleri önermişlerdir. Böylelikle elasto-plastik kırılma mekaniğinin (EPKM) başlangıcını oluşturmuşlardır. Wells, çatlak ucu açılma yer değişiminden (CTOD- Crack Tip Opening Displacement) yararlanarak plastik bölgeden etkilenen bölgenin tahmin edilmesi için model geliştirmiştir. Dugdale düzlem gerilme durumunda sonsuz elastik bir levha için çekme durumunda oluşan gerilmeleri ve çatlak ucundaki akmadan dolayı oluşan gerilmeleri eşitleyerek plastik bölgeyi tanımlamıştır. Dugdale, modeli mod-I yüklemesi altında doğru sonuçlar vermektedir. Dugdale'ın modeli, doğrusal olmayan kırılma analizlerinde kullanımı için Barenblatt tarafından önerilmiştir.

Bu gelişmelerden sonra Irwin (1968), düzlem gerilme şartlarında homojen elasto-plastik malzemeler için plastik bölge üzerindeki gerilmelerin, malzemenin akma gerilmesine eşit olduğunu varsayarak plastik bölgenin boyutlarını hesaplamıştır. Daha sonra gerilme dengesinin oluşabilmesi için çatlak ucunda plastik akış meydana geleceğini ve bu akışın plastik bölgeyi büyüteceğini hesap ederek, düzeltilmiş plastik bölge modelini ortaya koymuştur. Dugdale ve Irwin modelleri plastik bölgeyi birbirine yakın olarak tahmin etmektedirler.

Rice (1968), lineer olmayan elasto-plastik malzemeler için J integral metodunu geliştirmiştir. Rice yaptığı çalışmada iki boyutlu çatlak probleminde enerji salınımının bir ölçüsü olarak, çatlak ucu bölgesinin etrafında gerinim enerjisi yoğunluğunu çatlak yolundan bağımsız olarak tanımlamıştır. Griffith enerji yaklaşımı ile elde ettiği denklemlerdeki “G” ye benzer olan fakat bu sefer lineer olmayan malzemelerde de kullanılabilirliğini “J” parametresi ile sağlamıştır. Böylelikle lineer olmayan elasto-plastik kırılma mekaniğinin temelleri oluşturulmuştur.

1980 yılına kadar olan gelişmelerle birlikte kırılma mekaniği büyük ölçüde ilerleme sağlamıştır. Numerik metotların 1980 yılından sonra geliştirilmesiyle birlikte mühendislik problemlerinde kırılma mekaniği kriterlerinin uygulama alanları genişlemiştir. Uygulama alanları ulaşım alanında; otomobil, havacılık ve raylı sistemler iken enerji alanında; nükleer santraller, petrol çıkarma sistemleri, doğalgaz sistemleri, boru hatları ve basınçlı kaplarda olmuştur.

Nükleer santraller, kırılma mekaniğinin gelişimini başka hiçbir endüstrinin yapmadığı şekilde yönlendirmiştir. Kırılma mekaniği yöntemleri nükleer santrallerin bileşenlerinin emniyeti için önem arz etmektedir. Kumar vd., (1981) yaptıkları çalışmalarda ilk numerik elasto-plastik kırılma analizlerini nükleer buhar besleme basınçlı kapları ve bağlantıları için geliştirmişlerdir. Olasılıksal kırılma mekaniği yaklaşımı büyük ölçüde nükleer endüstrinin ihtiyaçlarına yanıt olarak geliştirilmiştir. Olasılıksal kırılma mekaniğinde, tek bir girdi yerine tüm girdiler olasılıksal bir dağılım olarak ifade edilmektedir. Sonuç olarak, arızaya etki eden parametrelerin olasılıksal olarak dağılımı elde edilmektedir. Böylelikle nükleer santralin bileşenlerindeki arızanın daha doğru tahmin edilmesi sağlanmaktadır. 1980'lerin en önemli sorunlarından biri nükleer santrallerin bileşenlerindeki basınçlı termal şok hasarlarıdır. Bu problemlerin çözümü için gerçekleştirilen yoğun çalışmalar kırılma mekaniğinde çatlak başlatma ve durdurma alanında kriterlerin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Nükleer santraller ile gelişen kırılma mekaniğinin diğer alanları ise, sürünme çatlak oluşumu ve zamana bağlı kırılma olmuştur (Landes, 1990).

Dünyada meydana gelen nükleer güç santrallerinde ciddi etkileri olan kazalar şunlardır:

“Three Mile Adası kazası Pennsylvania'daki nükleer enerji santralinin 2 no'lu reaktöründe 28 Mart 1979'da meydana gelmiştir. Kaza önce reaktörün ikinci soğutma sisteminde meydana gelen bir arıza ile başlamış ve birincil su soğutma sistemindeki bir vananın sıkışarak açık kalması ile büyük miktarda soğutma suyu soğutma sisteminin dışına kaçarak reaktör çekirdeğinde ısının yükselmesinde ve neticede reaktör çekirdeğinin kısmi erimesine yol açmıştır.

Çernobil nükleer kazası tarihin en kötü nükleer santral felaketi olarak adlandırılmaktadır. 26 Nisan 1986'da reaktörün 4. ünitesi rutin bakım nedeniyle kapatılmıştı. Ana istasyon elektrik güç desteği kalktığında acil güç kaynağı devreye girinceye kadar olan geçiş süresinde, reaktörün kendi donanımının çekirdeğini soğutmaya ve acil cihazlarını çalıştırmaya yeterli elektrik gücünü sağlama kabiliyetini sınamak için bir test gerçekleştirildi. Çalışanlar yeterli güvenlik önlemlerini almadan veya elektrik testinin riskleri konusunda operatörü uyuracak sistemleri çalıştırmadan testi başlattılar. Bu farkındalığın olmaması operatörlerin güvenlik prosedürlerinden uzaklaşan eylemler yapmalarına neden oldu. Sonuç olarak, ani güç dalgası patlama ve reaktörün hemen tümünün yıkımı ile sonuçlandı.

Fukushima Daiichi'de 11 Mart 2011 tarihinde Japonya'nın doğu kıyısında 9 şiddetinde tsunami yaratan bir deprem oldu. Deprem reaktörlerin dış güç kaynaklarını kesmişti. Deprem sonrası ortaya çıkan tsunami dalgası da santralin dayanmak üzere planlandığından daha yüksekti. Yedek jeneratörler çalışmadı ve reaktörün soğutma sistemi felce uğradı. Reaktör çekirdeğinde aşırı ısınan yakıt 12, 14 ve 15 Mart'ta reaktör binalarının üçünde ciddi hasara yol açan hidrojen patlamalarına neden oldu. Reaktör çekirdeklerinden üçünde bulunan yakıt eridi ve hasar görmüş reaktörlerden salınan radyonüklidler santral çevresindeki geniş bir alanı kontamine etti” (Günalp, 2017).

Three Mil Adası ve Çernobil Nükleer Santral kazaları sonucunda soğutucu kaybı kazası (LOCA - Loss of Coolant Accident) ve insan faktörü sorgulandı. Fukushima kazasında ise; doğal afetlerin nükleer santrallere etkileri sorgulanmıştır. Bu kapsamda yeni önlemler alınarak insan müdahalesi gerektirmeyen III. nesil (III+) pasif soğutma sistemli nükleer santral sistemlerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

1.3. Karışık Mod Kırılma Analizlerinin Önemi

Literatürde çoğu mühendislik problemi için mod-I problemleri üzerine odaklanılmıştır. Ancak gerçek mühendislik yapılarında ve endüstriyel uygulamalarda farklı yükleme ve sınır şartları nedeniyle çatlak dönme ve eğim açılarında yönlenme gösterebilmektedir. Çatlak ucunda farklı açılardaki sapma durumları için sadece basit mod-I kırılma analizlerinin yapılması yetersiz kalmaktadır. Bu gibi mühendislik problemlerinde karışık mod kırılma analizlerinin yapılması elzemdir (Demir, 2021) (Kurt, vd., 2022).

Saf mod-I yüklemesi altında sadece K_I oluşmaktadır. Fakat karışık mod-I/II açılı yükleme durumunda poisson oranına bağlı çatlak ucu boyunca ilave olarak mod-III aktif olup K_{III} oluşmaktadır (Demir, vd., 2017) (Demir vd., 2018) (Demir, vd., 2019). Karışık mod-I/III yüklemesi altında eğilme etkisinden dolayı ek olarak çatlak ucu boyunca mod-II aktif olup K_{II} oluşmaktadır (Ayhan ve Demir, 2019) (Ayhan ve Demir, 2021) (Yaren, vd., 2019). Bu durum karışık mod-I/II ve I/III problemlerini daha karmaşık hale getirmekte ve üç modun da aktif olduğu üç boyutlu karışık mod-I/II/III problemlerinin kırılma ve çatlak ilerleme mekanizmasının anlaşılmasını zorlaştırmaktadır.

Kırılma mekaniği literatüründe genelleştirilmiş bir eşdeğer gerilme şiddet faktörünün kabulü bulunmadığından karışık mod-I/II/III kırılma analizleri uygulamalarının literatüre kazandırılması önem arz etmektedir.

1.4. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Derby (1972), lineer elastik kırılma mekaniği disiplini, nükleer santrallerdeki basınçlı kaplardaki nozul köşe çatlakları için nozul şekil oranının önemini araştırmıştır. Bu kapsamda reaktör basınç kabını ölçeklendirerek epoksiden yapılmış hali ile köşe çatlağı bölgesinde gerinim ölçer (strain gage) yardımıyla deneysel olarak gerilmeleri hesaplamıştır. Mod-I yüklemesi altında çatlak derinliğinin nozul yarıçapı oranına bağlı gerilme şiddet faktörü sonuçlarını karşılaştırmıştır.

Ruiz (1973) ve Smith vd., (1977) birbirinden bağımsız yaptıkları çalışmalarda gerilmelerin doğrudan ölçülmesine olanak sağlayan fotoelastik gerilme dondurulması metodu ile nozul köşe çatlağının farklı a/T oranları için mod-I gerilme şiddeti faktörünü (K_I) hesaplamışlardır.

Besuner vd., (1977) kaynar su reaktörlerinde besleme suyu nozulunda paslanmaz çelik kaplamalı köşe çatlağında termal gerilmenin etkisiyle oluşan artık gerilmelerin iç basınç durumunda mod –I GŞF’ye etkilerini araştırmışlardır.

Smith vd., (1979) kaynar su reaktörlerinde nozul iç merkezine göre çatlak yöneliminin farklı açılarda olması durumunda a/T oranına bağlı GŞF'yi hesaplamışlardır. Bu çalışmada beklendiği gibi 0° durumunda GŞF'nin kritik olduğu ortaya konmuştur.

Miyamoto vd., (1983) kaynar su reaktörlerinde J integral metodu ile köşe çatlakları için yorulma çatlak ilerleme analizlerini gerçekleştirmiştir. Nozul köşesinde kaplama olması veya olmaması durumları için termal yük ve statik basınç altında çözümleri elde ederek literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırmıştır.

Gao vd., (1990) çalışmalarında Newman Raju GŞF denklemlerini köşe çatlakları için revize etmişlerdir. Newman Raju denklemlerindeki çatlak derinliği duvar kalınlığı (a/t) oranını köşe çatlakları için nozulun merkezinden 45° açıdaki çatlak derinliği ve et kalınlığı (a_{45}/T_{45}) oranı ile revize etmişlerdir. Basınçlı su reaktöründe köşe çatlakları için üç boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirerek fotoelastik yöntem kullanarak geliştirilen Newman Raju denklemlerini revize ederek elde edilen sonuçları Newman Raju denklemleri ile karşılaştırmışlardır.

Wang vd., (1992) 300MW bir reaktör basınç kabında köşe çatlakları için sonlu elemanlar analiz yöntemi ile çatlak ucu bölgesinde geçiş elemanları kullanarak farklı a/t oranlarında kavis yarıçapının çatlak ucu boyunca K_I GŞF'ye etkilerini incelemişlerdir. Çatlak ucu orta noktasında K_I GŞF'nin maksimum olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçları ASME Buhar Kazanı ve Basınçlı Kaplar Yönetmeliğinde yer alan K_I GŞF'nin analitik olarak hesaplanmasına yönelik denklem kullanarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıp literatürdeki üç boyutlu fotoelastik yöntem ile elde edilen sonuçları doğrulamışlardır.

Siegele vd., (1999) reaktör basınç kabında soğutucu kaybı kazası durumunda köşe çatlakları için J-integral ve GŞF yöntemiyle sonlu elemanlar analizinde alt-model yöntemi kullanarak çatlak ucu dağılımını sıcaklığın bir fonksiyonu olarak farklı çatlak geometrileri ve konumları için hesaplamışlardır.

Diamantoudis ve Labeas, (2005) basınçlı kaplar için yarı eliptik iç yüzey çatlakları, dış yüzey çatlakları ve köşe çatlakları durumu için farklı çatlak genişlik (a/c) ve çatlak derinlik oranlarında (a/t) mod-I GŞF değerlerini elde etmişlerdir. Çalışmalarında sonlu elemanlar analizi ve alt model yöntemini kullanarak iç basınç sabit (8.25 MPa) olduğu durum için analizler yapmışlardır. Gerilme yığılmasının maksimum olduğu nozul köşe çatlakları için (a/t) oranı azaldıkça ve a/c oranı arttıkça diğer bölgelere kıyasla GŞF'nin daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Murtaza ve Javed Hyder, (2015) reaktör basınç kabında giriş nozul bölgesinde termal yükün kırılma analizlerine etkisini araştırmışlardır. Farklı a/c ve a/t oranlarında, sadece statik iç basınç ve iç basınçla termal yükün her ikisinin de sisteme etkidiği durumlar için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak K_I 'i numerik olarak hesaplamışlardır. Beklendiği gibi her iki yükün de etkidiği durumlar için elde edilen K_I değerlerinin, statik iç basınç durumuna göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Du ve Shi, (2016) çalışmalarında reaktör basınç kabının giriş nozul bölgesinde statik tasarım basıncı altında “Schwartz-Neuman alternatif yöntemi” ve sonlu elemanlar analizinde alt bölüm modelleme tekniğini kullanarak farklı a/c ve a/t oranlarında yarı eliptik köşe çatlağı için lineer elastik kırılma analizleri gerçekleştirmişlerdir.

Li vd., (2020) iç basınç ve termal gerilmenin etkisiyle (Basınçlı termal şok) nozul bölgesindeki başlangıç köşe çatlağına kaplamanın etkilerini incelemişlerdir. Termal şok etkisini, dinamik yük şartları altında uygulayarak gerilme şiddet faktörü K_I , sonlu elemanlar analizinde alt bölüm modelleme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı çatlak boyut ve şekil oranlarının analizlerini yaparak nihai kritik çatlak boyutunun üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir.

R. Liu vd., (2018) Westinghouse AP1000 reaktör basınç kabında nozul bölgesinde çatlak ilerleme simülasyon analizlerini FRANC3D kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Reaktör basınç kabının nozul kısmına yerleştirdikleri yarı eliptik köşe çatlağı için 0° , 15° , 30° açıda çatlak ilerleme analizlerini yaparak K_I , K_{II} , K_{III} GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca dağılımını elde etmişlerdir. Reaktör basınç kabının $\frac{1}{4}$ duvar kalınlığındaki köşe çatlağının, statik iç basınç durumunda (tasarım basıncında) oluşan güvenilirlik aralığını göstermişlerdir.

K. T. Liu vd., (2020), daha önce yapmış oldukları çalışmanın (R Liu vd., 2018) devamı niteliğinde ki bu çalışmada, statik basınca ilave olarak termal yükü ekleyerek çalışmalarının kapsamını gerçekleştirmişlerdir. Statik basınç ve termal gerilme yükleri altında 0° 10° , 15° açıda çatlak ilerleme analizlerini gerçekleştirmiştir. 2018 yılındaki çalışmalarında elde ettikleri statik basınç altında çatlak ilerleme analiz sonuçlarını karşılaştırarak, termal yük ilavesi ile gerilme şiddet faktörlerinin düştüğünü belirtmişlerdir. Analiz sonucunda beklediği gibi reaktörün ömrüne en fazla K_I 'in etki ettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, 0° ‘den 90° ‘ye kadar 5° artış ile statik basınç altında köşe çatlağının kırılma analizlerini gerçekleştirmiş ve açı arttıkça K_I gerilme şiddet faktörünün düştüğünü belirtmişlerdir.

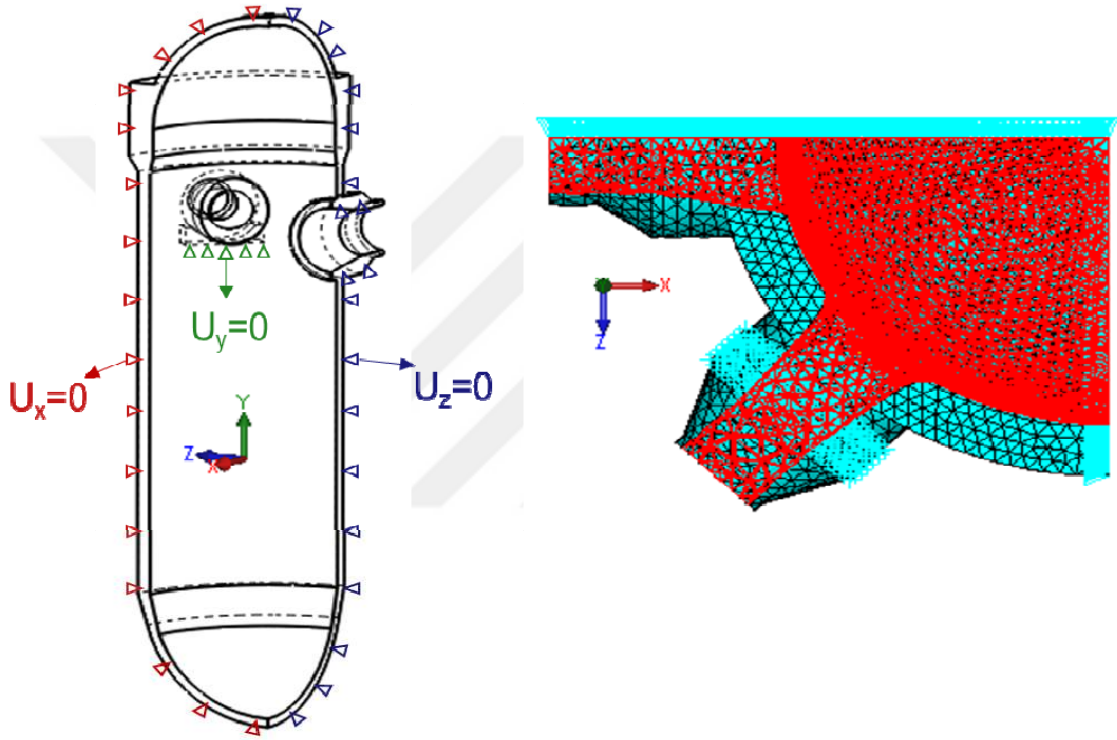
C. Liu vd., (2021) ısınma ve soğuma sırasında sürekli değişen basınç ve sıcaklıklar altında reaktör basınçlı kabın nozulunda farklı boyutlardaki köşe çatlakları için gerilme şiddet faktörü dağılımlarını Zencrack, (2018) programını kullanarak elde etmişlerdir. ASME Buhar Kazanı ve Basınçlı Kaplar Yönetmeliğine göre keskin köşeli nozul için elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır.

Literatürün çoğunluğunun mod-I GŞF analizleri olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların büyük bir bölümünde nozul bölgesindeki köşe çatlakları için basit mod-I yüklemesi altında kırılma analizleri yapılmıştır. Karışık mod yüklemesi altında son yıllarda az sayıda da olsa bazı çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. Karışık mod durumunda K_I , K_{II} , K_{III} değerlerinin farkını daha iyi gözlemlemek için R. Liu vd., (2018) yılında aynı çatlak boyut ve şekil oranlarında 0° , 15° , 30° açılarda çatlak ilerleme simülasyon analizleri gerçekleştirmişlerdir.

Mikro ve makro boyutta öngörülemeyen veya farklı sınır şartı ve yükleme koşulları gibi dış etkenlerden dolayı, çatlak başlangıcı beklenenden farklı eğim ve dönme açılarında yönelimlere sahip olabilmektedir. Farklı yönelimlere sahip başlangıç çatlakları basınçlı tankların ömrüne önemli ölçüde etki etmektedir.

Bu çalışmada AP1000 RBK'da (Reaktör Basınç Kabı) köşe çatlağı için Prof. Dr. Ali Osman Ayhan tarafından geliştirilen FCPAS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, farklı çatlak şekil oranı (a/c), çatlak derinlik oranı (a/t), eğim (β) ve dönme (α) açıları için karışık mod GŞF çözümleri elde edilmiştir. Aynı zamanda, K_I GŞF'nin tahminine yönelik önerilen ve ASME Buhar Kazanı ve Basınçlı Kaplar Yönetmeliğinde yer alan denkleme benzer şekilde mevcut çalışmada geniş bir yelpazede gerçekleştirilen analizlerden elde edilen GŞF'leri kullanarak K_I , K_{II} ve K_{III} GŞF'lerin tahminine yönelik empirik denklem geliştirilmiş ve literatür verileri ile doğrulanmıştır.

Tüm analizlerde elastisite modülü= 186 GPa, poisson oranı = 0.3 ve iç basıncın 17.13 MPa (tasarım basıncı) olarak uygulanmıştır. Sınır şartları Şekil 2.2’de gösterilmiştir. “ $U_x=0$ ” ve “ $U_y=0$ ” iki ekseninde simetri sınır şartlarını sağlarken alt giriş nozul tutucu (pad) için “ $U_y=0$ ” y ekseninde hareketi sınırlamaktadır. Değişken parametreler olarak; şekil oranı (a/c) 0.5, 1, 2, derinlik oranı (a/t) 0.0625, 0.125, 0.25, eğim açısı (β) 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° ve dönme açısı (α) 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° durumları için FCPAS ile yapılan kırılma analizleri sonucunda karışık mod GŞF çözümleri elde edilmesi amaçlanmıştır. Tüm işlem aşamaları Şekil 2.3’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Sınır koşulları ve basınç dağılımı

İlk aşama geometrik modelin oluşturulmasıdır. Teknik resim ölçülerine göre reaktör basınç kabı çeyrek model olarak tasarımı SolidWorks, (2018) programında yapılmıştır. Ardından ANSYS Mechanical’de (ANSYS, 2009) global koordinat sistemine göre köşe çatlağının modeli oluşturulmuştur.

Üçüncü aşamada, sınır şartları, basınç yükü ve malzeme özelliklerinin tanımlamaları yapılmıştır. Basınç yükü Westinghouse (üretici) firmasının belirlediği tasarım basıncıdır.

Dördüncü aşamada, ANSYS MAPDL’de gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Alt-model yöntemine ihtiyaç duyulmasaydı ANSYS MAPDL’de yapısal analiz çözümüne gerek kalmadan FCPAS için gerekli girdi listelerinin alınması ile çözüm başlatılabilirdi.

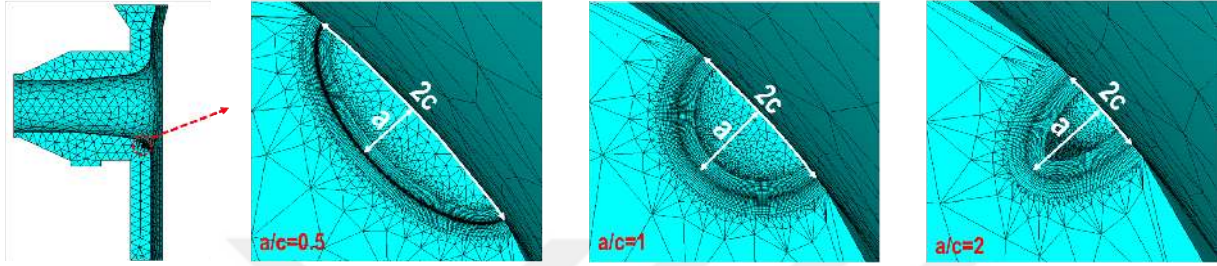
Beşinci aşama, alt-model yönteminin uygulanmasıdır. Alt-model yöntemi, tüm modelin düğüm noktalarındaki yer değiştirme sonuçlarının belirli bir alt-modele aktarılmasıdır. Alt model yönteminin kullanılmasının sebebi, FCPAS’ta çözüm başlatılması için gerekli girdi listelerinde belirli limitler vardır. Genel modelin çeyrek model olmasına rağmen modelin boyutlarının büyüklüğü ve çatlak modelinin tam model olması sebebiyle eleman listeleri ve iç yüzey alanlarına uygulanan basınçlar listesi limitleri aşmaktaydı. Bu nedenle alt-model yöntemi kullanılmıştır. Böylelikle alt-model yöntemi daha küçük ağ bölüntüleme işlemine olanak sağlamıştır. Bu sayede daha kısa sürede sonuçlar elde edilmiştir.

Altıncı aşamada, FCPAS’ta çözümlerin başlatılması için gerekli girdi listelerin ANSYS MAPDL’den çıktı olarak aktarılmasıdır. Bu aşamada alt-model için yer değiştirme listeleri, eleman listesi, düğüm noktaları listesi ve çatlak ucu(önü) için; eleman listesi, düğüm listesi ANSYS MAPDL’den listelenerek çıkarılmaktadır. Ardından FCPAS çözücüsü olan FRAC3D için ANSYS MAPDL’den alınan çıktılar girdi olarak aktarılarak nümerik çözüm başlatılmaktadır. Çözüm bittikten sonra FCPAS bize çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörlerinin dağılımını çıktı olarak vermektedir. Böylelikle çözüm süreci tamamlanmış olmaktadır.

Farklı, a/c, a/t, dönme açıları ve eğim açıları durumları için tekrar ilk aşamaya dönülerek ANSYS Mechanical APDL’de global koordinat sistemine göre köşe çatlağının yeni modeli oluşturulup işlem prosesleri tekrarlanır.

2.1.1.Çatlak Şekil Oranı (a/c)

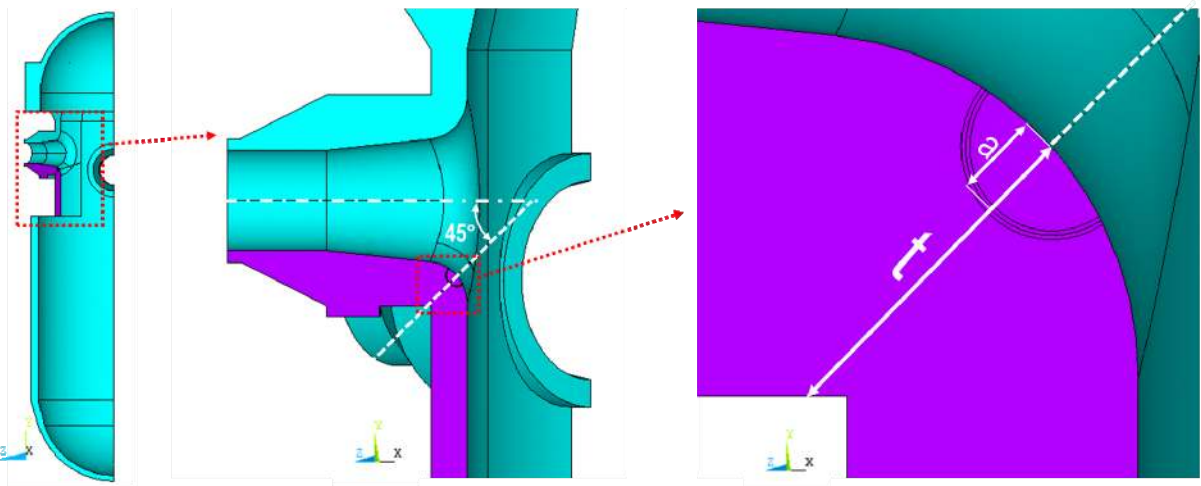
Çatlak şekil oranı (a/c); çatlak derinliğinin yarı çatlak genişliğine oranıdır. Şekil 2.5'te nozul – silindir kesişiminde tanımlı ve ağ yapısı oluşturulmuş köşe çatlağının şekil oranı 0.5, 1 ve 2 değerleri için gösterimi verilmiştir. “a” çatlak derinliği, “2c” çatlak genişliğinin uzunluğudur. “a/c =1” durumunda a=15mm, c=15mm'dir ve köşe çatlağı yarı daireseldir. Şekil oranı 0.5 ve 2 olması durumunda köşe çatlağı yarı eliptiktir.



Şekil 2.5. Model üzerinde "a" ve "c" 'nin gösterilmesi

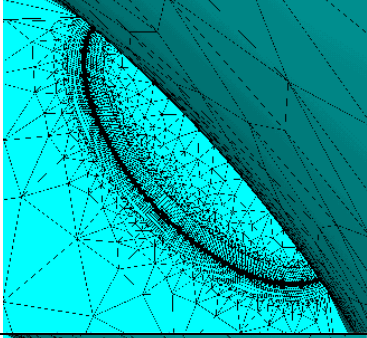
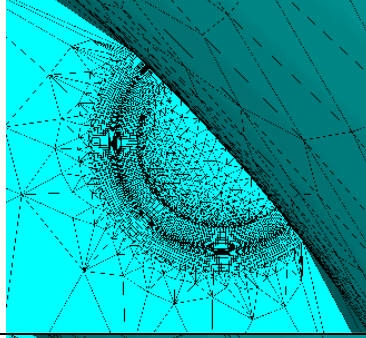
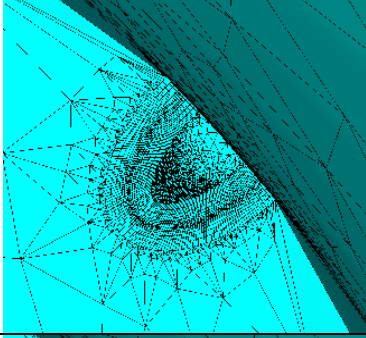
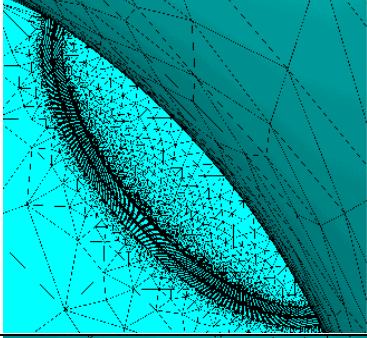
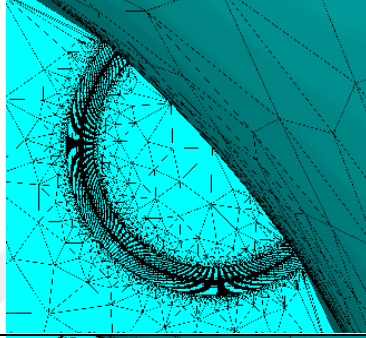
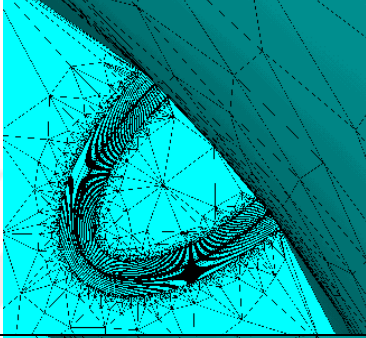
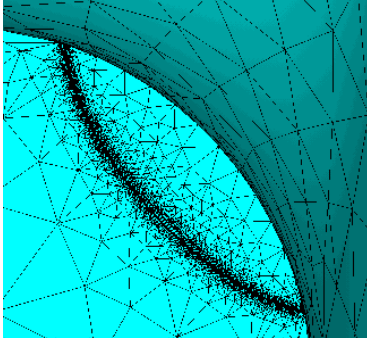
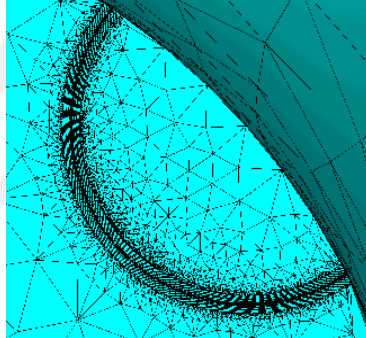
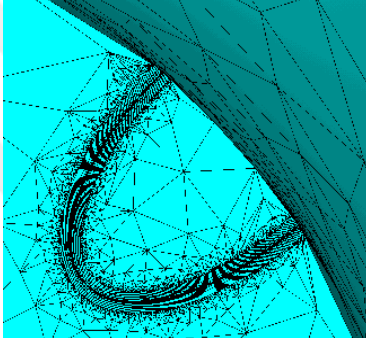
2.1.2.Çatlak Derinlik Oranı (a/t)

Çatlak derinlik oranı (a/t), çatlak derinliğinin nozulun merkezinden 45° açıdaki köşe çatlağı bölgesinden geçecek şekilde kesmesi ile oluşan nozul – silindir bölgesindeki et kalınlığına oranıdır. Şekil 2.6'da detaylı görünümü verilmiştir. Çalışma kapsamında çatlak derinlik oranı 0.0625, 0.125 ve 0.25 değerleri için çözümler yapılmıştır. Tablo 2.1'de çatlak derinlik oranlarının ve şekil oranlarının parametrelerinin kombinasyonu şeklinde oluşturulan çatlakların ağ yapısı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.6. Model üzerinde çatlak derinlik oranı(a/t) gösterilmesi

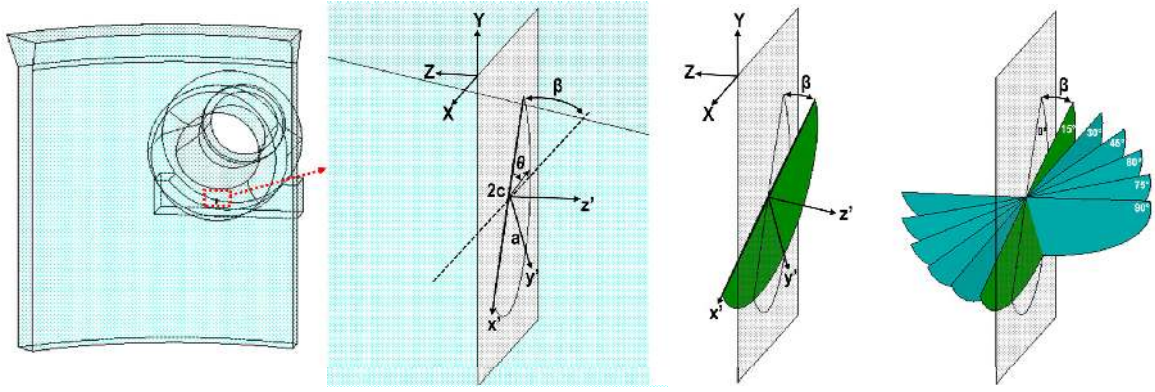
Tablo 2.1. Farklı a/c ve a/t oranlarına bağlı tanımlı köşe çatlaklarının ağ yapısı

	$a/c=0.5$	$a/c=1$	$a/c=2$
$a/t=0.0625$			
$a/t=0.125$			
$a/t=0.25$			

2.1.3. Çatlak Eğim Açısı (β)

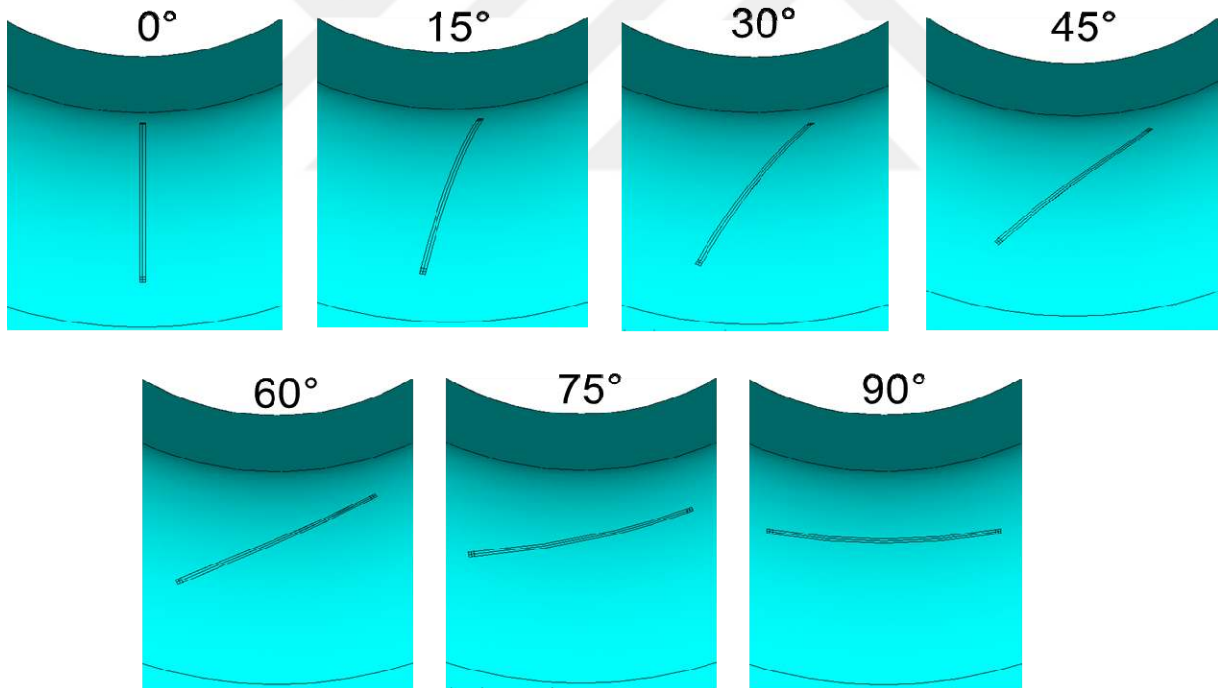
Lokal ve global koordinat sistemleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Eğim açısı (β), çatlakın y' eksenini etrafında döndürülmesi sonrası çatlak düzlemi ile X-Y düzlemi arasındaki açıdır. Eğim açısı (β), çatlakın y' eksenini etrafında döndürülmesi sonrası çatlak düzlemi ile X-Y düzlemi arasındaki açıdır. Çalışma kapsamında $\beta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90° eğim açısına sahip köşe çatlakları modellenmiştir.

Şekil 2.7’de alt-model (sub-model) üzerinde yarı eliptik köşe çatlaklarının farklı açılarda görünümü verilmiştir. “ θ ” parametrik çatlak ucu konumsal açısıdır. “ θ ” açısının yönü çatlak ucu konumunu göstermektedir. $\theta=0^\circ$ ve 180° çatlak ucu kenar noktalarını, $\theta=90^\circ$ ise çatlak ucu merkezini temsil etmektedir.



Şekil 2.7. Alt model ve düzlem üzerinde çatlak eğim açısının " β " gösterimi

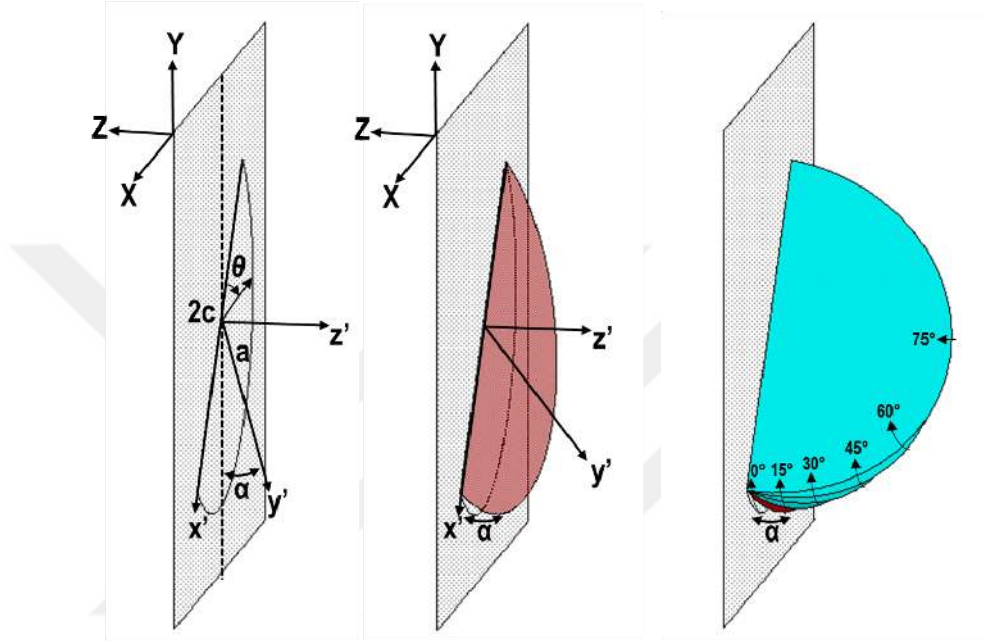
Şekil 2.8’de tanımlı yarı eliptik köşe çatlağının farklı açılar için görünümü gösterilmiştir. $\beta=0^\circ$ açısında çatlak düşey konumda iken $\beta=90^\circ$ açıda çatlak yatay konuma gelmektedir. Ara açı değerlerinde karışık mod durumunun oluşması öngörülmektedir.



Şekil 2.8. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için yarı eliptik köşe çatlağının farklı açılarda görünümü

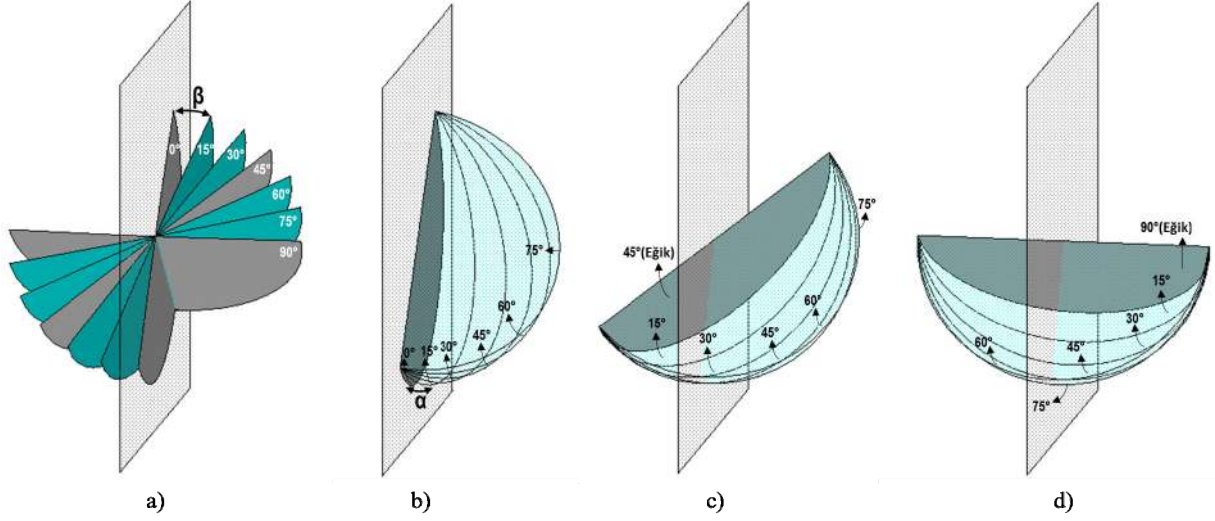
2.1.4. Çatlak Dönme Açısı (α)

Dönme açısı (α), çatlağın x' eksenini etrafında döndürülmesi sonrası çatlak düzlemi ile X-Y düzlemi arasındaki açıdır. Çalışma kapsamında dönme açısı parametresi 0° ile 75° arasında 15° 'lik artış miktarı ile yarı eliptik köşe çatlakları modellenmiştir. Şekil 2.9'da farklı dönme açılara sahip çatlaklar gösterilmektedir. 90° dönme açısındaki çatlak, bulunduğu düzlemin paralelinde olduğu için çatlak tanımı yapılamamaktadır.



Şekil 2.9. Düzlem üzerinde dönme açısı " α " gösterimi

Eğim açısı ve dönme açısının kombinasyonları Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Eğim açıları gri ile gösterilen 0° , 45° ve 90° açılarda dönme açıları oluşturulmuştur. Eğim açısının 0° - 90° olduğu durumda dönme açısı 0° 'dir (Şekil 2.10 a).



Şekil 2.10. a) Eğik çatlaklar b) 0° Eğim açısında dönmüş çatlaklar c) 45° Eğim açısında dönmüş çatlaklar d) 90° Eğim açısında dönmüş çatlaklar

Tablo 2.2’de gösterildiği gibi analizleri tamamlamak için $3 \times 3 \times 7 \times 6 = 378$ farkı model ve çözüm gereklidir. Çok fazla zaman alacağından 0°, 45° ve 90° eğim açısındaki dönme durumlarındaki çözümlerin elde edilmesinin ardından ara değerlerin (15°, 30°, 60°, 75°) eğim açısı durumunda dönme açılarından (daha sonra olasılıksal olarak) denklem elde edilip hesaplanması hedeflenmiştir. Çözüm sayısını azaltmak için eğim açısı durumunda $3 \times 3 \times 7 = 63$, dönme açısı durumu için $3 \times 3 \times 3 \times 6 = 162$, toplam 225 modele indirgenmiştir.

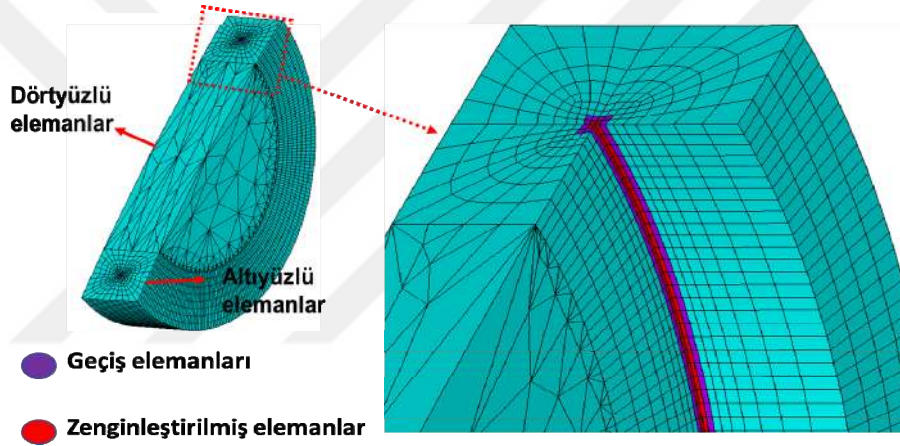
Tablo 2.2. FCPAS için çözüm parametreleri

Parametreler	Birim	Düzyey	Değerler	Çıktı(FCPAS)
Çatlak Derinlik Oranı (a/t)	-	3	0.0625; 0.125; 0.250	K _I ; K _{II} ; K _{III} (MPa·m ^{0.5})
Çatlak Şekil Oranı (a/c)	-	3	0.5; 1; 2;	
Eğim açısı (β)	Derece	7	0; 15; 30; 45; 60; 75; 90	
Dönme açısı (α)	Derece	6	0; 15; 30; 45; 60; 75	

Çözüm parametresi olarak farklı a/c ve a/t durumlarında; eğim açısı 0°-90° (Şekil Şekil 2.10 a), eğim açısı 0° dönme açısı durumları (Şekil 2.10 b), eğim açısı 45° dönme açısı durumları (Şekil 2.10 c) ve eğim açısı 90° dönme açısı durumları (Şekil 2.10 d) için FCPAS ile K_I; K_{II}; K_{III} GŞF değerlerinin elde edilmesi hedeflenmiştir.

2.2. Gerilme Şiddet Faktörlerinin (GŞF) Hesaplanması

Çalışma kapsamında GŞF'lerin hesaplanmasında FCPAS paket programı kullanılmıştır. "FRAC3D", FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System - Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi) programının ana çözümleyicisidir. FRAC3D, Ali Osman Ayhan tarafından Lehigh Üniversitesi'nde yüksek lisans ve doktora çalışmaları süresince geliştirilmiştir (Ayhan ve Nied, 1999) (Ayhan, 2000). FCPAS; çatlak ucu boyunca zenginleştirilmiş elemanlar formülasyonu ile üç boyutlu karışık mod kırılma ve çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilebilen, çatlak bölgesinde özel ağ bölüntüleme ihtiyacı duymayan, gerilme şiddet faktörünü (K_I , K_{II} , K_{III}) nümerik olarak hesaplayan, sonlu eleman temelli bağımsız bir paket program bütünüdür (Demir, 2016). Şekil 2.11'de çatlak bölgesindeki ağ yapısı ve zenginleştirilmiş elemanların görünümü verilmiştir.



Şekil 2.11. Çatlak ucundaki zenginleştirilmiş elemanların görünümü

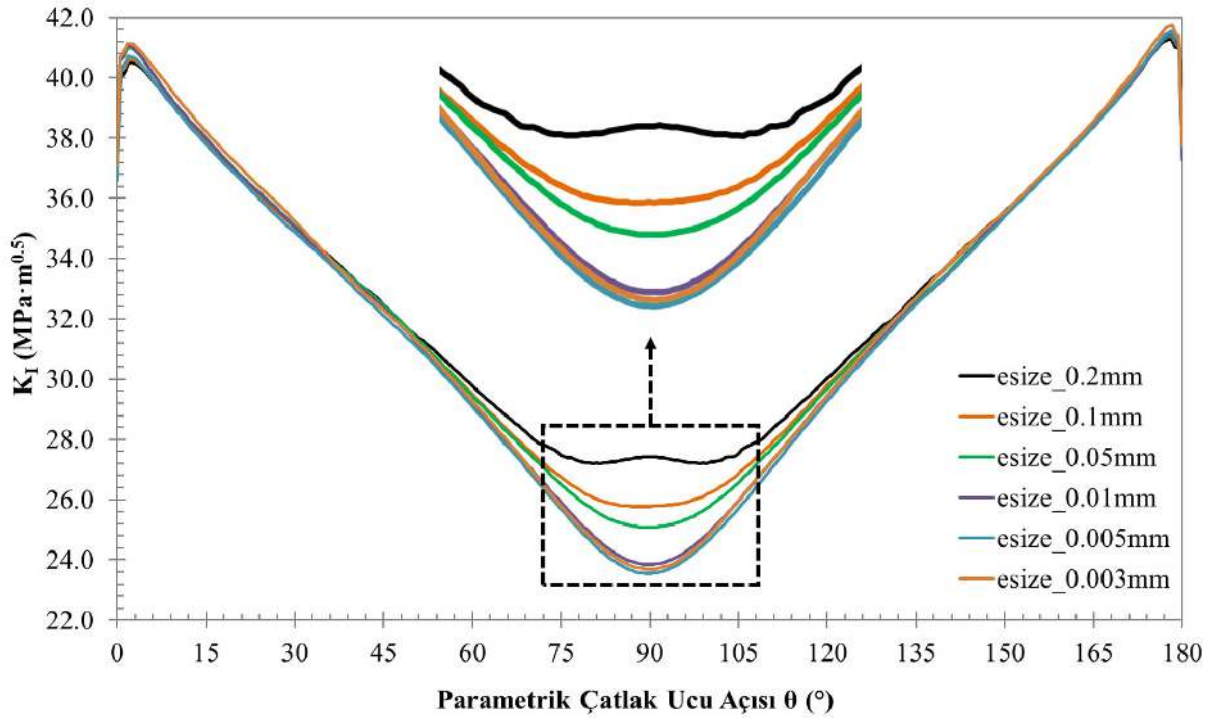
FCPAS programı Sakarya Üniversitesi bünyesinde Ali Osman Ayhan'ın öncülüğünde Hesaplamalı ve Deneysel Kırılma Mekaniği (HDKM) grup üyeleri tarafından geliştirilmeye devam edilmektedir. Saf Mod-I yüklemesi üzerine deneysel ve nümerik çalışmaların tamamlanmasıyla birlikte karışık mod çalışmaları hedeflenmiştir. Yeni boyutları optimize edilmiş karışık mod-I/II/III deneysel kırılma testi için; model ve tutucu geliştirilmesiyle birlikte karışık mod uygulamaları üzerine çalışmalara odaklanılmıştır. 2020 yılında ilk defa FRAC3D'de yazılım kodunda eleman sertlik matrisleri paralel hesaplama yöntemi ile çalışması test edilmiştir. Böylelikle GŞF çözümlerinin önemli ölçüde daha kısa sürede çözümlenmesine imkân sağlanmıştır. Üç boyutlu olasılıksal kırılma mekaniği hesaplarında ilk defa FCPAS kullanılmış ve deneysel olarak üç boyutlu kırılma analizleriyle validasyonu yapılmıştır (Yaren, 2021).

3. NÜMERİK ANALİZLER

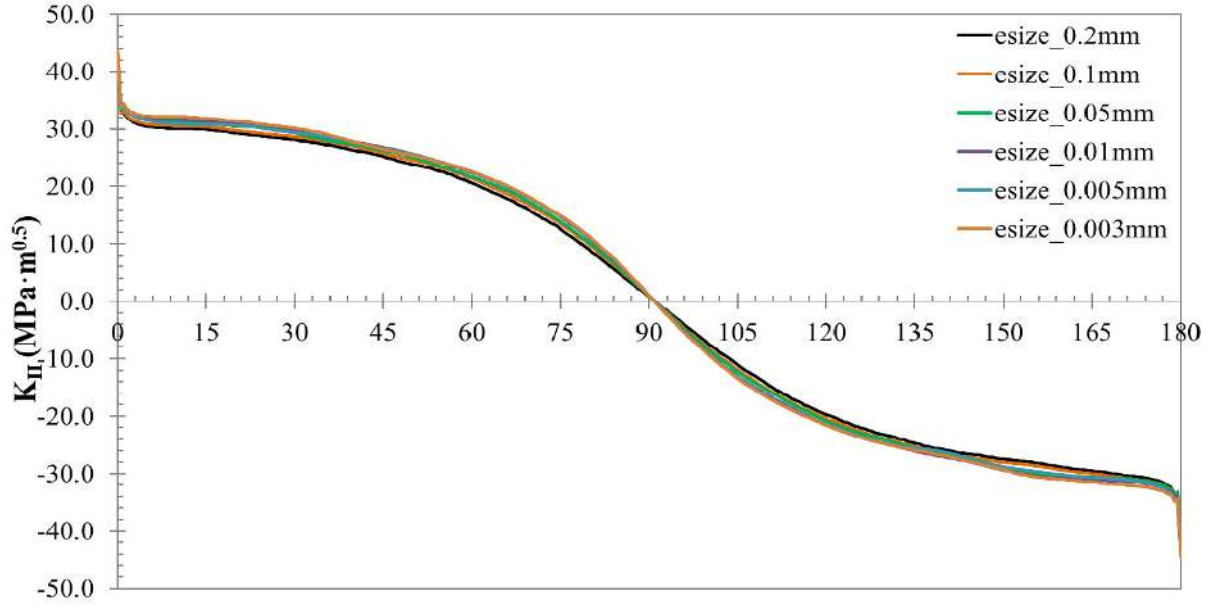
3.1. Sonlu Eleman Ağ Hassasiyet Analizi

Sonlu elemanlar analizinde doğru eleman boyutunun kullanımı önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında optimize edilen elemanlar; çatlak ucunu oluşturan zenginleştirilmiş altıyüzlü elemanlardır. Çatlağın 0° olması durumunda problem; saf mod-I problemine eğilimde olmakla birlikte mod-II ve mod-III değişiminin daha iyi gözlemlenmesi amaçlanarak 0° açıda ağ hassasiyet analizi yapılması tercih edilmemiştir. Optimizasyon işlemleri 45° eğik çatlaklar için her a/t ve a/c oranı değiştiğinde tekrarlanmıştır.

Şekil 3.1 ve Şekil 3.3'te görüldüğü üzere mod-I ve mod-III için farklı eleman boyutları GŞF sonuçlarını ciddi oranda etkilemektedir. Şekil 3.2'de ise; mod-II GŞF sonuçlarının eleman boyutuna etkisinin çok az olduğu görülmektedir. Eleman boyutu küçüldükçe daha hassas sonuçlar elde edilmektedir. Yapılan sonlu elemanlar ağ optimizasyon analizleri sonucu 0.005mm ($5\mu\text{m}$) eleman boyutu $a/t=0.125$, $a/c=2$ oranında tüm eğik ve dönmüş açılardaki çatlaklara uygulanması için seçilmiştir.

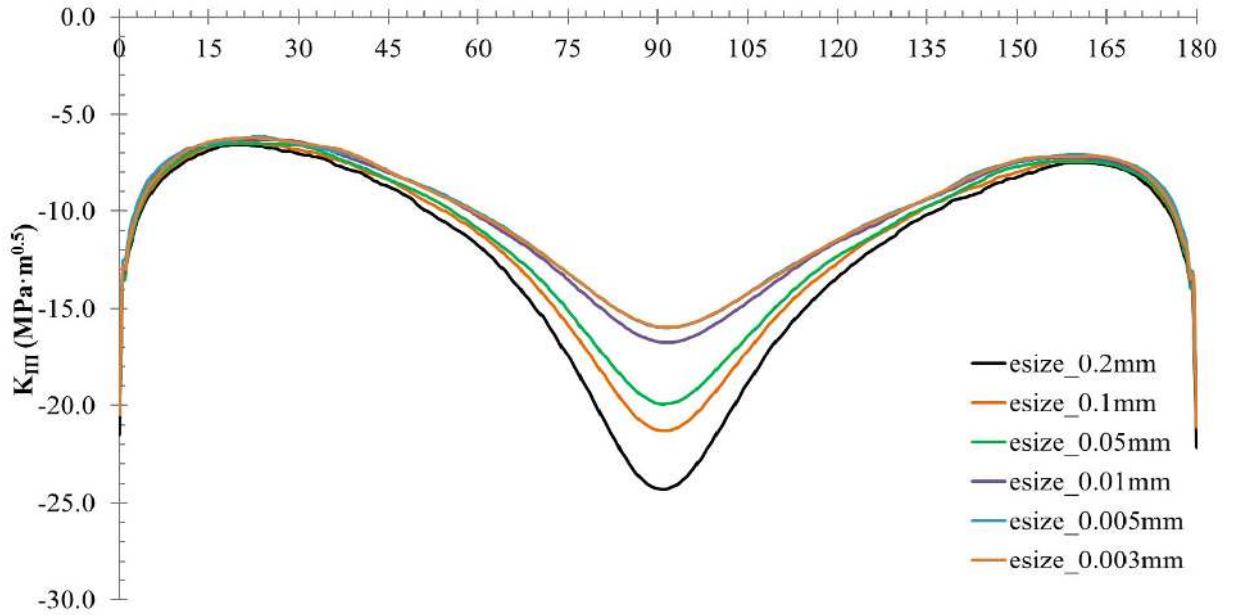


Şekil 3.1. $a/t=0.125$, $a/c=2$ oranlarında 45° eğik çatlak ucu açısındaki farklı eleman boyutu değerlerinde mod-I gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımları



Parametrik Çatlak Ucu Açısı θ (°)

Şekil 3.2. $a/t=0.125$, $a/c=2$ oranlarında 45° eğik çatlağın çatlak ucundaki farklı eleman boyutu değerlerinde mod-II gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımları

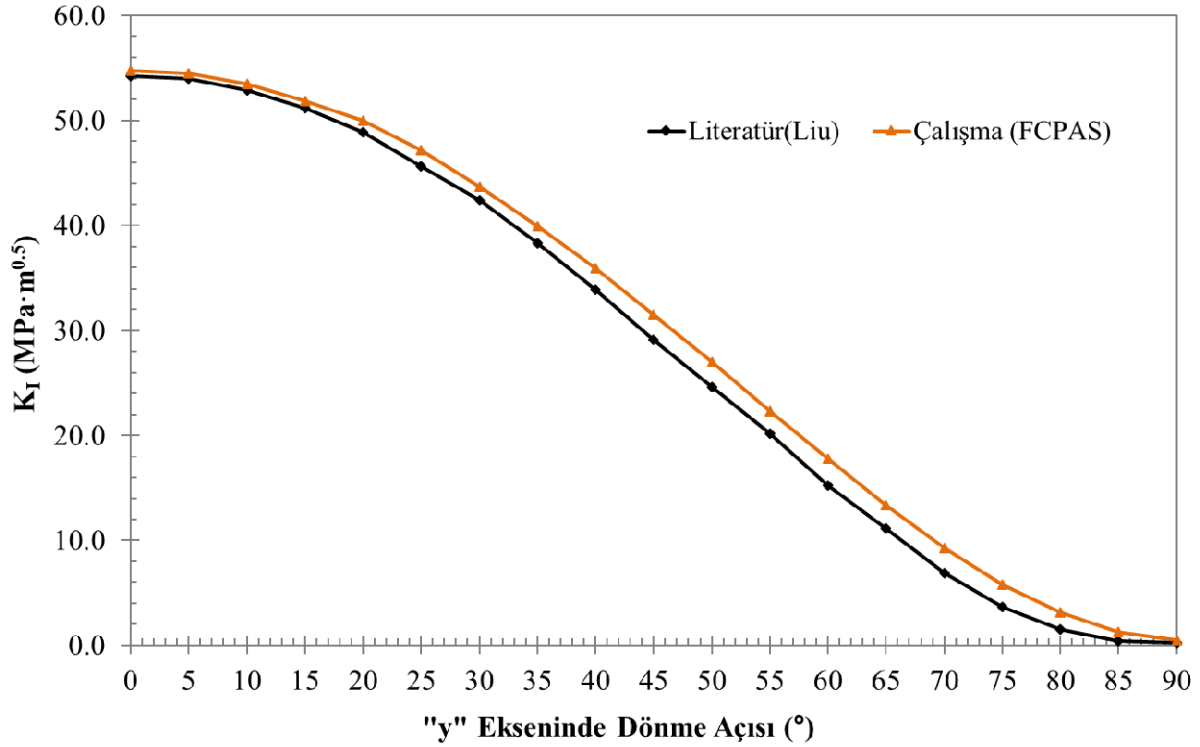


Parametrik Çatlak Ucu Açısı θ (°)

Şekil 3.3. $a/t=0.125$, $a/c=2$ oranlarında 45° eğik çatlağın çatlak ucundaki farklı eleman boyutu değerlerinde mod-III gerilme şiddet faktörünün çatlak önü boyunca dağılımları

3.2. Analiz Sonuçlarının Literatür ile Doğrulanması

Bu bölümde aynı geometrik model ve malzeme özelliklerini referans aldığımız (K. T. Liu vd., 2020) çalışmaların sonuçları FCPAS sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çatlak derinlik ekseninde (y' eksen) 5° artış ile 0°'den 90°'ye kadar toplam 19 analiz için literatür ve FCPAS sonuçları karşılaştırılmıştır. Açı değerine bağlı çatlak ucu orta noktasındaki K_I değerleri $a/c=1$ ve $a/t=0.0625$ olması durumunda Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Literatür verileri ile sonuçların doğrulanması

Literatür ile çalışma sonuçları karşılaştırıldığında uyum içerisinde olduğu görülmektedir. 0° açıda K_I sonuçları literatür verilerine göre %0.95 daha fazladır. Açı arttıkça çalışma sonuçları ile literatür sonuçları arasında fark yüzde olarak artmaktadır. Çatlak yatay konumda (90°) iken mod-I yönünde minimum düzeyde açılmaya zorlanırken, maksimum 0° açıda açılmaya zorlanmaktadır. Sonuçlar karşılaştırıldığında kabul edilebilir verilerin elde edildiği görülmektedir.

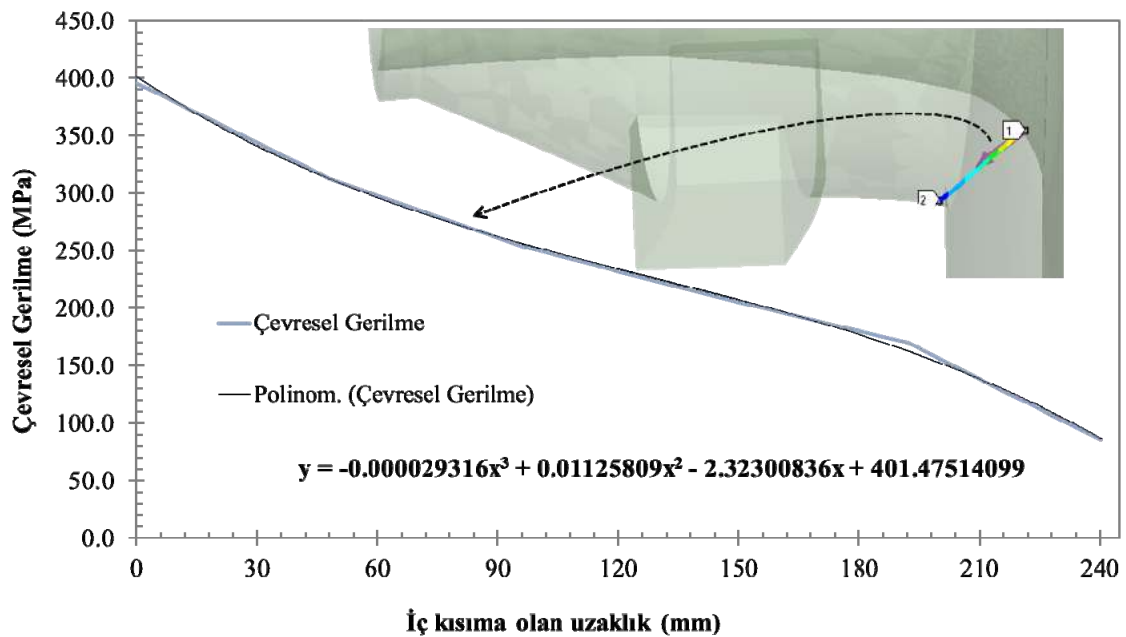
Büyütme faktörü yöntemine bağlı Lineer Elastik Kırılma Mekaniği'nde (LEKM) nozul bölgesindeki çatlaklar için ASME B&PV Bölüm XI, PWR (Basınçlı Su Reaktörleri) nozul tasarımlarında Zorunlu Olmayan Ek G'ye göre radyuslu (yuvarlak köşeli) nozul ve dairesel çatlaklarda önerilen etki fonksiyonu Denklem 3.1'de verilmiştir (Mehta vd., 2011).

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left[0.706A_0 + 0.537 \left(\frac{2a}{\pi} \right) A_1 + 0.448 \left(\frac{a^2}{2} \right) A_2 + 0.393 \left(\frac{4a^3}{3\pi} \right) A_3 \right] \quad (3.1)$$

Denklem 3.1.'de K_I mod-I yönündeki GŞF, “a” çatlak derinliği, A_0 , A_1 , A_2 , A_3 nozula göre 45° açıdaki et kalınlığı yolu boyunca çevresel gerilme dağılımının 3.dereceden polinom eğrisinin katsayılarıdır (Mehta vd., 2008).

Nozula göre 45° açıdaki et kalınlığı yolu (uzunluğu) boyunca çevresel gerilme dağılımı sonuçları ve uydurulan 3. dereceden (kübik) polinom eğrisi Şekil 3.5'te verilmiştir. Elde edilen katsayılar ve hesaplanan farklı çatlak derinliğindeki K_I GŞF sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Etki fonksiyonu sadece dairesel çatlaklar ($a/c=1$) ve çatlak derinlik oranı en fazla $a/t=0.25$ olması durumları için; basınçlı su reaktörlerinde nozul – silindir bölgesinde GŞF K_I 'in kısıtlanmasını sağlamaktadır. Denklem 3.1 ile elde edilen sonuçlar çatlak ucu orta noktasındaki K_I GŞF sonuçlarını vermektedir (Yin vd., 2011).



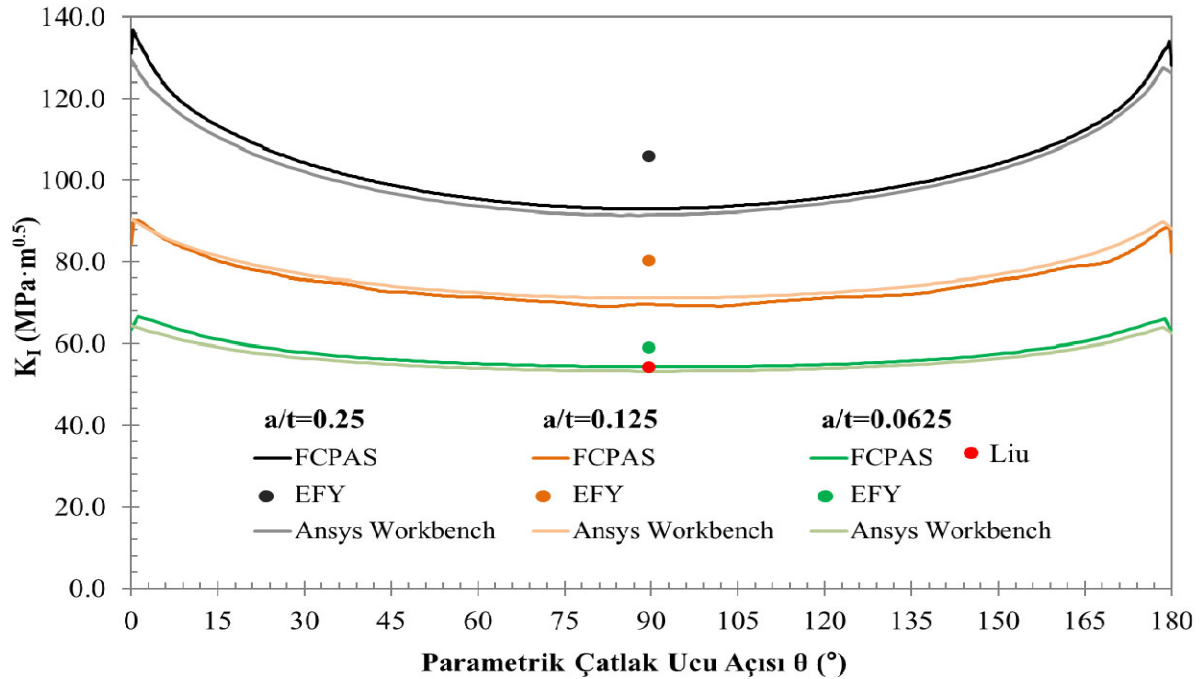
Şekil 3.5. Et kalınlığı boyunca çevresel gerilme dağılımı

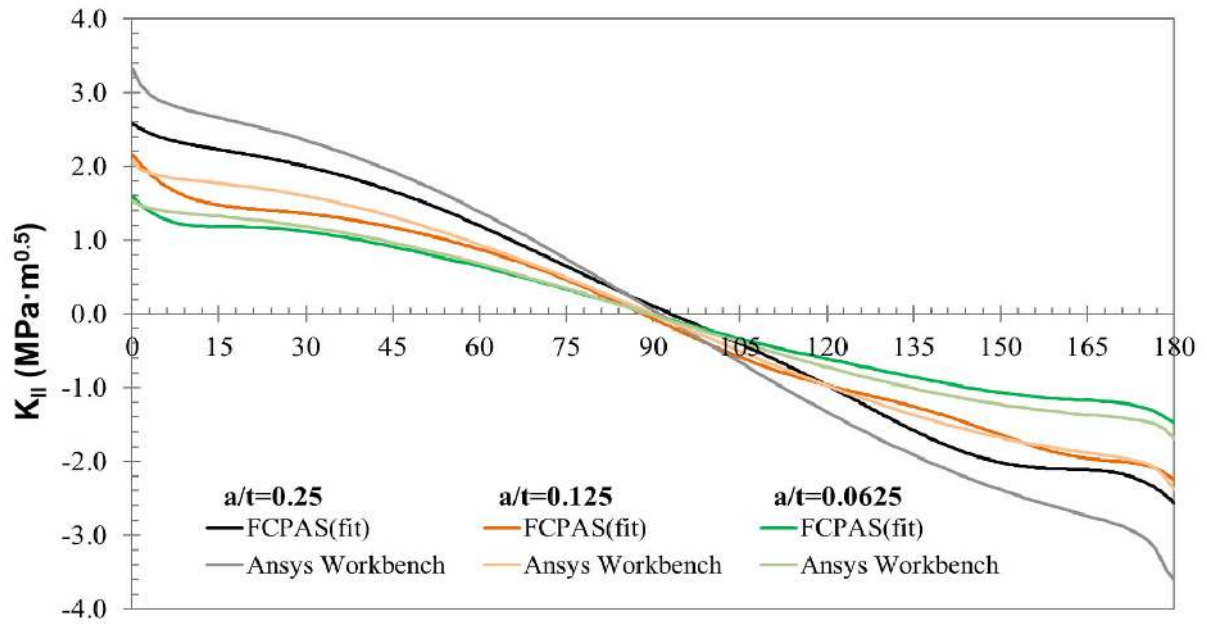
Tablo 3.1. Polinom eğrisinin katsayıları ve hesaplanan K_I değerleri

P(MPa)	A_0	A_1	A_2	A_3	a (mm)	K_I (MPa·m ^{0.5})
17.13	401.47514099	-2.32300836	0.01125809	-0.000029316	60	105.855
					30	80.358
					15	59.063

Şekil 3.6'da çalışma kapsamında FCPAS, Ansys Workbench sonuçları ve etki fonksiyonu ile hesaplanan K_I GŞF çatlak ucu boyunca dağılım grafiği verilmiştir. FCPAS ve Ansys Workbench GŞF sonuçlarının çok iyi uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Derinlik oranı (a/t) arttıkça etki fonksiyonu sonuçları ile FCPAS ve Ansys Workbench sonuçları arasındaki fark artmaktadır. Bu durum beklenen bir durumdur. Zira, etki fonksiyonu a/t oranı arttıkça sapması artmakta ve en fazla a/t=0.25'e kadar kabul edilebilir sonuç vermektedir. FCPAS sonuçları ile etki fonksiyonu arasında a/t=0.0625 için %8.78'lik bir fark vardır. Dairesel köşe çatlakları için minimum GŞF çatlak ucu orta noktasında iken; maksimum çatlak ucu başlangıcı ve bitişinde olduğu görülmektedir.

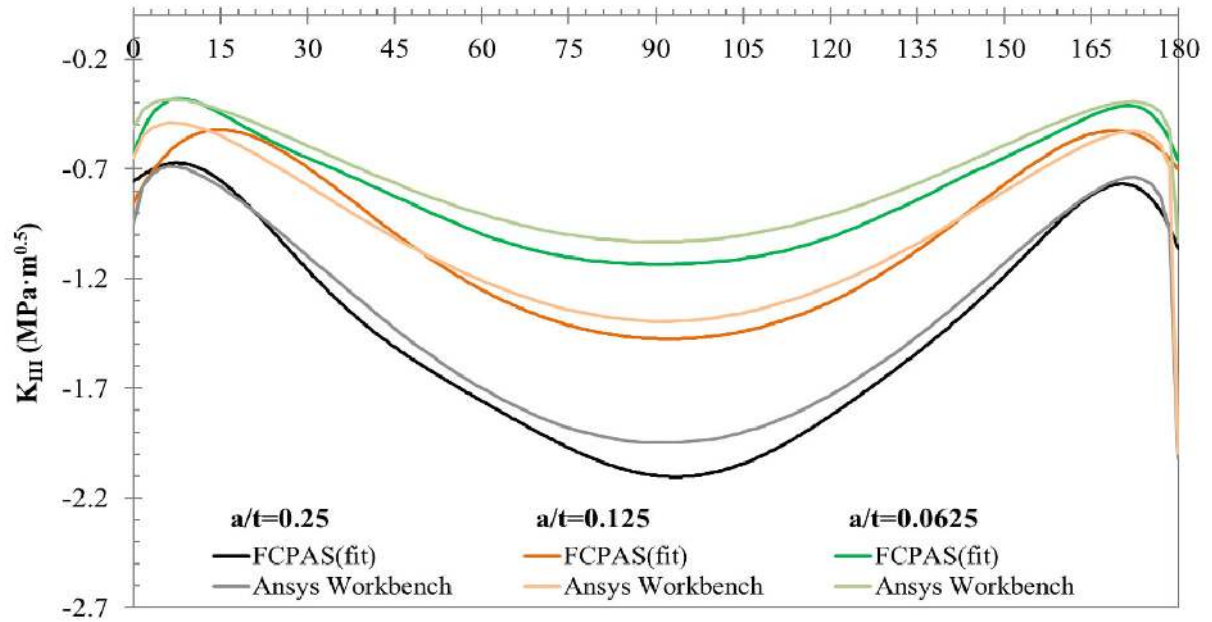
Şekil 3.7'de K_{II} ve Şekil 3.8'de K_{III} GŞF için FCPAS ve ANSYS Workbench GŞF sonuçları verilmiştir. GŞF sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu sayede karışık mod için tüm kırılma modlarında farklı yöntemler ile doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 3.6.** K_I GŞF değerlerinin farklı yöntemler ve literatür ile doğrulanması



Parametrik Çatlak Ucu Açısı θ (°)

Şekil 3.7. K_{II} GŞF değerlerinin karşılaştırması

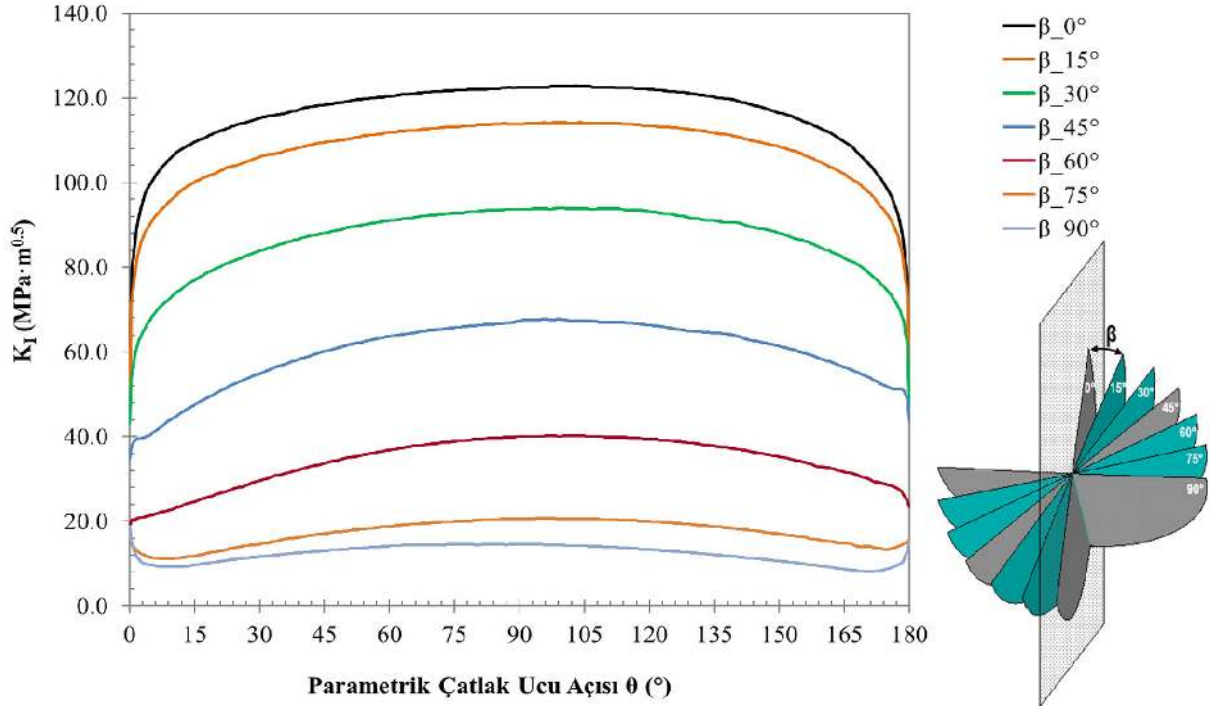


Parametrik Çatlak Ucu Açısı θ (°)

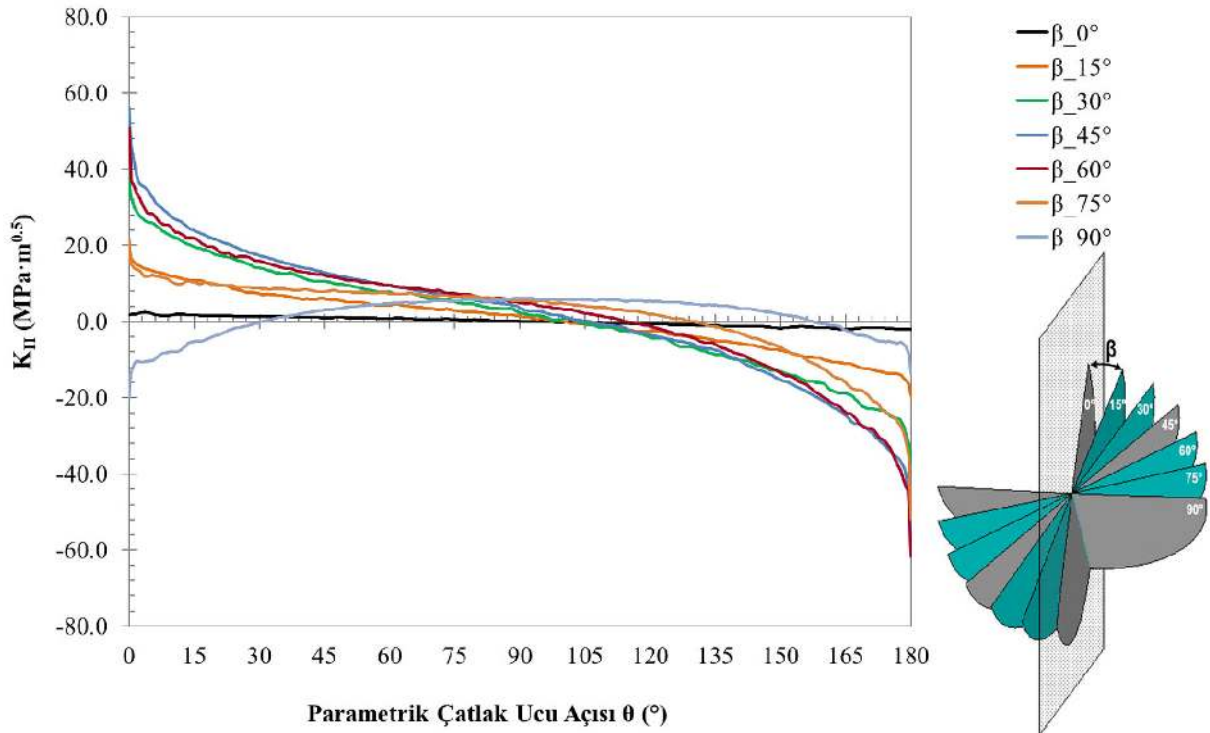
Şekil 3.8. K_{III} GŞF değerlerinin karşılaştırması

3.3. Eğik Çatlak Analizleri

Bu bölümde $a/t=0.0625$, 0.125 , 0.25 ve $a/c=0.5$, 1 , 2 çatlak oranlarına sahip 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° derece yükleme açıları için kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve çatlak ucu boyunca elde edilen K_I , K_{II} , K_{III} GŞF değerleri Şekil 3.9-3.35'te verilmiştir.

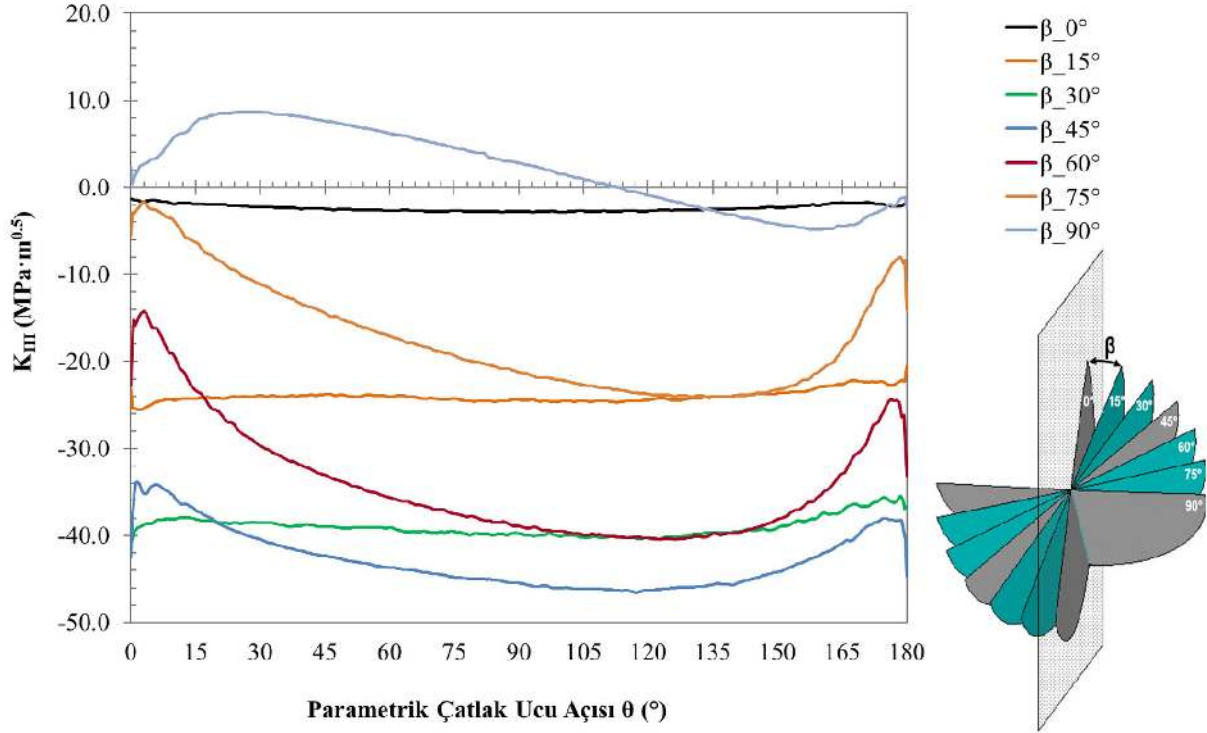


Şekil 3.9. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

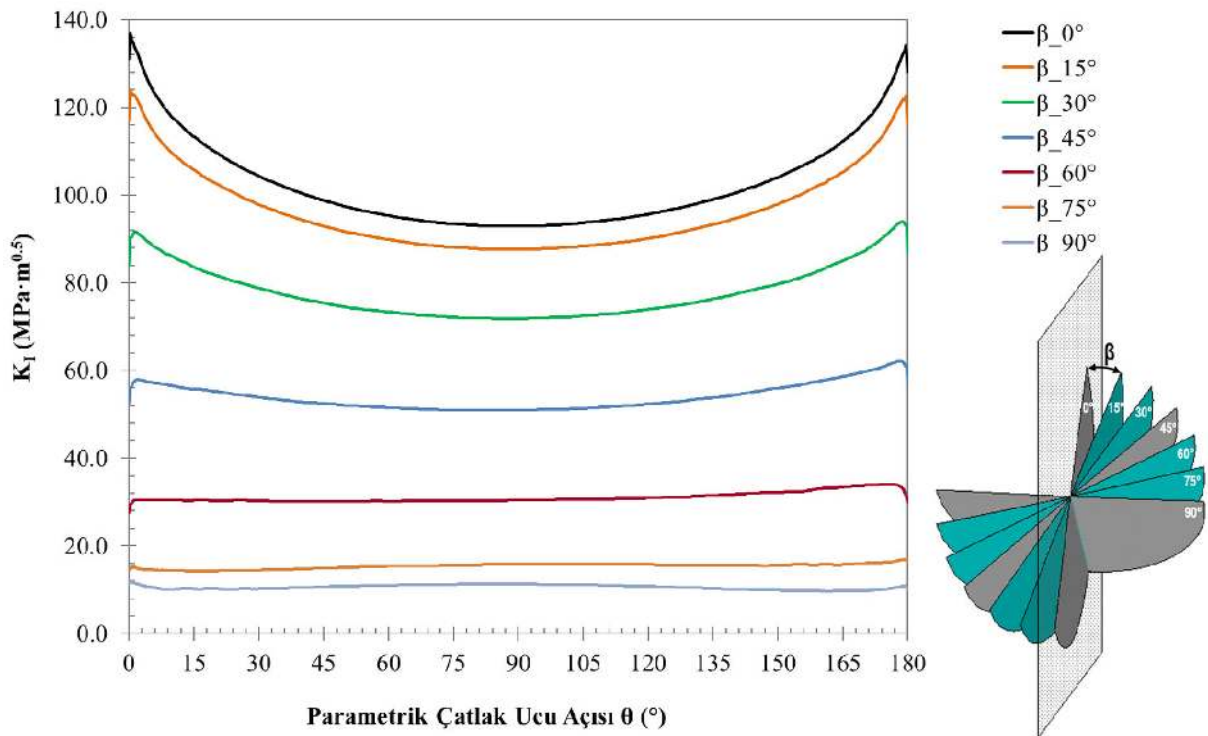


Şekil 3.10. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

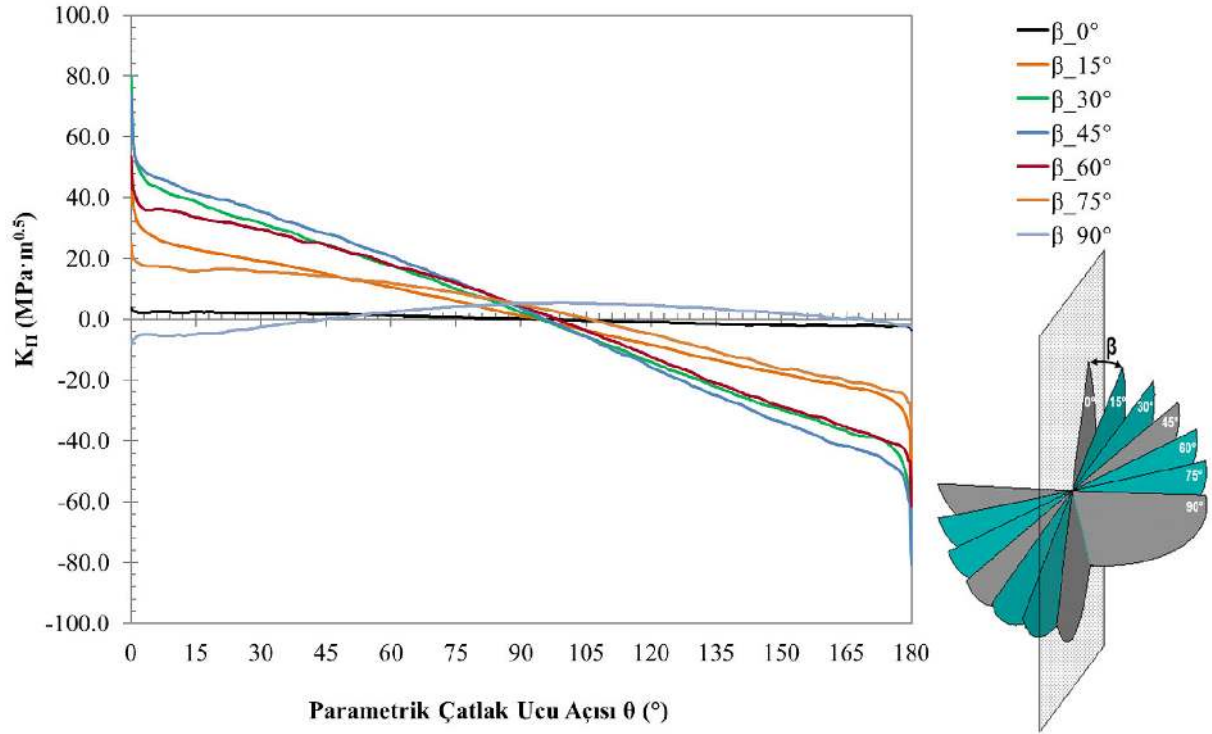
Şekil 3.9’da mod-I GŞF değerlerinin çatlak ucu boyunca simetrik ve gürültüsüz olduğu görülmektedir. Maksimum çatlak en boy oranında Şekil 3.10’da mod-II GŞF ve Şekil 3.11’de mod-III GŞF değerleri için bir miktar gürültü gözlenmiştir. Çatlak ucu boyunca daha fazla eleman kullanılarak mevcut gürültünün giderilebileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.11. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

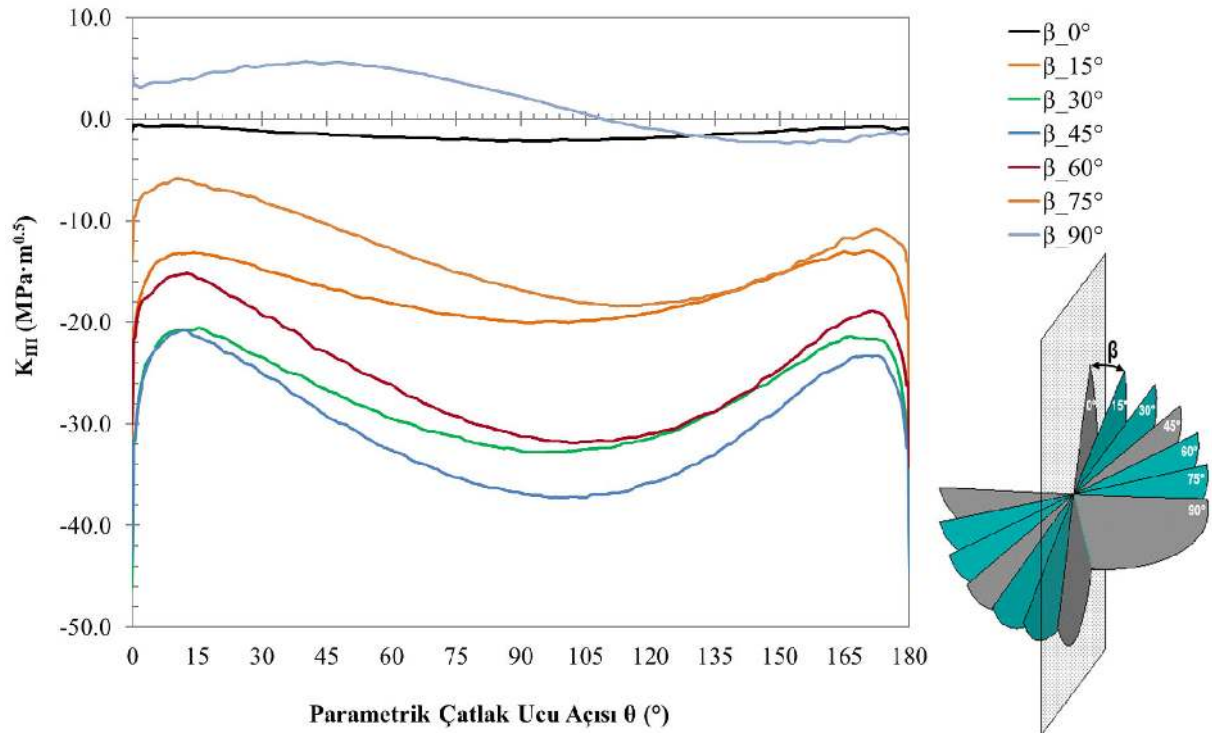


Şekil 3.12. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

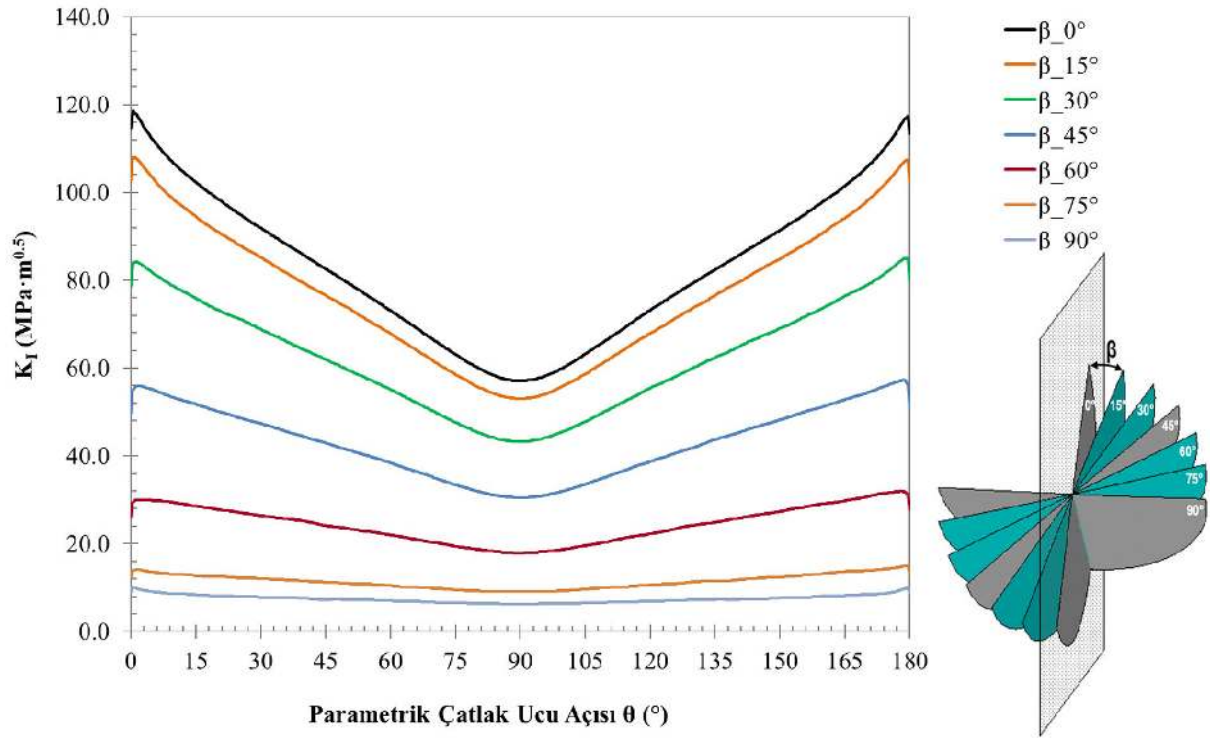


Şekil 3.13. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

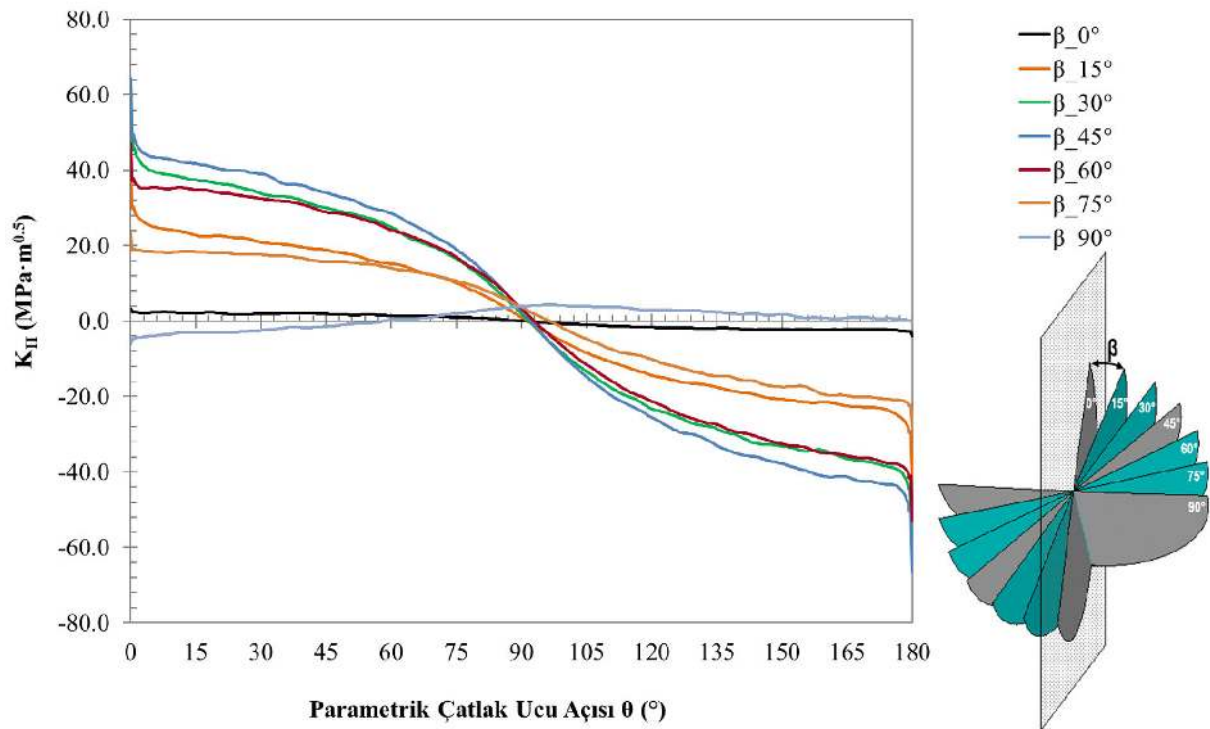
“ β ” açısının artmasıyla birlikte çatlak ucu boyunca mod-I GŞF sonuçları azalmaktadır. Şekil 3.12’de $\beta=0^\circ$ ’de mod-I GŞF maksimum iken, Şekil 3.13 ve 3.14’te görüldüğü gibi $\beta=0^\circ$ ’de mod-II ve mod-III GŞF çatlak ucu boyunca 0’a çok yakın değerlerdedir.



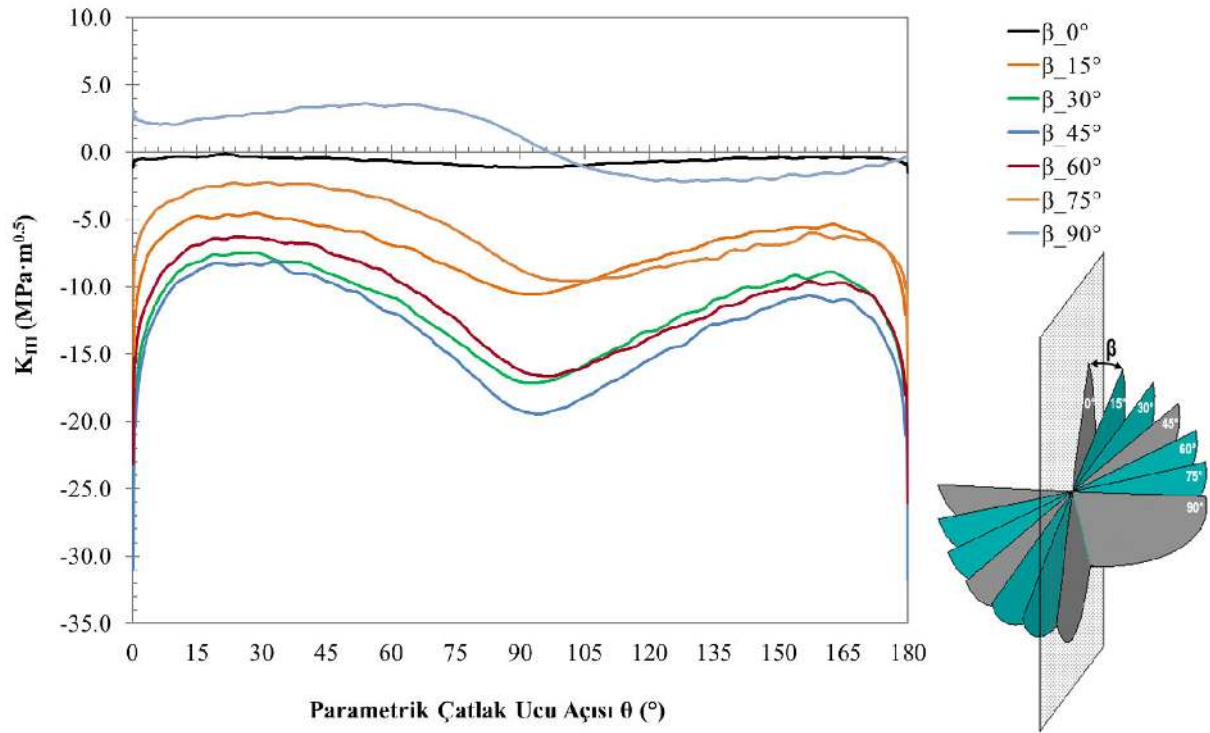
Şekil 3.14. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



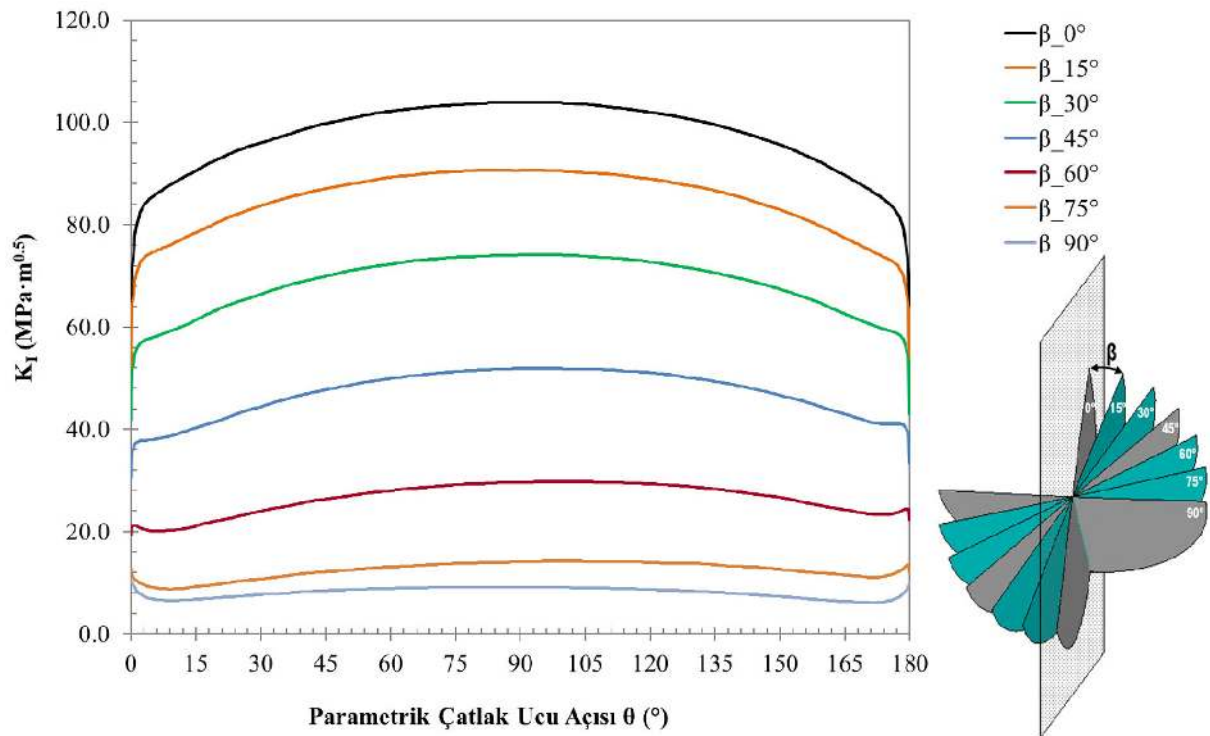
Şekil 3.15. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



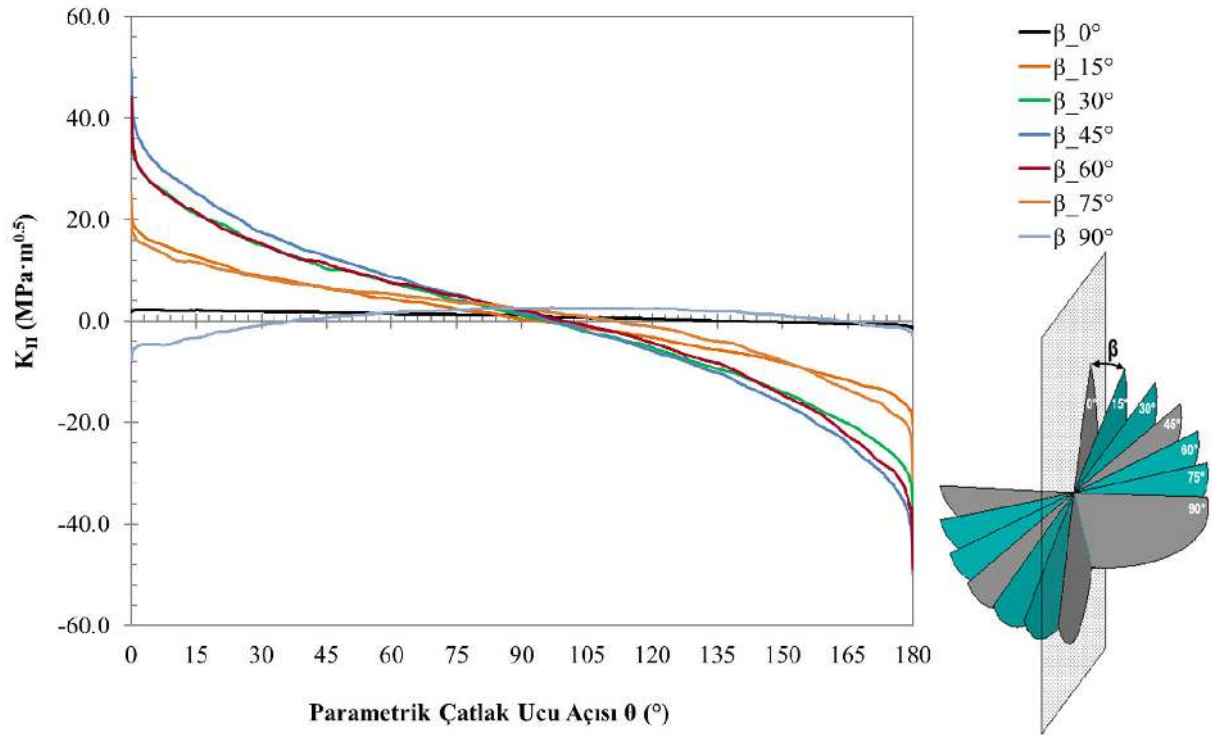
Şekil 3.16. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



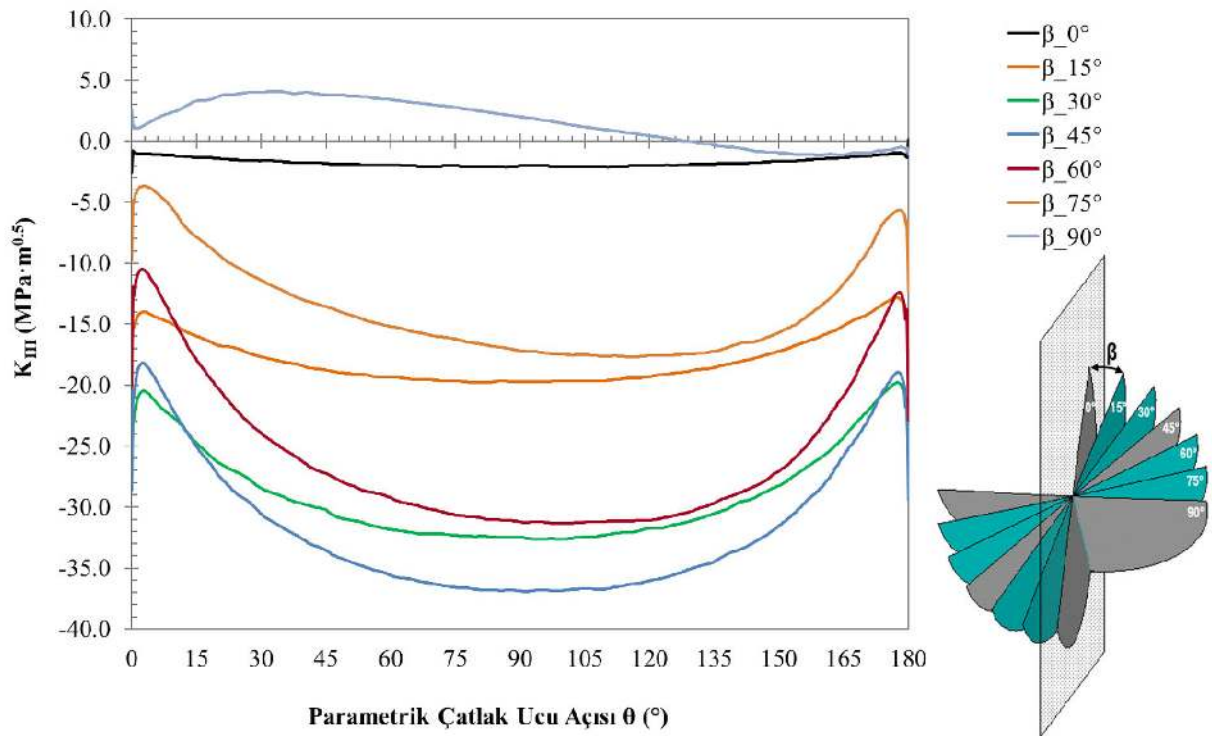
Şekil 3.17. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



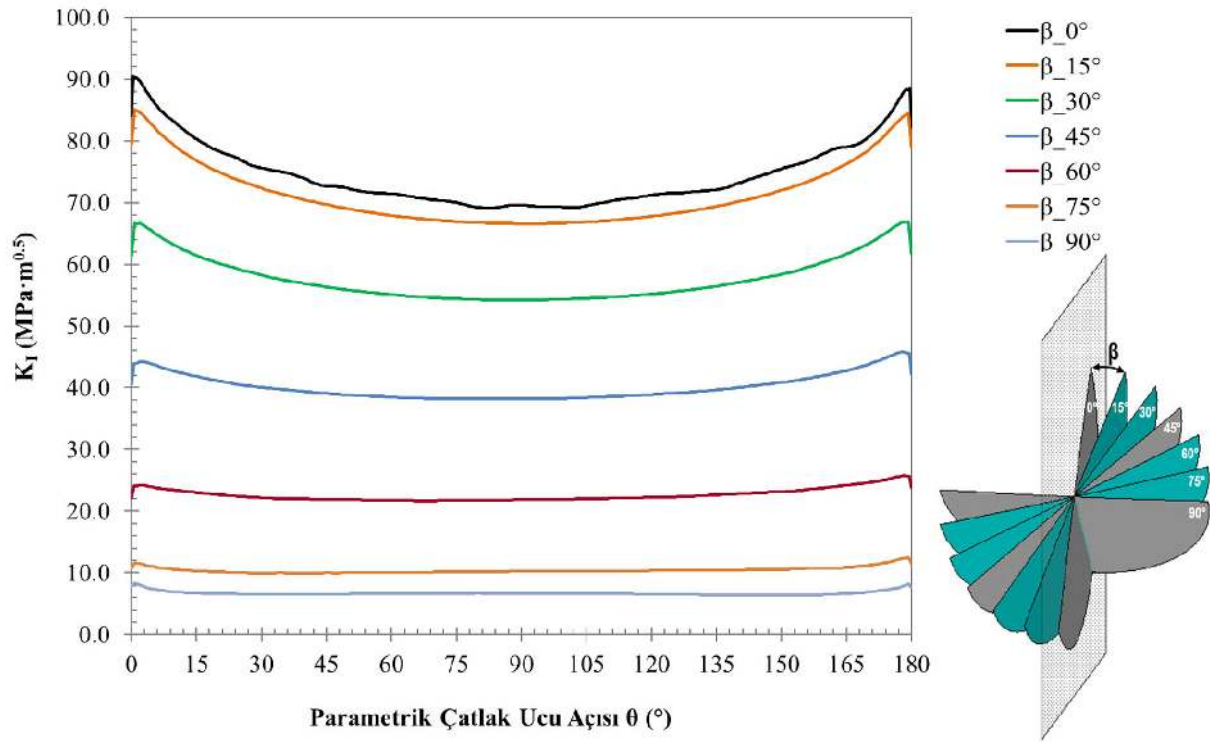
Şekil 3.18. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



Şekil 3.19. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

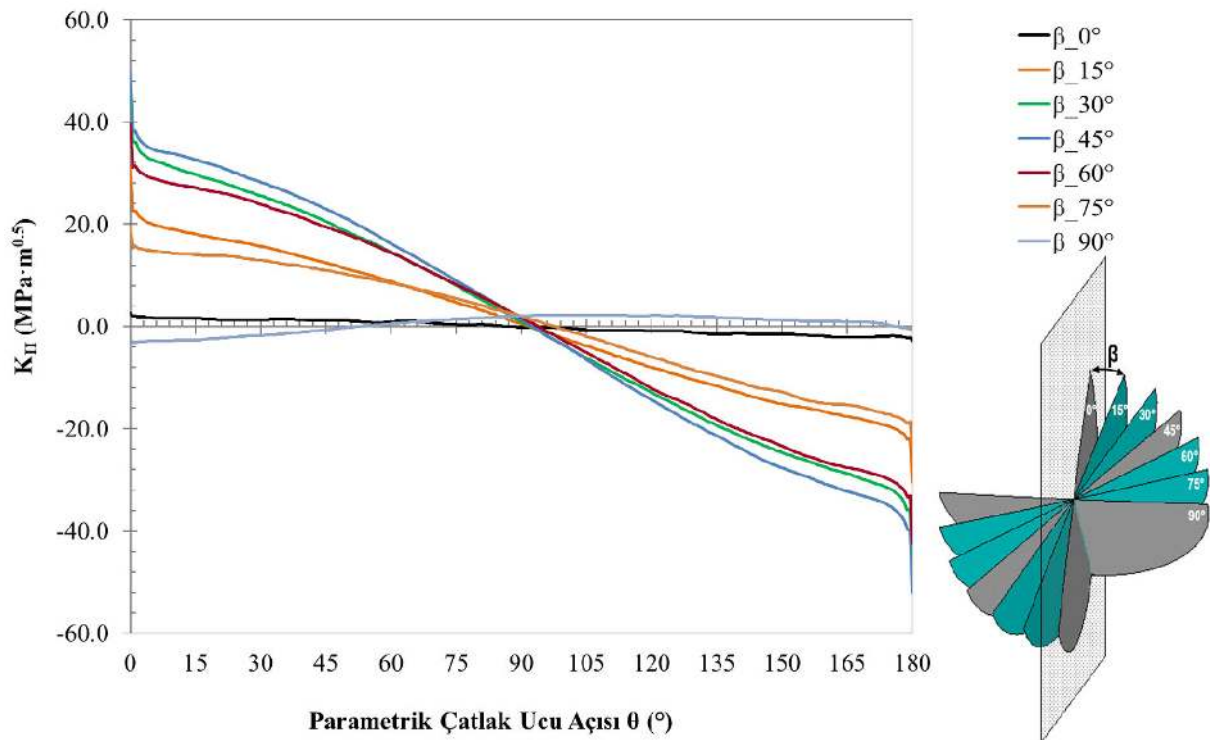


Şekil 3.20. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

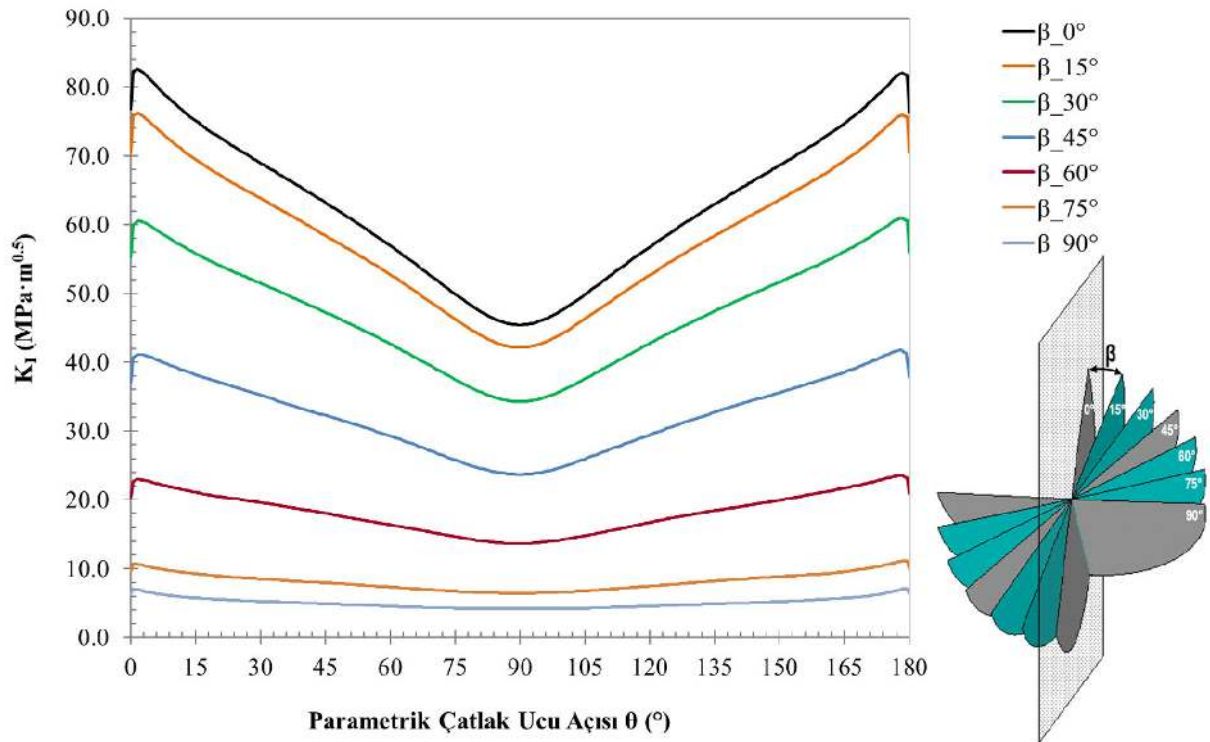
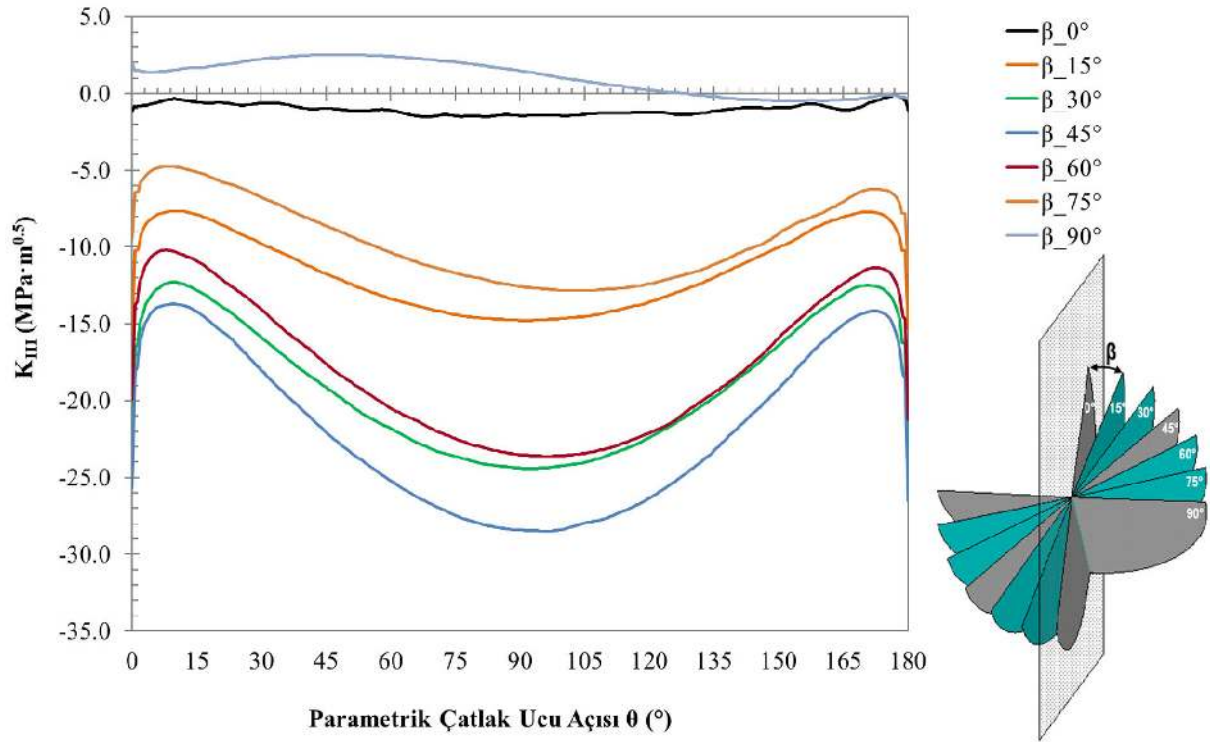


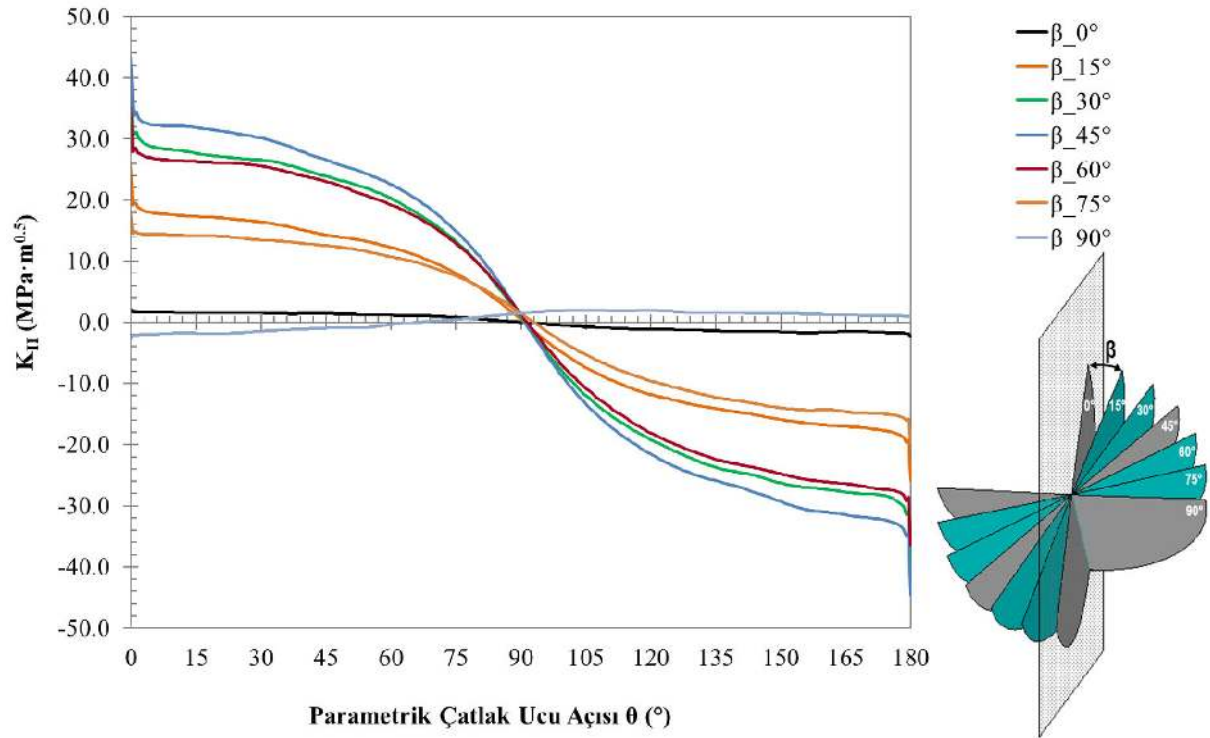
Şekil 3.21. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

Çatlak şekil oranının (a/c) 1 (Şekil 3.21) ve 2 (Şekil 3.24) olması durumunda; mod-I GŞF çatlak kenarlarından ($\theta=0^\circ$ ile $\theta=180^\circ$) çatlak ucu orta noktasına ($\theta=90^\circ$) doğru azalırken, 0.5 (Şekil 3.18) olması durumunda çatlak kenarlarından çatlak ucu orta noktasına doğru artmaktadır.

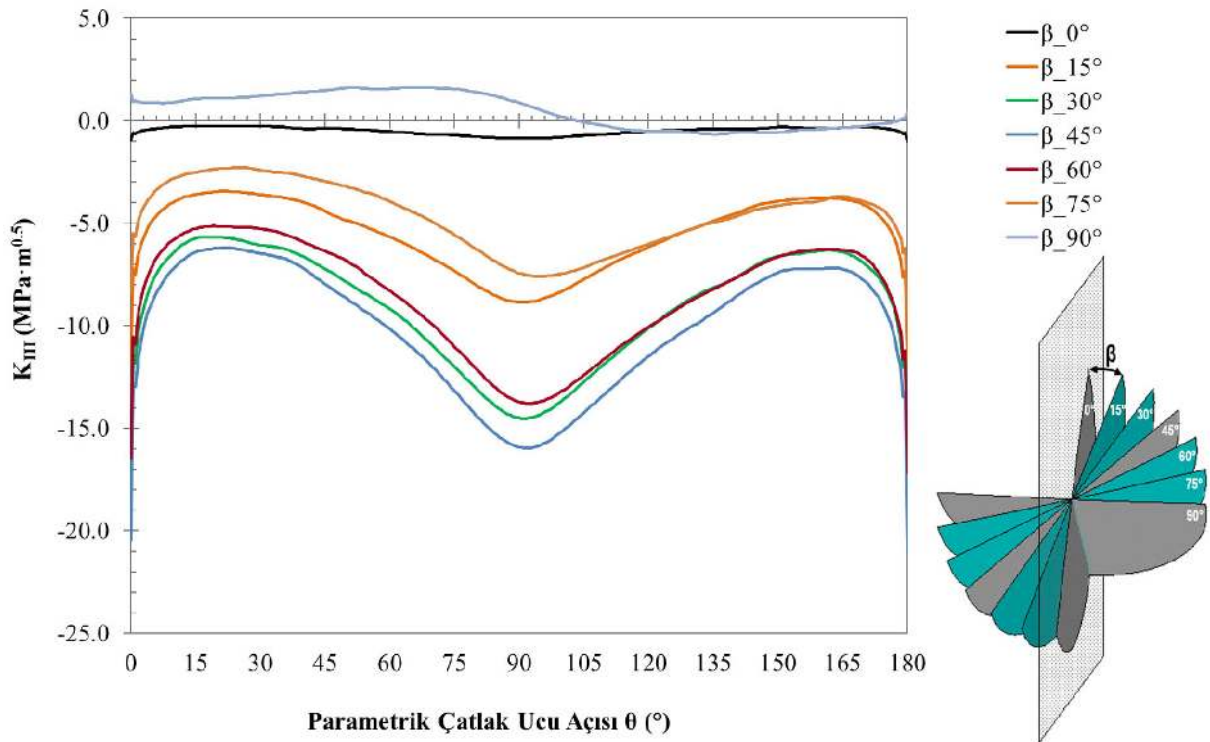


Şekil 3.22. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

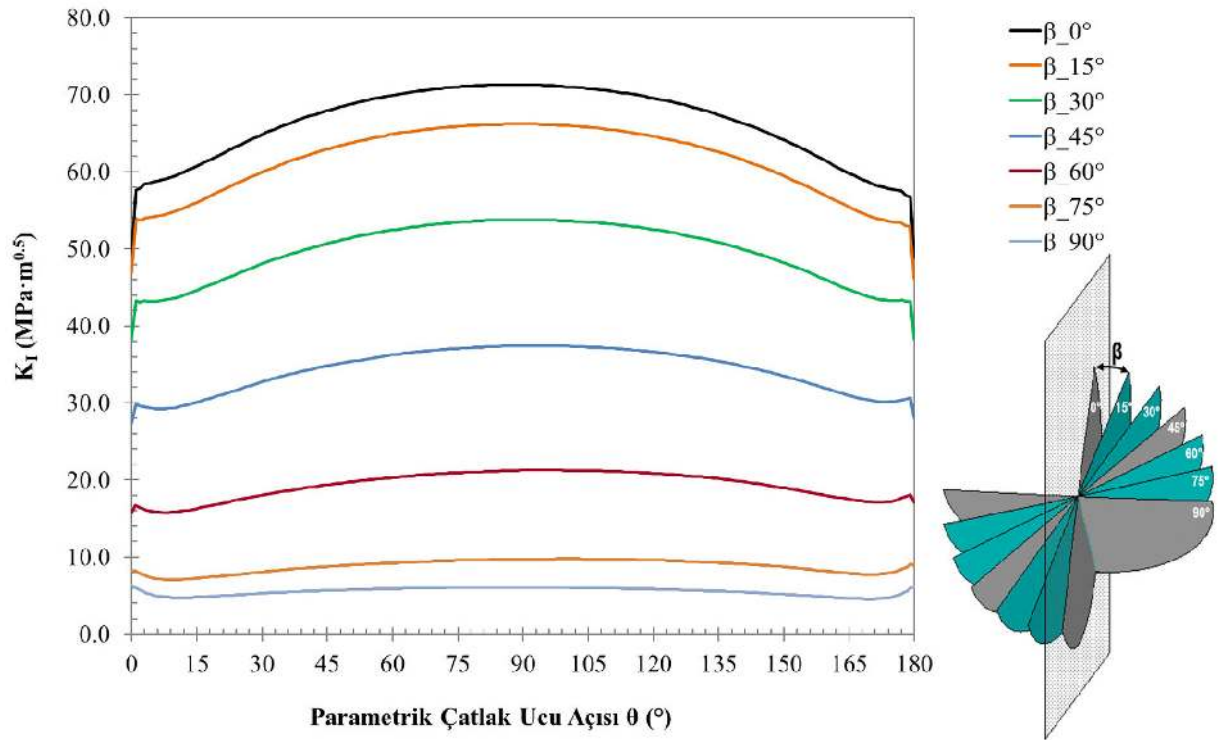




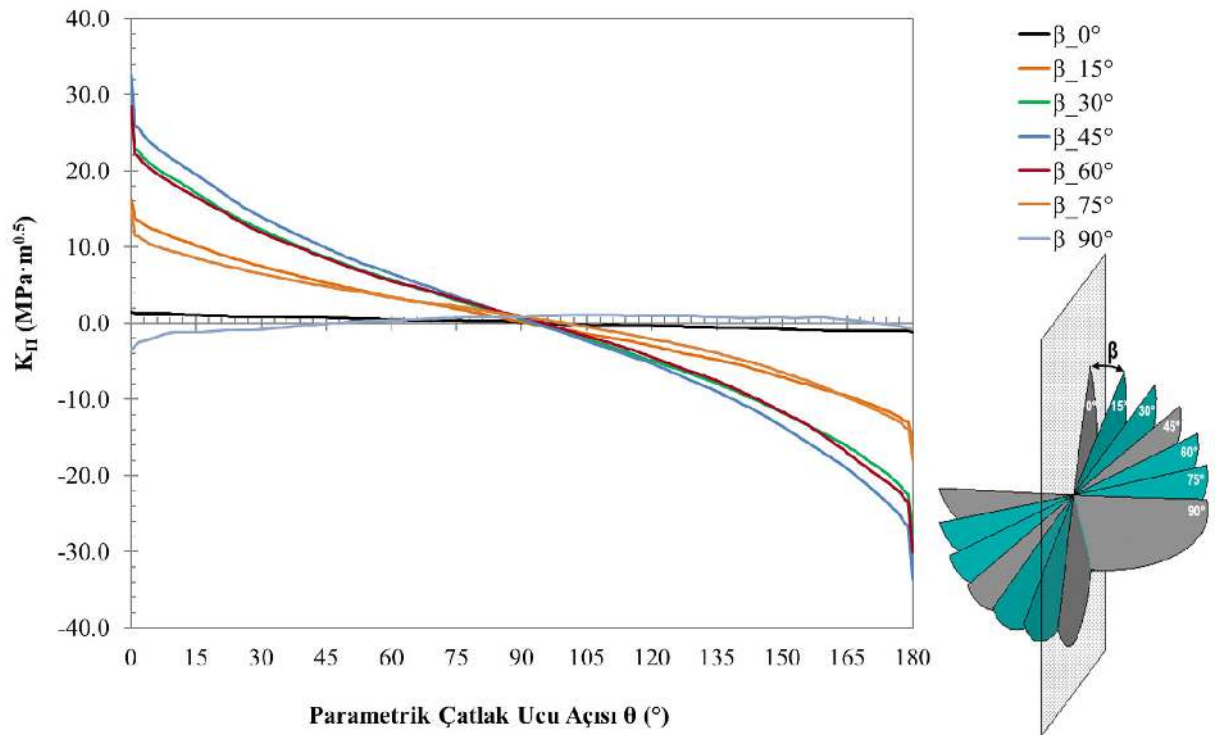
Şekil 3.25. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



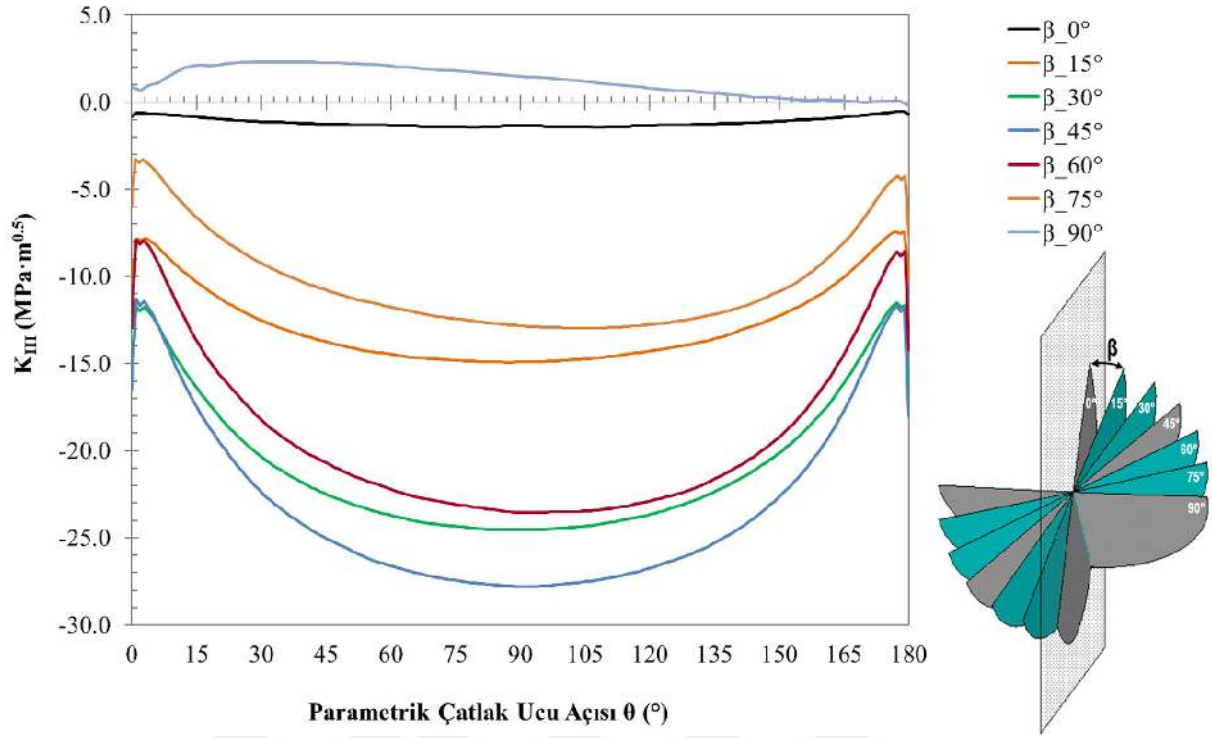
Şekil 3.26. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



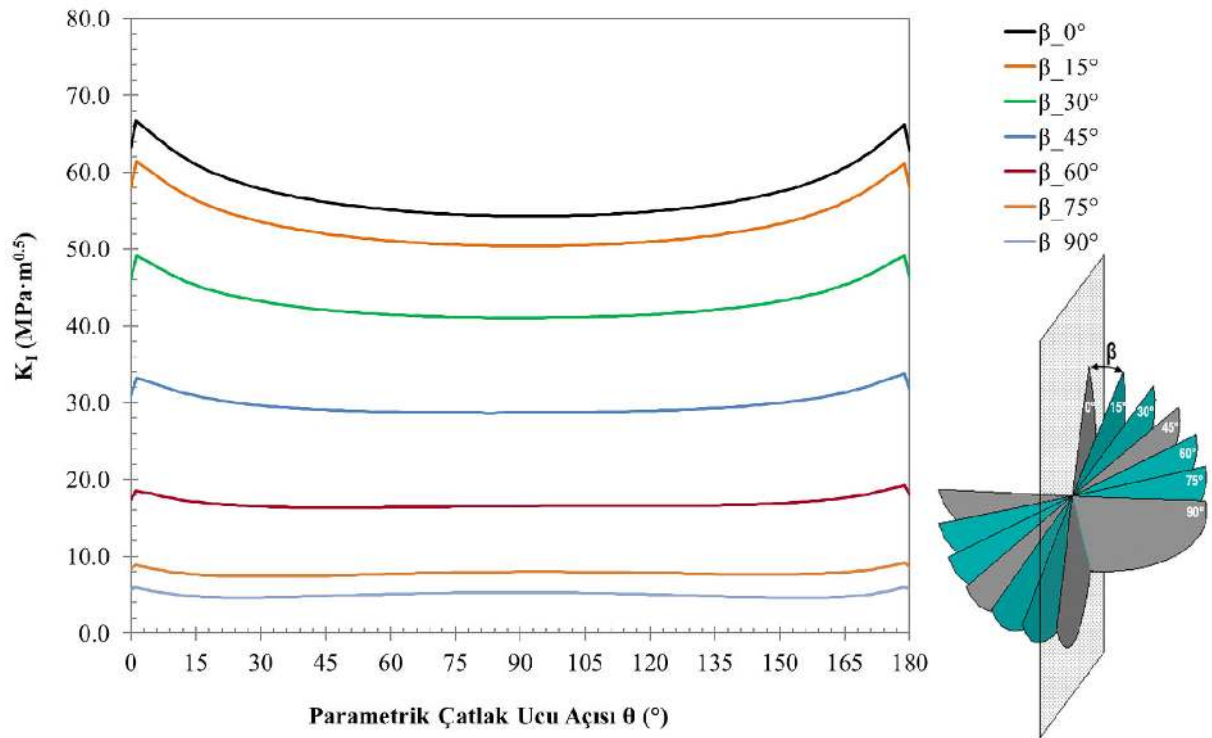
Şekil 3.27. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



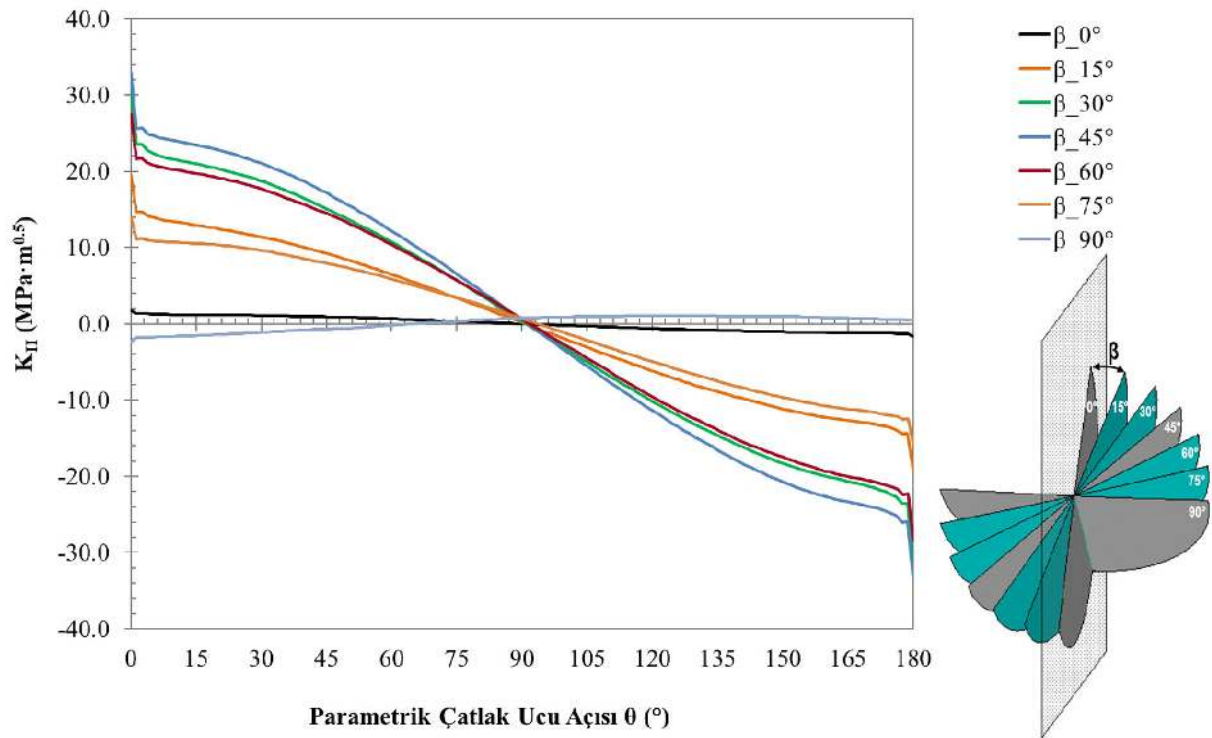
Şekil 3.28. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



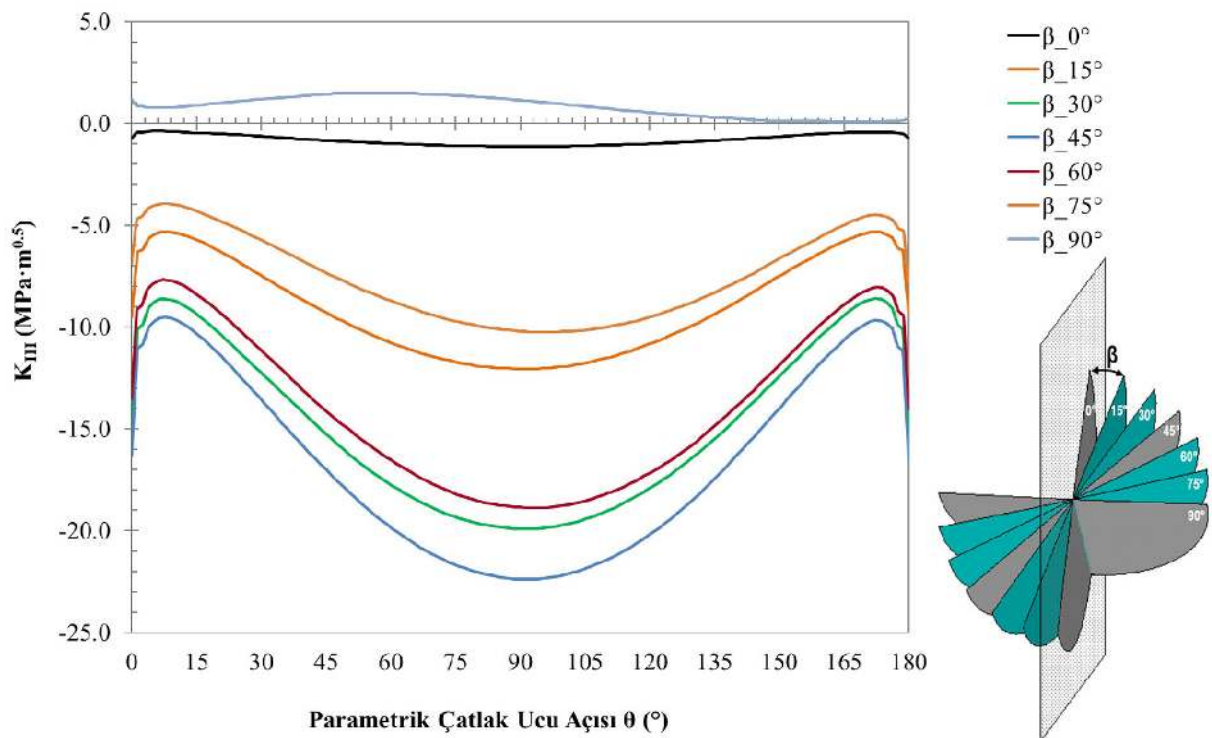
Şekil 3.29. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



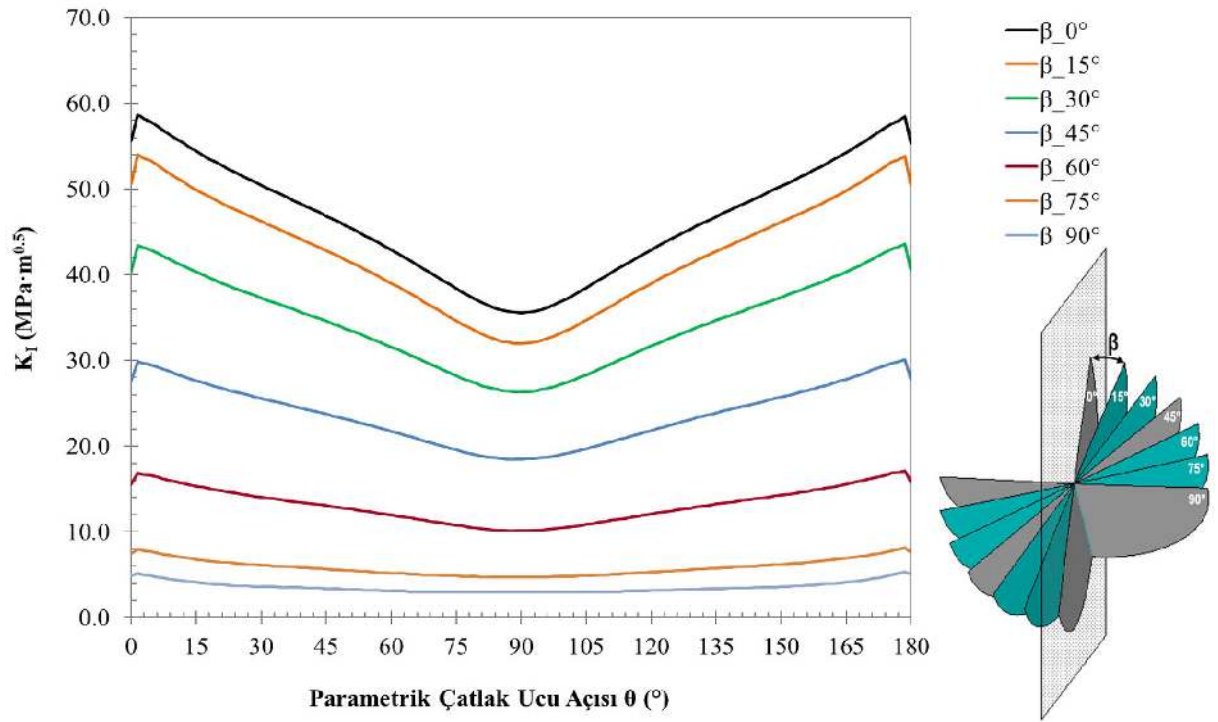
Şekil 3.30. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



Şekil 3.31. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

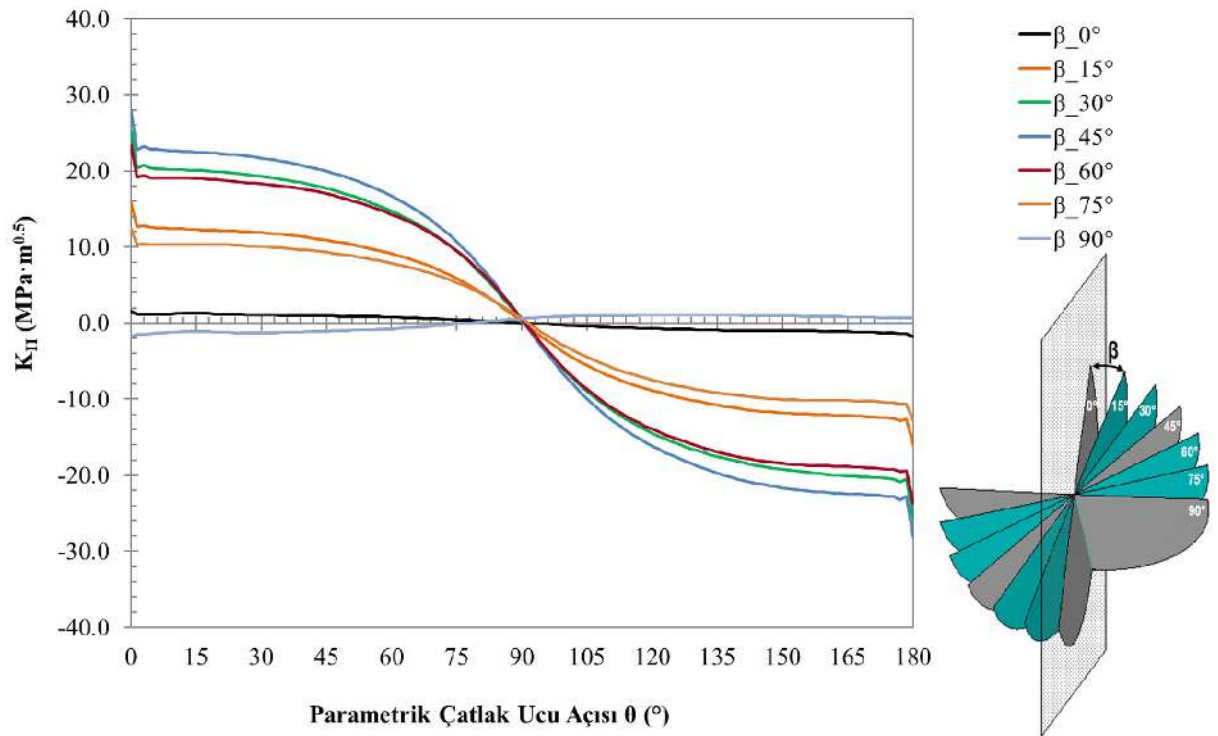


Şekil 3.32. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

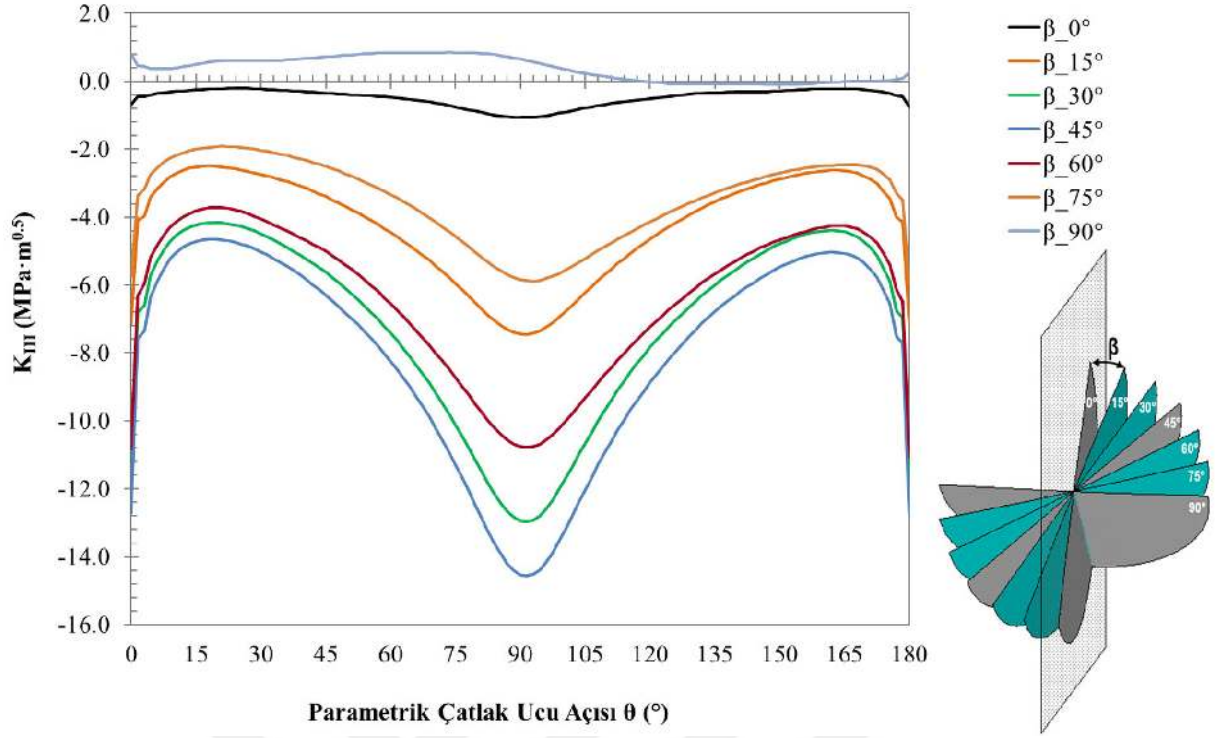


Şekil 3.33. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)

Tüm eğik çatlaklarda şekil oranı (a/t) azaldıkça GŞF değerleri azalmaktadır. Örneğin Şekil 3.15, Şekil 3.24 ve Şekil 3.33 karşılaştırıldığında mod-I için bu durum gözlemlenmektedir.

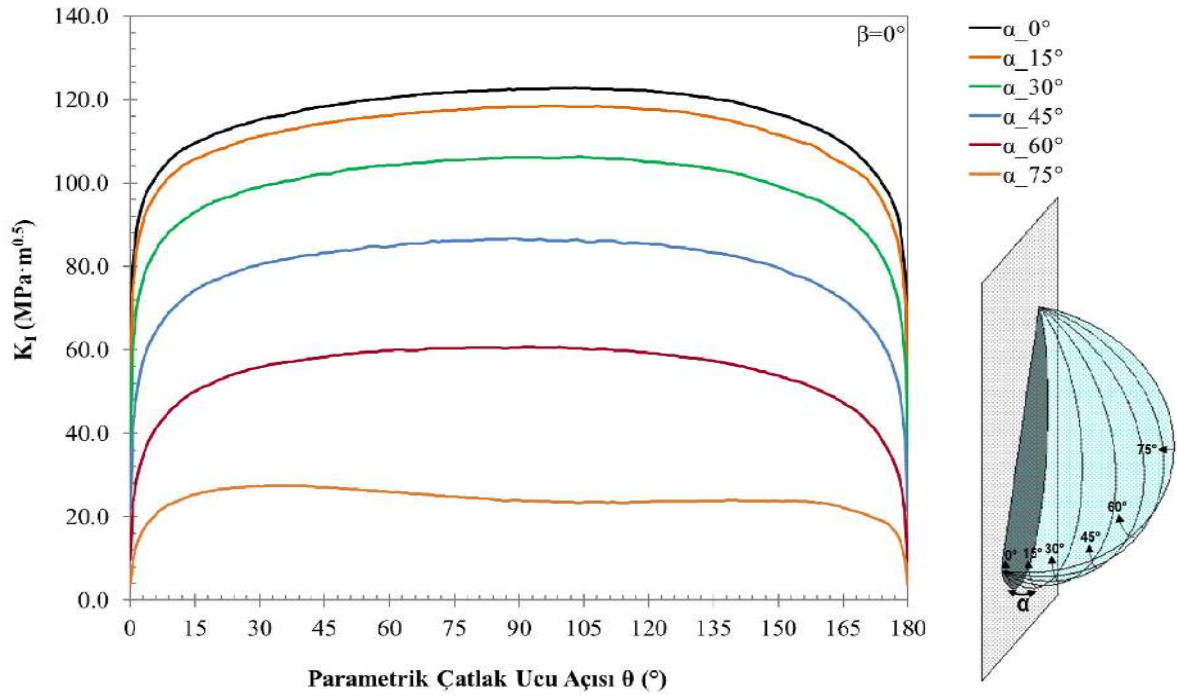


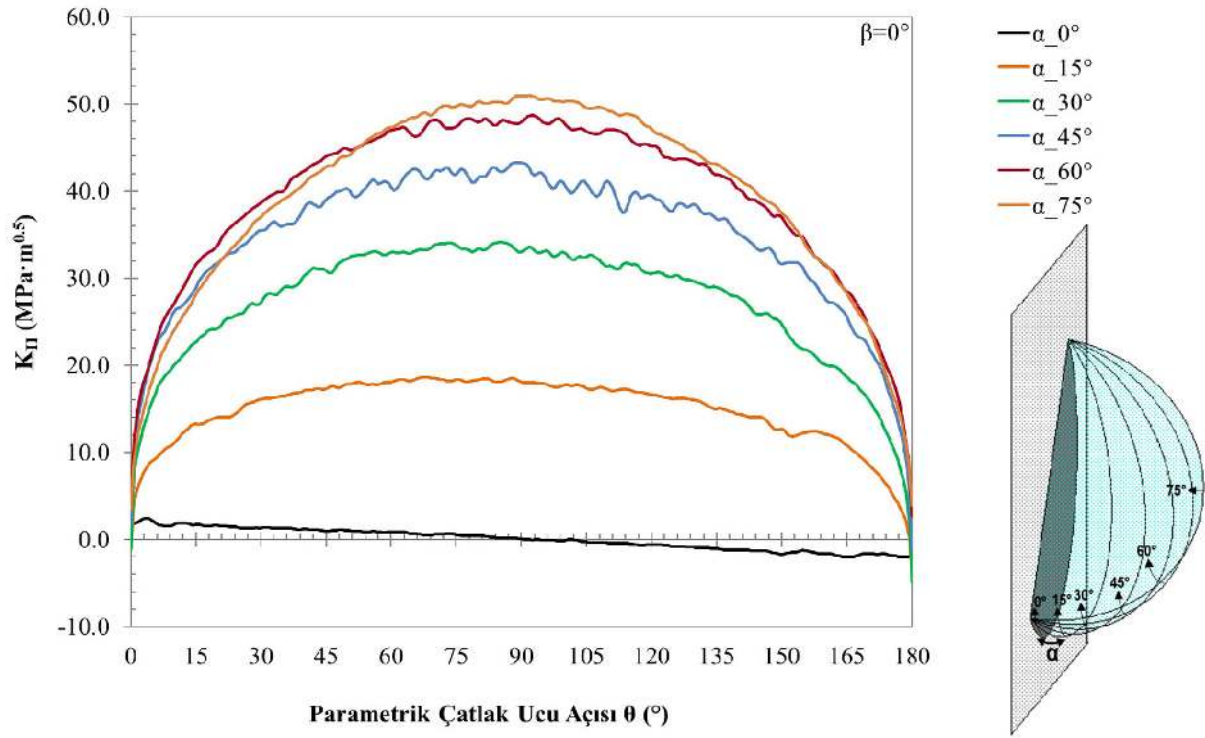
Şekil 3.34. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\alpha=0^\circ$)



3.4. 0° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizleri

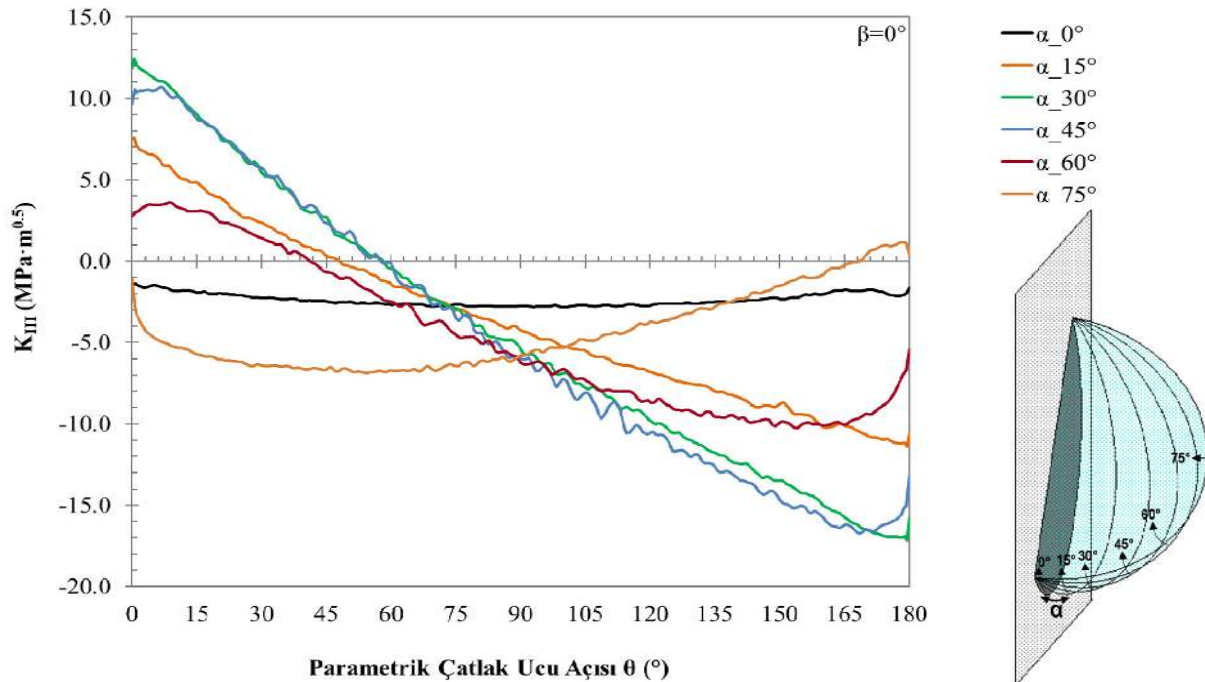
Bu bölümde $a/t=0.0625$, 0.125 , 0.25 ve $a/c=0.5$, 1 , 2 çatlak oranlarına sahip 0° eğim açısında 0 , 15 , 30 , 45 , 60 , 75 derece dönmüş yükleme açıları için kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve çatlak ucu boyunca elde edilen K_I , K_{II} , K_{III} GŞF değerleri Şekil 3.36-3.62’de verilmiştir.



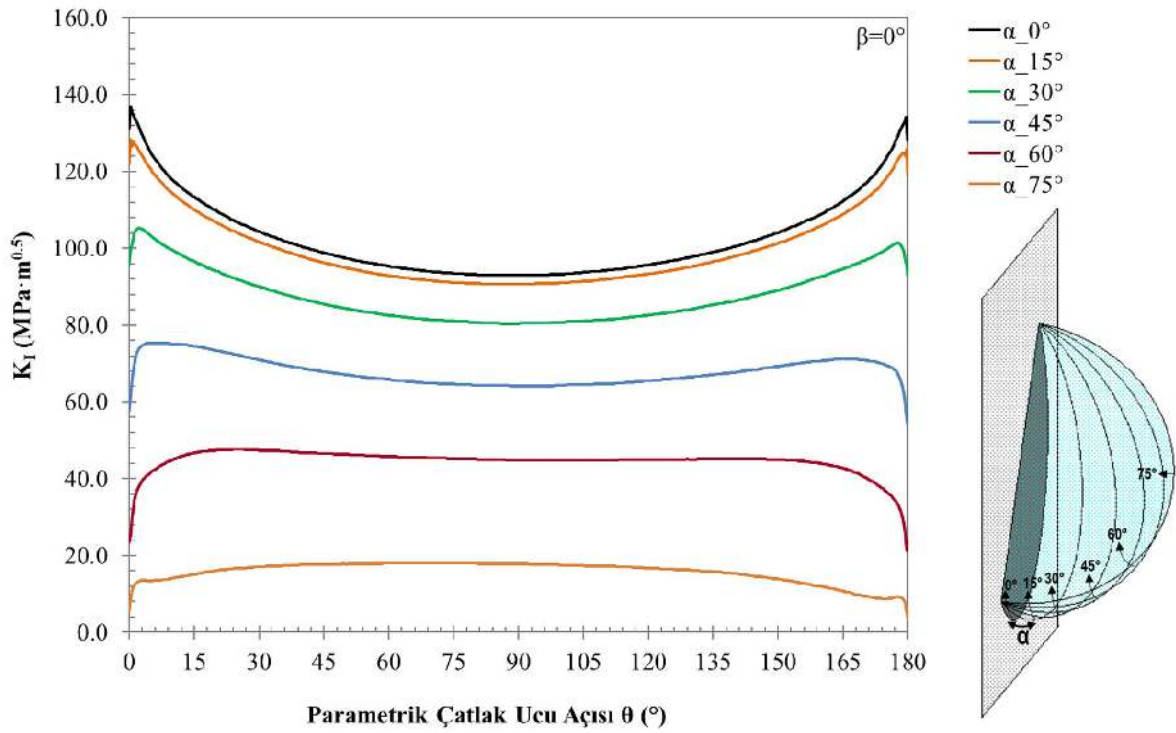


Şekil 3.37. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

Maksimum çatlak en boy oranında Şekil 3.37’de mod-II GŞF ve Şekil 3.38’de mod-III GŞF değerleri için gürültülü sonuç elde edilirken Şekil 3.36’da mod-I GŞF sonuçlarının gürültüsüz olduğu görülmektedir. Mod-I, mod-II, mod-III GŞF sonuçlarının çatlak ucu boyunca simetrik olma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bir önceki bölümde belirtildiği gibi, çatlak ucu boyunca daha fazla eleman kullanılarak mevcut gürültünün giderilebileceği düşünülmektedir.

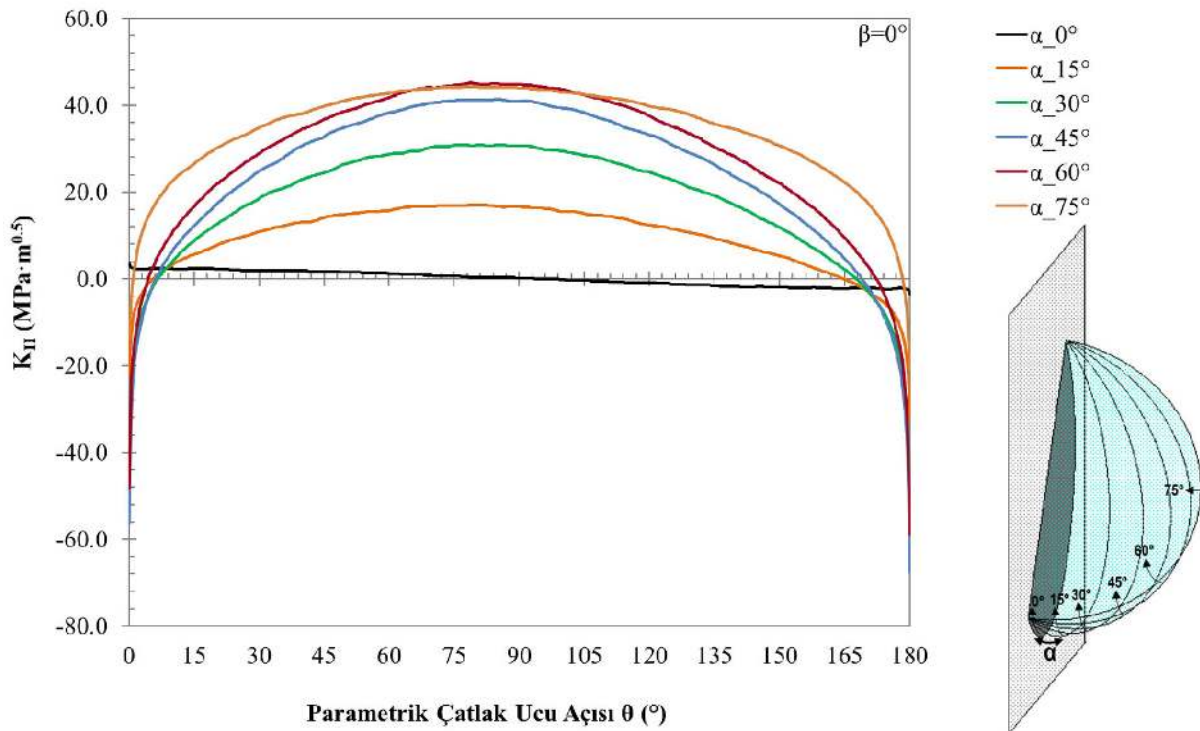


Şekil 3.38. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

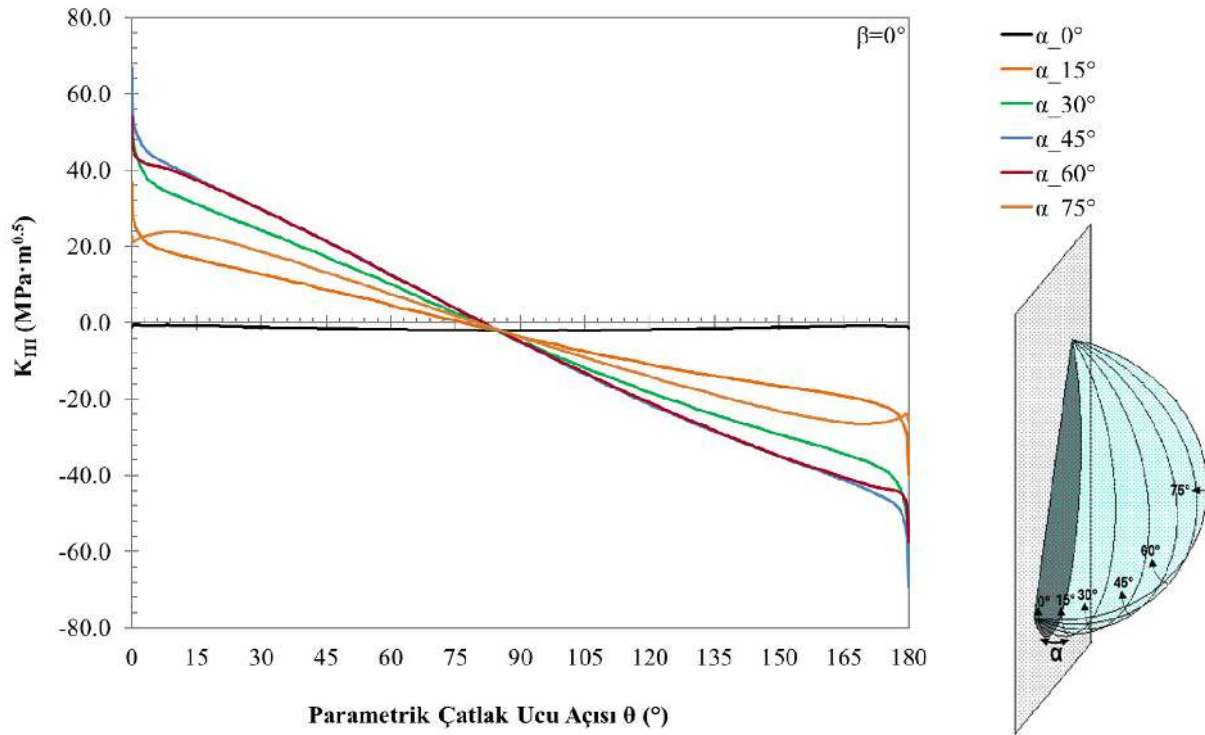


Şekil 3.39. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

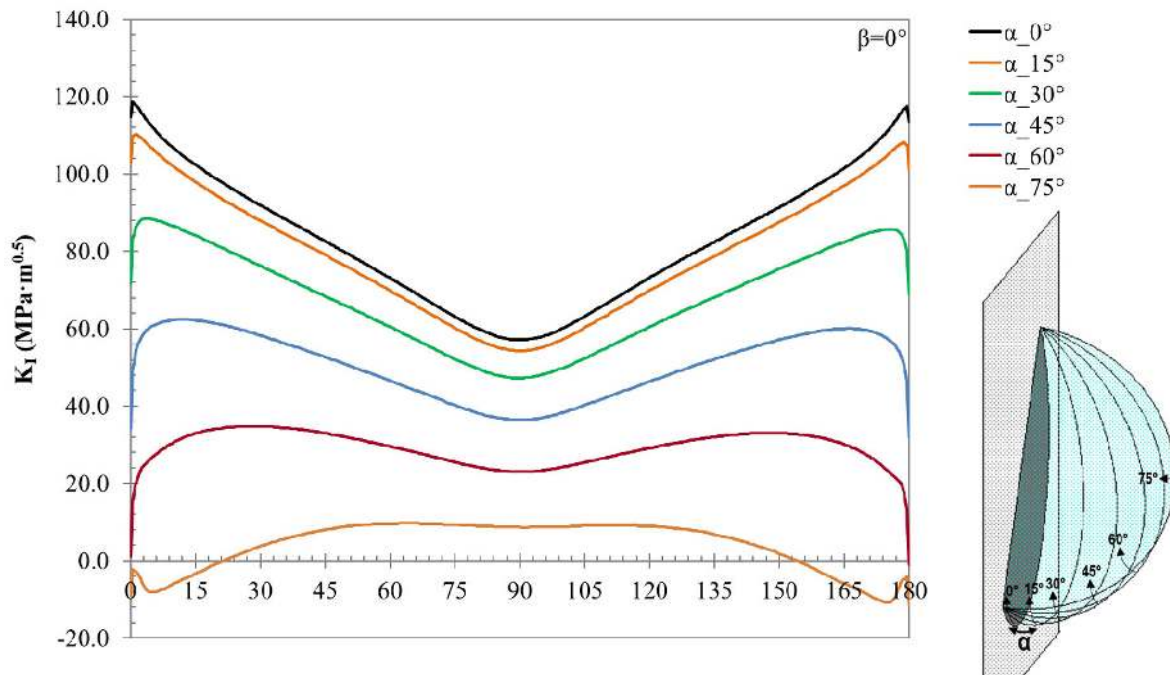
Dönme açısı (α) artmasıyla birlikte çatlak ucu boyunca mod-I GŞF sonuçları azalmaktadır. Şekil 3.39’da $\alpha=0^\circ$ ’de mod-I GŞF $a/c=1$ durumunda maksimum iken Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’de görüldüğü gibi $\alpha=0^\circ$ ’de mod-II ve mod-III GŞF çatlak ucu boyunca yaklaşık 0 değerindedir.



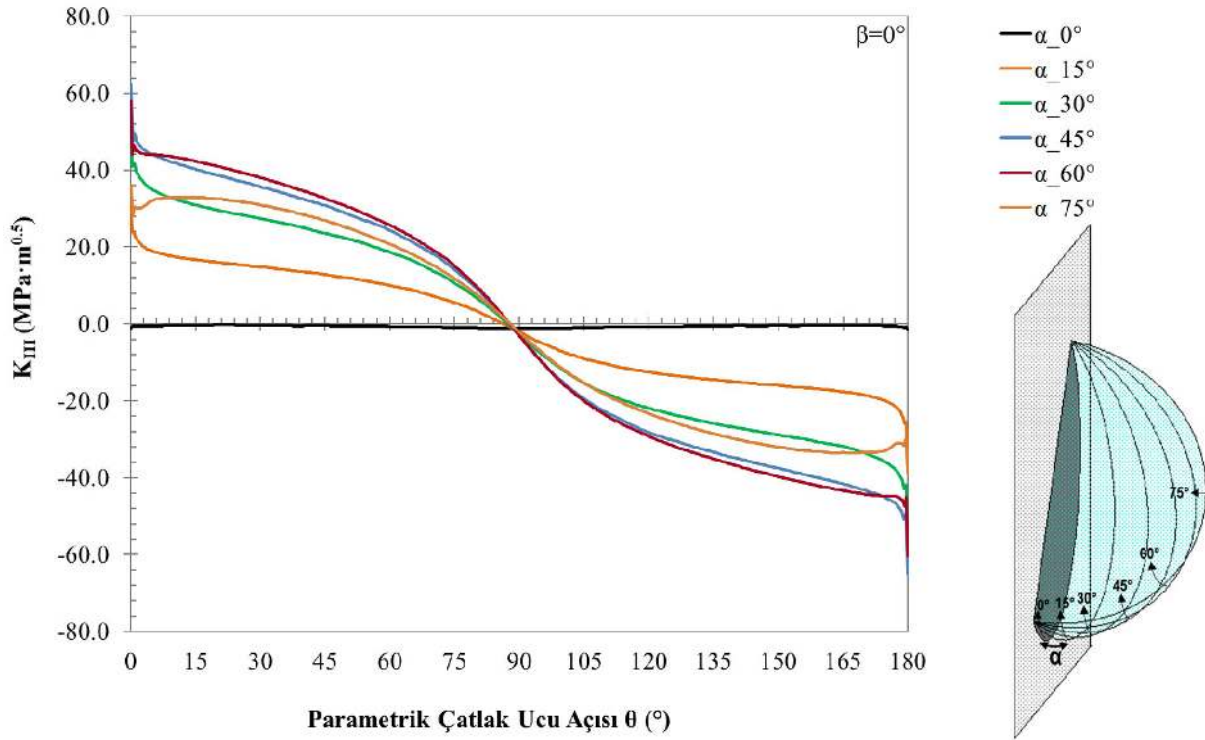
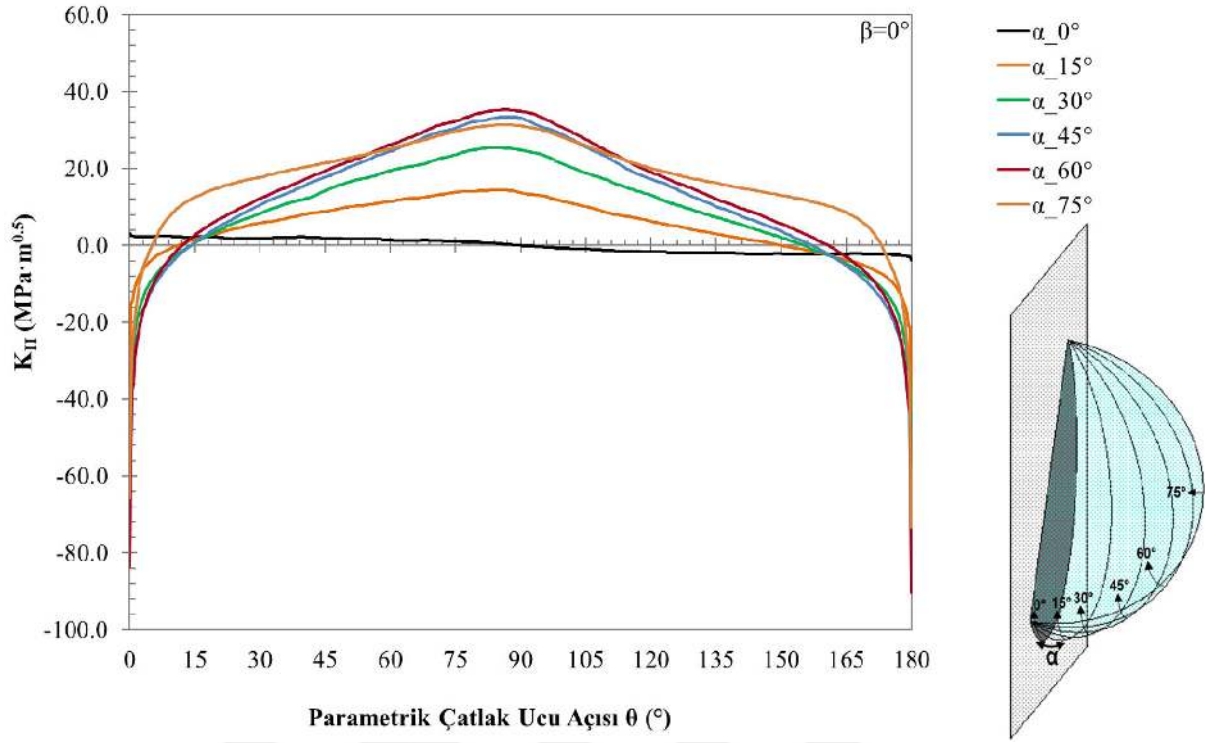
Şekil 3.40. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

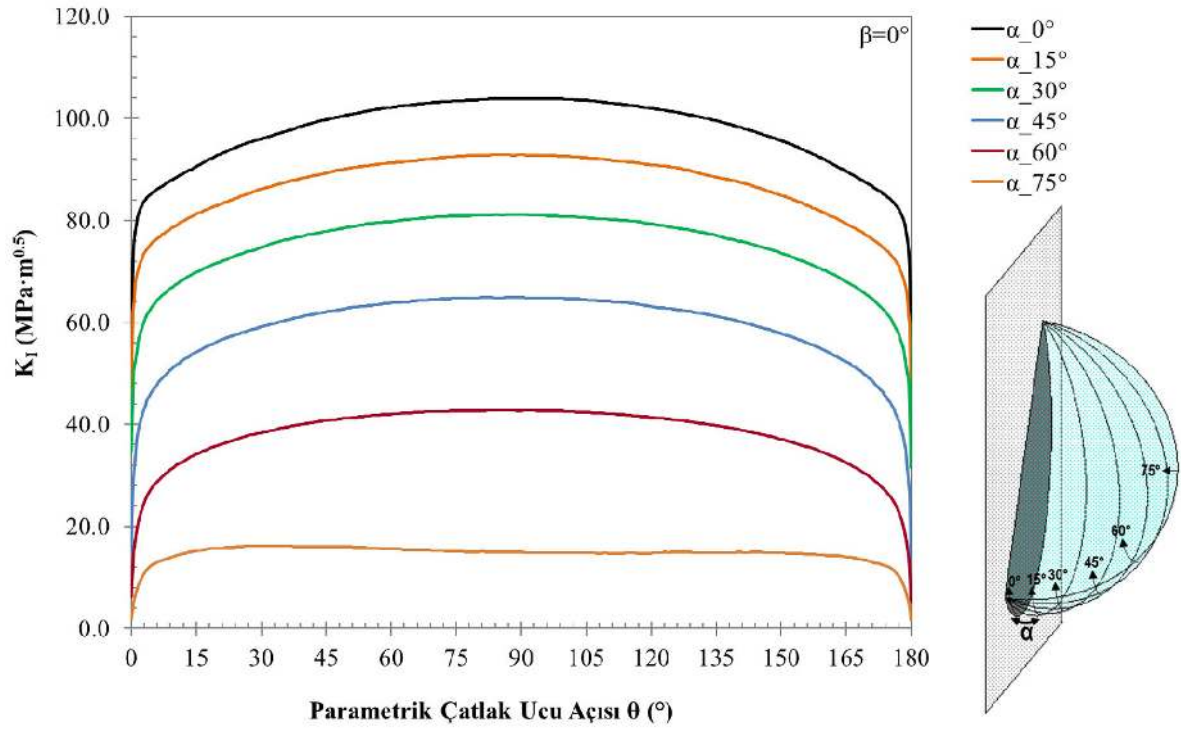


Şekil 3.41. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

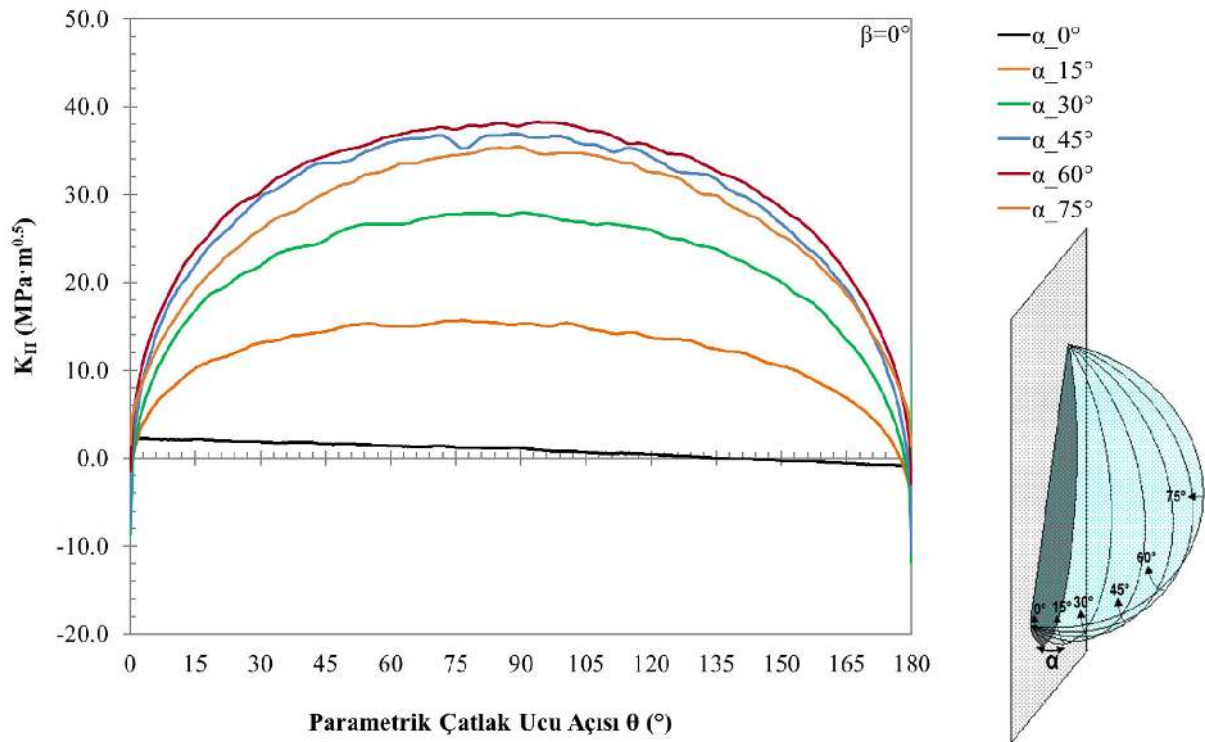


Şekil 3.42. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

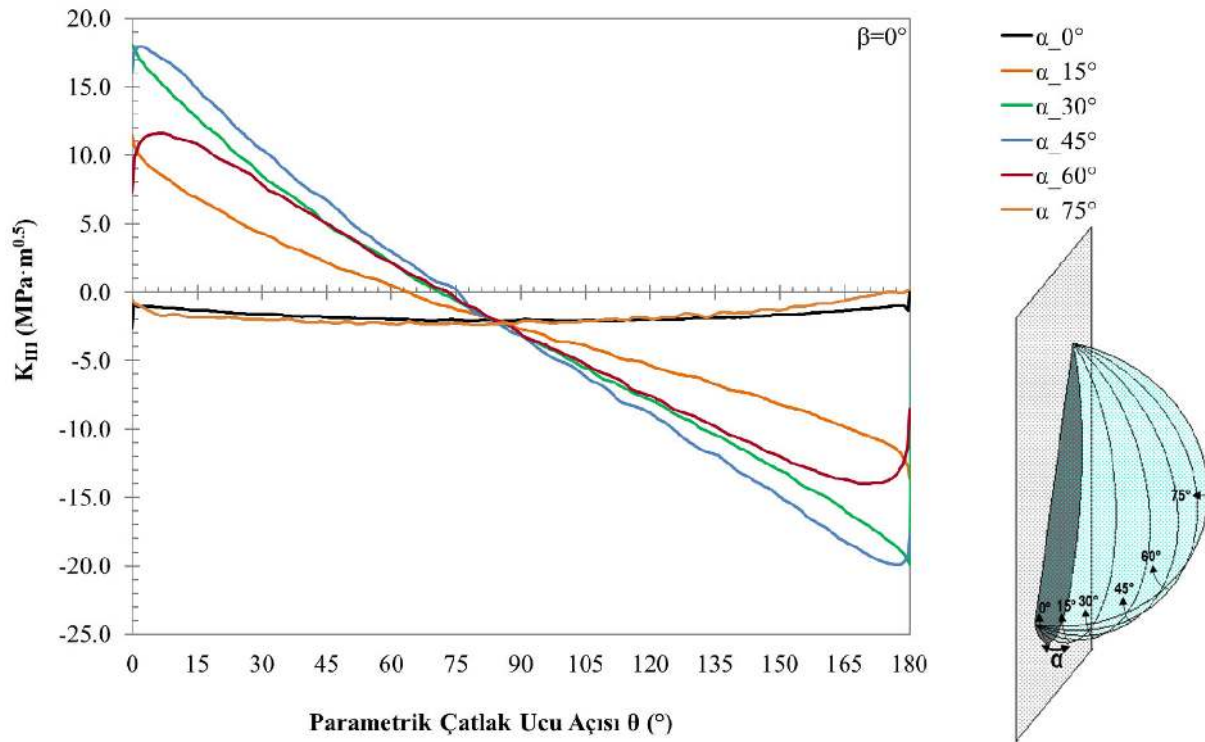




Şekil 3.45. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

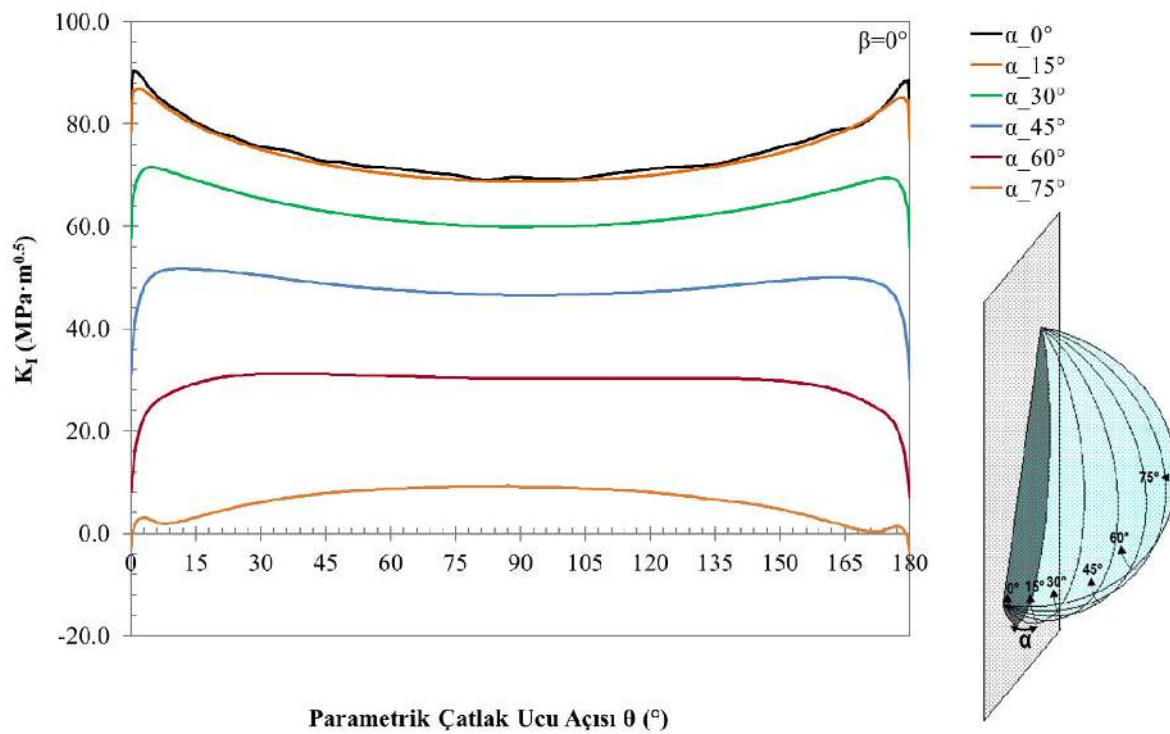


Şekil 3.46. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

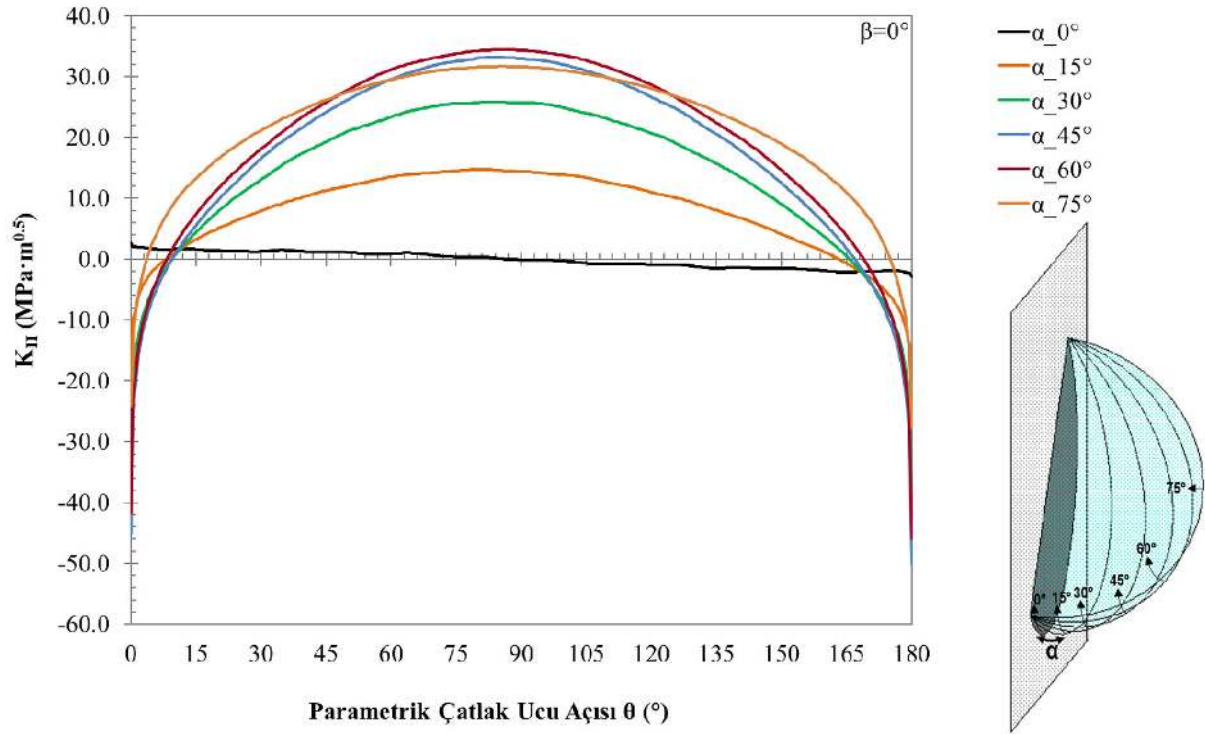


Şekil 3.47. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

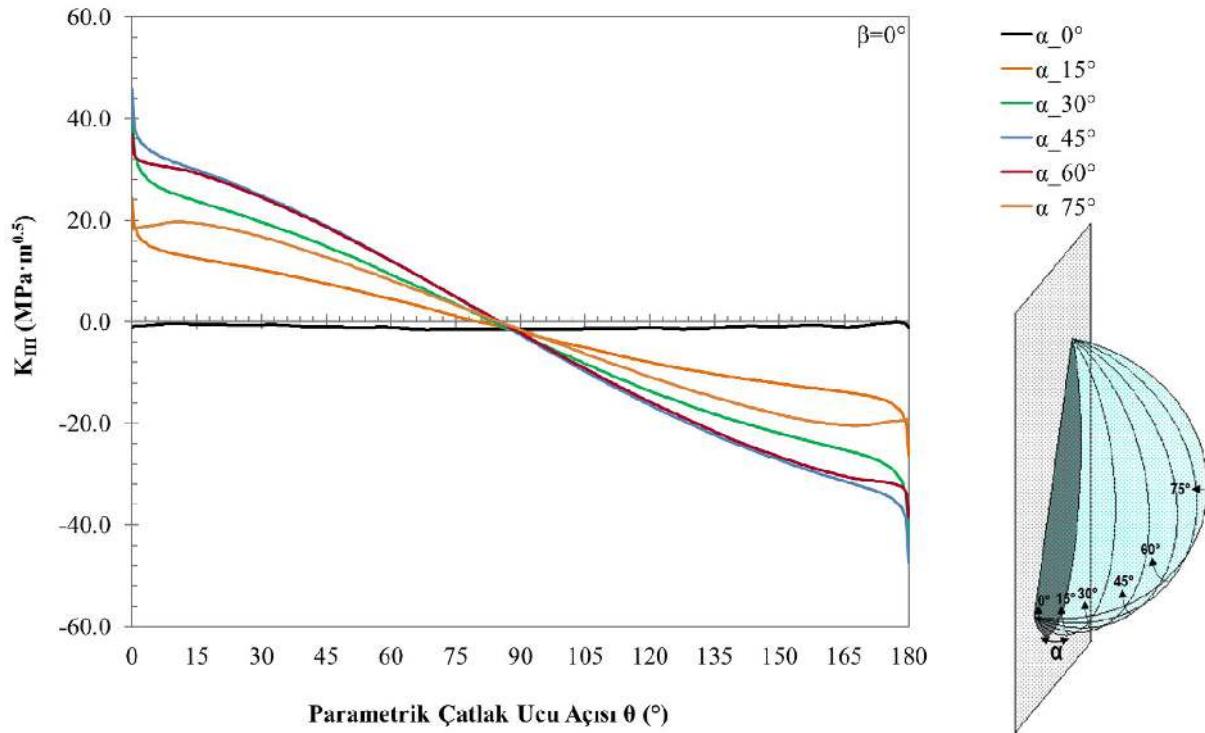
Şekil 3.48’de görüldüğü üzere istisnai olarak $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ ’de neredeyse aynı mod-I GŞF sonuçları elde edilmiştir. Ancak Şekil 3.49’da mod-II GŞF ve Şekil 3.50’de mod-III GŞF sonuçları incelediğinde tutarlı olduğu görülmektedir.



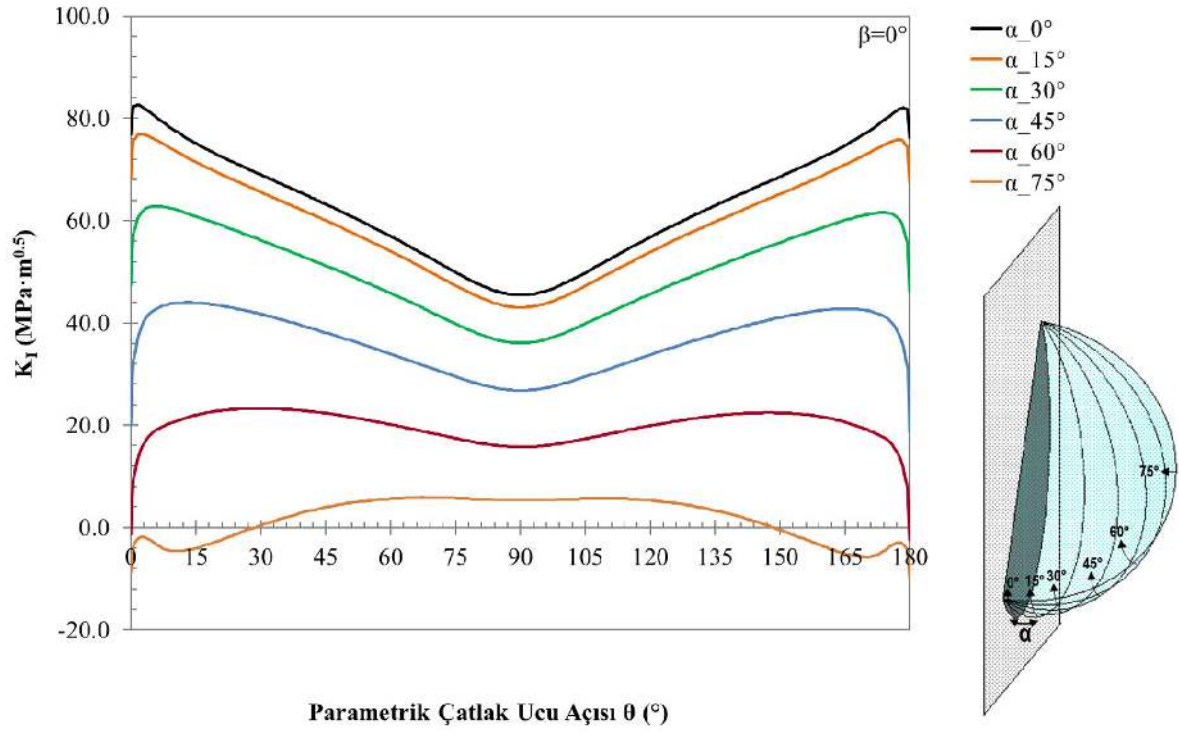
Şekil 3.48. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



Şekil 3.49. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

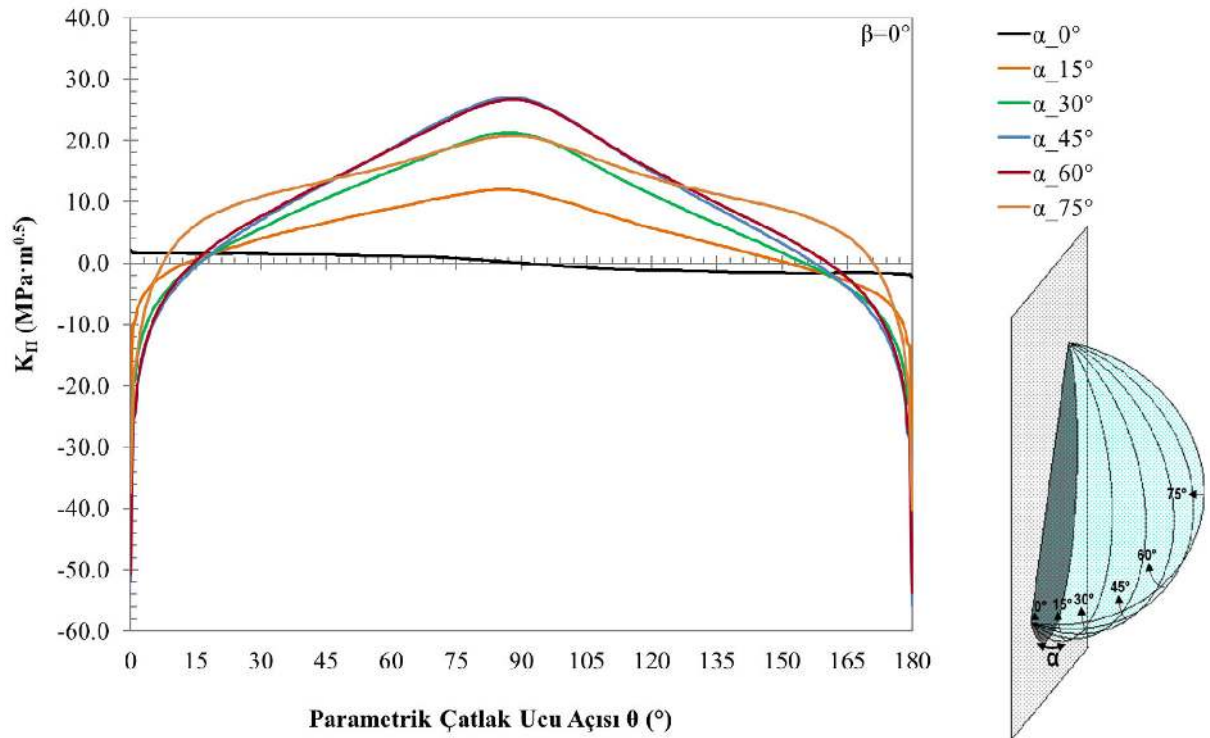


Şekil 3.50. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

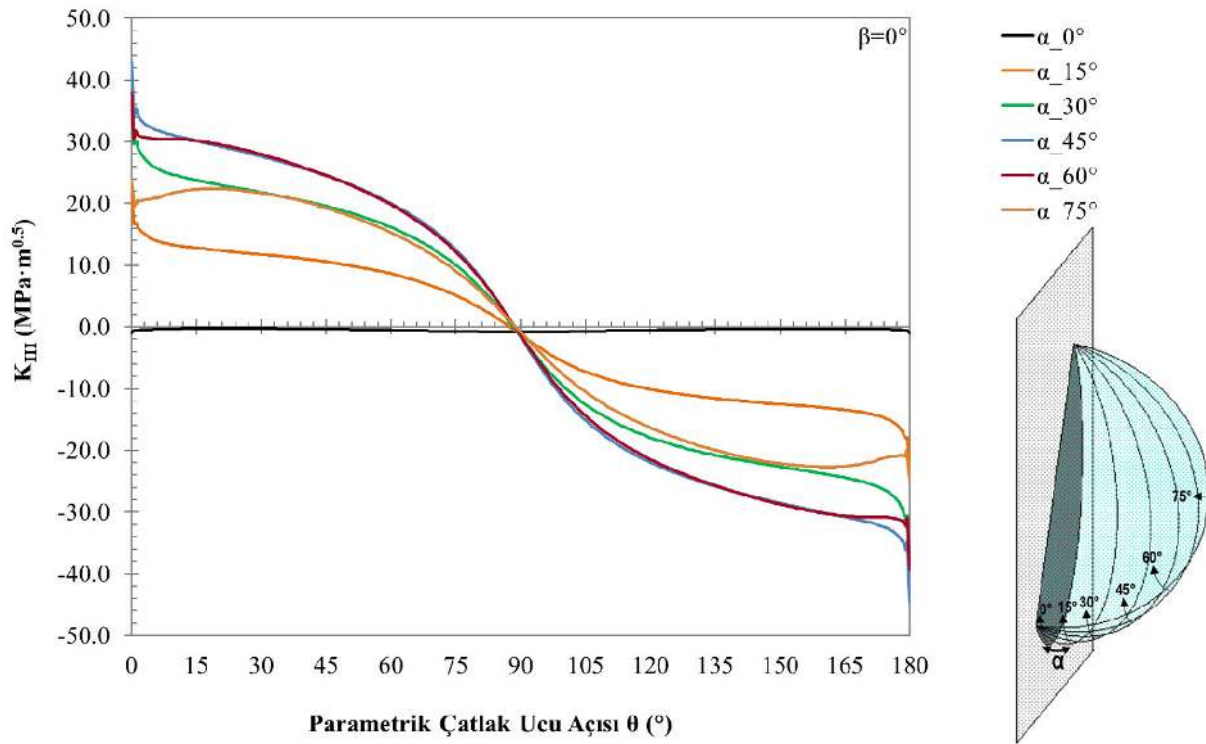


Şekil 3.51. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

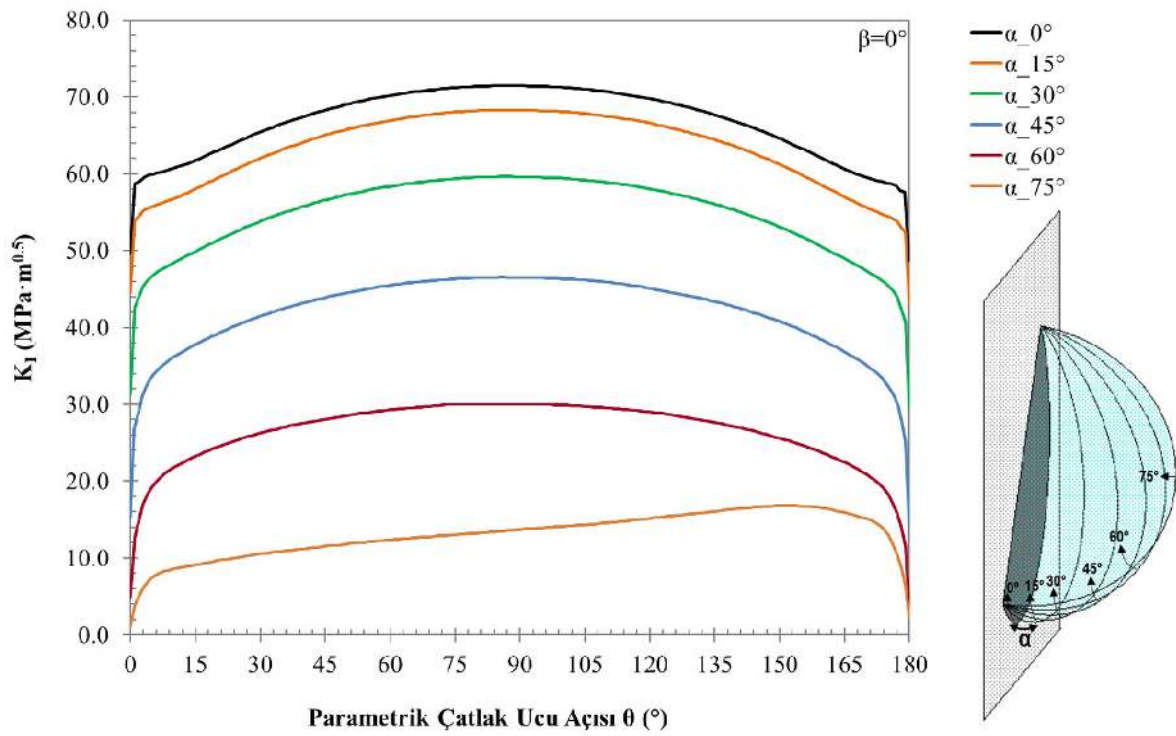
Mod-II ve mod-III GŞF sonuçları sırasıyla Şekil 3.52 ve Şekil 3.53'te görüldüğü gibi $\alpha=60^\circ$ ve $\alpha=45^\circ$ 'te çatlak ucu boyunca neredeyse aynı değerleri takip etmiştir.



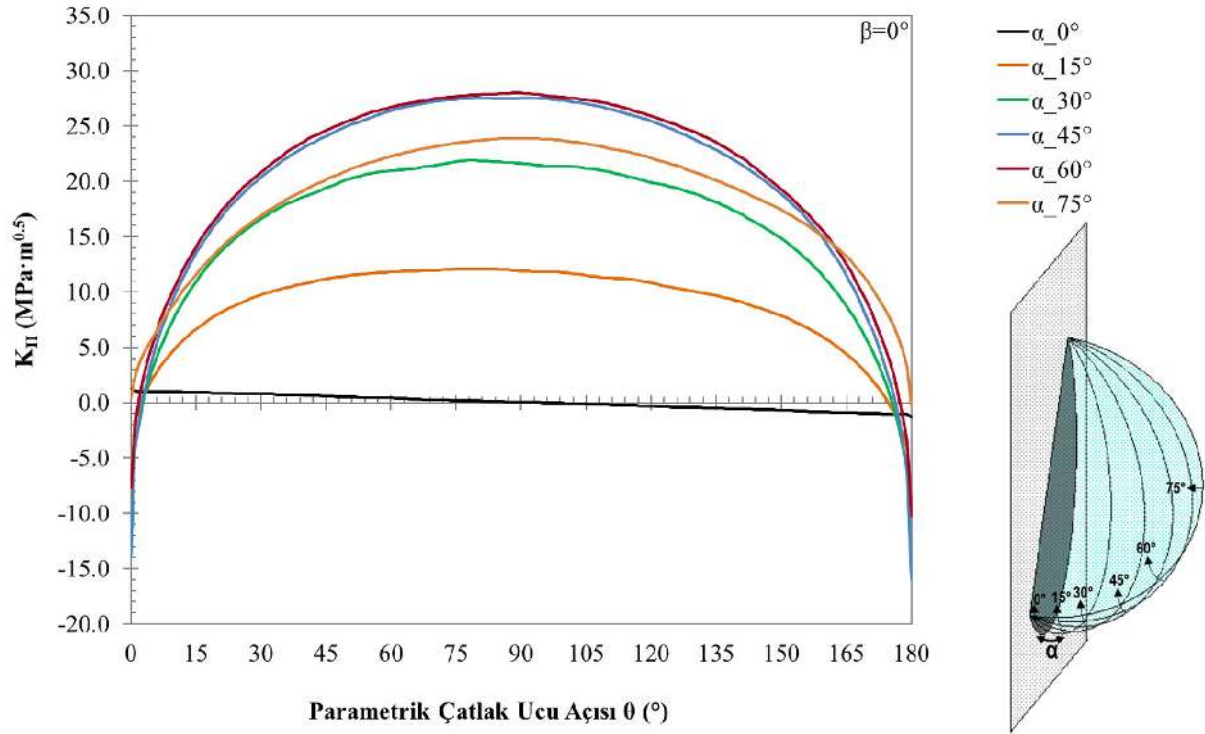
Şekil 3.52. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



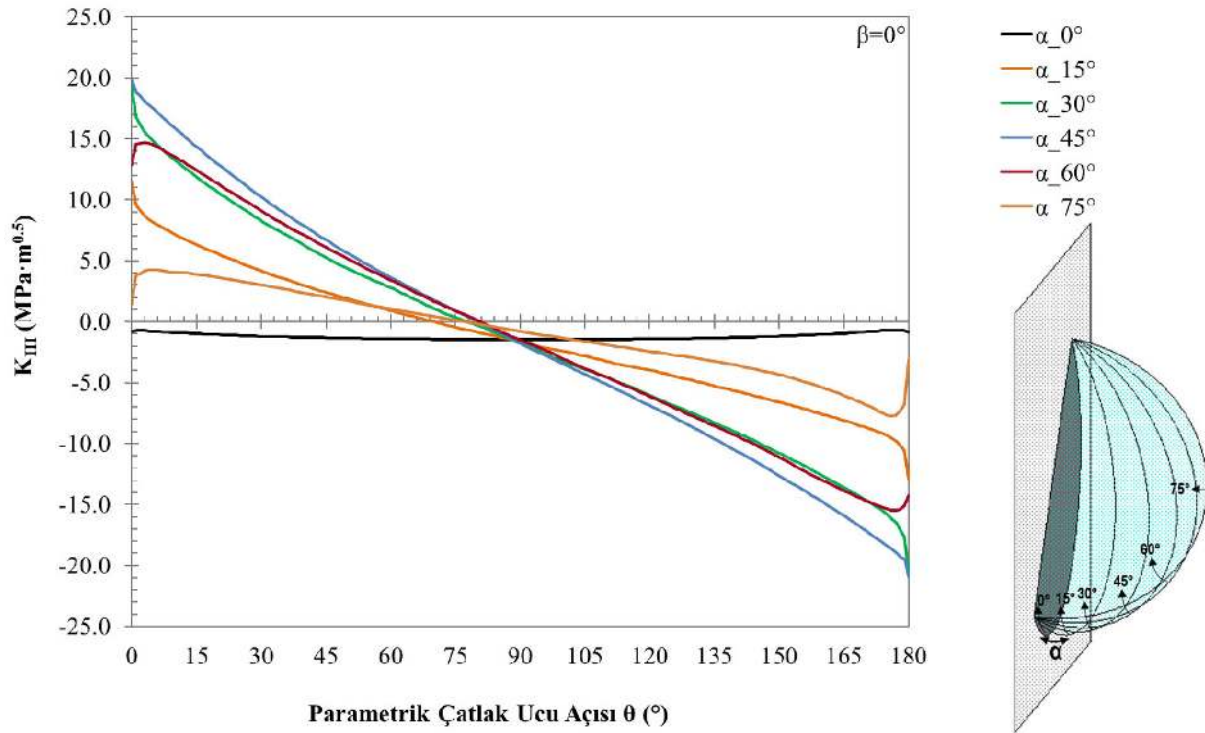
Şekil 3.53. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



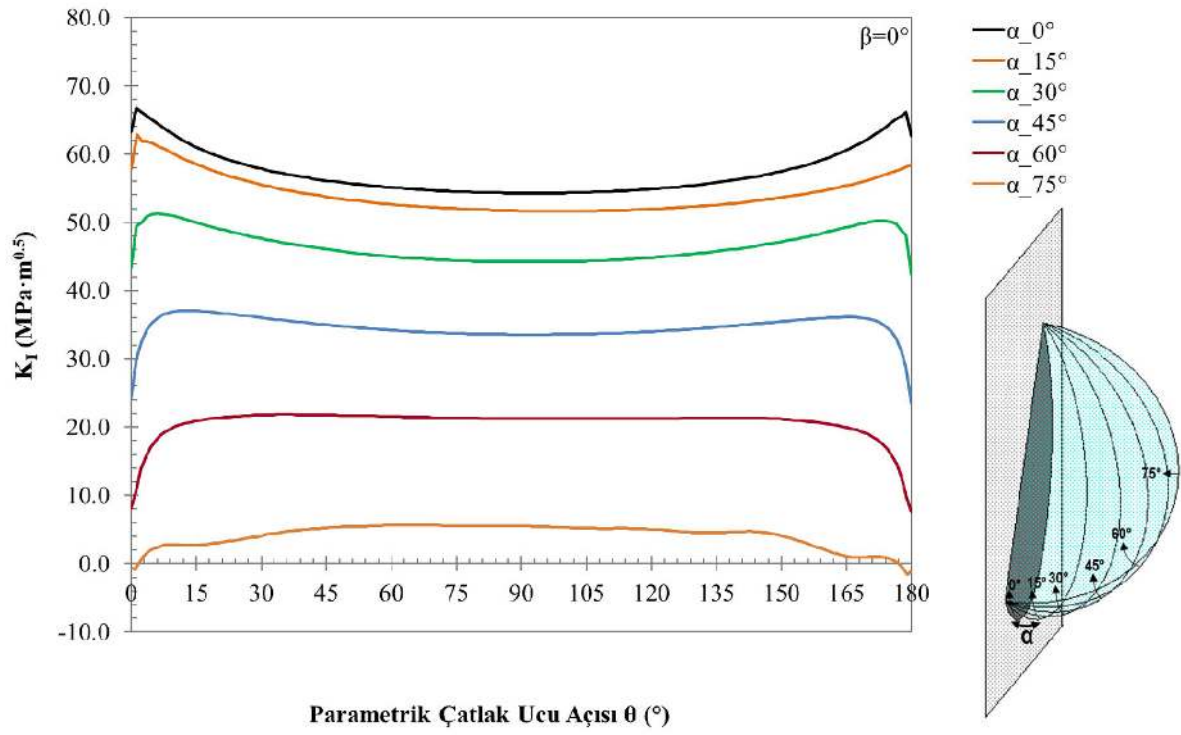
Şekil 3.54. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



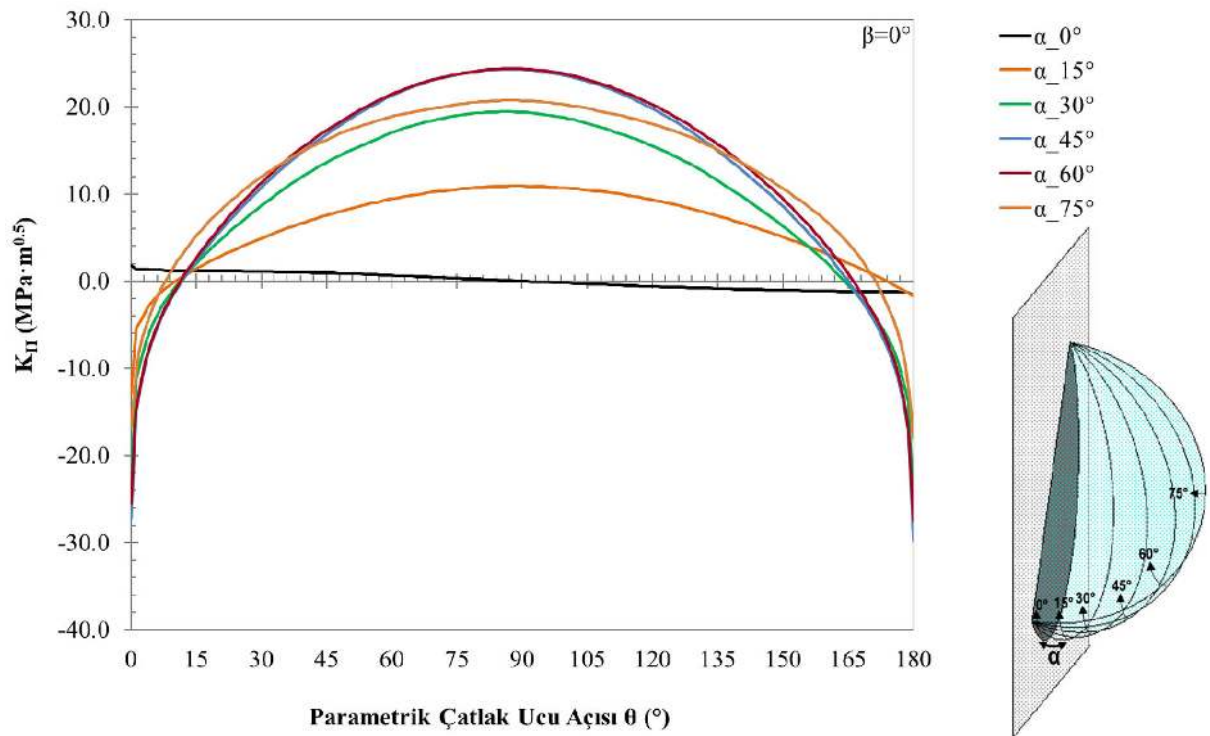
Şekil 3.55. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



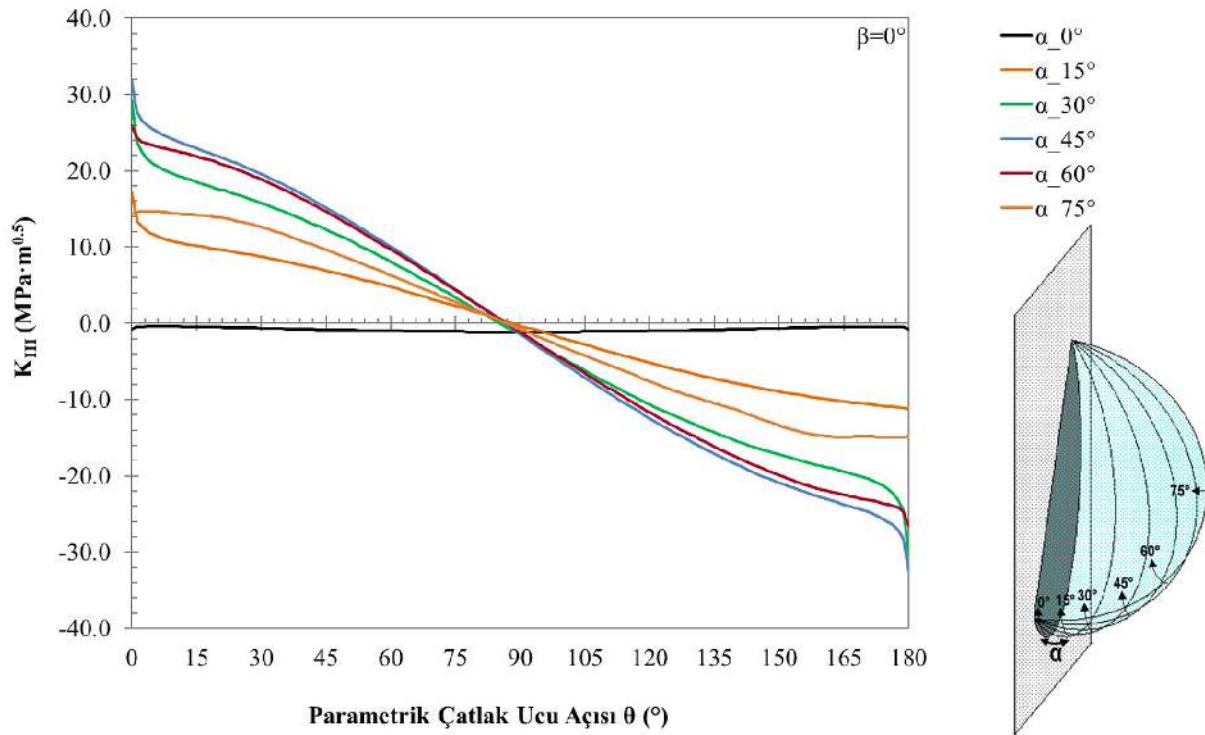
Şekil 3.56. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



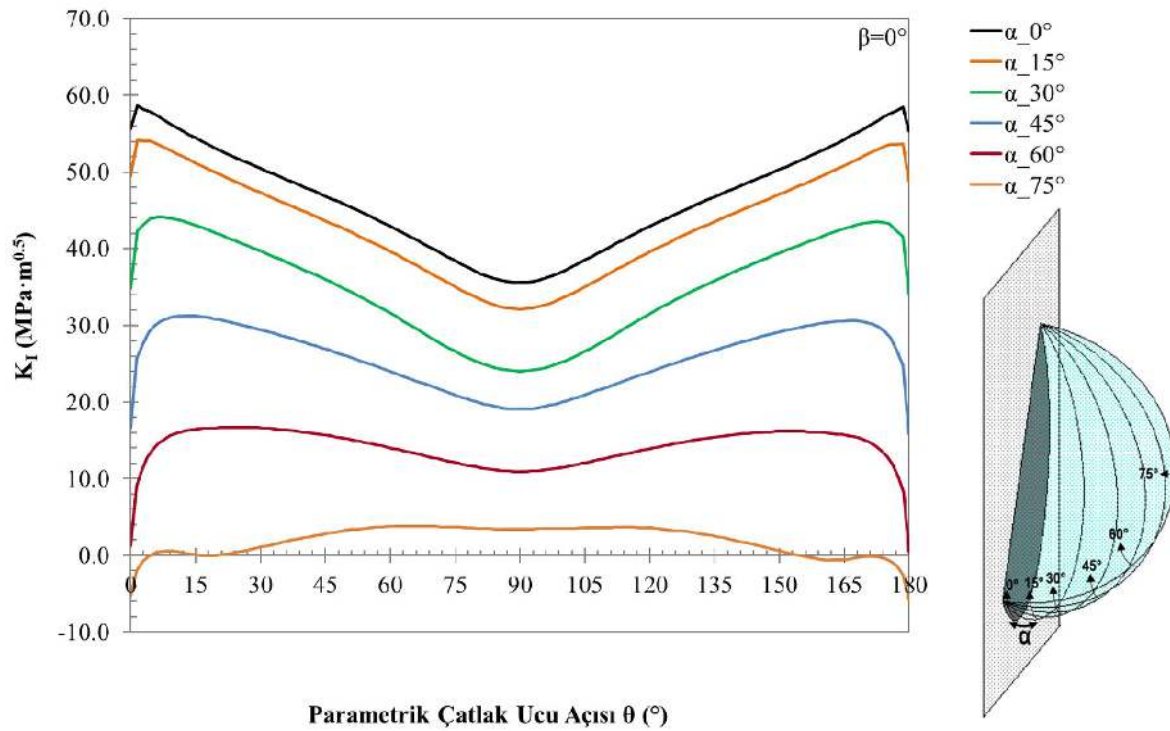
Şekil 3.57. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



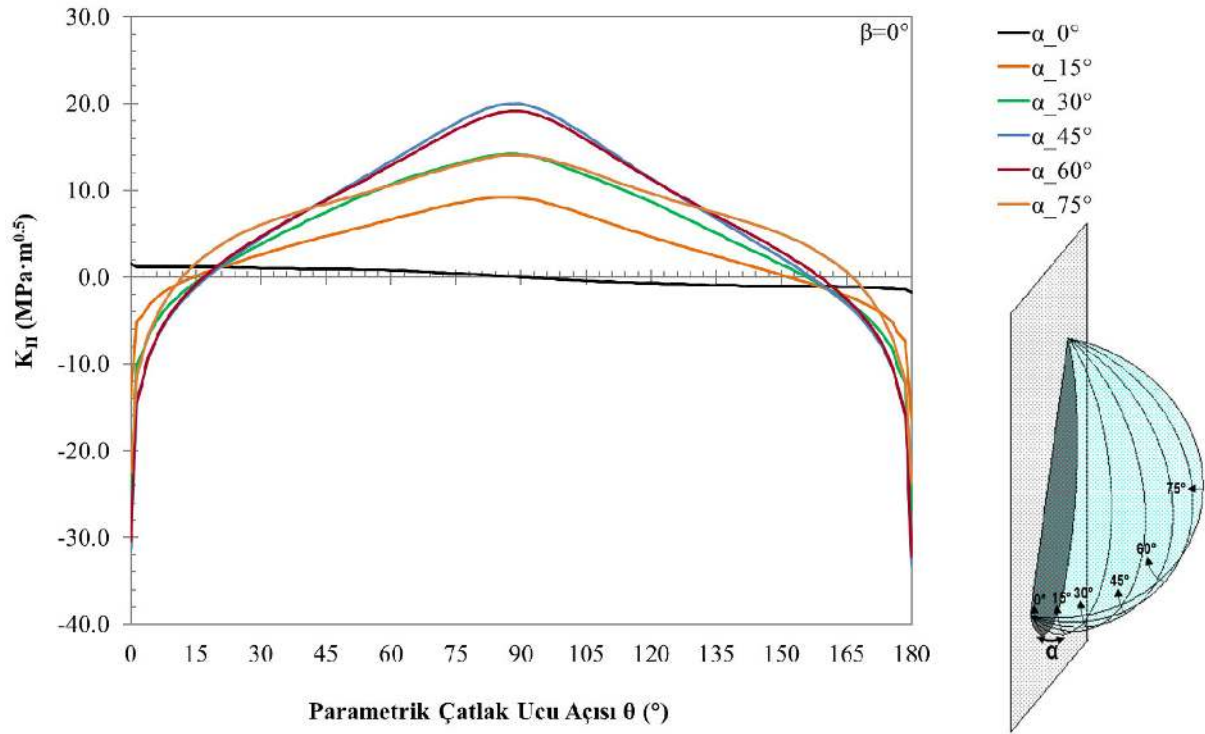
Şekil 3.58. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



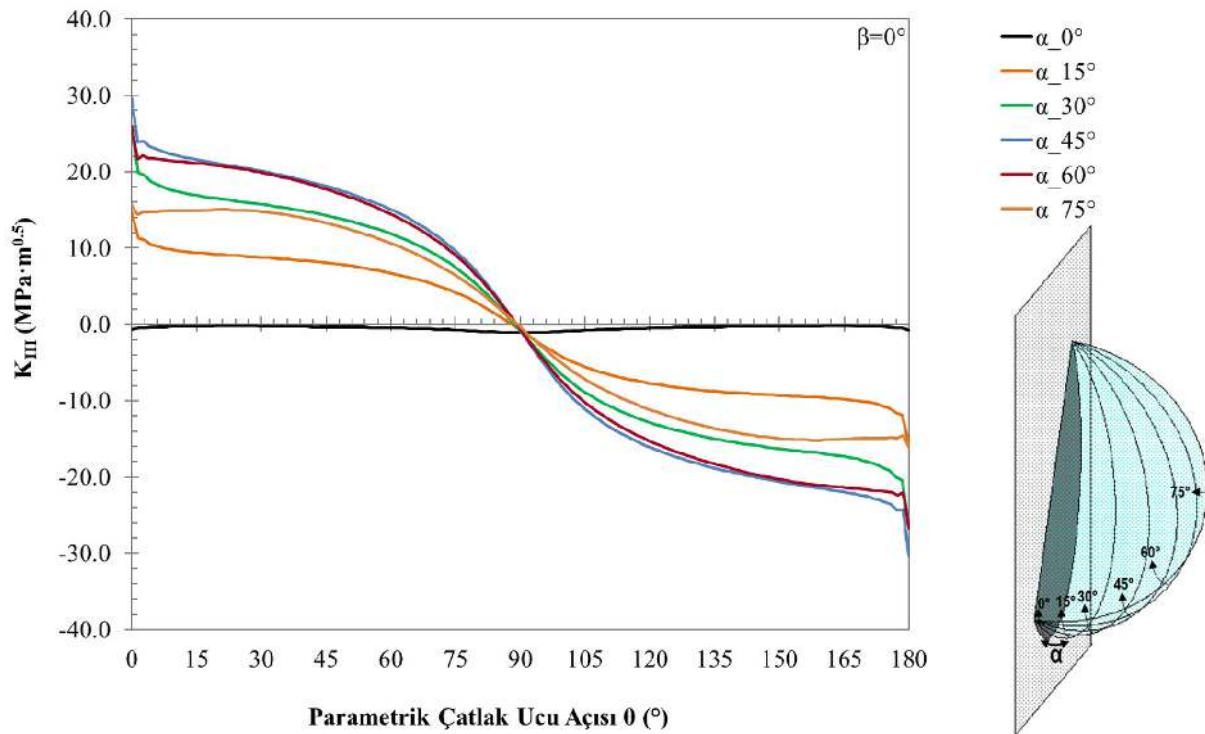
Şekil 3.59. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



Şekil 3.60. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



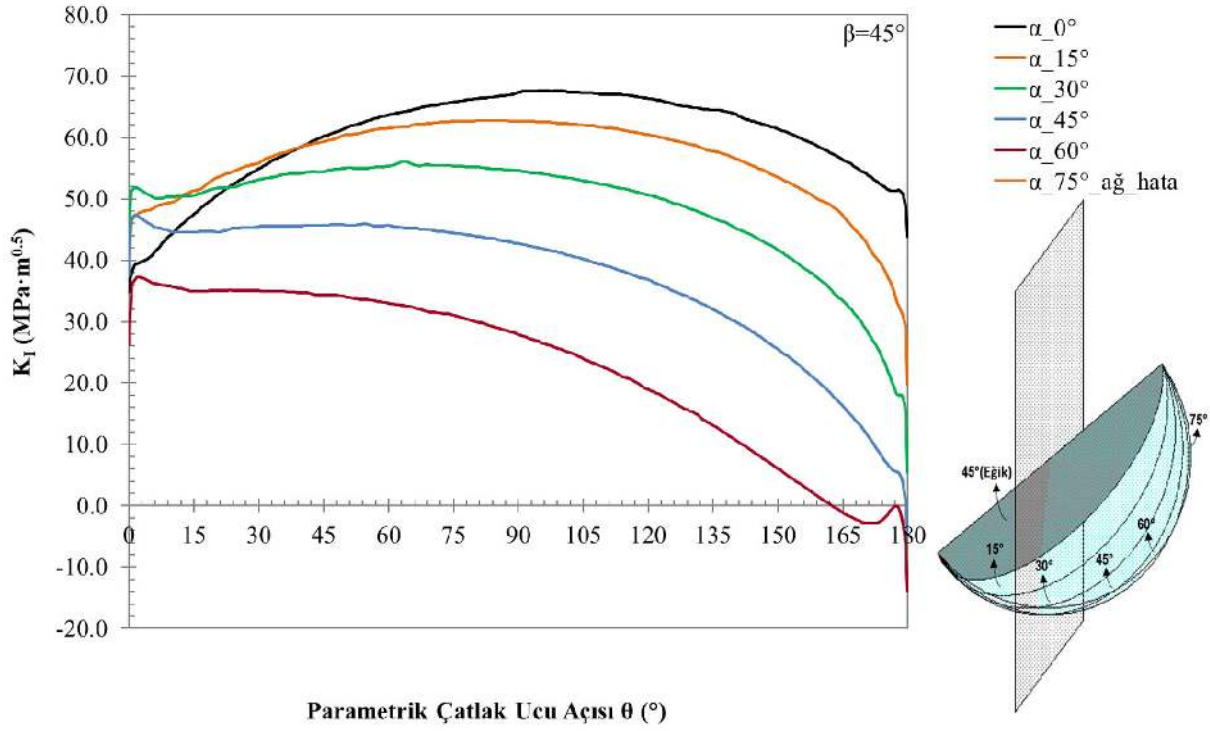
Şekil 3.61. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)



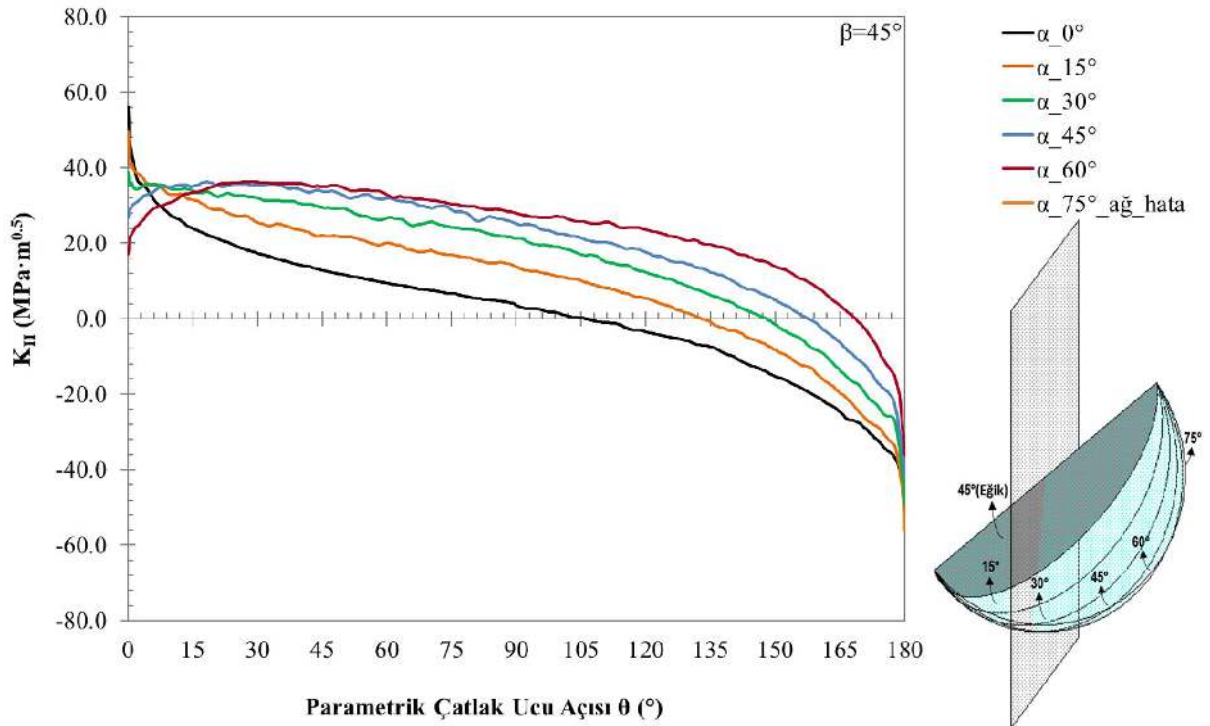
Şekil 3.62. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=0^\circ$)

3.5. 45° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizleri

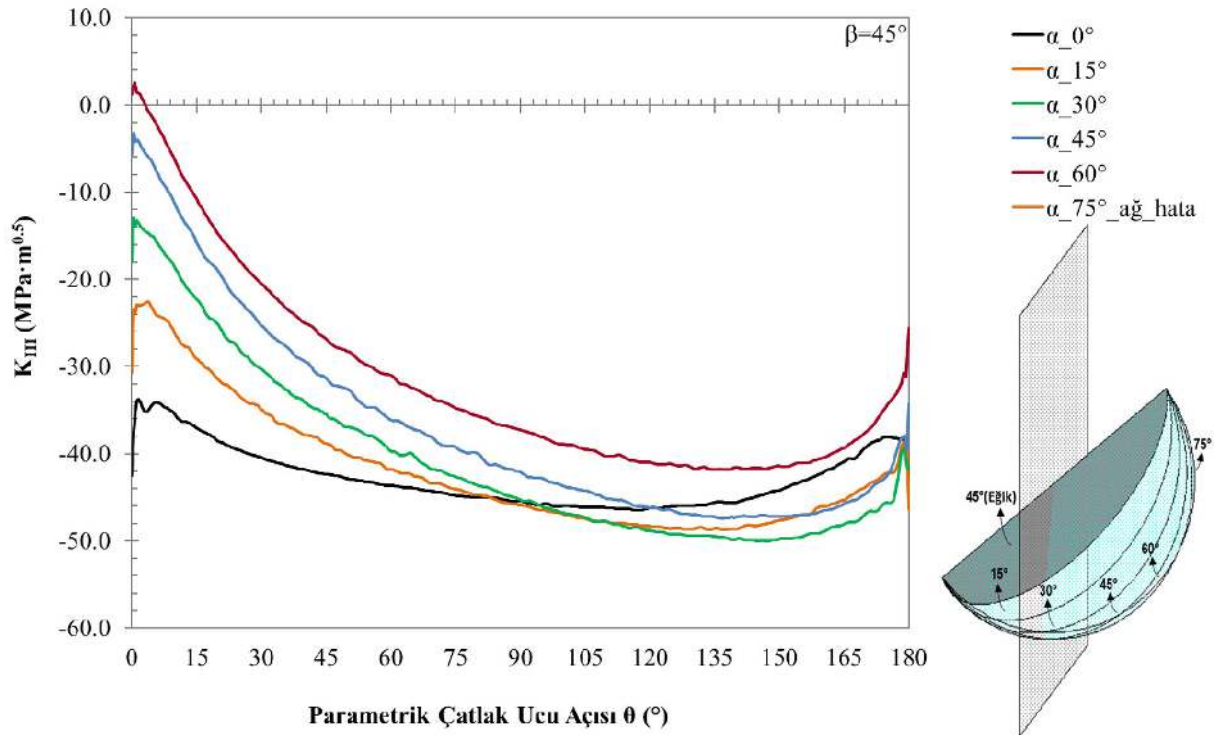
Bu bölümde $a/t=0.0625, 0.125, 0.25$ ve $a/c=0.5, 1, 2$ çatlak oranlarına sahip 45 derece eğim açısında 0, 15, 30, 45, 60, 75 derece dönmüş yükleme açıları için kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve çatlak ucu boyunca elde edilen K_I , K_{II} , K_{III} GŞF değerleri Şekil 3.63-3.89'da verilmiştir.



Şekil 3.63. $a/t=0.25, a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)

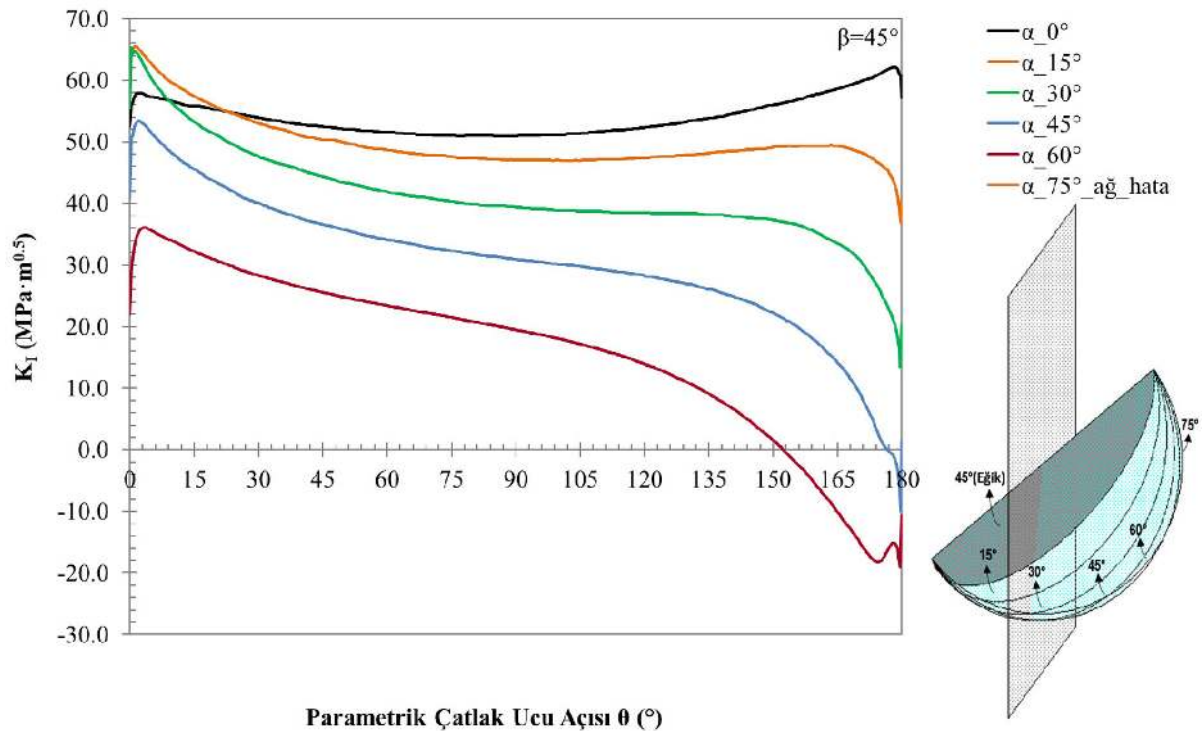


Şekil 3.64. $a/t=0.25, a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)

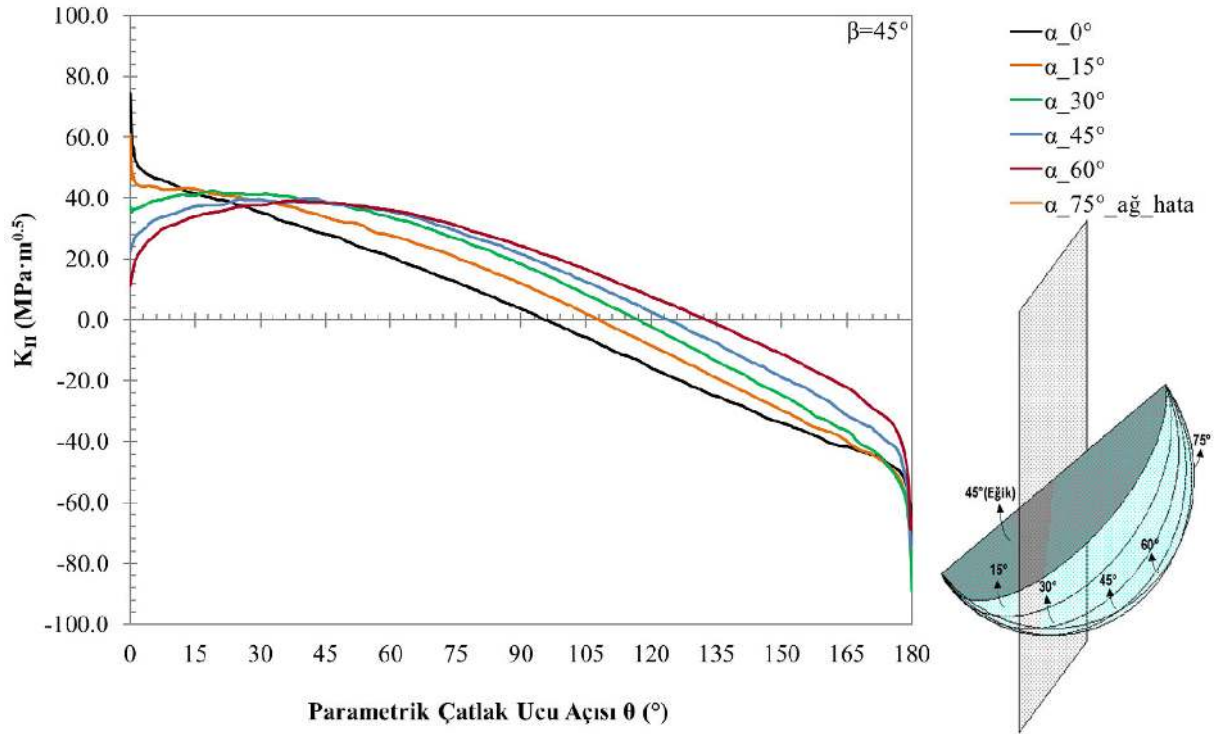


Şekil 3.65. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)

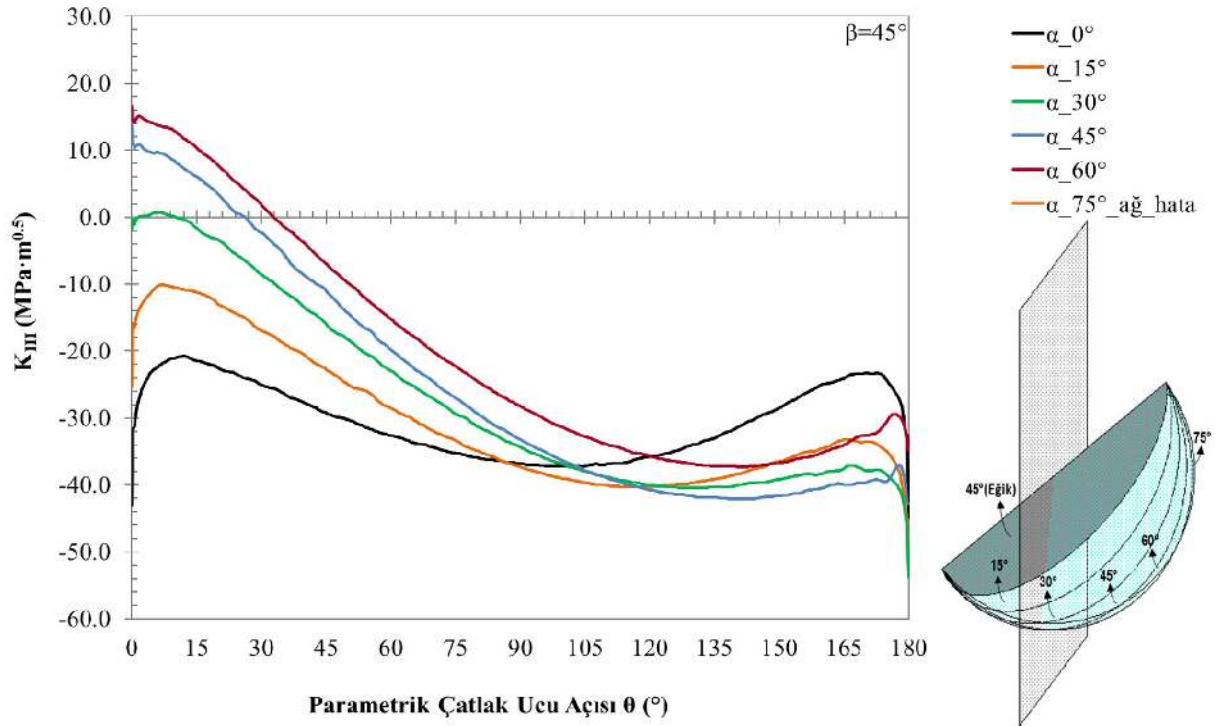
Şekil 3.65'te olduğu gibi “ağ_hata” olarak belirtilen değerlerde çatlak bulunduğu düzleme paralel yakın formda olması nedeniyle çatlak modellenemediği için GŞF sonuçları elde edilememiştir. 45° eğim açısında dönmüş çatlaklar genel itibariyle “ α ” açısı artmasıyla GŞF sonuçlarının çatlak ucu boyunca simetrik olma özelliğini kaybettiği görülmektedir.



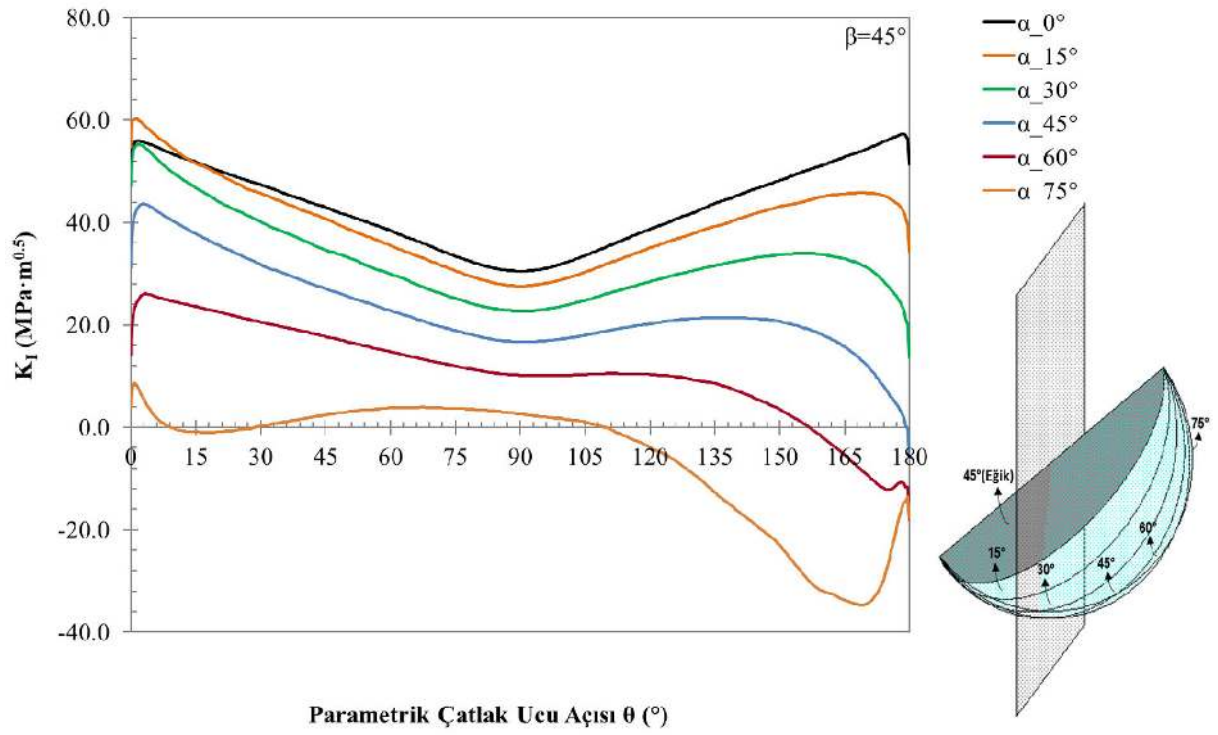
Şekil 3.66. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



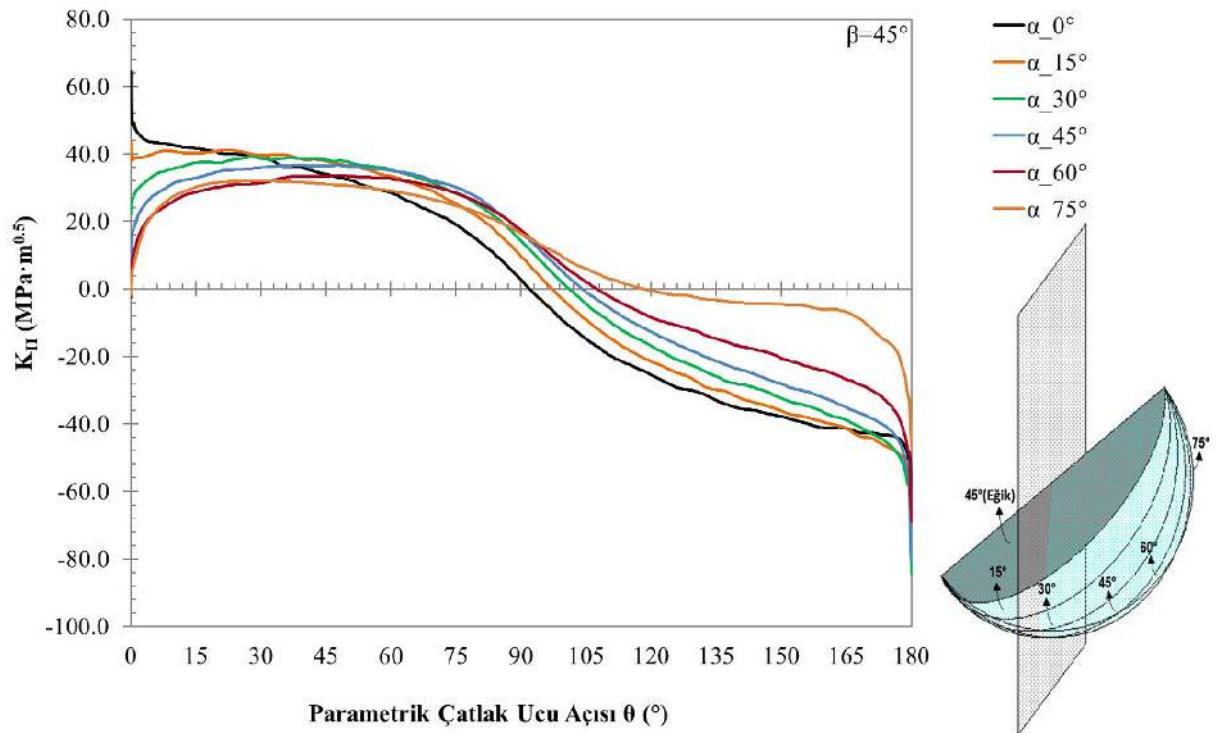
Şekil 3.67. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



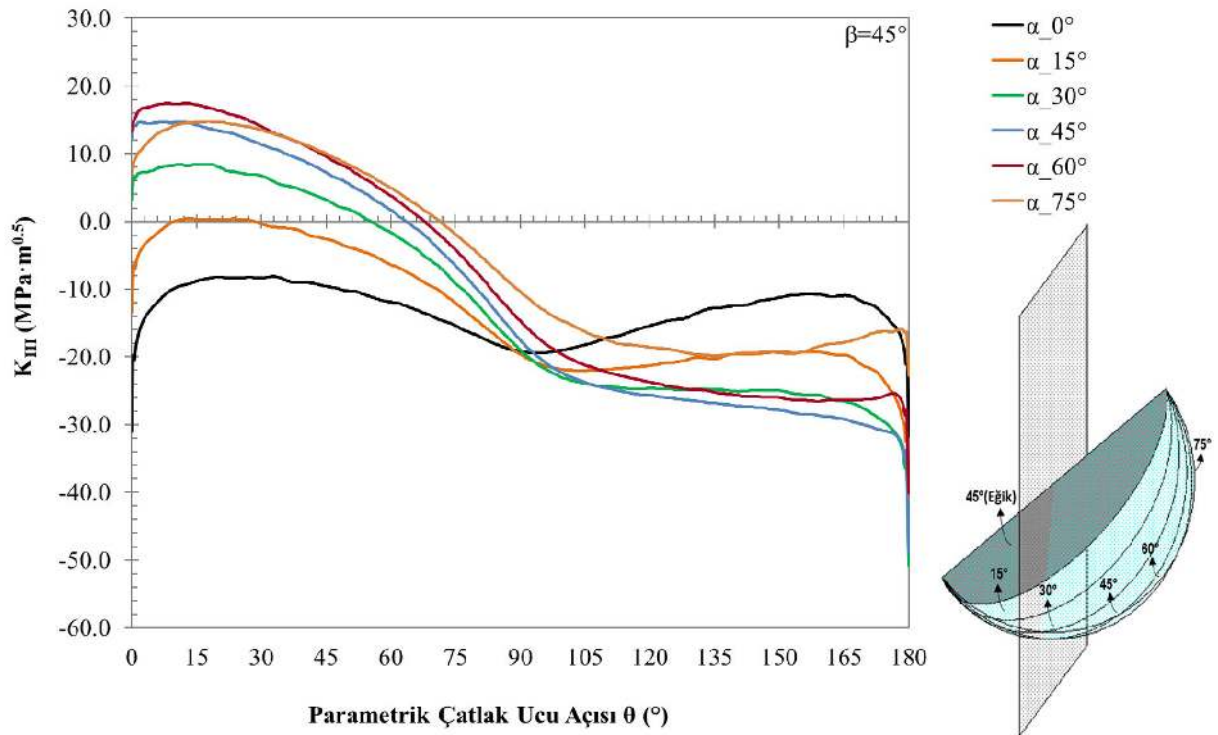
Şekil 3.68. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



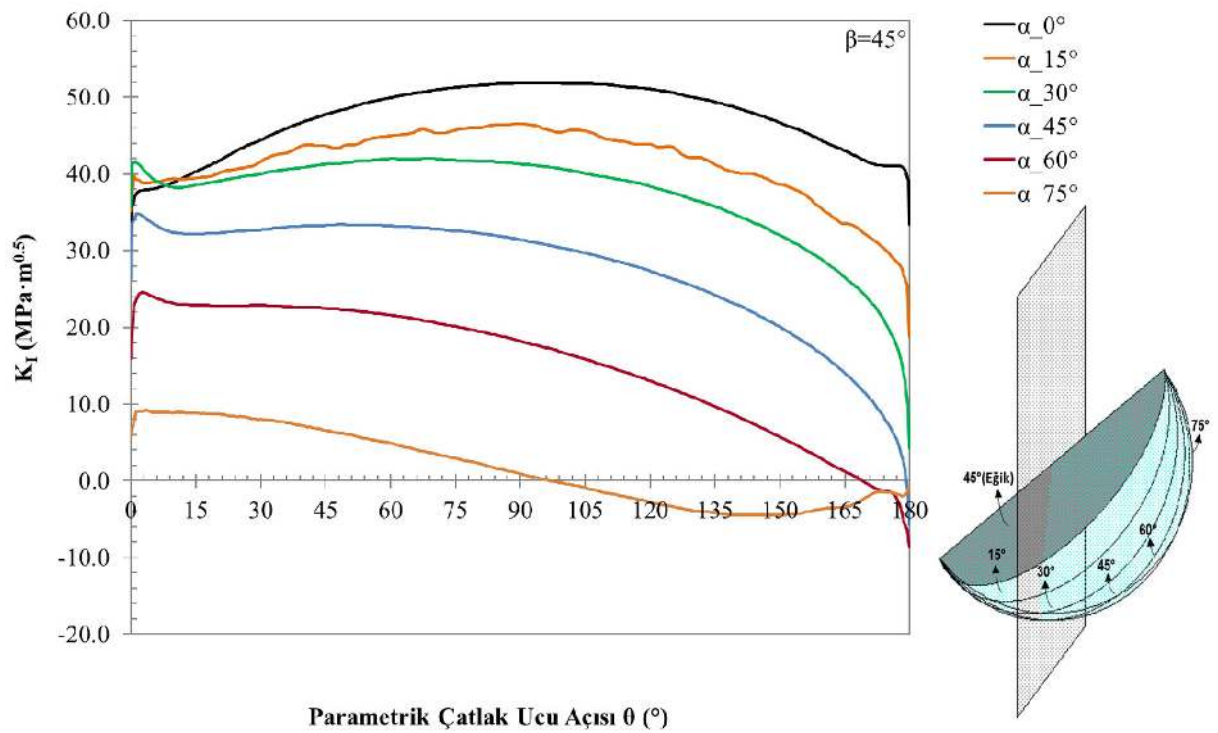
Şekil 3.69. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



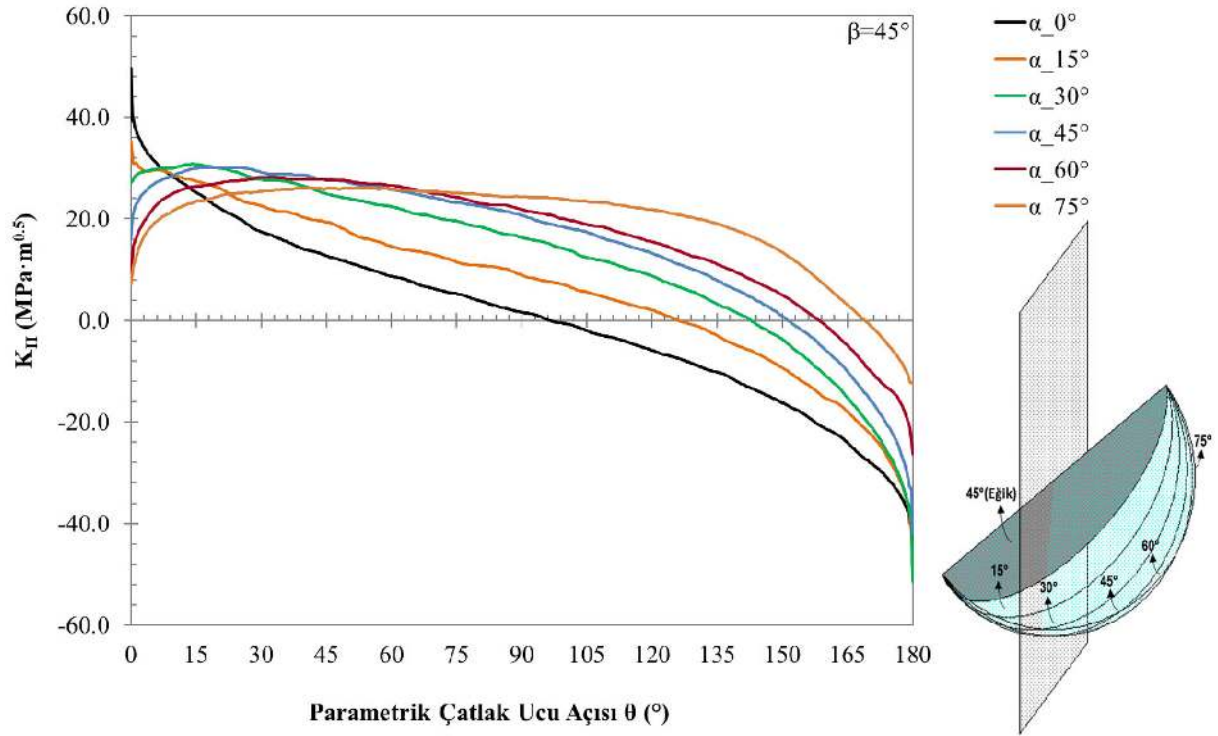
Şekil 3.70. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



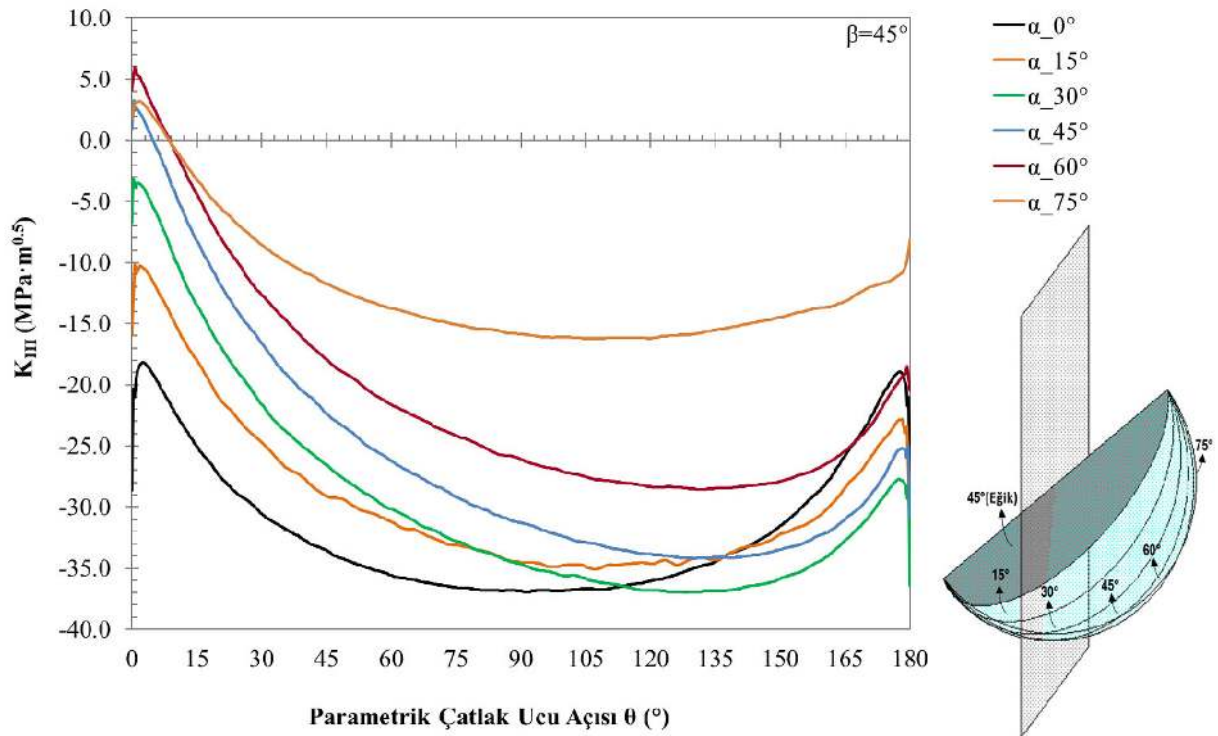
Şekil 3.71. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



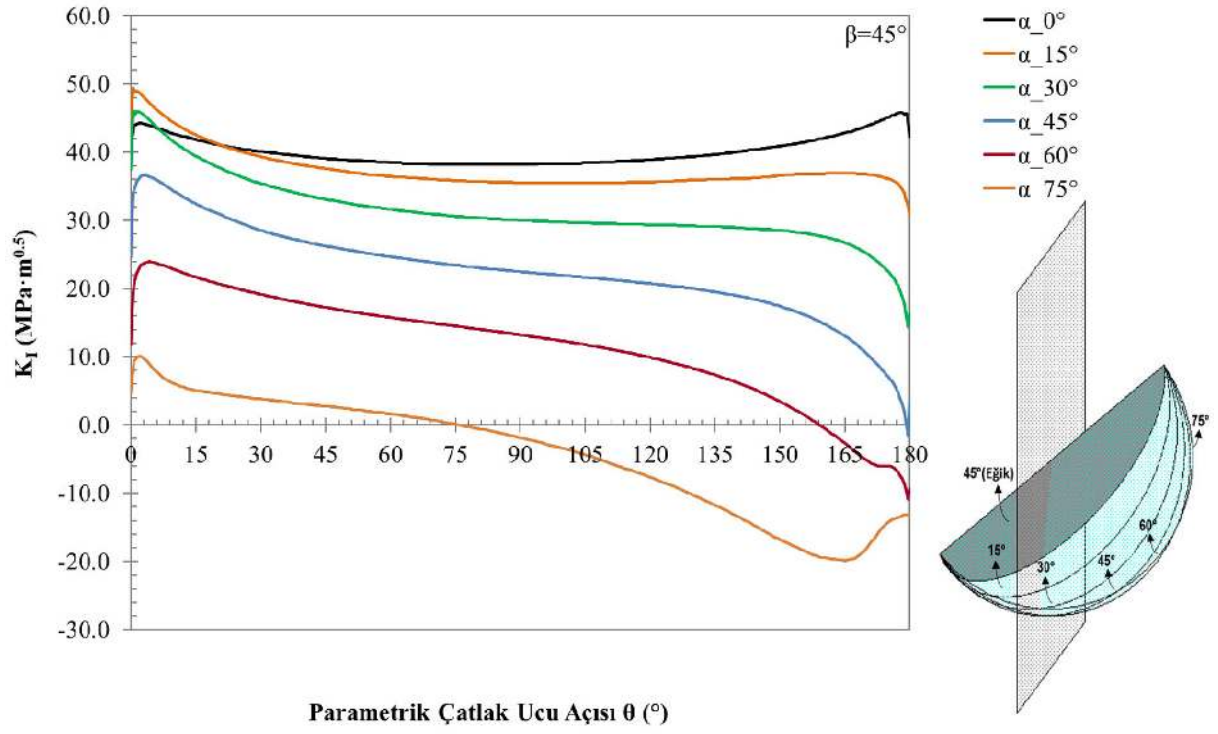
Şekil 3.72. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



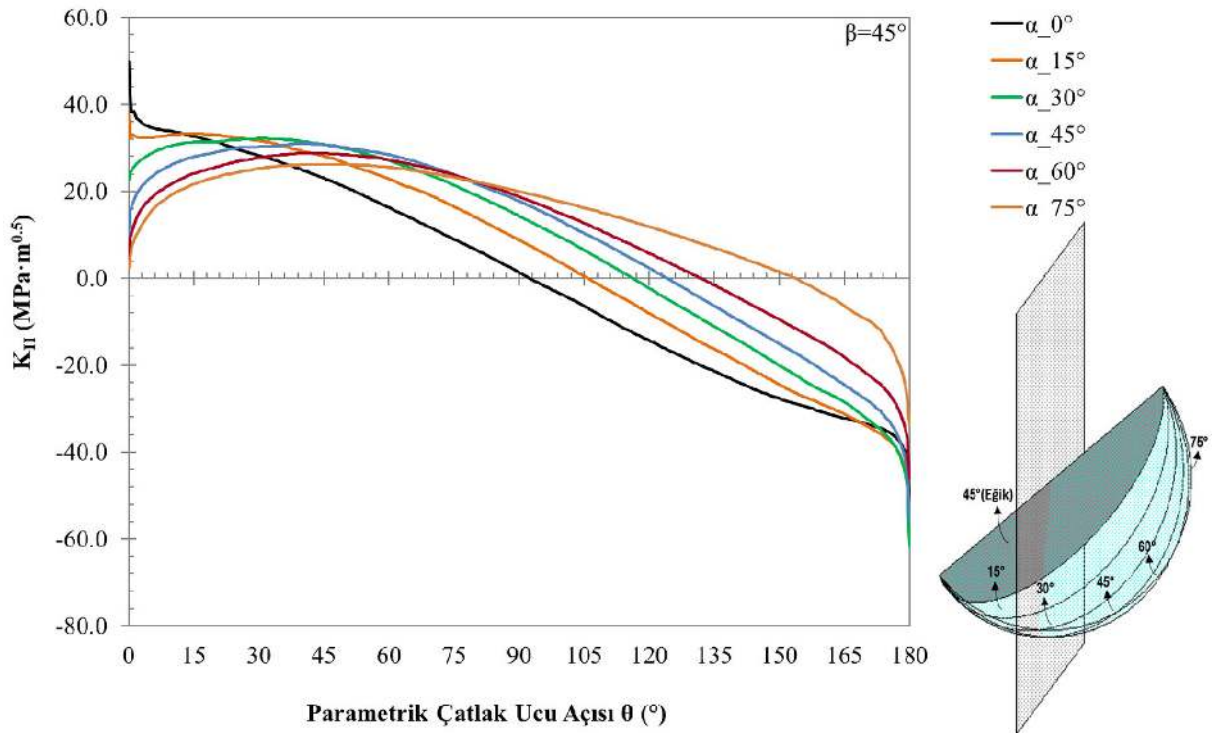
Şekil 3.73. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^{\circ}$)



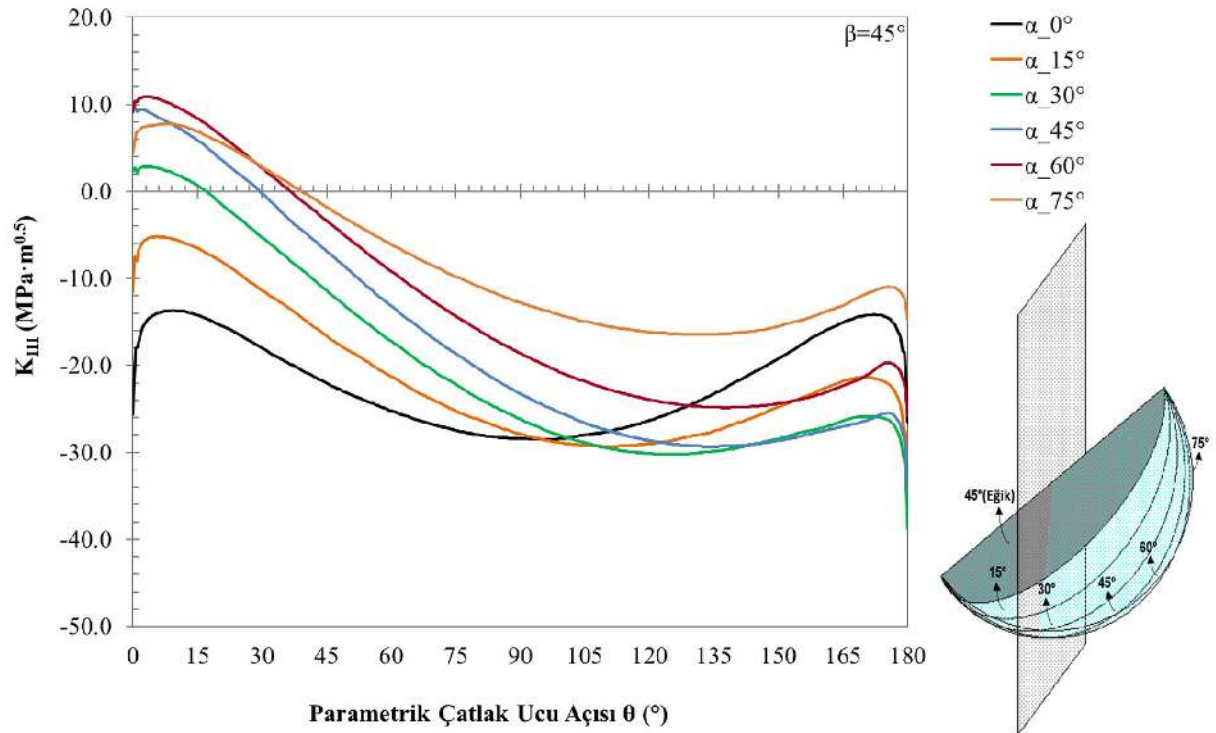
Şekil 3.74. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^{\circ}$)



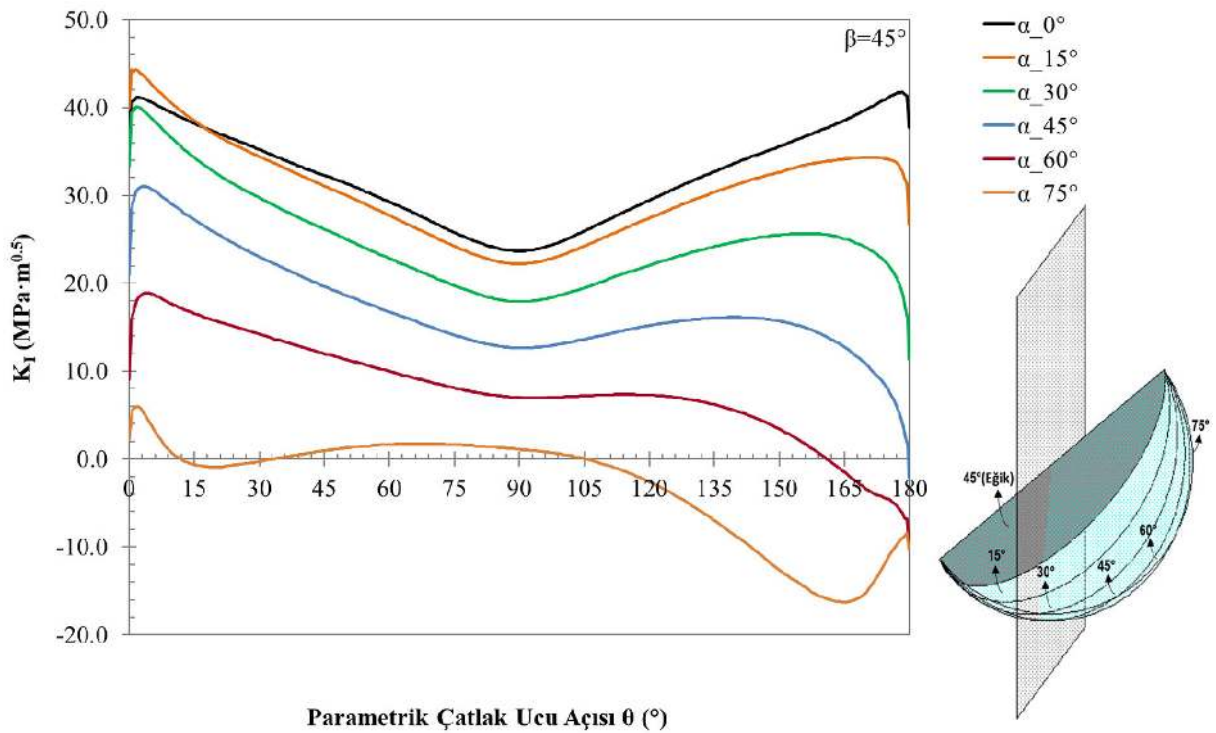
Şekil 3.75. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



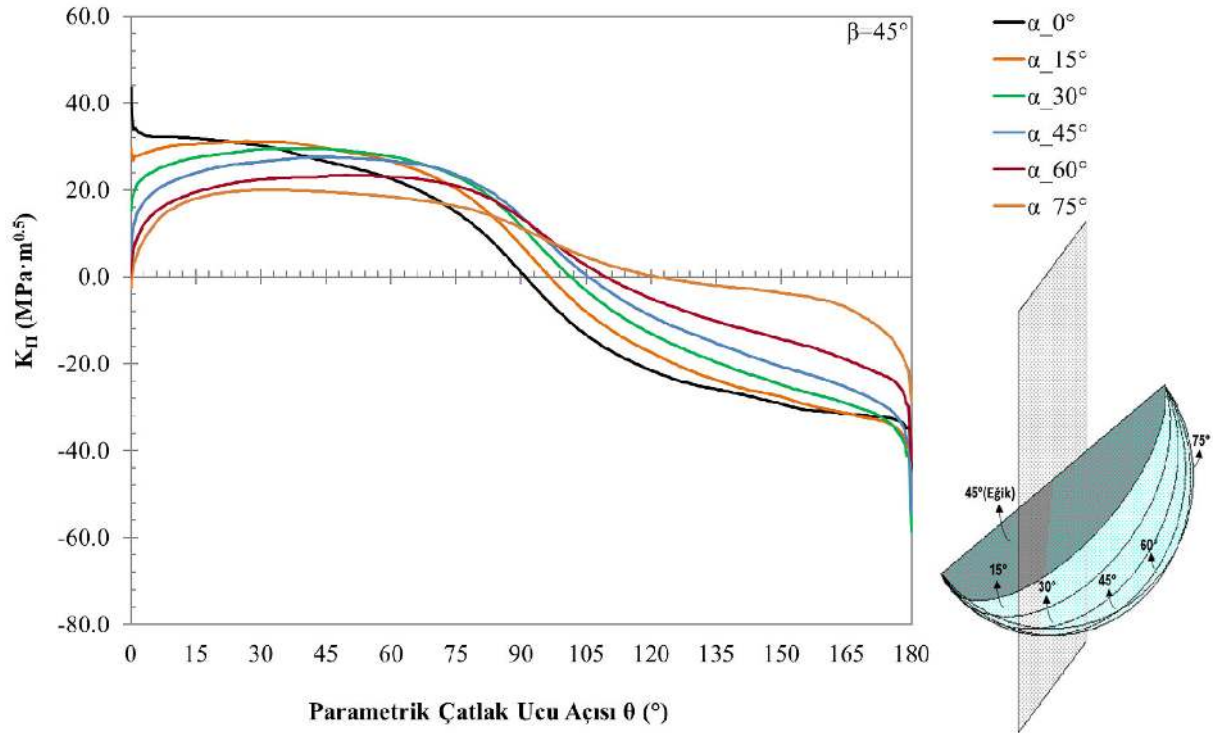
Şekil 3.76. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



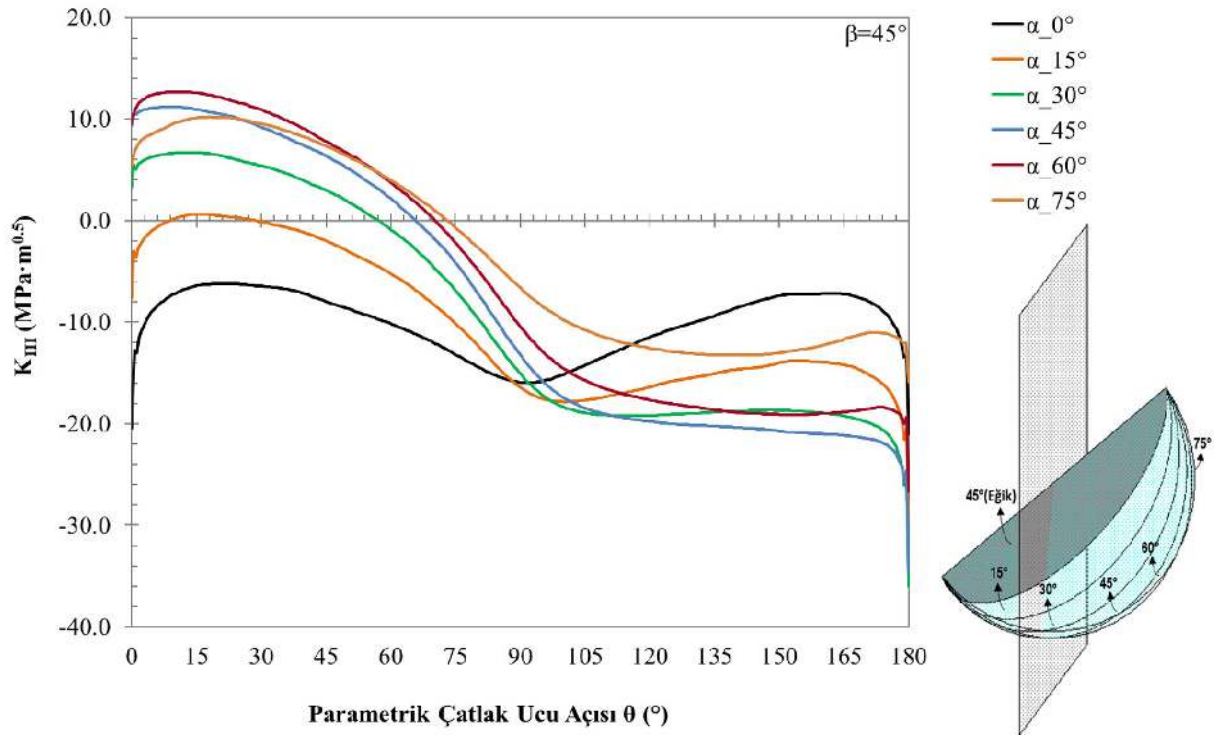
Şekil 3.77. $a/t=0.125, a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



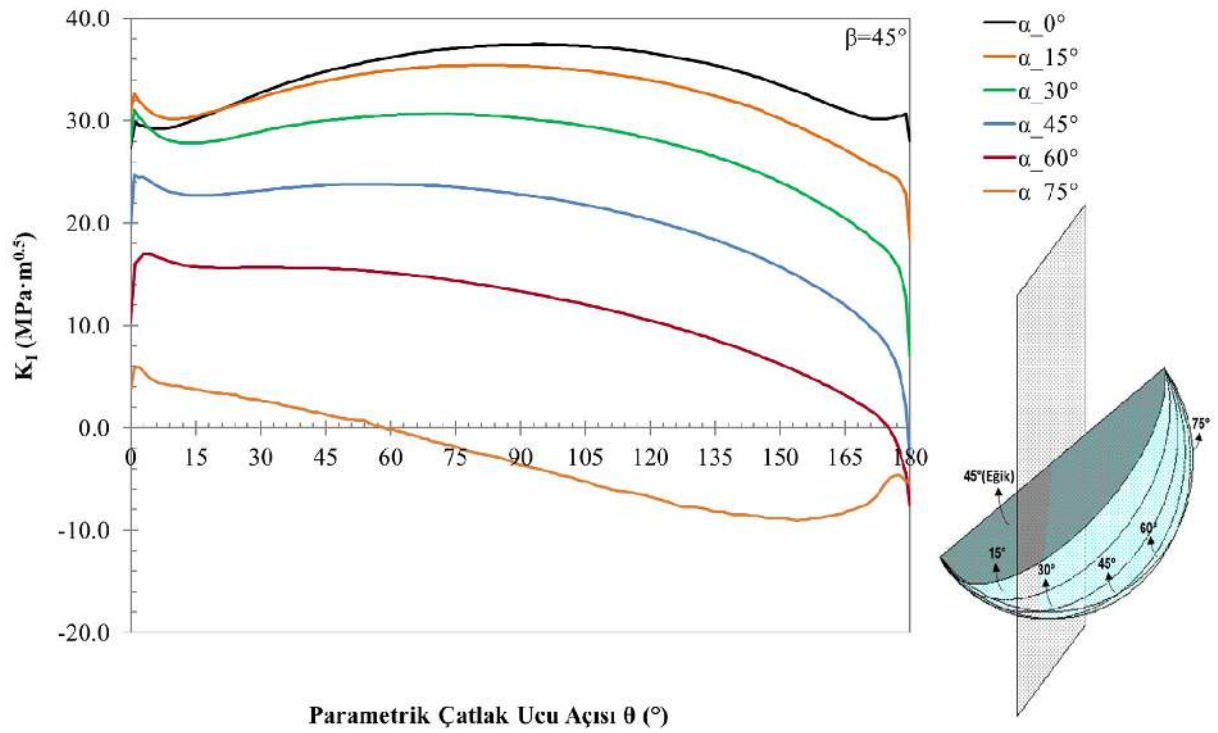
Şekil 3.78. $a/t=0.125, a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



Şekil 3.79. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)

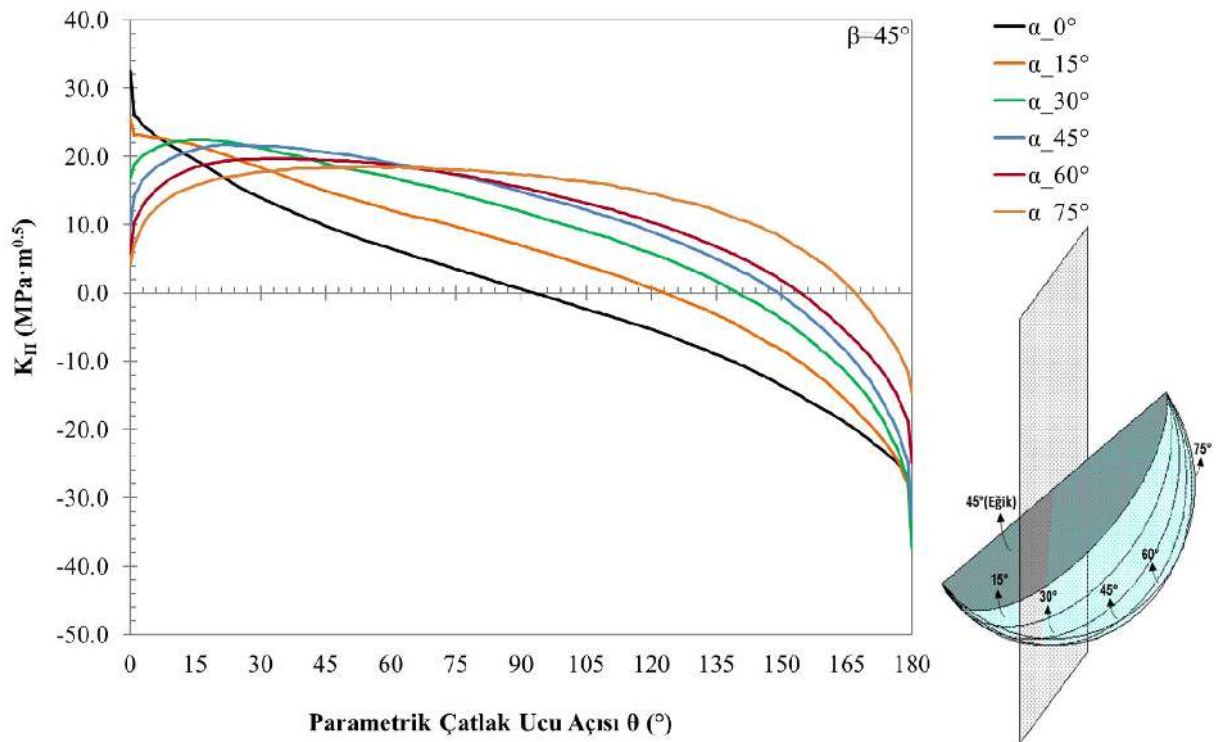


Şekil 3.80. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)

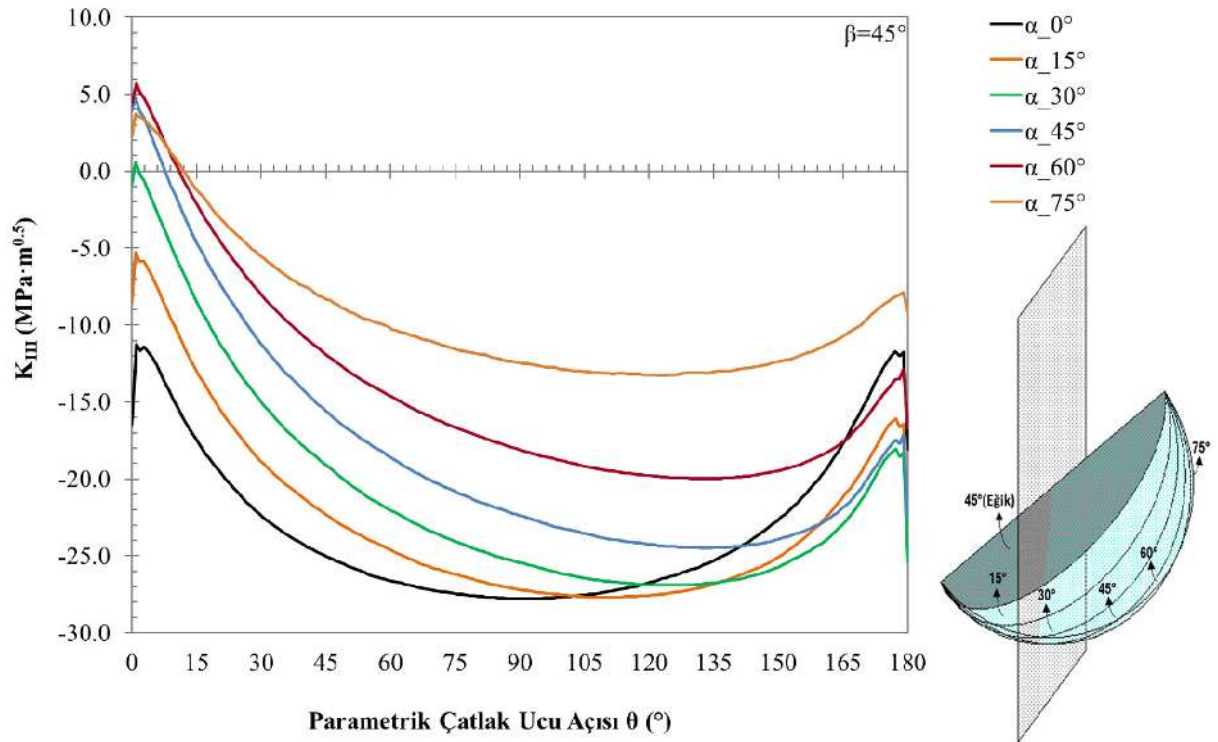


Şekil 3.81. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)

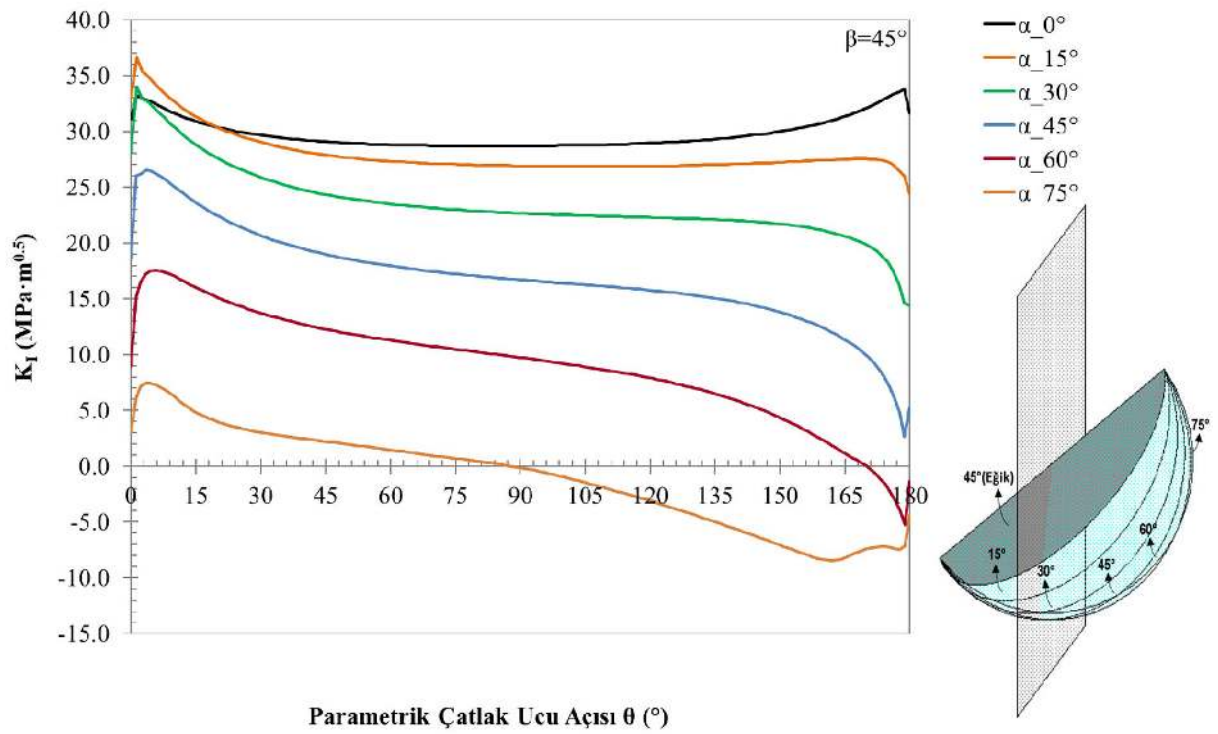
Şekil 3.81 $\alpha=75^\circ$ 'deki gibi çatlak ucu boyunca mod-I GŞF değerleri parametrik çatlak ucu açısı $\theta=60^\circ$ 'den itibaren negatif değerlere düşmektedir. Bu gibi sonuçlar nümerik olarak hatalı veri olduğundan mod-I GŞF sonuçları yanında, mod-II (Şekil 3.82), mod-III (Şekil 3.83) GŞF sonuçları da regrasyon analizlerine dahil edilmemiştir.



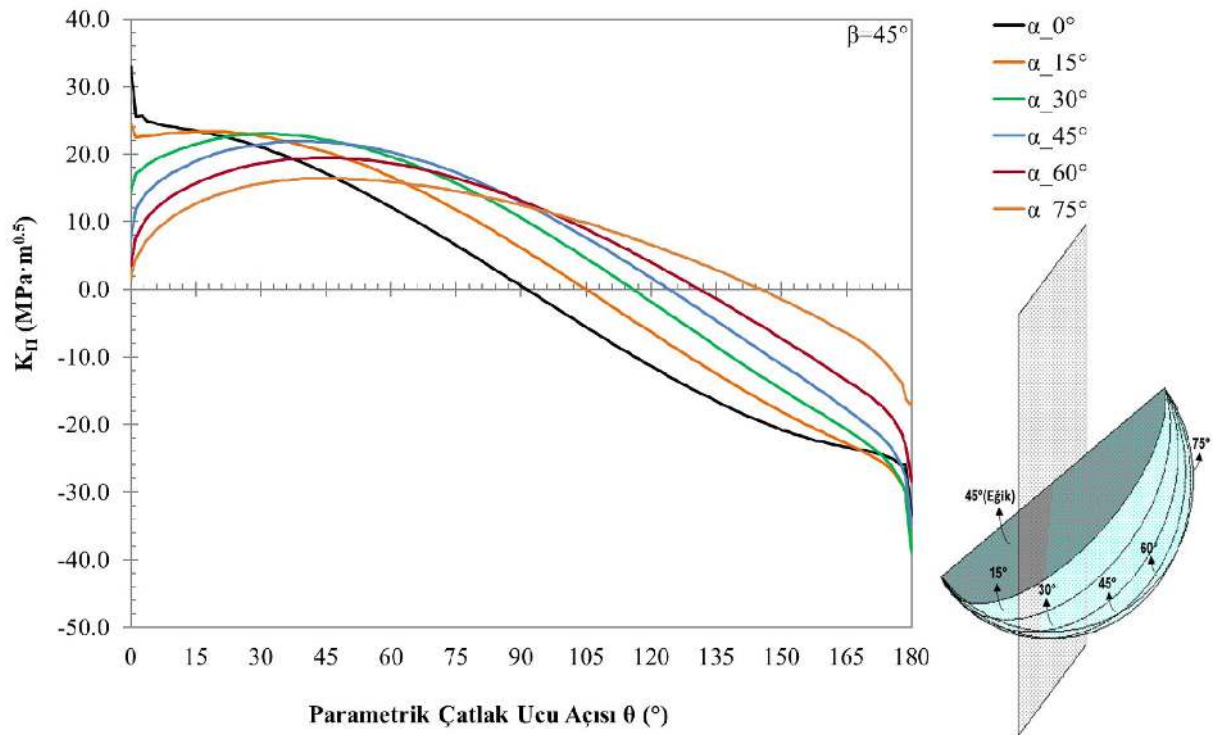
Şekil 3.82. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



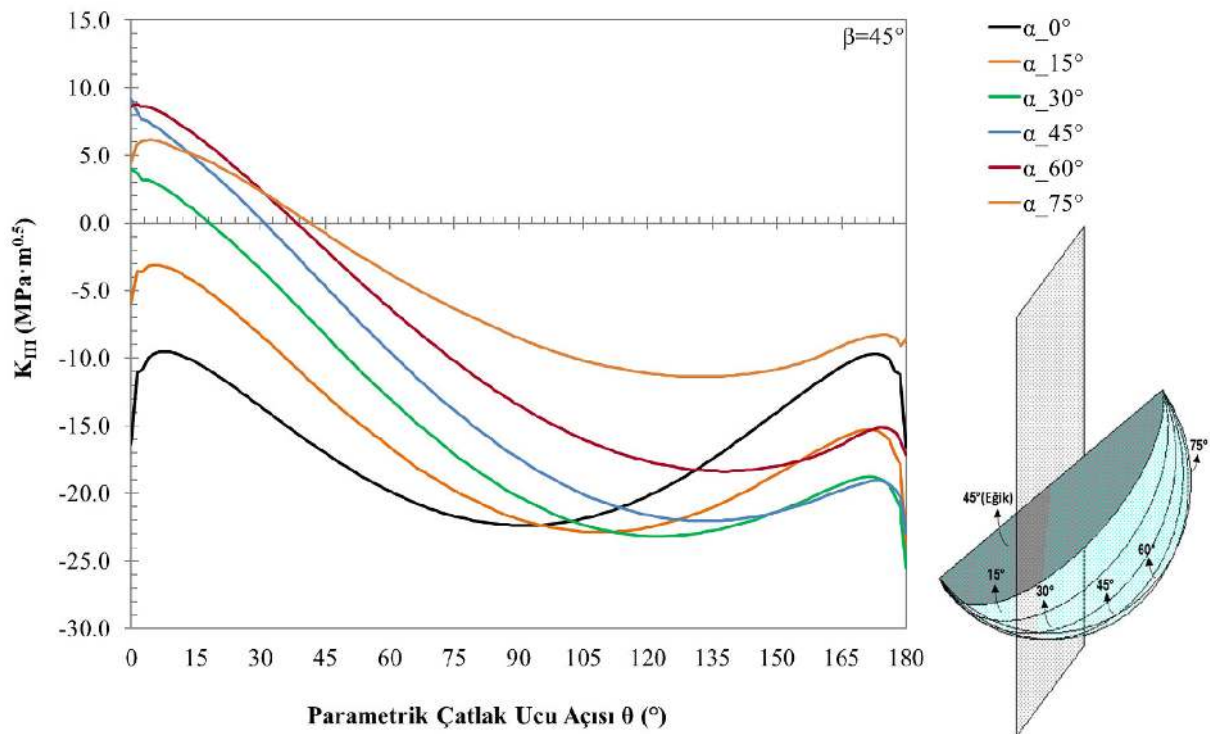
Şekil 3.83. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



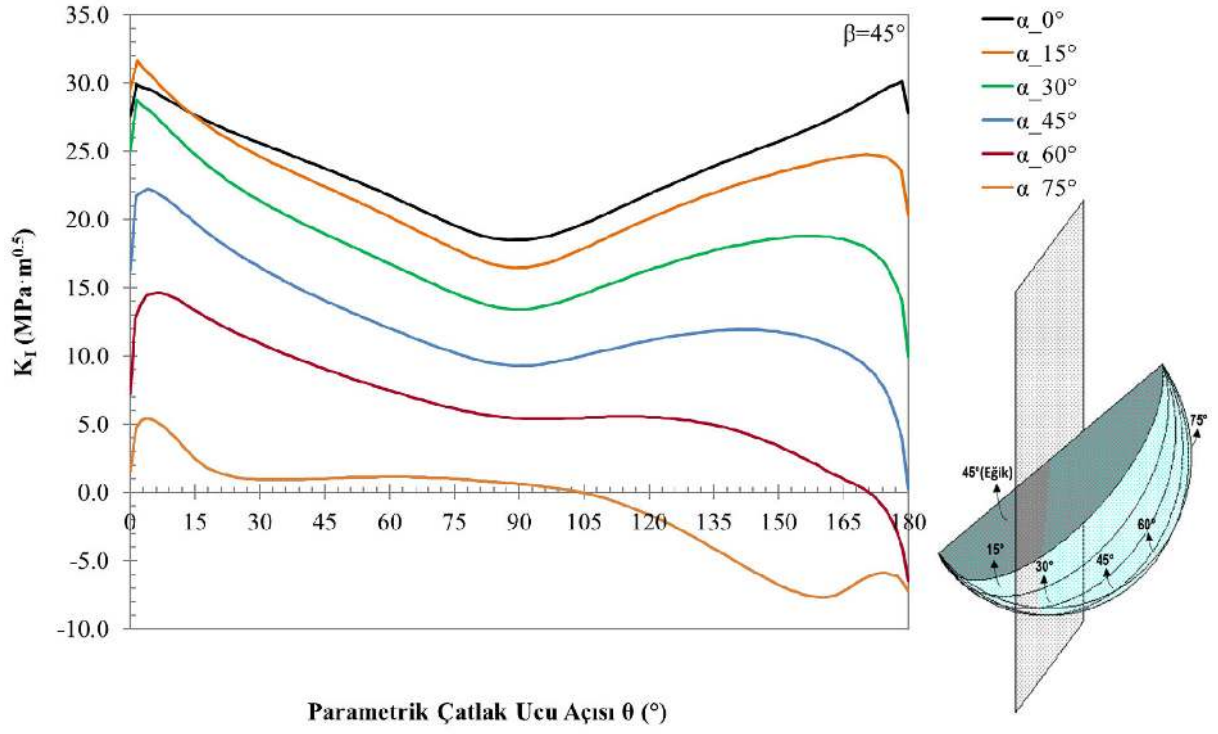
Şekil 3.84. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



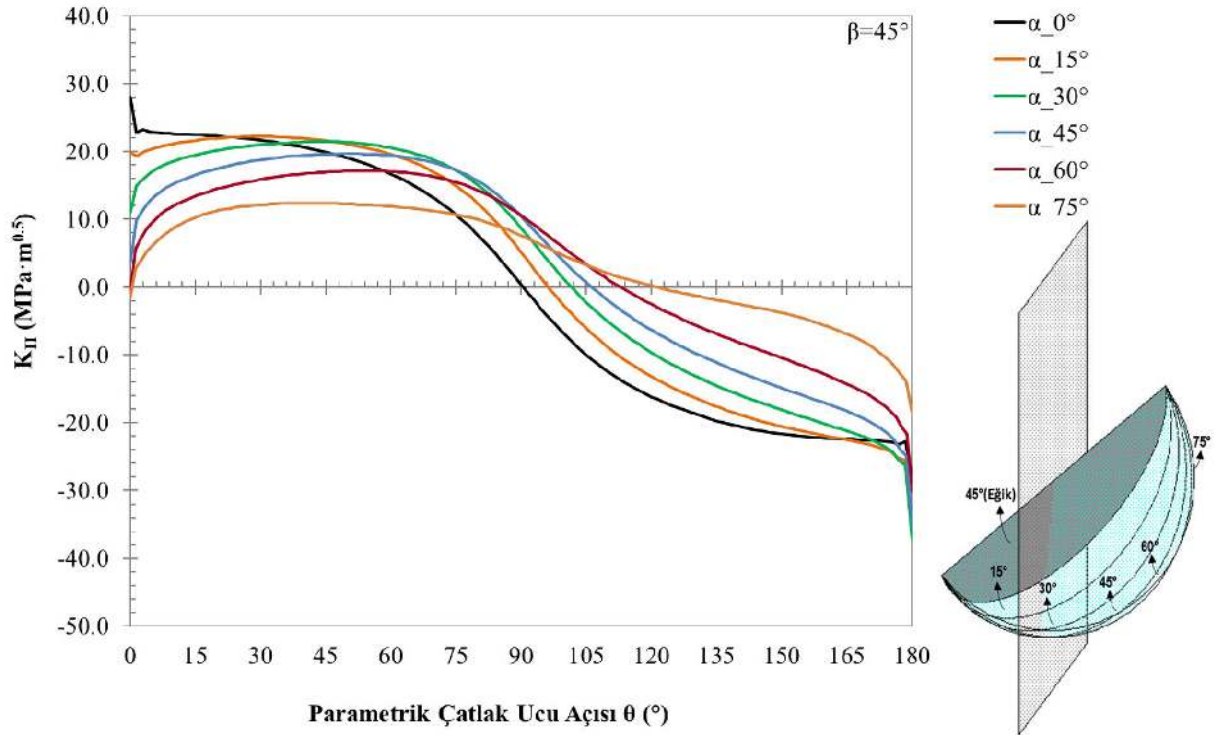
Şekil 3.85. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



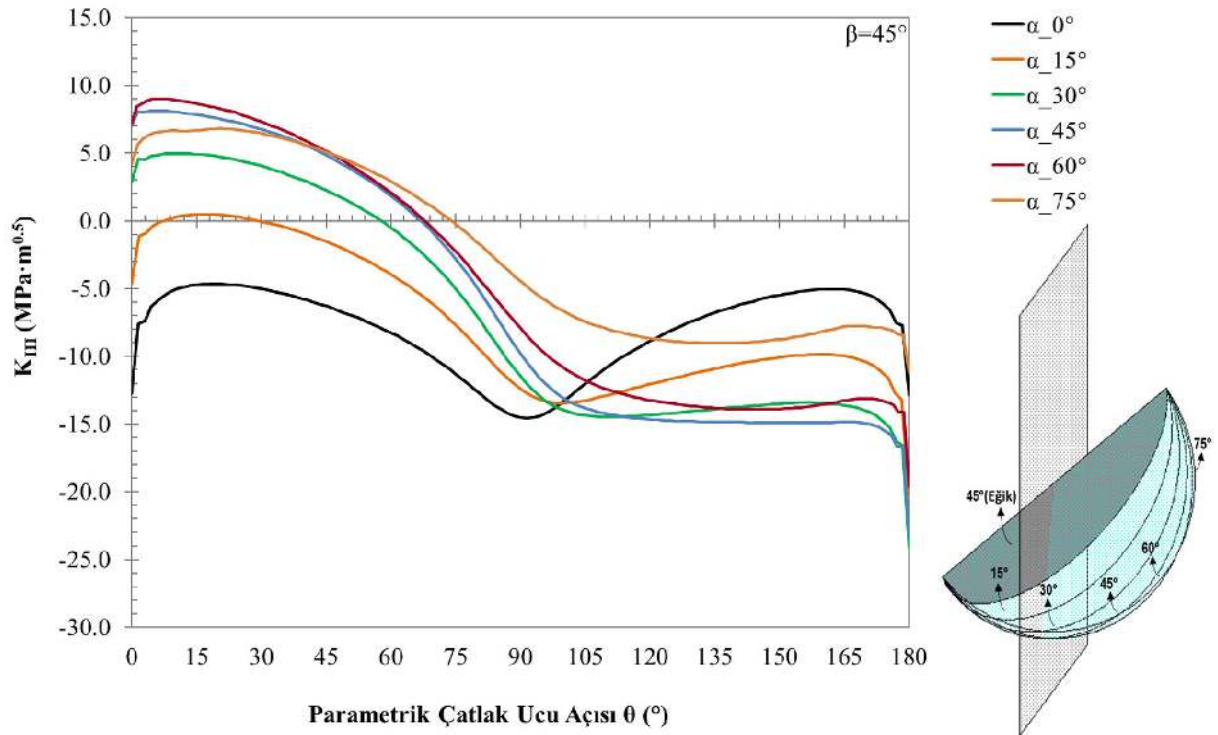
Şekil 3.86. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



Şekil 3.87. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



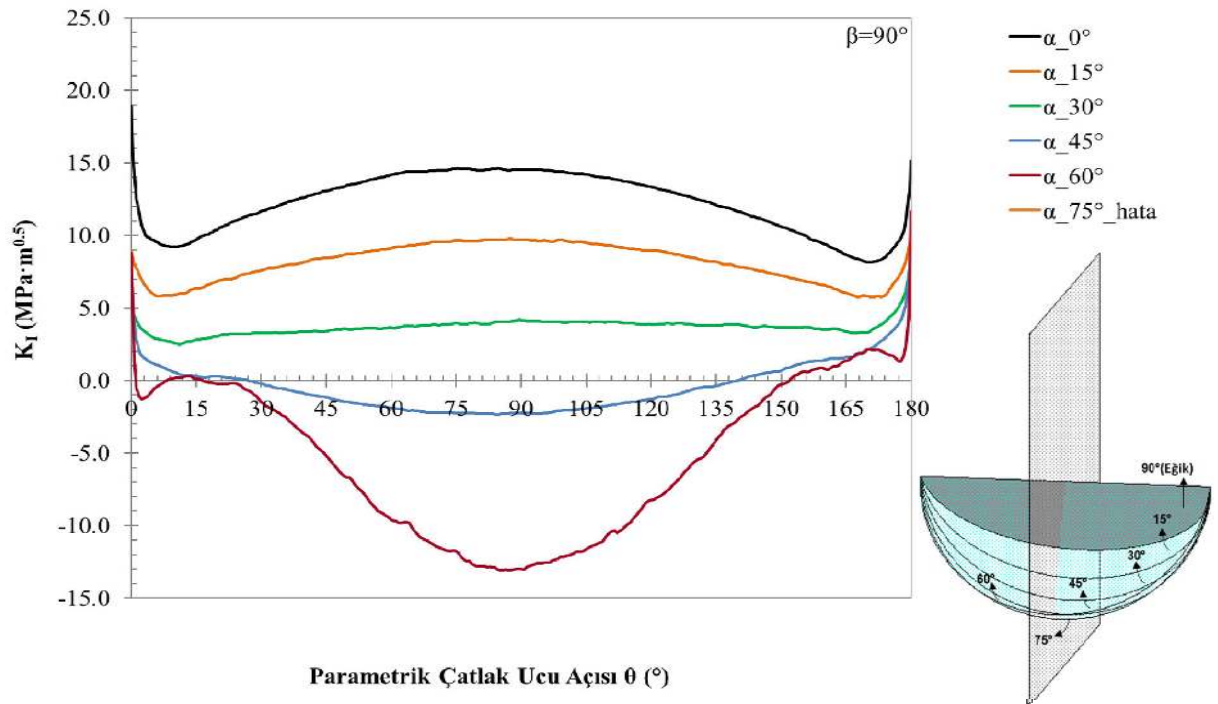
Şekil 3.88. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)



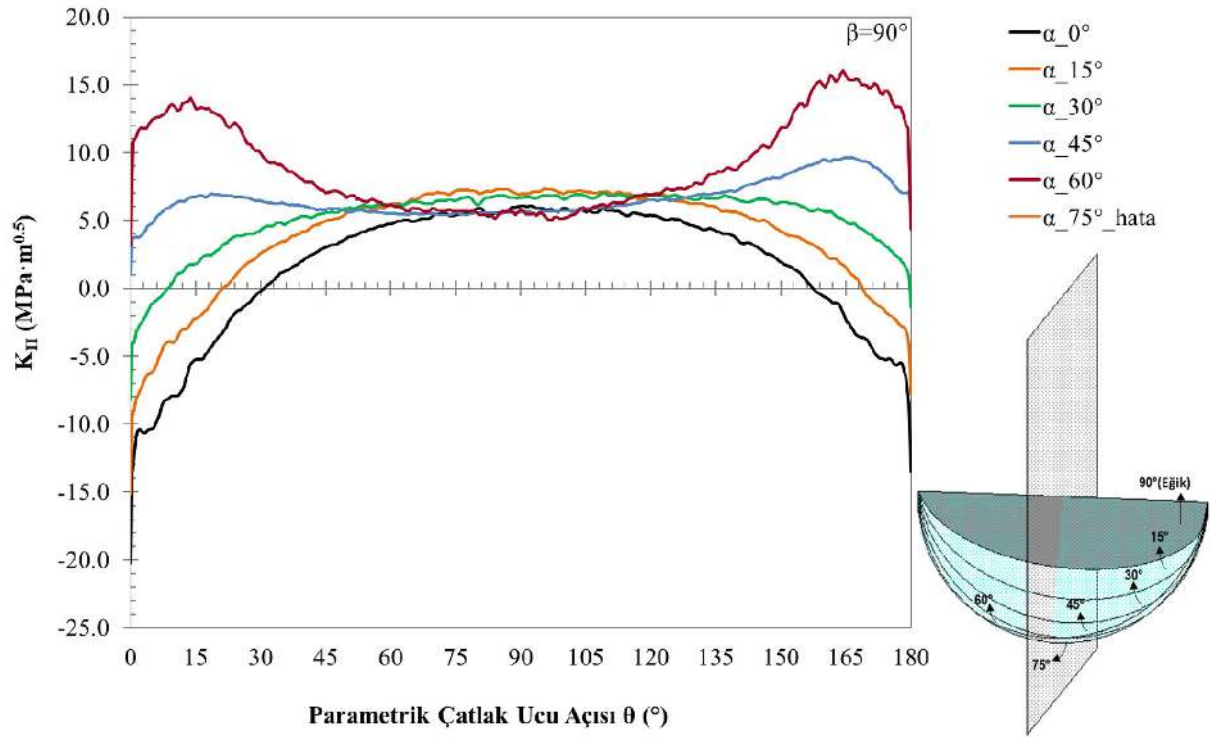
Şekil 3.89. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=45^\circ$)

3.6. 90° Eğim açısında Dönmüş Çatlak Analizleri

Bu bölümde $a/t=0.0625$, 0.125 , 0.25 ve $a/c=0.5$, 1 , 2 çatlak oranlarına sahip 90 derece eğim açısında 0 , 15 , 30 , 45 , 60 , 75 derece dönmüş yükleme açıları için kırılma analizleri gerçekleştirilmiş ve çatlak ucu boyunca elde edilen K_I , K_{II} , K_{III} GŞF değerleri Şekil 3.90-3.116'da verilmiştir.

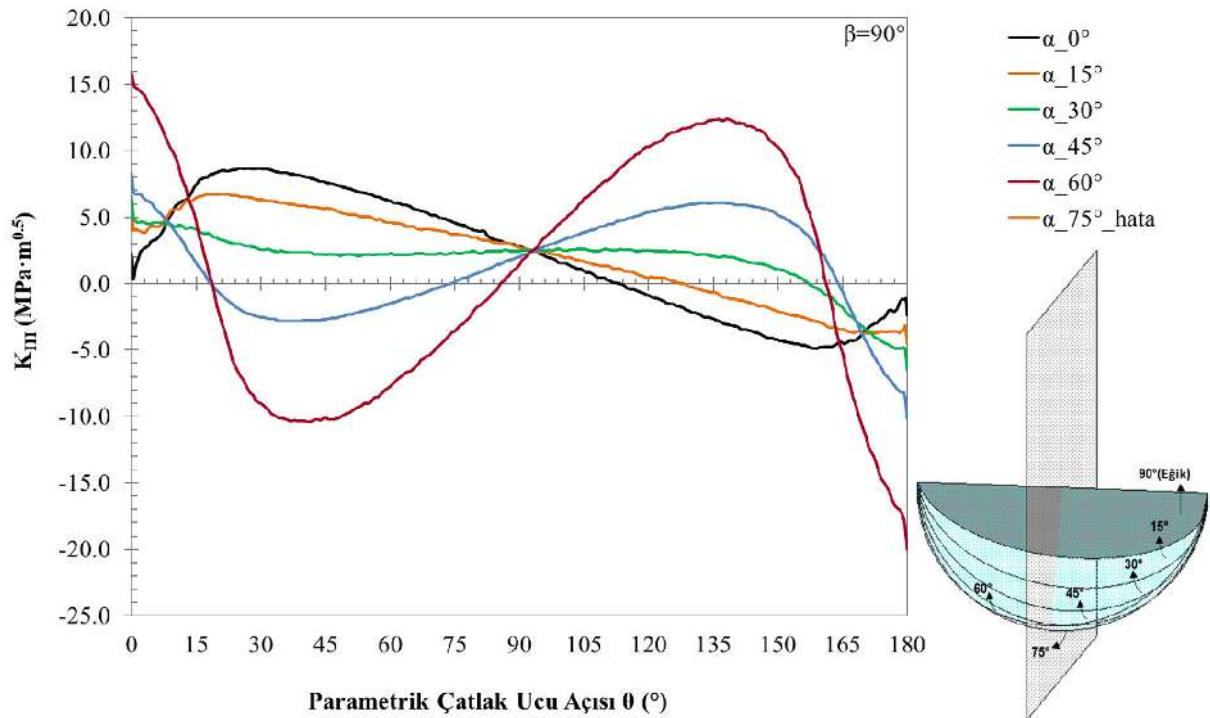


Şekil 3.90. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)

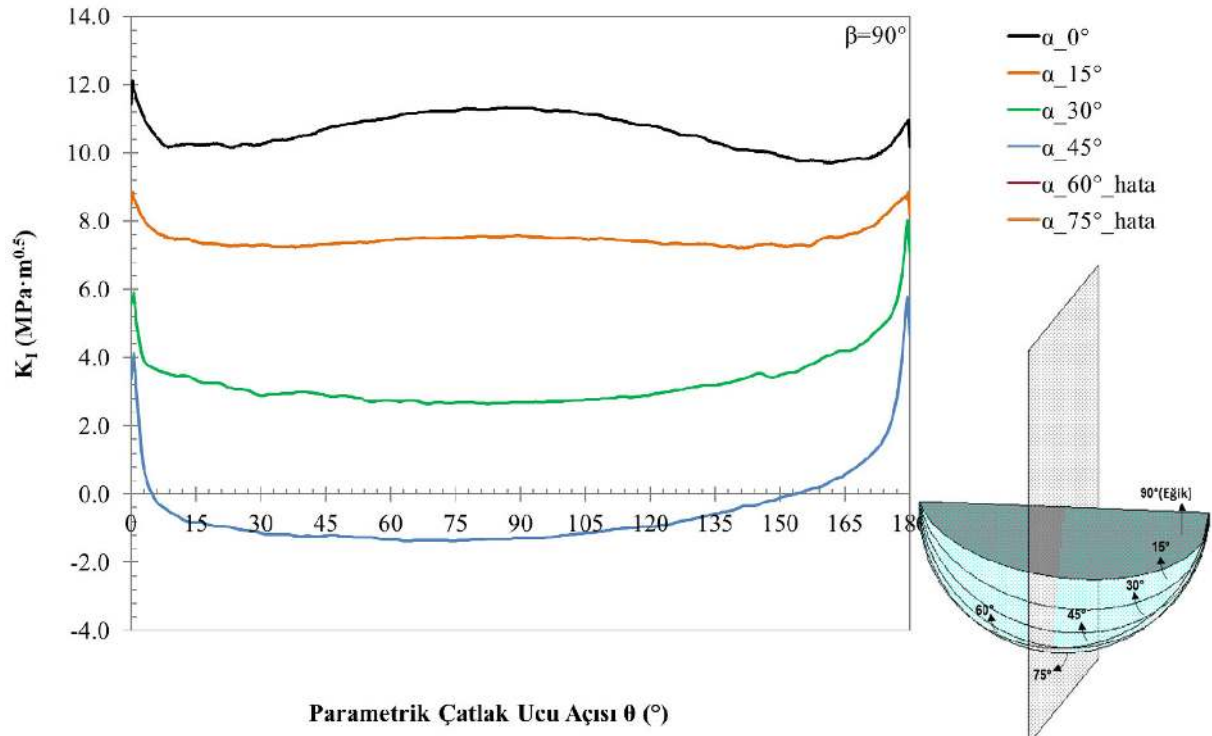


Şekil 3.91. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)

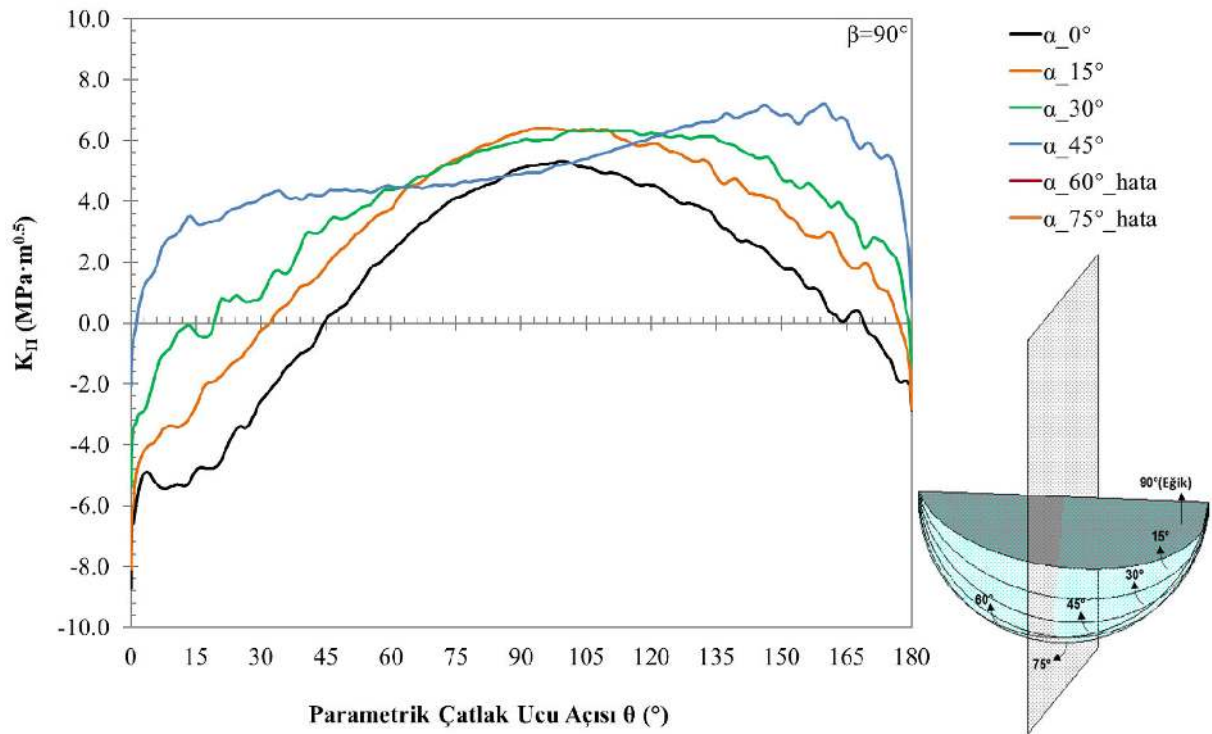
Şekil 3.90’da $\alpha=0^\circ$, $\alpha=15^\circ$ ve $\alpha=30^\circ$ ’lerde kabul edilebilir sonuç elde edilirken, $\alpha=45^\circ$ ve $\alpha=60^\circ$ ’de mod-I GŞF negatife düştüğü için uygun olmayan sonuçlar gözlemlenmiştir. $\alpha=75^\circ$ ’de ise çatlak bulunduğu düzleme paralel yakın formda olduğu için çatlak modellenememiştir. Dolayısıyla $\alpha=30^\circ$ ’den sonraki veriler kabul edilebilir değildir ve regresyon analizine dâhil edilmemiştir.



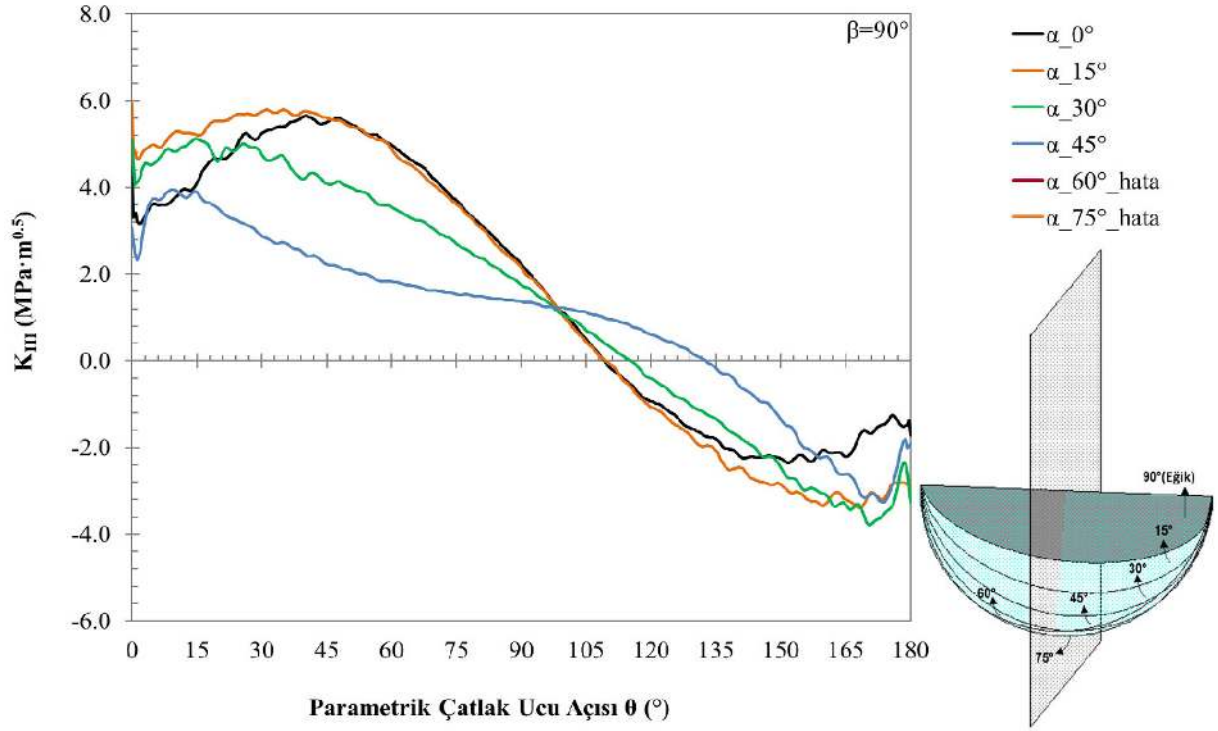
Şekil 3.92. $a/t=0.25$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



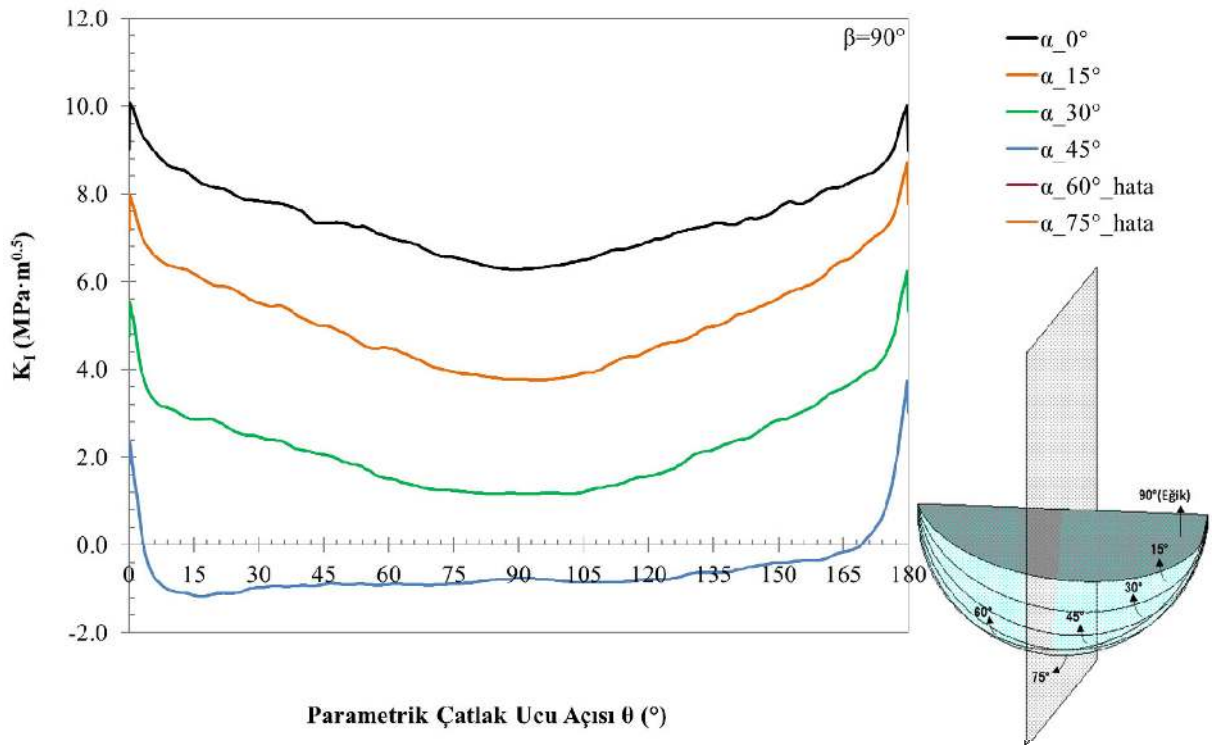
Şekil 3.93. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



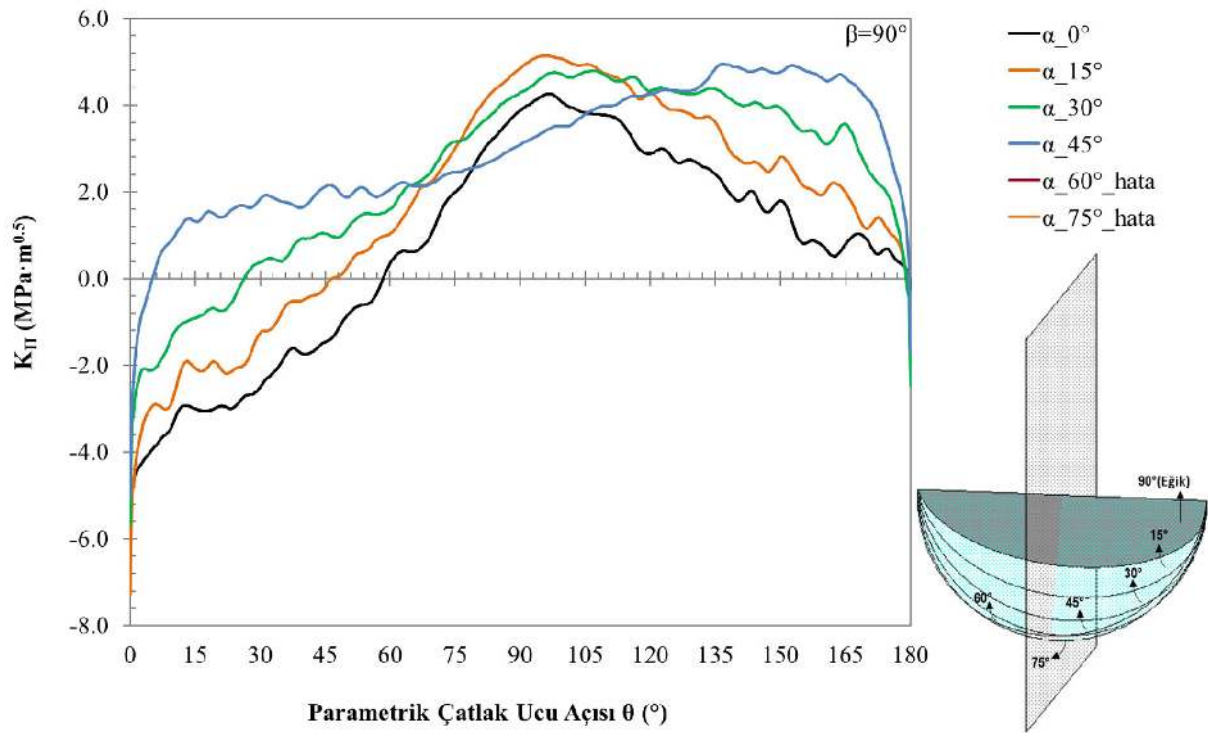
Şekil 3.94. $a/t=0.25$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



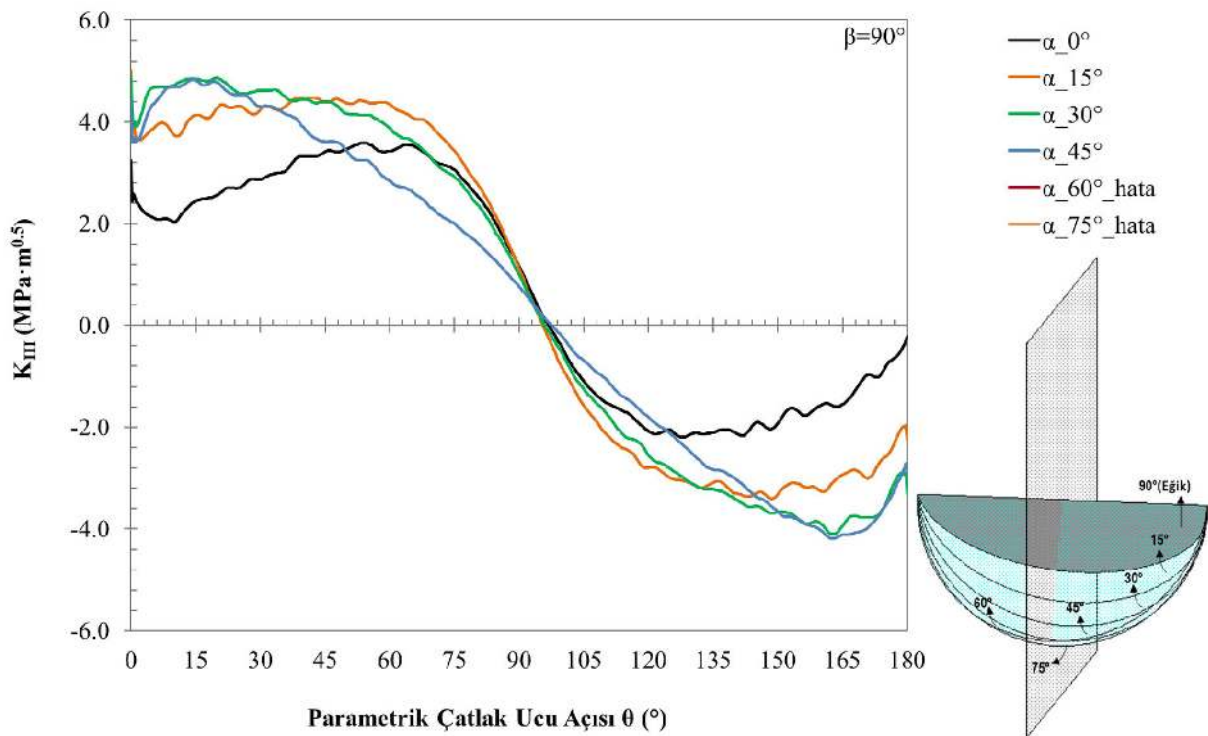
Şekil 3.95. $a/t=0.25, a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



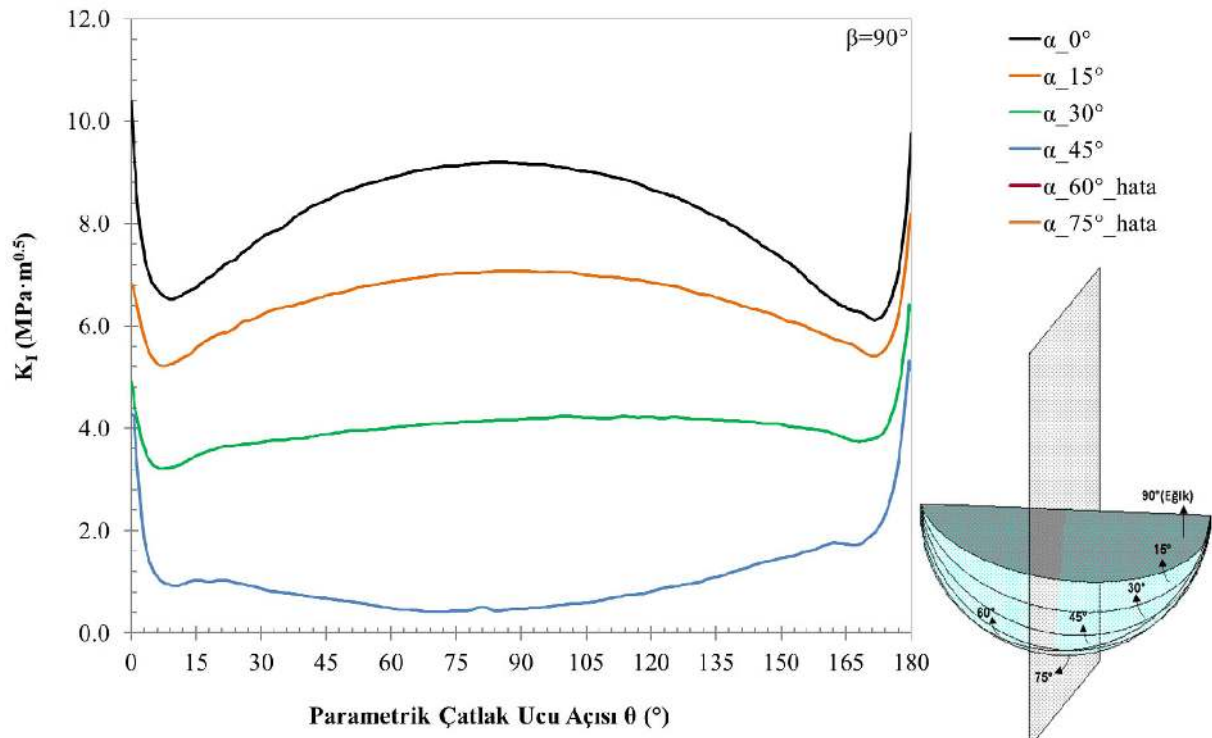
Şekil 3.96. $a/t=0.25, a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



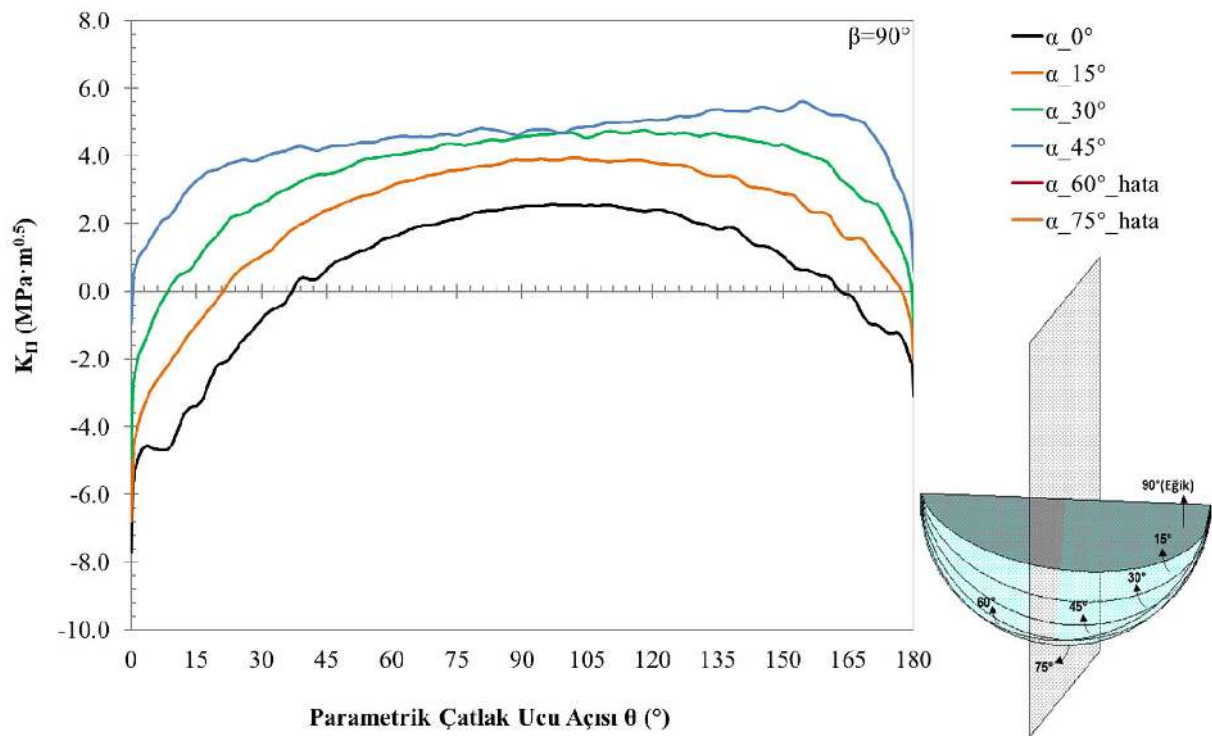
Şekil 3.97. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



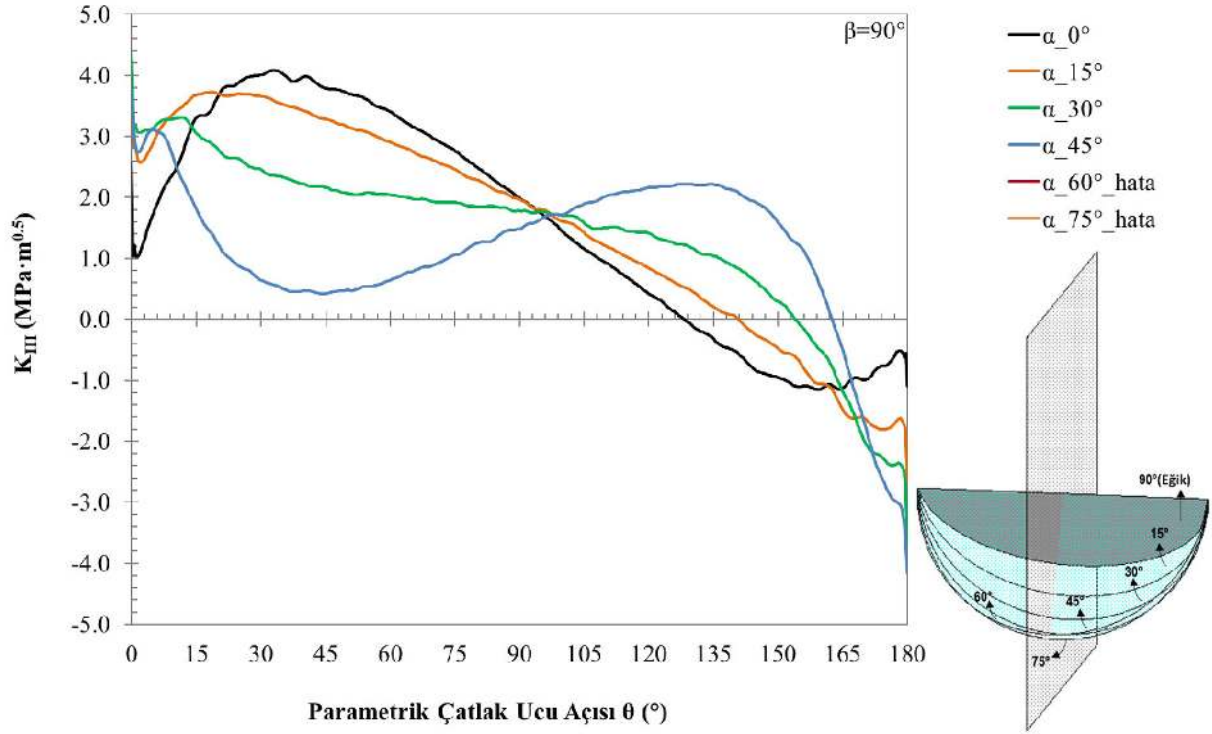
Şekil 3.98. $a/t=0.25$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



Şekil 3.99. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)

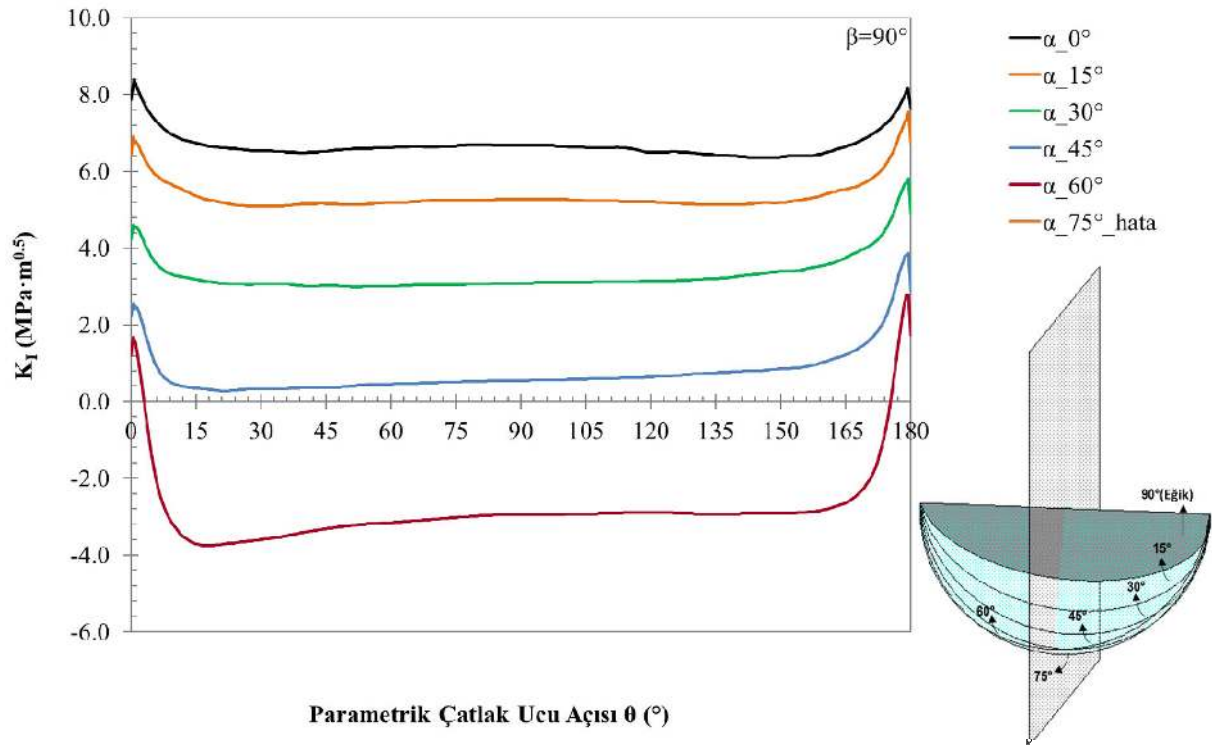


Şekil 3.100. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)

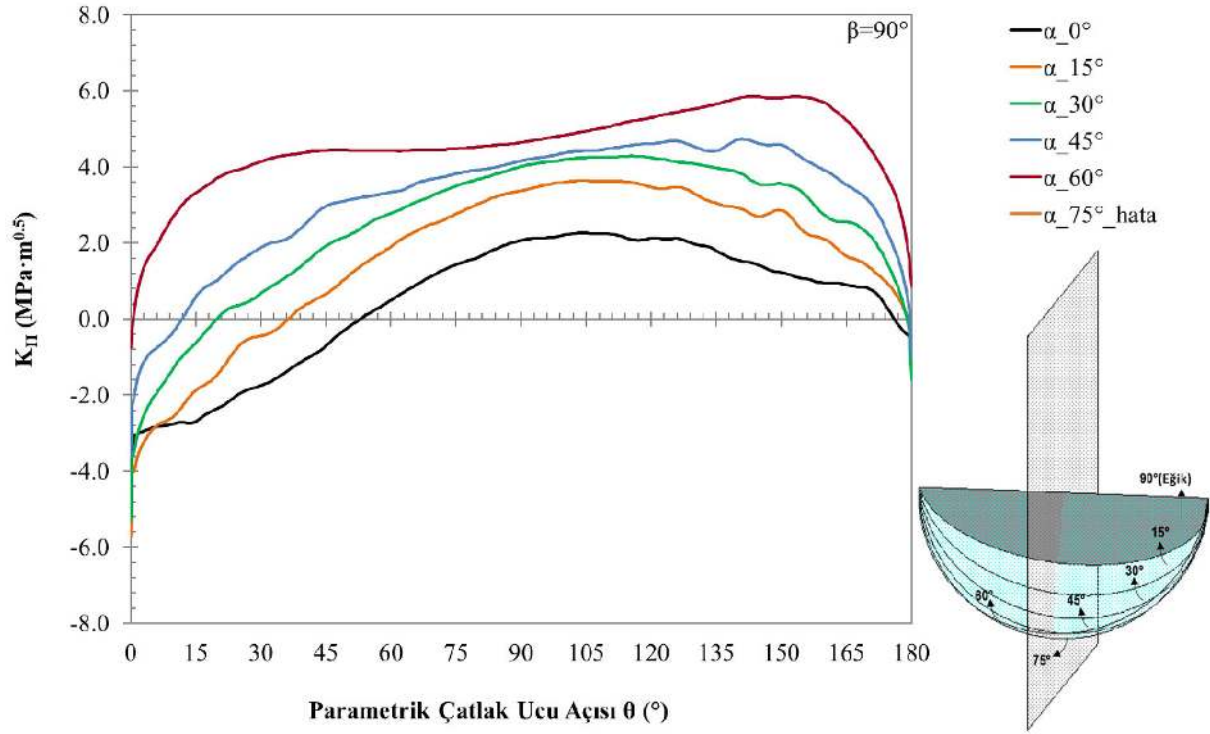


Şekil 3.101. $a/t=0.125$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)

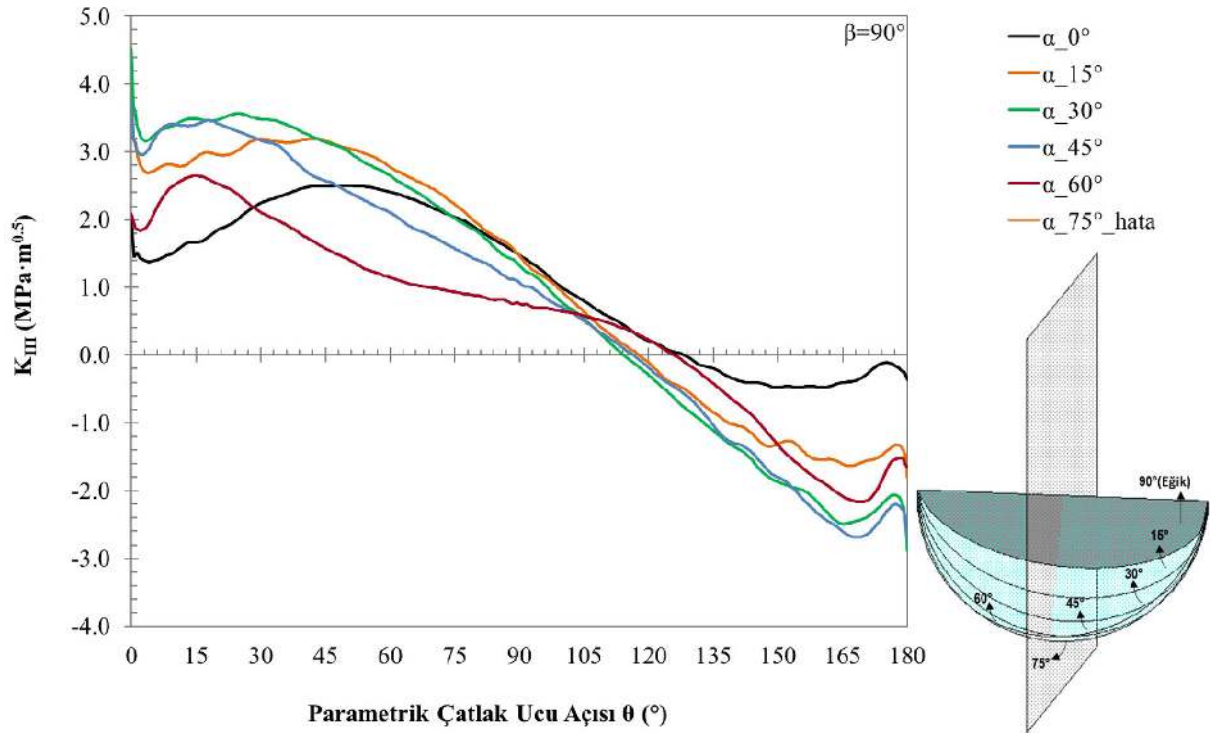
Elde edilen sonuçların simetrik olma eğilimi olduğu görülmektedir. a/t oranı arttıkça GŞF değerleri artmaktadır (Şekil 3.90, 3.99, 3.108). a/c oranı azaldıkça GŞF değerleri artmaktadır (Şekil 3.90, 3.93, 3.96).



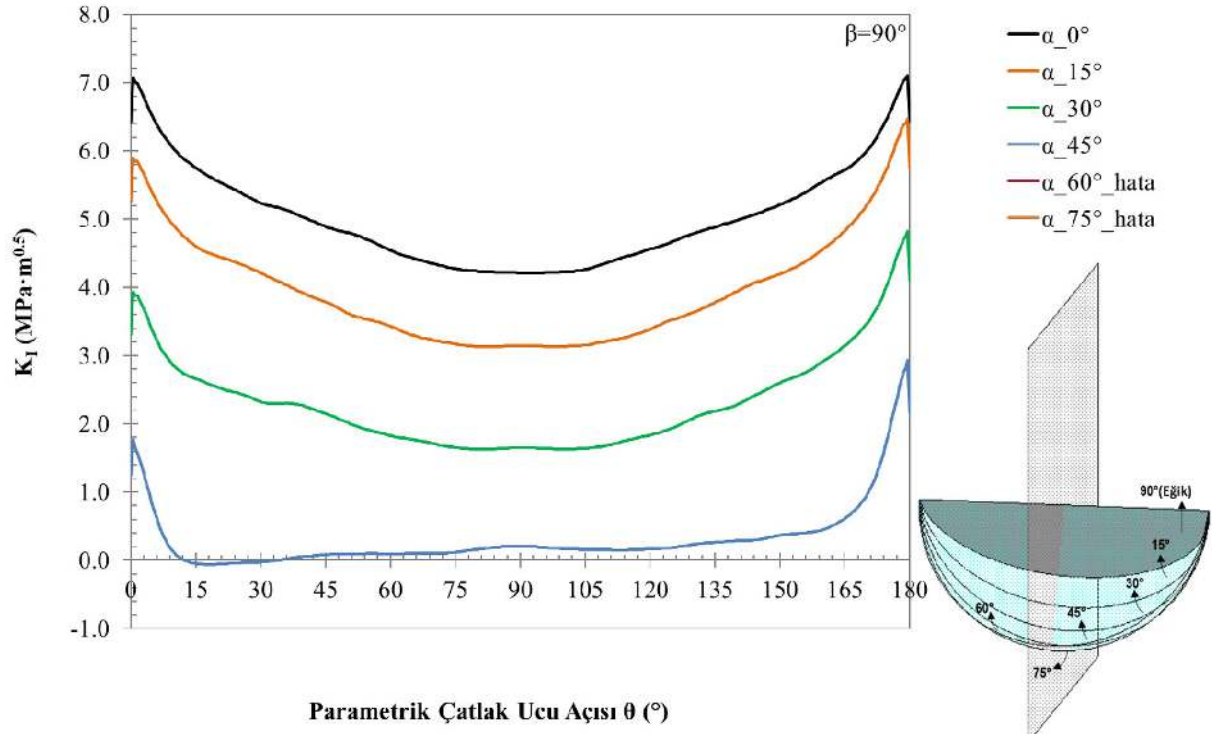
Şekil 3.102. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



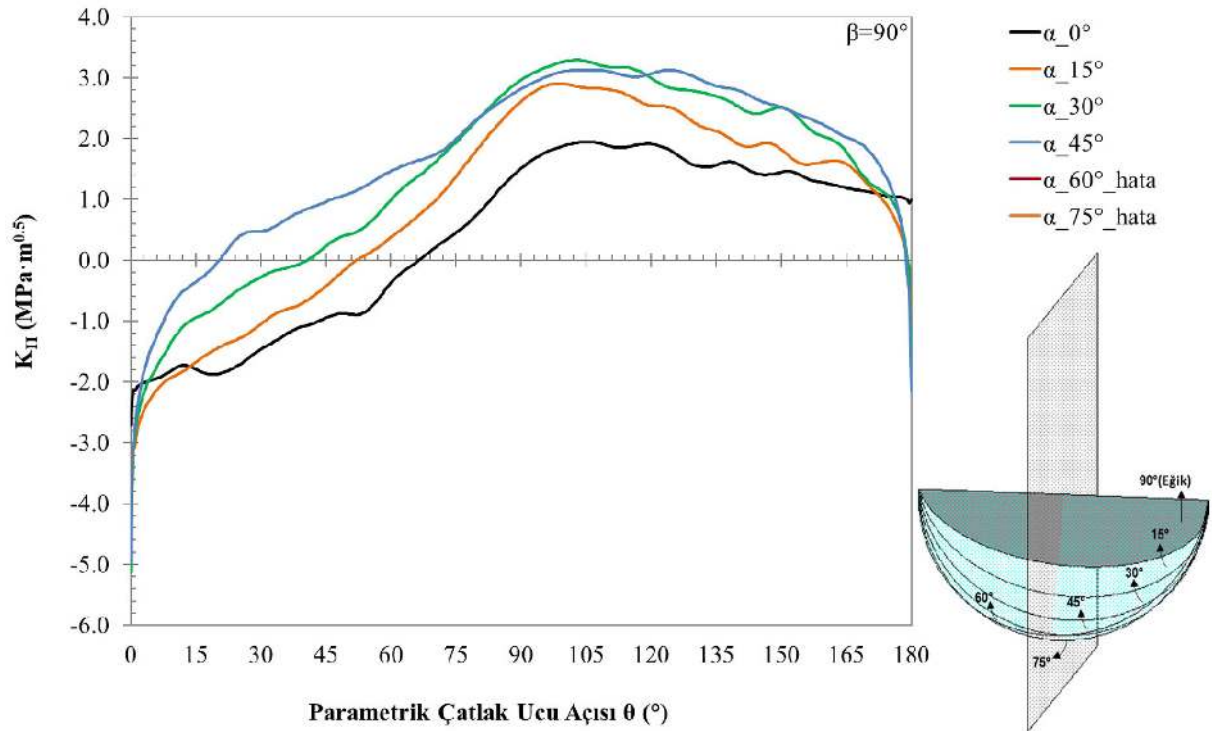
Şekil 3.103. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



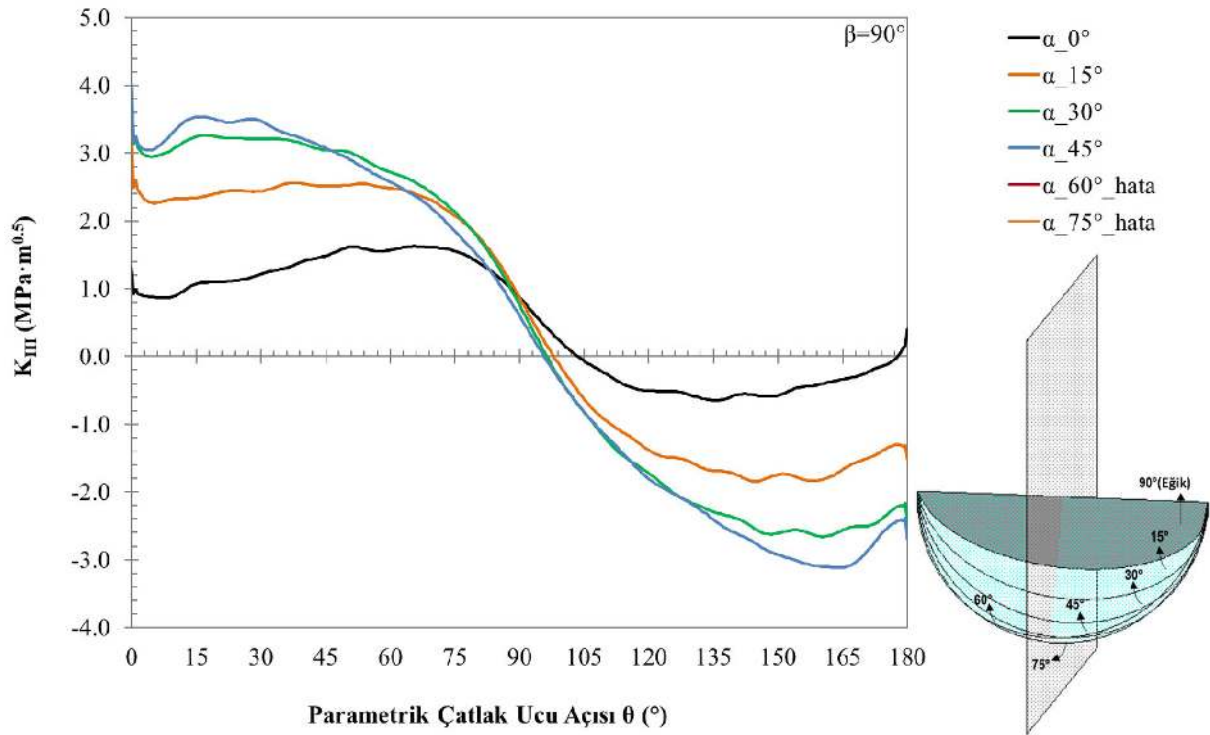
Şekil 3.104. $a/t=0.125$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



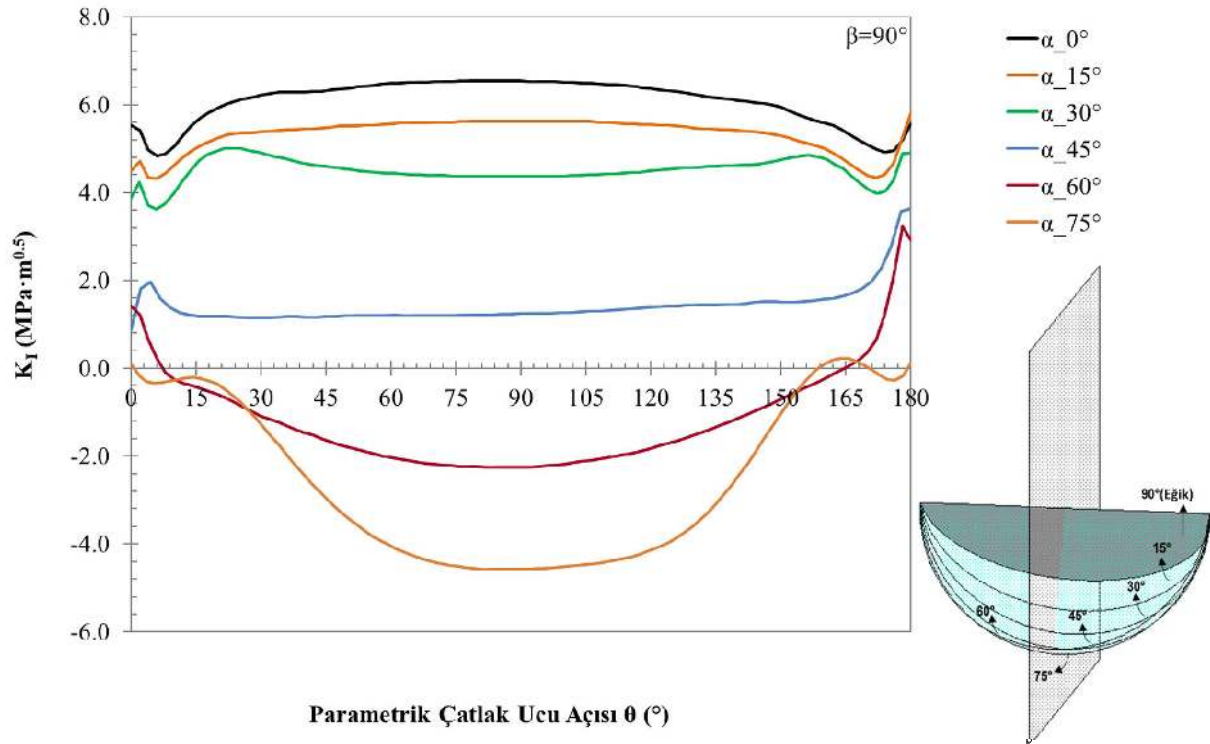
Şekil 3.105. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



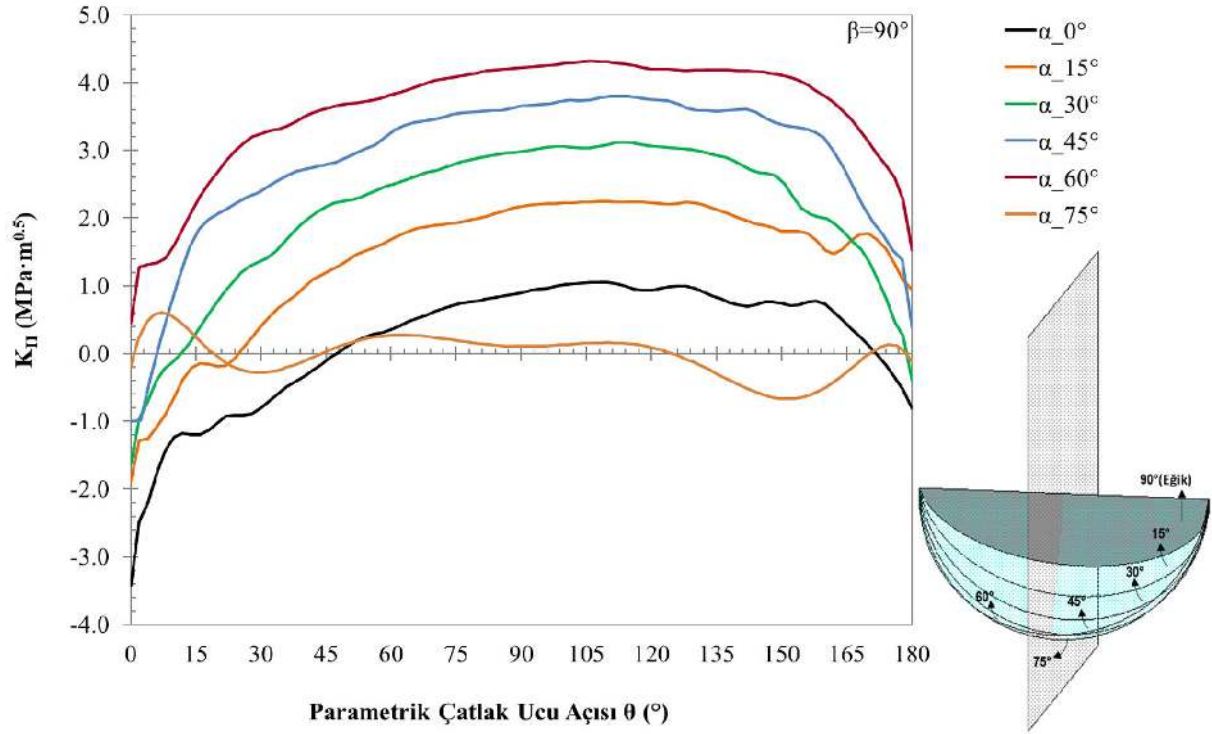
Şekil 3.106. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



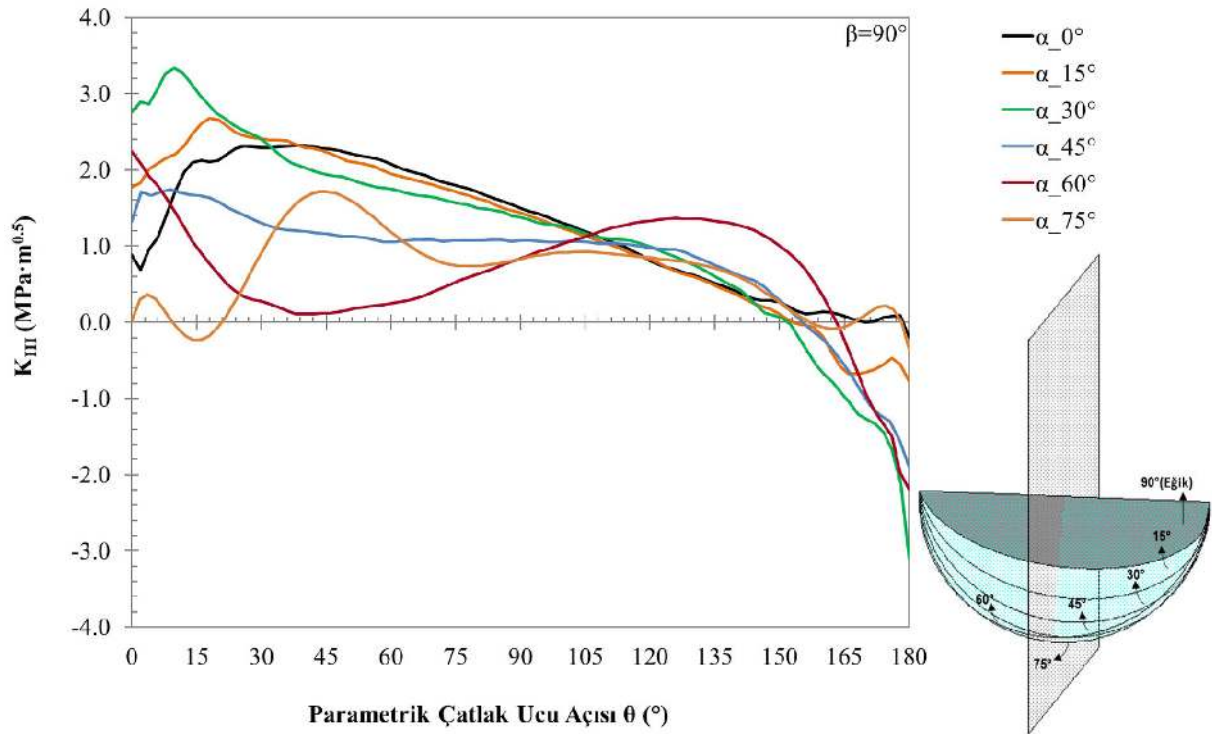
Şekil 3.107. $a/t=0.125$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



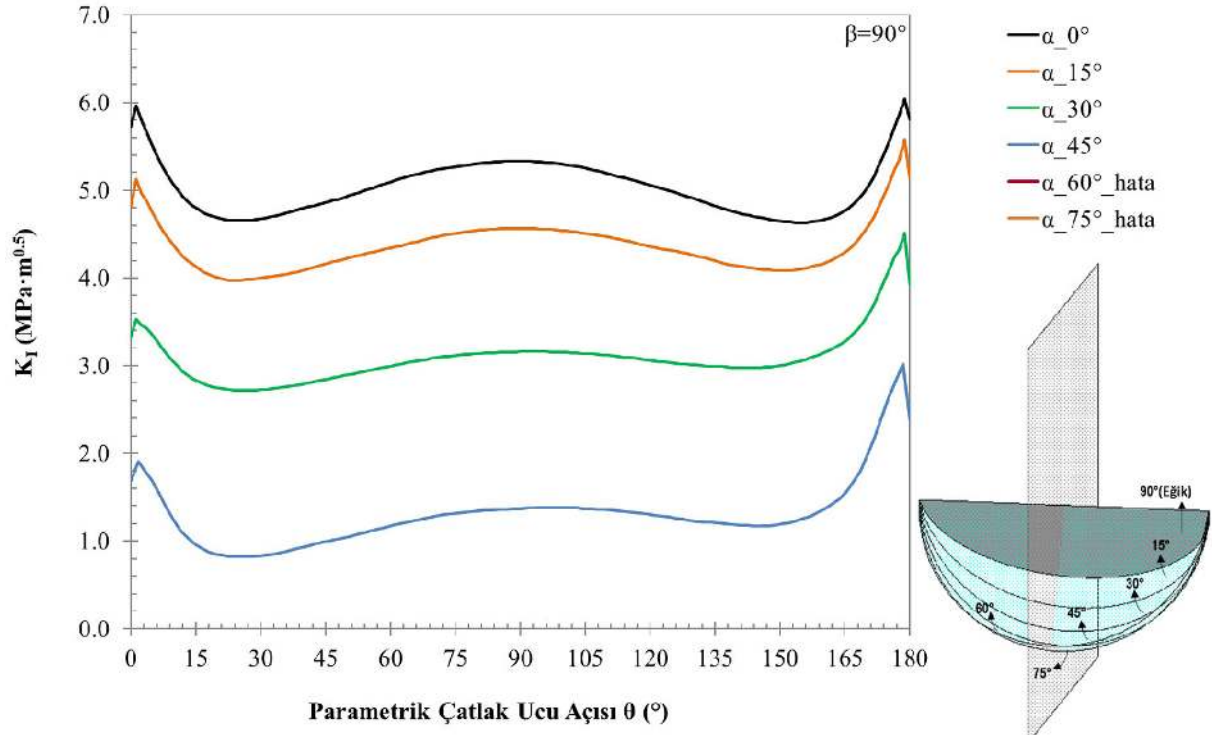
Şekil 3.108. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



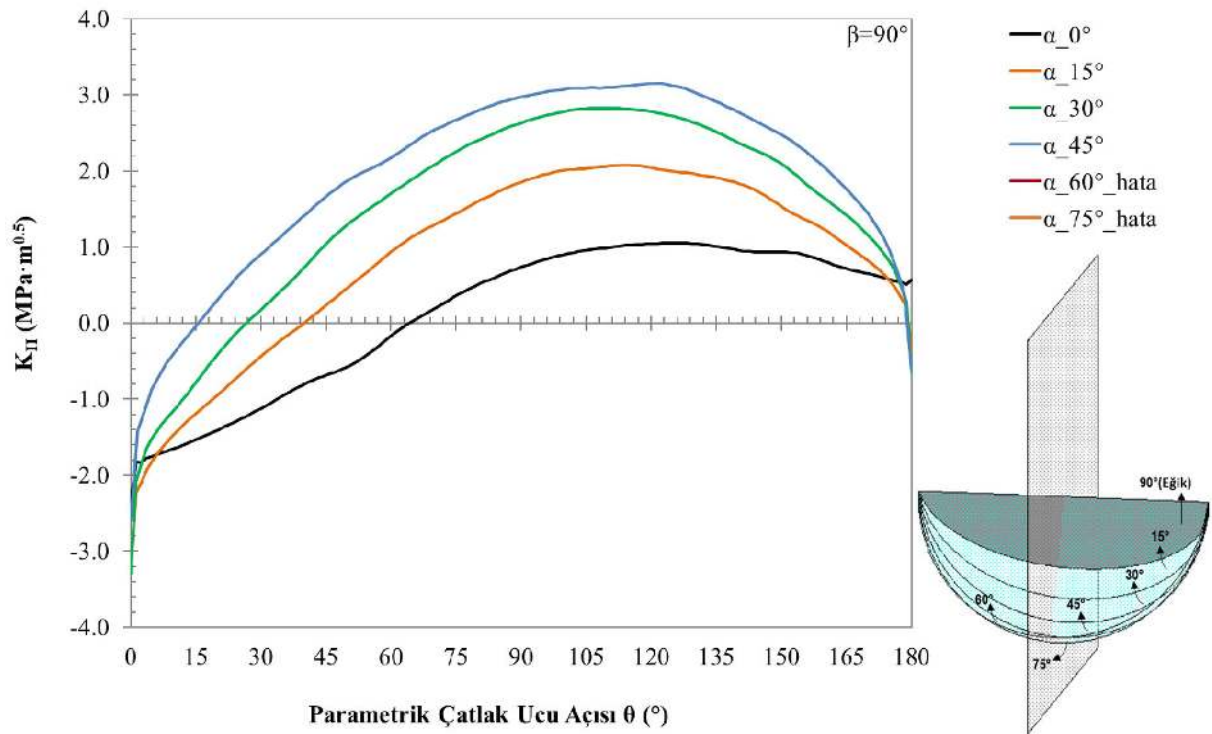
Şekil 3.109. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



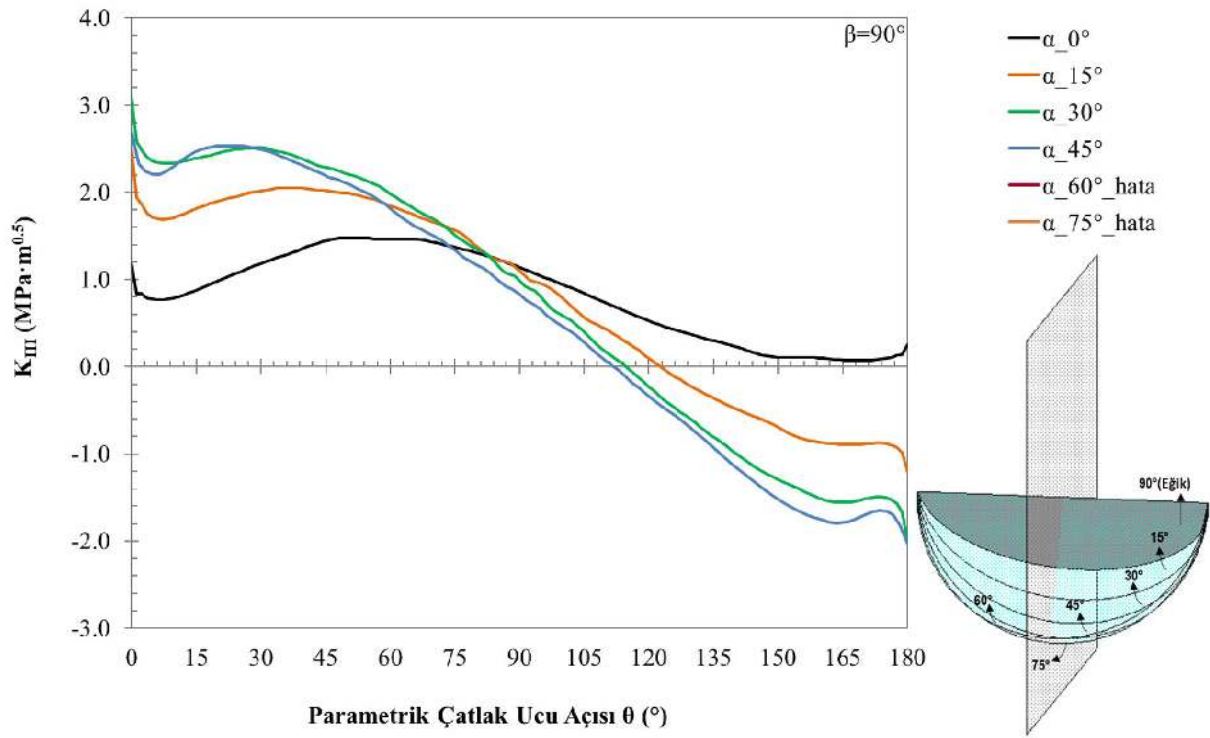
Şekil 3.110. $a/t=0.0625$, $a/c=0.5$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



Şekil 3.111. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)

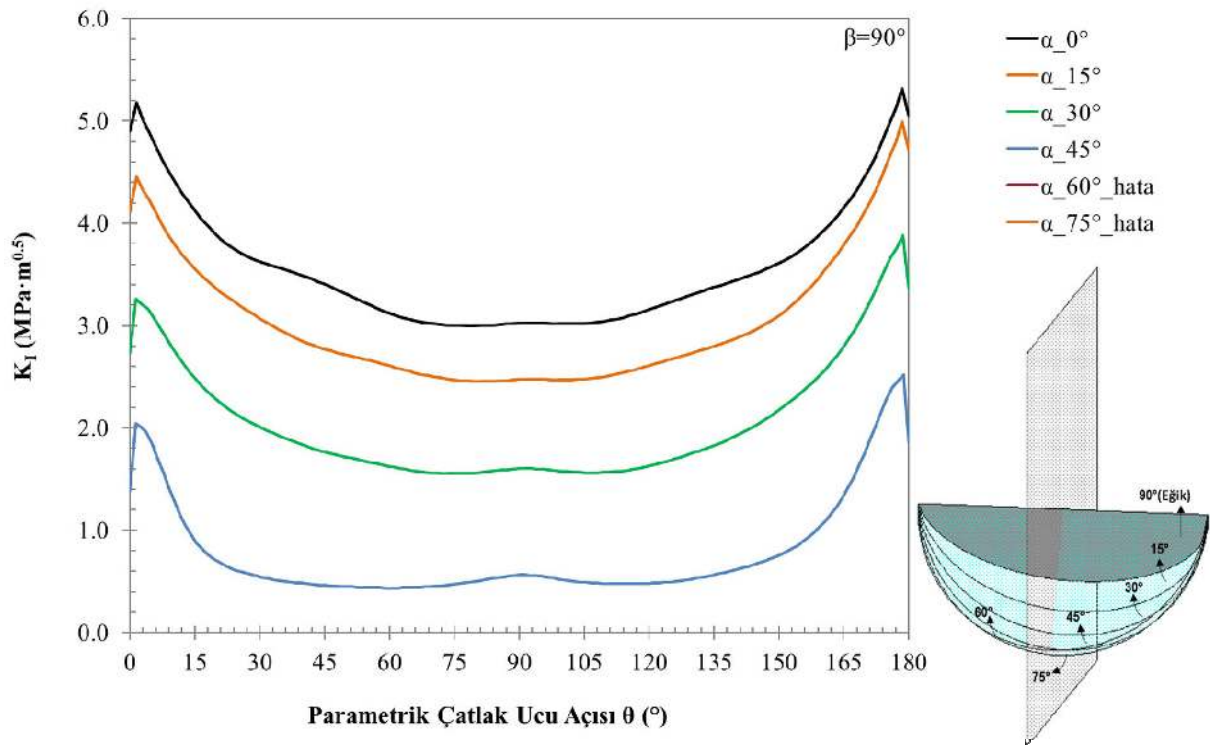


Şekil 3.112. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)

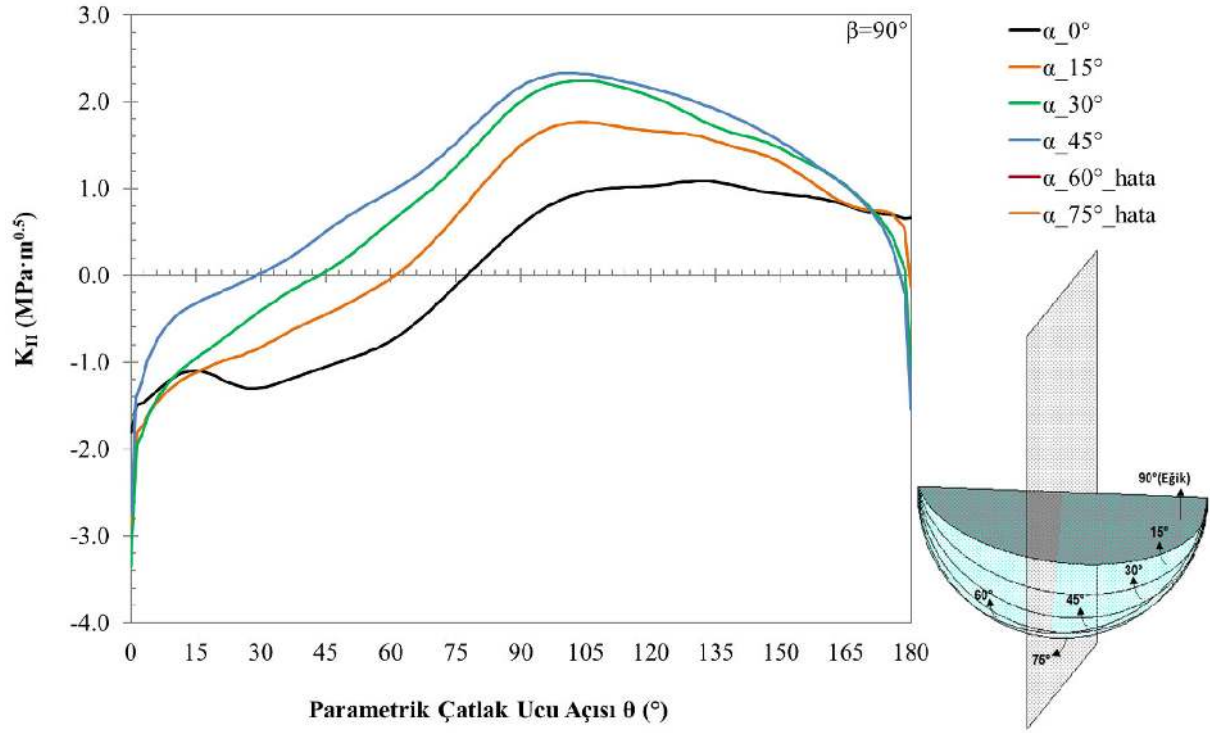


Şekil 3.113. $a/t=0.0625$, $a/c=1$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)

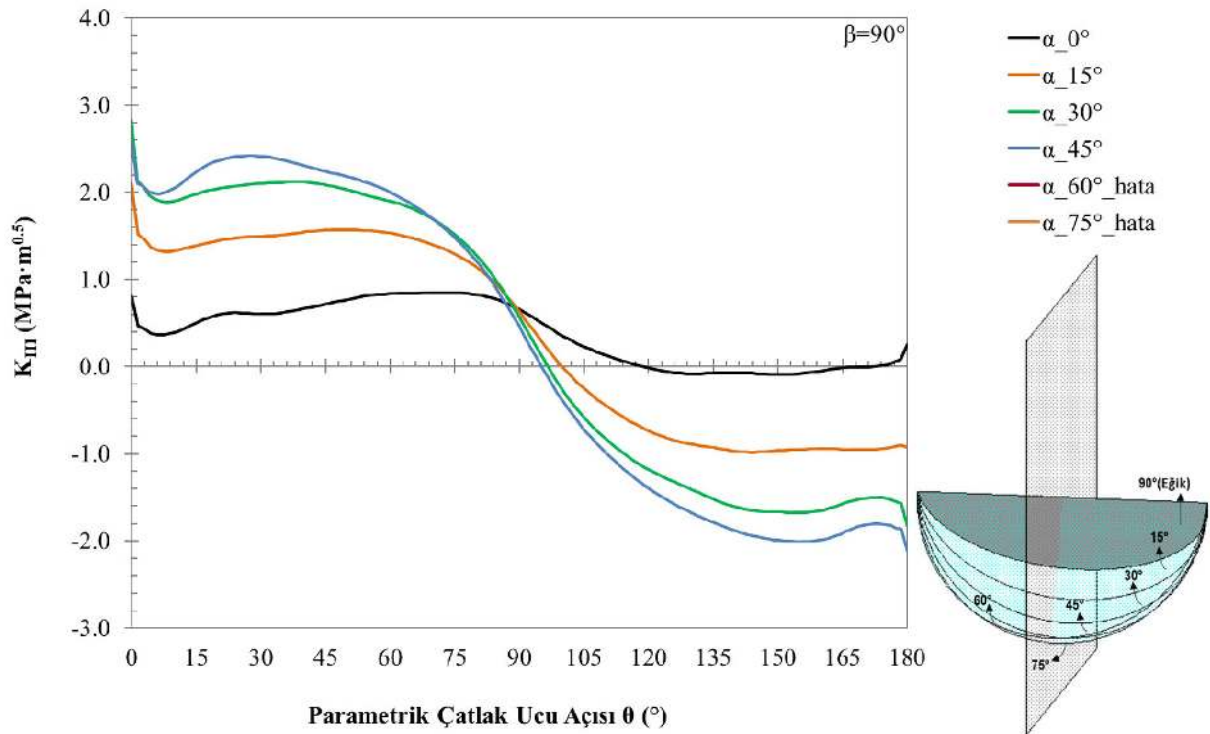
90° eğik dönmüş çatlak analizleri en düşük GŞF sonuçlarının elde edildiği analizlerdir. En düşük GŞF sonuçları $a/t= 0.0625$, $a/c=2$ durumunda elde edilmiştir. (Şekil 3.114, Şekil 3.115 ve Şekil 3.116)



Şekil 3.114. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-I gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



Şekil 3.115. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-II gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)



Şekil 3.116. $a/t=0.0625$, $a/c=2$ için mod-III gerilme şiddet faktörleri ($\beta=90^\circ$)

4. EMİRİK DENKLEM GELİŞTİRİLMESİ VE DOĞRULANMASI

Gerilme Şiddet faktörlerinin hesaplanmasında uzun süren yöntemler yerine özelleőtirilmiő problemler için hazır halde bulunan denklemler oldukça istenen bir durumdur (Şahin, 2020: 219). Karışık mod gerilme Şiddet faktörleri için empirik denklemler parametrik çatlak ucu açısının 90° olması durumunda (çatlak ucu orta noktasında) gerilme Şiddet faktörü değerlerine göre lineer regresyon analizleri gerçekteőtirilmiőtir. Regresyon analizi için (Minitab, 2017) Paket programı kullanılmıştır. Karışık mod gerilme Şiddet faktörleri için Şekil oranı, derinlik oranı, eğim ve dönme açılarının etkisine bağlı denklemler elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede çözüm yaptırılmayan ara aç değerleri için, elde edilen empirik denklemler ile kolaylıkla hesaplanması beklenmektedir.

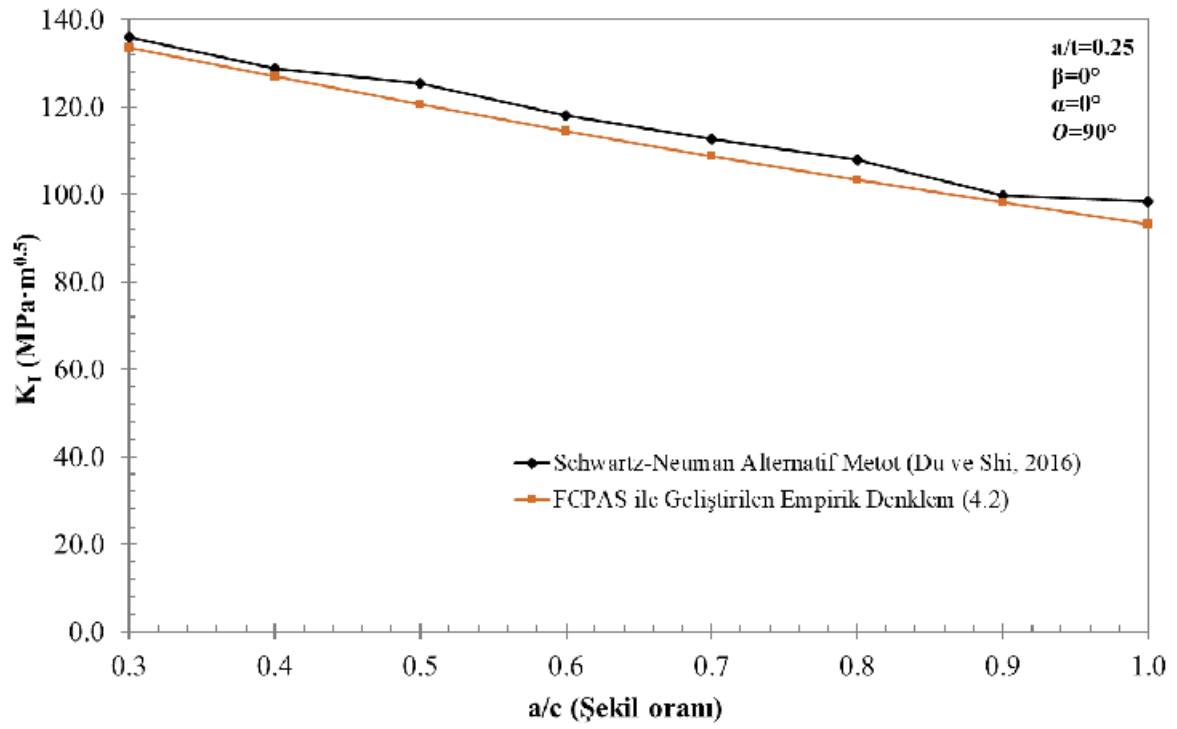
K_I GşF için denklem geliőtirilirken negatife düştüğü değerler regresyon analizine dahil edilmemiştir. Zira K_I'in negatif olduğu değerlerde çatlakta kapanma durumu söz konusudur. Bu durum reelde çatlak içeren bir yapıda çatlak kapanmayacağından dolayı hatalı veri olarak değerlendirip regresyon analizlerine dâhil edilmemiştir. Özellikle β=45° ve β=90° eğik yüksek dönme açılarında bu durum söz konusu olabilmektedir. K_I'in negatif değerleri veri olarak regresyon analizine dâhil edilmese dahi regresyon analizi sonucu elde edilen empirik denklemde belirli açılarda negatife düşebilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için poisson regresyon analizi yapılarak doğal üstel fonksiyona bağlı empirik denklem elde edilmiştir.

K_I için poisson regrasyon analizi sonucu elde edilen eőitlikler Denklem 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. Denklemlerde; “β” eğim açısı, “α” dönme açısı, “a/c” Şekil oranı, “a/t” derinlik oranı ve “e” Euler sayısıdır. “β” ve “α” açılarının birimi radyan, GşF faktörlerinin birimi MPa.m^{0.5} ‘dir.

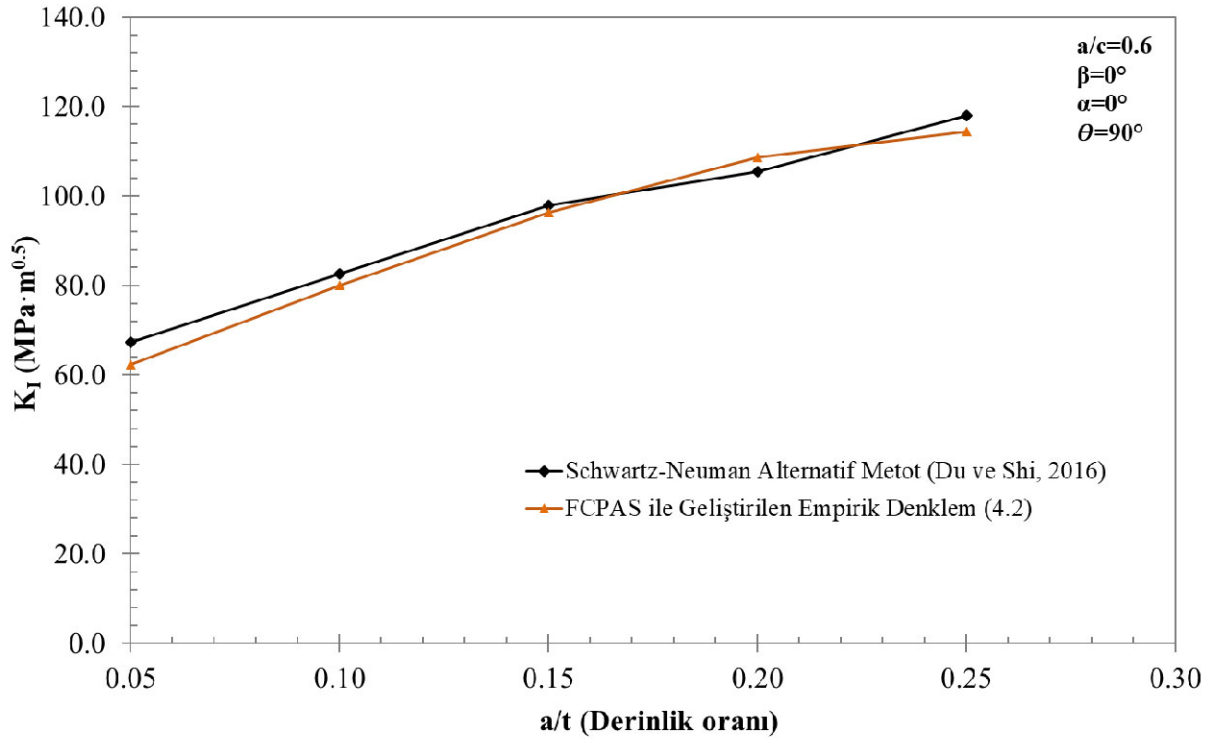
$$y = 4.122 + 7.012 \frac{a}{t} - 0.513 \frac{a}{c} - 13.22 \left(\frac{a}{t} \right)^2 - 0.99 \beta^2 - 0.812 \alpha^3 + 0.965 \frac{a}{t} \alpha^2 - 0.133 \frac{a}{c} \alpha^2 - 0.403 \beta^2 \alpha \quad (4.1)$$

$$K_I = e^y \quad (4.2)$$

Denklem (4.2) ile elde edilen K_I GşF sonuçları ve (Du ve Shi, 2016) Schwartz-Neuman tarafından alternatif metot ile elde ettikleri K_I GşF sonuçlarının karşılaőtırılması Şekil oranının (a/c) değişken olduğu durum için Şekil 4.1'de, derinlik oranının (a/t) değişken olduğu durum için Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Mod-I GŞF'lerinin $a/t=0.25$ 'de sabit, a/c 'nin değişken olması durumunda empirik denklemin doğrulanması



Şekil 4.2. Mod-I GŞF'lerinin $a/c=0.6$ 'da sabit, a/t 'nin değişken olması durumunda empirik denklemin doğrulanması

Lineer regresyon analizi sonucu GŞF K_{II} için elde edilen eşitlik Denklem 4.3'te, GŞF K_{III} için elde edilen eşitlik Denklem 4.4'de verilmiştir.

$$K_{II} = -1.444 + 23.286 \frac{a}{t} + 1.012 \beta + 46.371 \alpha - 66.660 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + 206.940 \frac{a}{t} - 23.263 \alpha^2 - 5.328 \frac{a}{c} \alpha - 34.440 \alpha + 3.457 \frac{a}{c} \beta \alpha + 69.244 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \beta - 249.349 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \alpha - 1.104 \frac{a^3}{c^2 t} - 2.415 \alpha^3 - 13.651 \frac{a^2}{t c} \alpha - 4.363 \frac{a}{t} \beta^2 - 72.828 \frac{a}{t} \beta \alpha - 16.427 \frac{a}{t} \alpha^2 + 1.493 \beta^2 \alpha + 18.932 \beta \alpha^2 \quad (4.3)$$

$$K_{III} = 1.079 - 25.925 \frac{a}{t} - 81.260 \beta - 0.715 \left(\frac{a}{c} \right)^2 + 53.095 \beta^2 + 19.305 \frac{a^2}{t c} + 30.728 \frac{a}{c} \beta - 46.643 \frac{a}{t} \alpha + 15.351 \beta \alpha + 105.071 \frac{a}{t} \beta^2 + 19.925 \frac{a}{t} \beta \alpha - 159.751 \frac{a}{t} \beta + 31.217 \frac{a}{t} \alpha^2 - 20.152 \frac{a}{c} \beta^2 - 10.563 \beta^2 \alpha \quad (4.4)$$

Tezden bağımsız gerçekleştirilmiş referans çalışmalardan elde edilen sonuçlar K_I GŞF için elde edilen empirik denklemin doğrulanmasına imkânı sağlarken; K_{II} , K_{III} ve 0° 'den farklı eğim ve dönme açıları için doğrulama imkânı sağlamamaktadır. Bu nedenle daha önce çözümü yaptırılmayan ara değerdeki parametreler için FCPAS'da çözümler gerçekleştirerek çatlak ucu orta noktası için elde edilen sonuçlar ile empirik denklemlerden elde edilen sonuçlar ve aralarındaki yüzde farklar Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Empirik denklemlerin, ara değerdeki parametreler için doğrulanması

β (°)	α (°)	a/c	a/t	FCPAS (MPa. $\sqrt{m}$)			Empirik D. (MPa. $\sqrt{m}$)			Yüzde Fark		
				K_I	K_{II}	K_{III}	K_I	K_{II}	K_{III}	K_I	K_{II}	K_{III}
22.5	52.5	0.625	0.09375	35.90	28.31	-17.08	33.59	24.86	-19.83	-6.9%	-13.9%	13.9%
52.5	22.5	1	0.0625	19.37	6.90	-20.23	19.51	7.60	-20.68	0.8%	9.2%	2.2%
67.5	22.5	0.75	0.1875	16.26	7.84	-23.70	19.24	10.06	-24.74	15.5%	22.1%	4.2%
22.5	67.5	1.5	0.2185	16.60	27.17	-11.55	15.11	29.13	-15.66	-9.8%	6.7%	26.2%
22.5	0	0.625	0.09375	67.00	0.50	-22.04	65.99	0.69	-22.99	-1.5%	27.7%	4.1%
52.5	0	1	0.0625	22.40	0.60	-21.33	23.67	0.63	-22.33	5.4%	4.9%	4.5%
67.5	0	0.75	0.1875	21.33	3.61	-23.86	24.86	3.39	-25.28	14.2%	-6.6%	5.6%
22.5	0	1.5	0.2185	58.42	1.38	-17.79	60.37	1.47	-20.32	3.2%	5.6%	12.4%
0	22.5	0.625	0.09375	71.26	19.47	-2.22	73.27	19.49	-1.77	2.7%	0.1%	-25.9%
0	52.5	1	0.0625	27.58	24.78	-1.33	27.37	25.22	-1.08	-0.7%	1.7%	-22.9%
0	67.5	0.75	0.1875	32.87	38.88	-3.48	29.15	43.00	-3.65	-12.8%	9.6%	4.6%
0	22.5	1.5	0.2185	61.41	21.61	-2.72	67.06	22.03	-2.82	8.4%	1.9%	3.5%

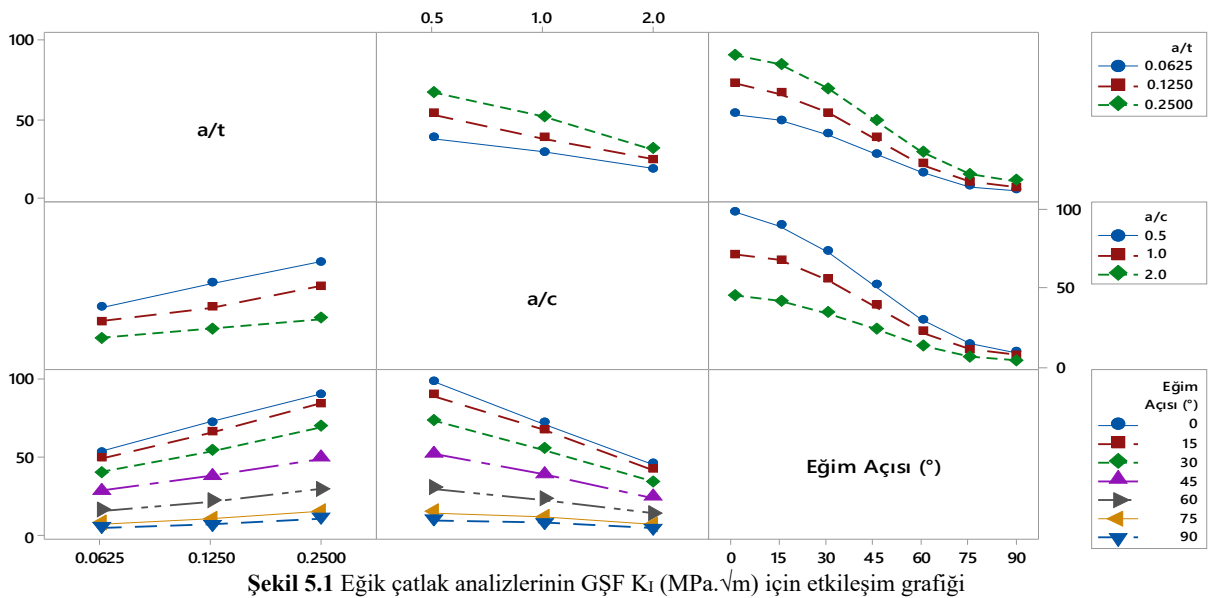
5. ANALİZLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE BULGULAR

Gerilme şiddet faktörü yöntemi kırılma mekaniğinin prensipleri gereği; çatlak ucu kenar (başlangıç – bitiş) noktalarındaki gerilmeler matematiksel olarak sonsuza gitmektedir. Bu sebeple çatlak ucu orta noktalarındaki GŞF değerleri önemsenmiş ve yorumlanmıştır. Mod-III ve mod-II’de GŞF’nin negatif veya pozitif olması sadece yön belirtmektedir. Eğer çatlak dönme ve eğim açıları ters yönde alınır; aynı sonuçlar elde edilip sadece negatifliği veya pozitifliği değişmektedir. Mod-I GŞF’nin negatif olma durumu reelde başlangıç çatlak içeren bir yapı için söz konusu değildir ve bu açılardaki veriler denklemlerin geliştirilmesinde değerlendirmeye alınmamıştır. Bu bölümde farklı çatlak şekil oranları, çatlak derinlik oranları ve farklı eğim ve dönme açılarına sahip çatlaklar için gerçekleştirilen kırılma analizleri sonrası elde edilen GŞF değerlerinin yukarıda bahsedilen parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Ek olarak her bölümde ortalama etkileşim grafikleri verilmiştir.

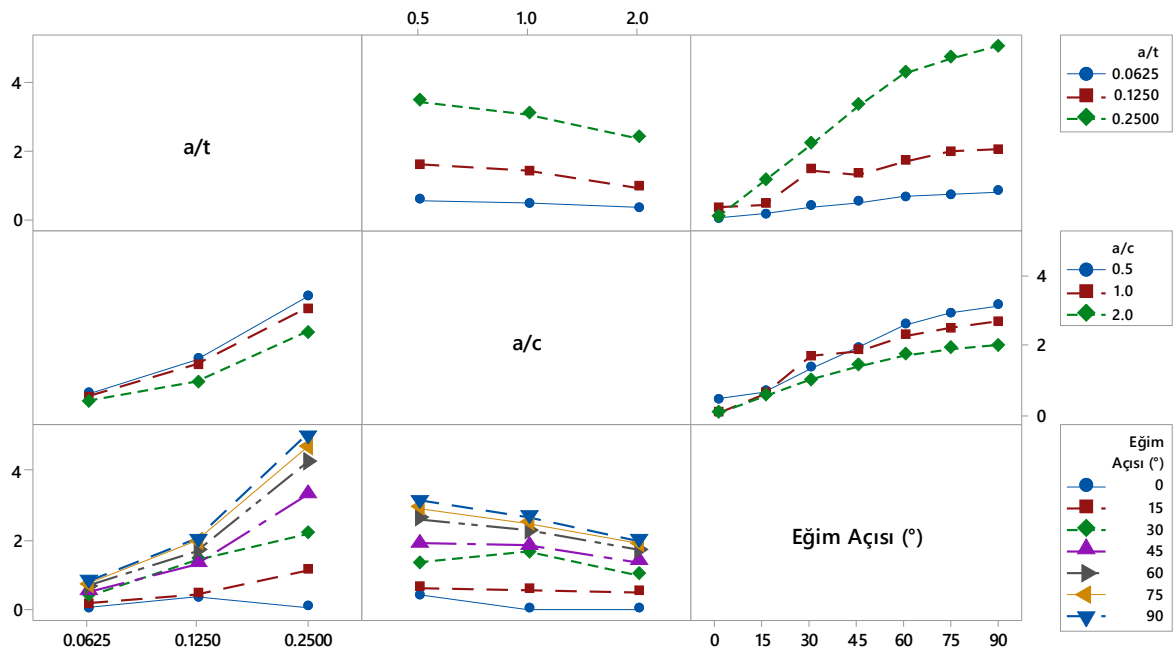
5.1. Eğik Çatlak Analizlerinin İrdelenmesi

Eğik çatlak analizleri için hedeflenen 63 analiz her parametresinin tasarım ve ağ örüntüleme işlemleri başarıyla gerçekleştirilip FCPAS paket programı ile kırılma analizlerinin sonuçları elde edilmiştir.

Derinlik oranı (a/t) arttıkça, şekil oranı (a/c) azaldıkça mod-I GŞF değerleri beklendiği gibi artmaktadır. GŞF eğim açısı (β) arttıkça mod-I GŞF değerlerinin azaldığı görülmektedir. Maksimum mod-I GŞF $a/t=0.25$, $a/c=0.5$, $\beta=0^\circ$ olduğu parametrede çatlak ucu orta noktasında $122.45 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ‘dir. Mod-I GŞF maksimum olduğu parametrelerde mod-II GŞF $0.05 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ve mod-III $-2.77 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ değerindedir. $\beta=0^\circ$ değerinde problem neredeyse tekil mod-I durumundadır. Sonuçların çatlak ucu boyunca simetrik olduğu görülmektedir.

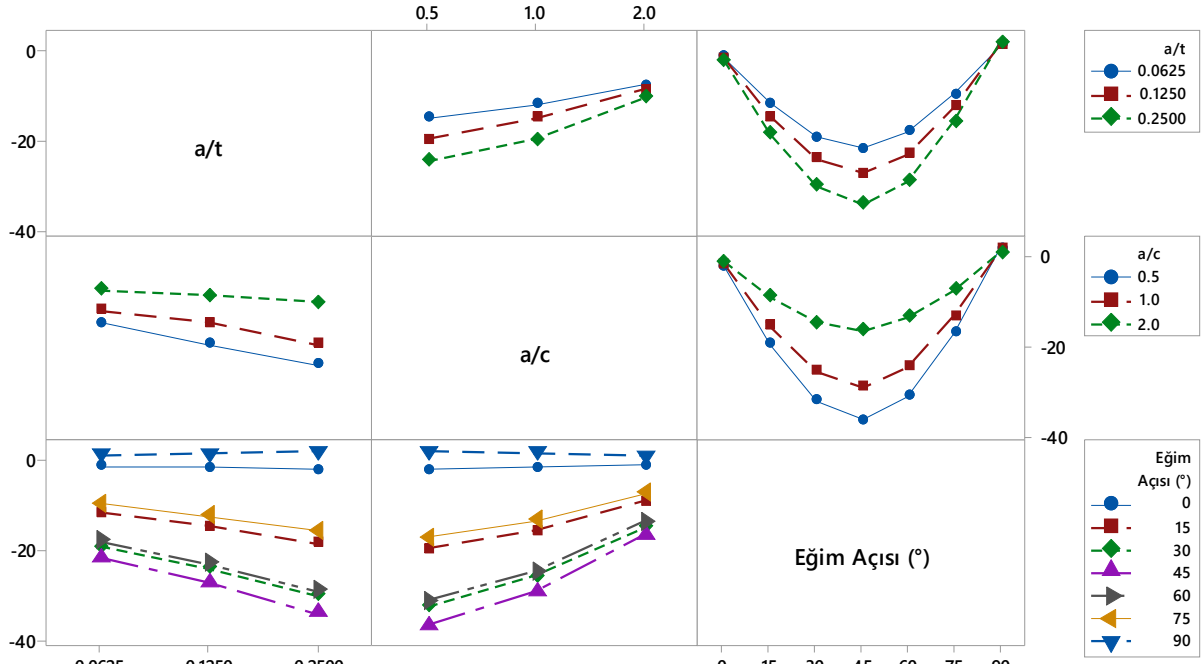


Eğik çatlak analizleri için mod-II GŞF incelendiğinde; derinlik oranı (a/t) arttıkça, şekil oranı (a/c) azaldıkça GŞF K_{II} artmaktadır. Eğim açısı (β) arttıkça mod-II GŞF arttığı görülmektedir. Mod-II GŞF sonuçları çatlak ucu orta noktasında pozitif değerlerden negatif değerlere geçişi sağlayan $0 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ eğilimde iken; çatlak ucu başlangıç ve bitiş noktalarında artış göstermektedir. Bu durum karışık mod kırılma analizlerinin önemi bölümünde açıklanan eğilme etkisini göstermektedir. Bu nedenle K_{II} GŞF’de pozitiften negatife geçiş durumu söz konusudur. Çatlak ucu orta noktasında maksimum mod-II GŞF $a/t=0.25$, $a/c=0.5$, $\beta=90^\circ$ olduğu parametrede $6.06 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ değerindedir. Bu parametrelerde mod-I GŞF $14.55 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, mod-III GŞF $2.8 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ’dir.



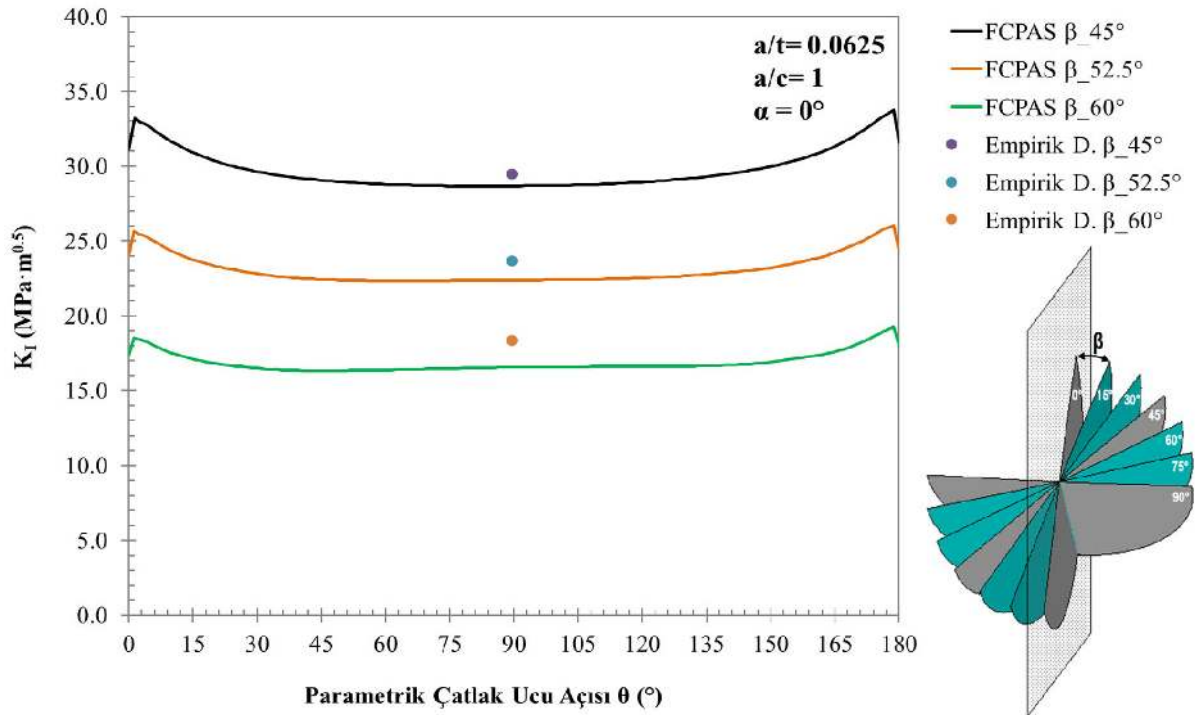
Şekil 5.2. Eğik çatlak analizlerinin GŞF K_{II} ($\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$) için etkileşim grafiği

Eğik çatlak analizleri için mod-III GŞF incelendiğinde; derinlik oranı (a/t) arttıkça şekil oranı (a/c) azaldıkça GŞF K_{III} negatif yönde artmaktadır. $\beta=0^\circ - \beta=90^\circ$, $\beta=15^\circ - \beta=75^\circ$ ve $\beta=30^\circ - \beta=60^\circ$ gibi birbirini 90° tamamlayan açılarda çatlak ucu orta noktasında mod-III GŞF değerleri eşit olma eğilimindedir. $\beta=45^\circ$ ’de ise; mod-III GŞF sonuçları negatif yönde maksimum değerdedir. Çatlak ucu kenarlarından çatlak ucu orta noktasına doğru mod-III GŞF değerleri artmaktadır. Negatif yönde maksimum mod-III GŞF $a/t=0.25$, $a/c=0.5$, $\beta=45^\circ$ olduğu parametrelerde çatlak ucu orta noktasında $-45.45 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ olarak elde edilmiştir. Bu parametrelerde mod-I GŞF $67.34 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, mod-II GŞF $3.57 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ değerindedir.



Şekil 5.3. Eğik çatlak analizlerinin GŞF K_{III} (MPa·√m) için etkileşim grafiği

Mod-I GŞF için geliştirilen empirik denklem %95 güven aralığında iyilik uyum indeksi %99.06 olarak tahminde bulunmaktadır. Eğik çatlak analizleri için FCPAS ile çözümü daha sonradan yaptırılan ara değer olan 52.5° eğik açiya göre tahmin edilen sonuçların tutarlı olduğu Şekil. 5.4'te görülmektedir. Eğik çatlak analizlerinde açı arttıkça mod-I GŞF için geliştirilen empirik denklem arasında sapma yüzde olarak artmaktadır. Tablo 5.1'de yüzde fark artışı gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Eğik çatlak analizlerinde ara değerlerde empirik denklemin doğrulanması

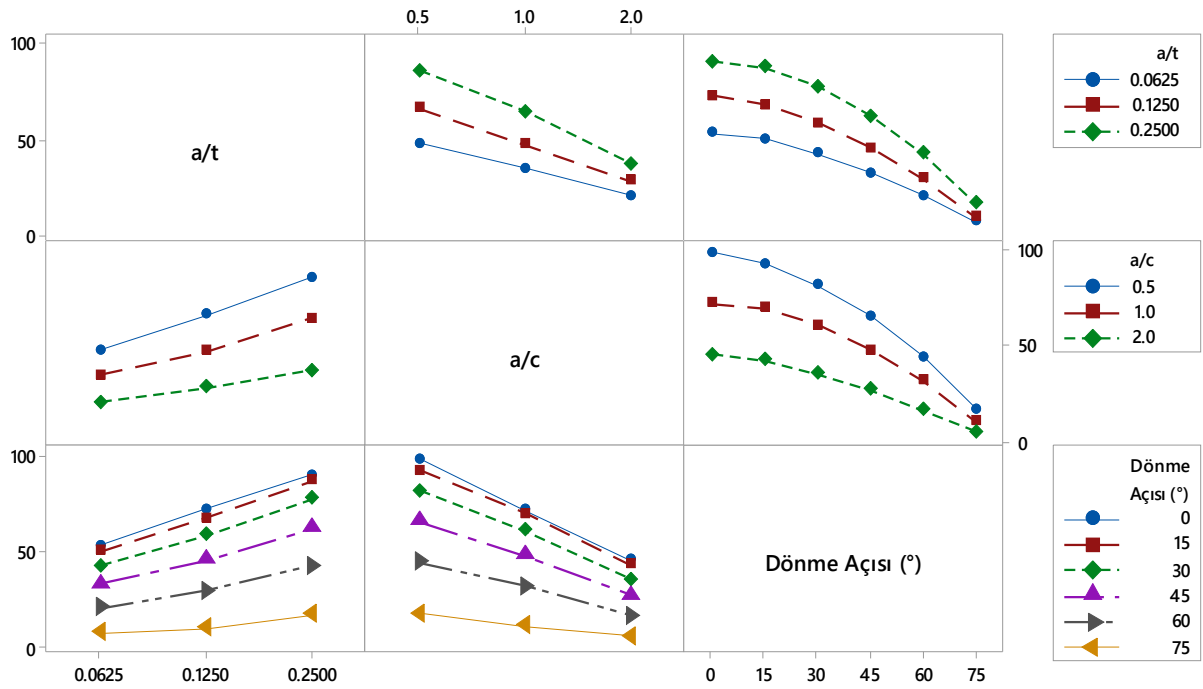
Tablo 5. 1. Eğik çatlak analizlerinde $a/c=1$, $a/t=0.0625$ durumunda mod-I GŞF empirik denkleminin açıya göre yüzde sapması

β (°)	FCPAS	Empirik Denklemler	Yüzde Fark
	K_I (MPa. $\sqrt{m}$)	K_I (MPa. $\sqrt{m}$)	
0	54.29	54.34	0.09%
15	50.39	50.77	0.76%
30	41.05	41.42	0.90%
45	28.70	29.51	2.74%
60	16.57	18.35	9.71%
75	8.00	9.97	19.73%
90	6.54	4.73	-38.32%

5.2. 0° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizlerinin İrdelenmesi

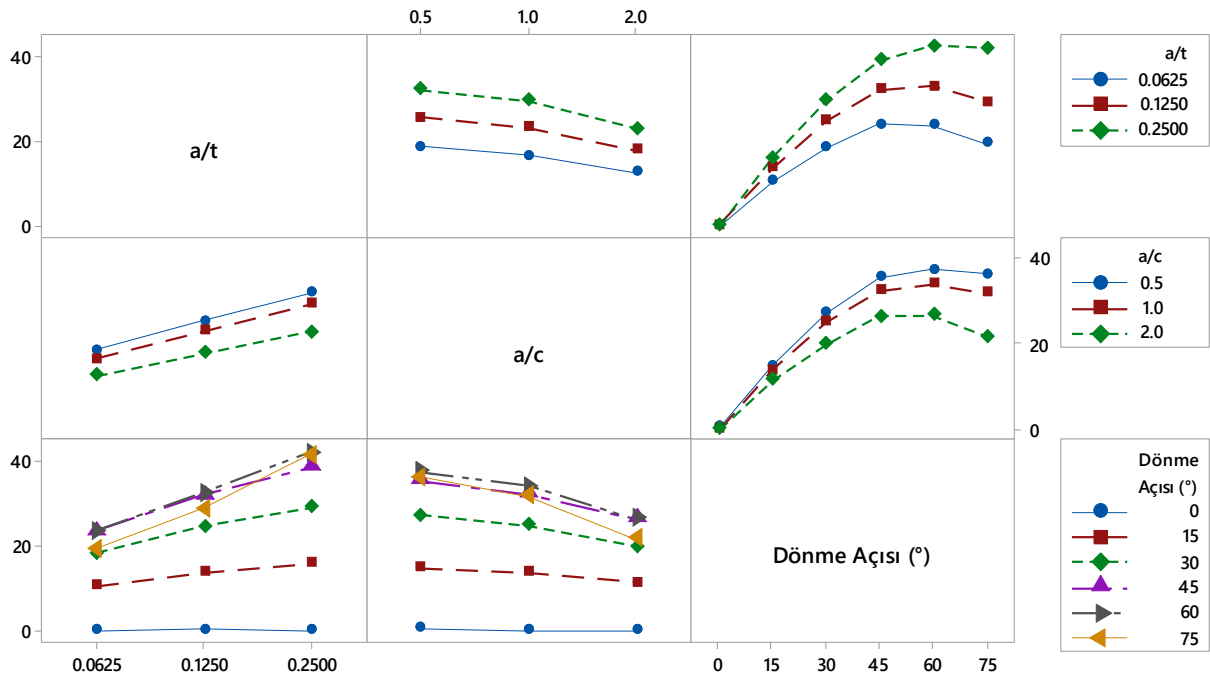
0° eğim açısında dönmüş çatlak analizlerinde hedeflenen 54 analizin her parametresi için tasarım ve ağ örüntüleme işlemleri başarıyla gerçekleştirilip FCPAS paket programı ile kırılma analizleri sonuçları elde edilmiştir. Çatlağın modellenmesinde 75° üzerindeki dönme açısına çıkılamamaktadır. Zira çatlak, geometrinin yüzeyinin dışına çıkmaktadır.

Derinlik oranı (a/t) arttıkça, şekil oranı (a/c) azaldıkça mod-I GŞF değerleri beklendiği gibi artmaktadır. GŞF dönme açısı (α) arttıkça mod-I GŞF değerlerinin azaldığı görülmektedir. Sonuçların çatlak ucu boyunca simetrik olduğu tespit edilmiştir.



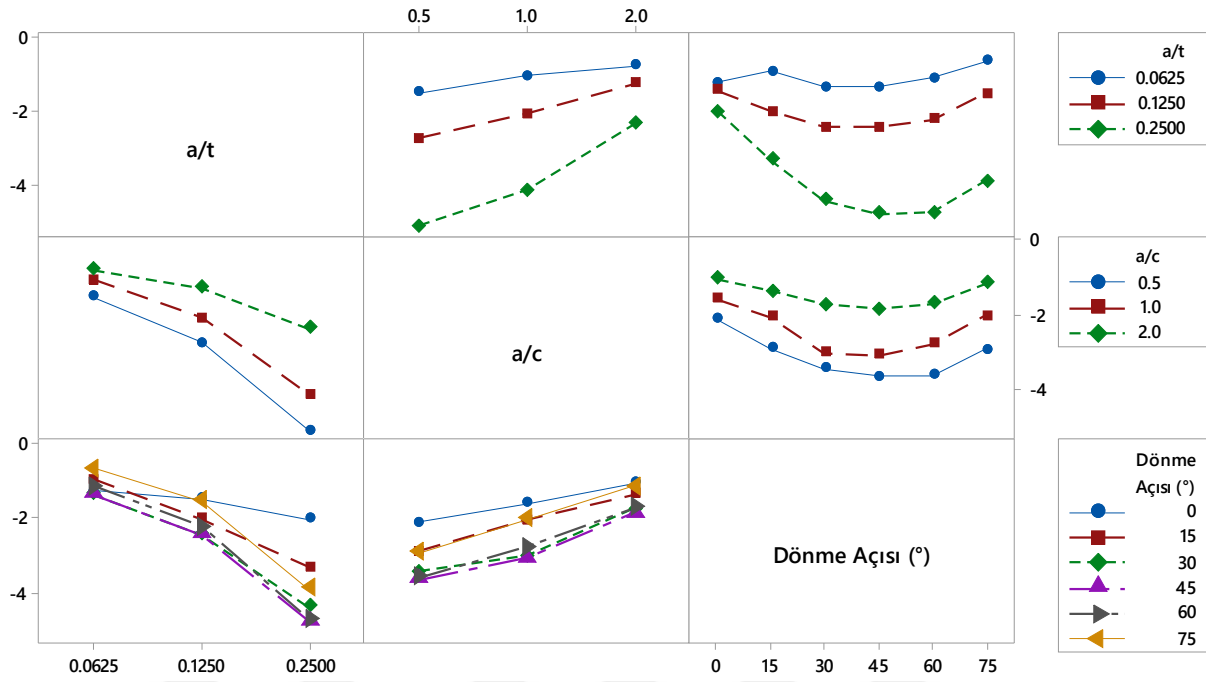
Şekil 5.5. 0° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_I (MPa. $\sqrt{m}$) için etkileşim grafiği

Mod-II GŞF sonuçları incelendiğinde dönme açısı (α) arttıkça 0° 'den 60° 'ye kadar artış gösterip 75° 'de azaldığı görülmektedir. İstisnai olarak; $a/t=0.25$, $a/c=0.5$, $\alpha=75^\circ$ parametrelerinde mod-II maksimumdur. Bu değerde mod-II GŞF çatlak ucu orta noktasında $50.93 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi; maksimum minör ve majör boyutlara ulaşmış eliptik çatlağın GŞF sonuçlarının gürültülü elde edilmiş olmasıdır. Çatlak ucu boyunca düğüm noktası sayısının artırılması gürültüyü azaltmaktadır. Fakat FCPAS paket programındaki düğüm noktasındaki (465000) ve eleman sayısındaki (186000) limitlerinden dolayı çatlak ucu boyunca daha yüksek düğüm noktası sayısına çıkılamamıştır.



Şekil 5.6. 0° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{II} ($\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$) için etkileşim grafiği

Mod-III GŞF sonuçları eğik çatlak analizlerine benzer şekilde birbirini 90° 'ye tamamlayan açılarda eşit olma eğilimindedir ($\alpha=15^\circ-75^\circ$, $\alpha=30^\circ-60^\circ$). Mod-III GŞF sonuçları çatlak ucu orta noktasında pozitif değerlerden negatif değerlere geçişi sağlayan $0 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ eğilimde iken çatlak ucu başlangıç ve bitiş noktalarında artış göstermektedir. Mod-III GŞF $\alpha=45^\circ$ negatif yönde maksimum olma eğilimindedir. Mod-III GŞF sonuçlarında a/t ve a/c daha fazla etkili olurken; en az etki edenin dönme açısı olduğu anlaşılmaktadır.

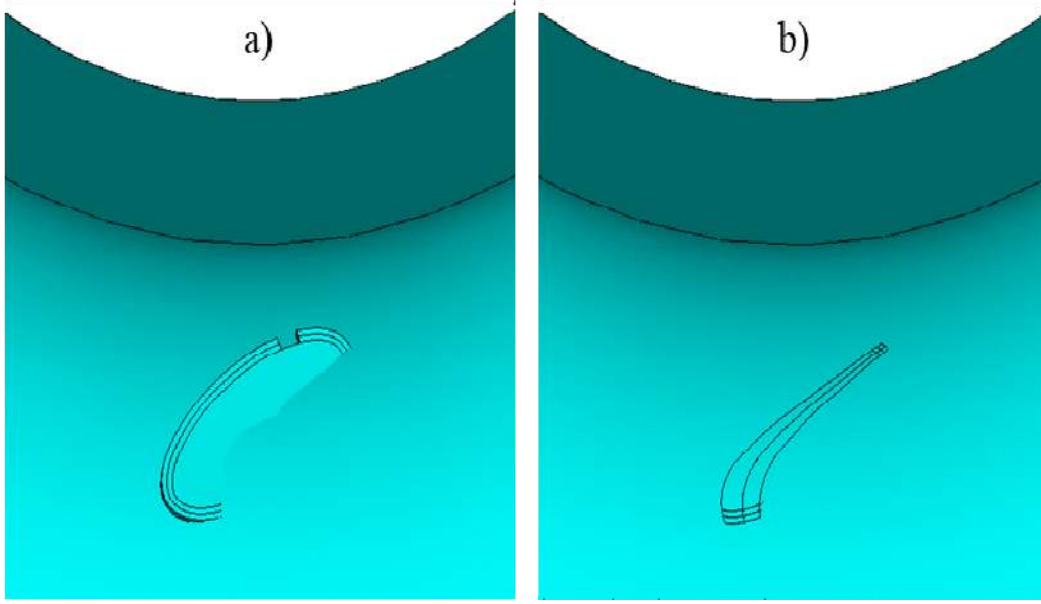


Şekil 5.7. 0° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{III} (MPa.√m) için etkileşim grafiği

5.3. 45° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizlerinin İrdelenmesi

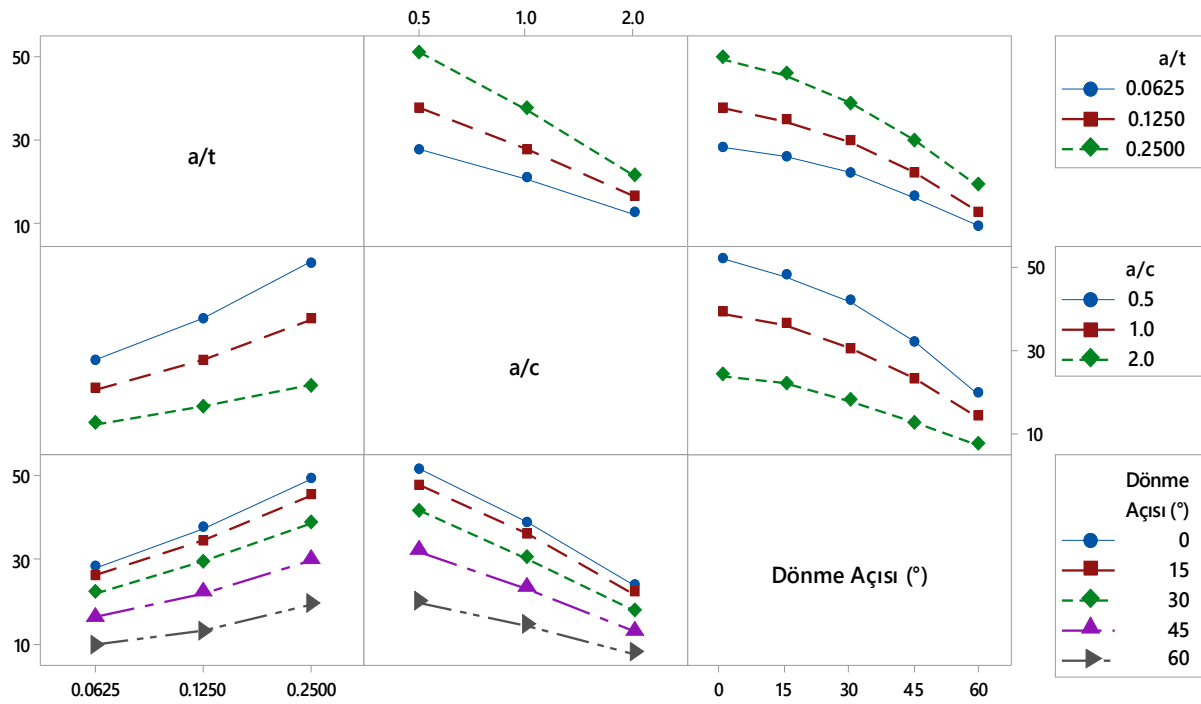
45° eğim açısında dönmüş çatlak analizlerinde hedeflenen 54 analizden 49 analiz için kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir. Bir kısmının ise; ağ örtüntüleme işlemi gerçekleştirilememiştir. Mod-I GŞF negatife düştüğü 5 analiz 45° eğim açısında 75° dönmüş çatlaklardır. Bu değerler hatalı veri olarak değerlendirilmiştir.

Mod-I gerilme şiddet faktörü incelediğinde çatlakın bir kısmı açılırken diğer kısmının daha az açıldığı veya kapandığı görülmektedir. Bu durum GŞF sonuçlarını çatlak ucu boyunca asimetrik hale getirmektedir. Yarı eliptik bir çatlak için GŞF sonuçların çatlak ucu boyunca simetrik olması beklenmektedir. Asimetrik hale gelmesinin sebebi; çatlak oluşturulan hacimlerde nozul – silindir bölgesindeki radyustan (ovallikten) dolayı yarı eliptik yapının bozulmasıdır. Bu durum $a/t=0.125$, $a/c=0.5$, $\beta=45^\circ$, $\alpha=75^\circ$ olması durumunda çatlak oluşturulan hacimler için Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

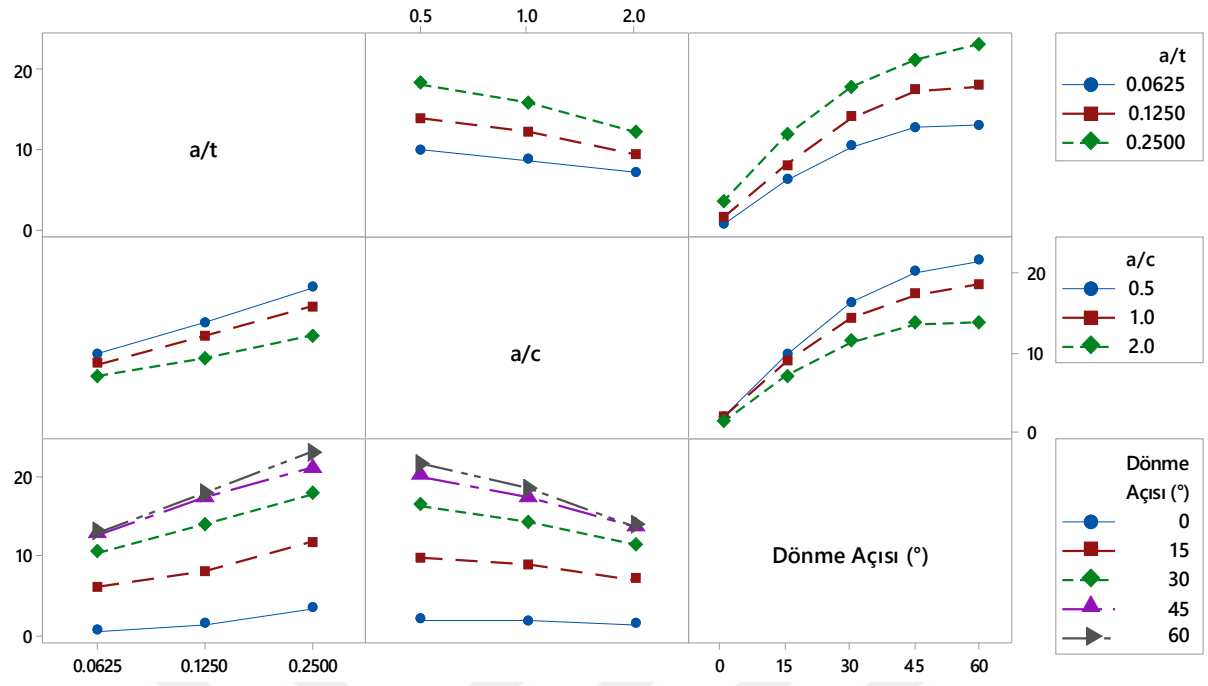


Şekil 5.8. a) Çatlağı tanımlayan elipsin hacimleri b) "VOVLAP" komutu ile kesişen hacimlerin ayrılması

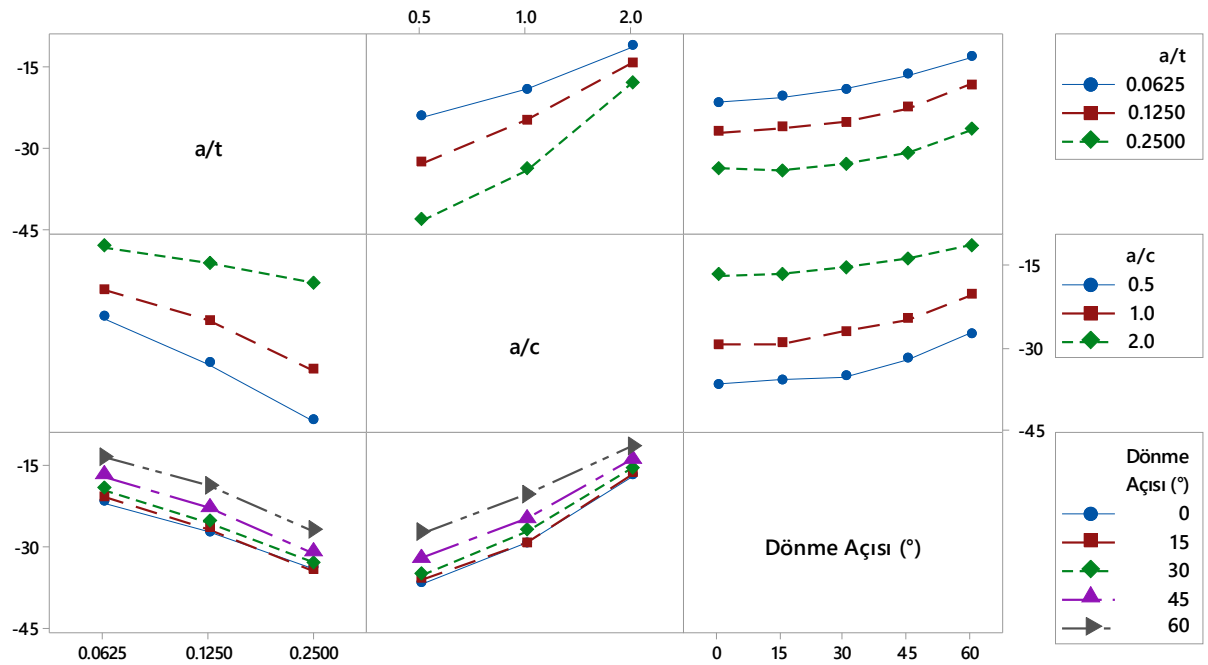
Dönme açısının artmasıyla birlikte mod-I ve mod-III GŞF değerlerinin azaldığı, Mod-II GŞF değerlerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 5.9. 45° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_I (MPa.√m) için etkileşim grafiği



Şekil 5.10. 45° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{II} (MPa.√m) için etkileşim grafiği

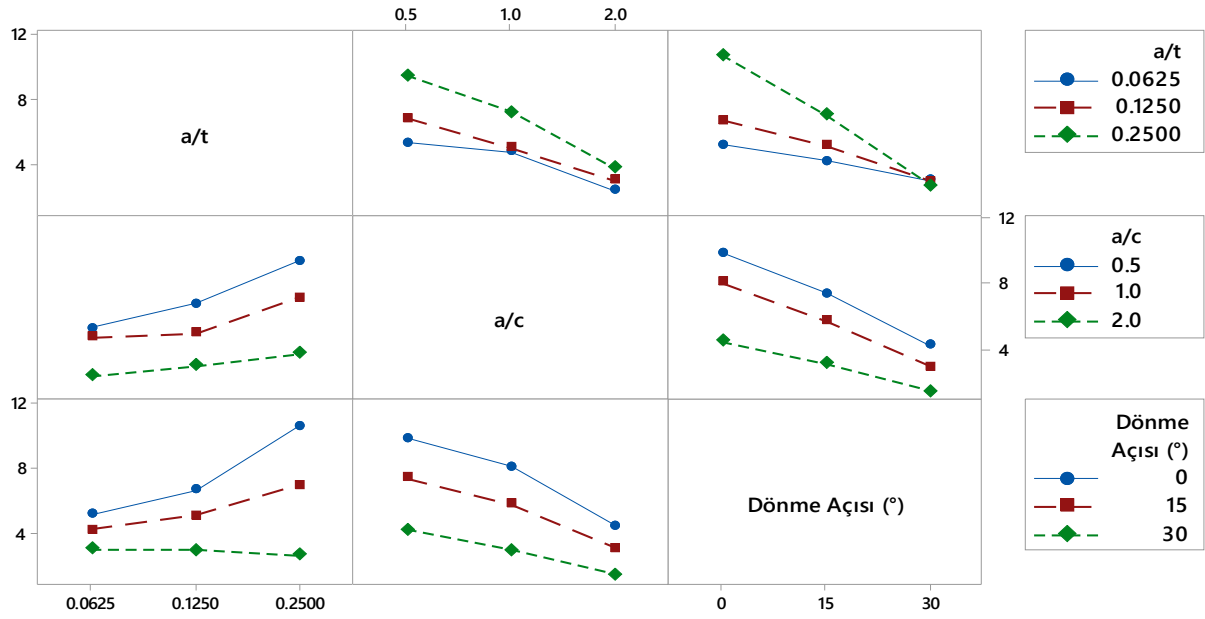


Şekil 5.11. 45° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{III} (MPa.√m) için etkileşim grafiği

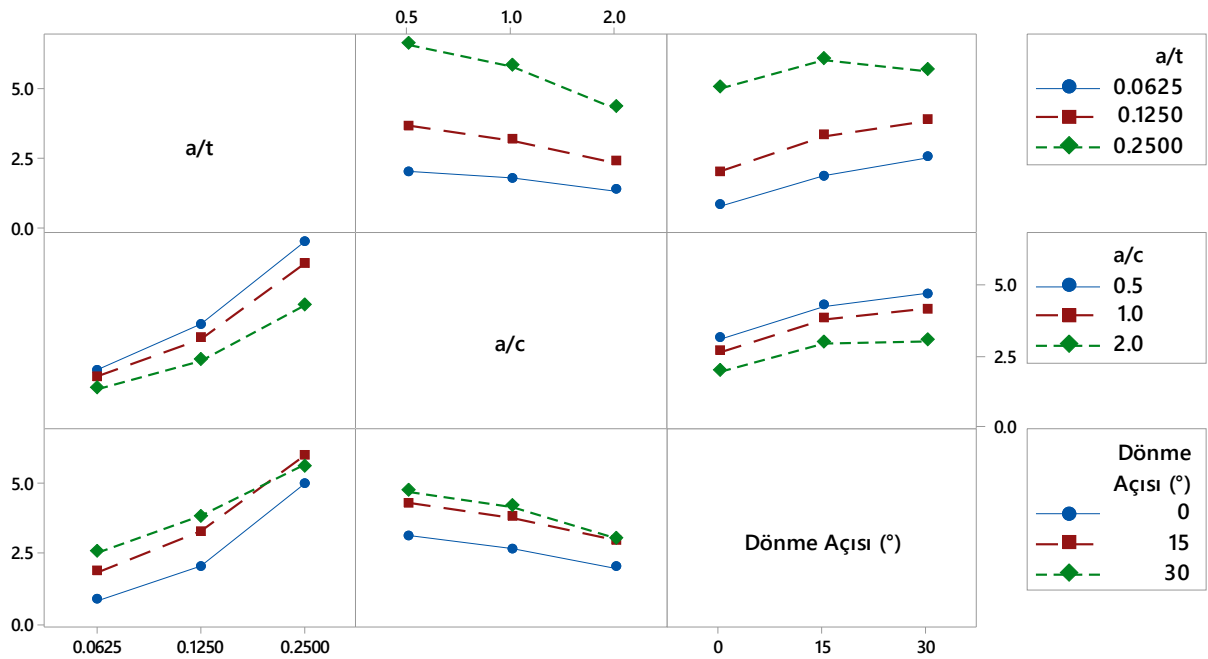
5.4. 90° Eğim Açısında Dönmüş Çatlak Analizlerinin İrdelenmesi

90° eğim açısında dönmüş çatlak analizlerinde hedeflenen 54 analizden 33 analiz için kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir. Bir kısmının ise ağ örtüntüleme işlemi gerçekleştirilememiştir.

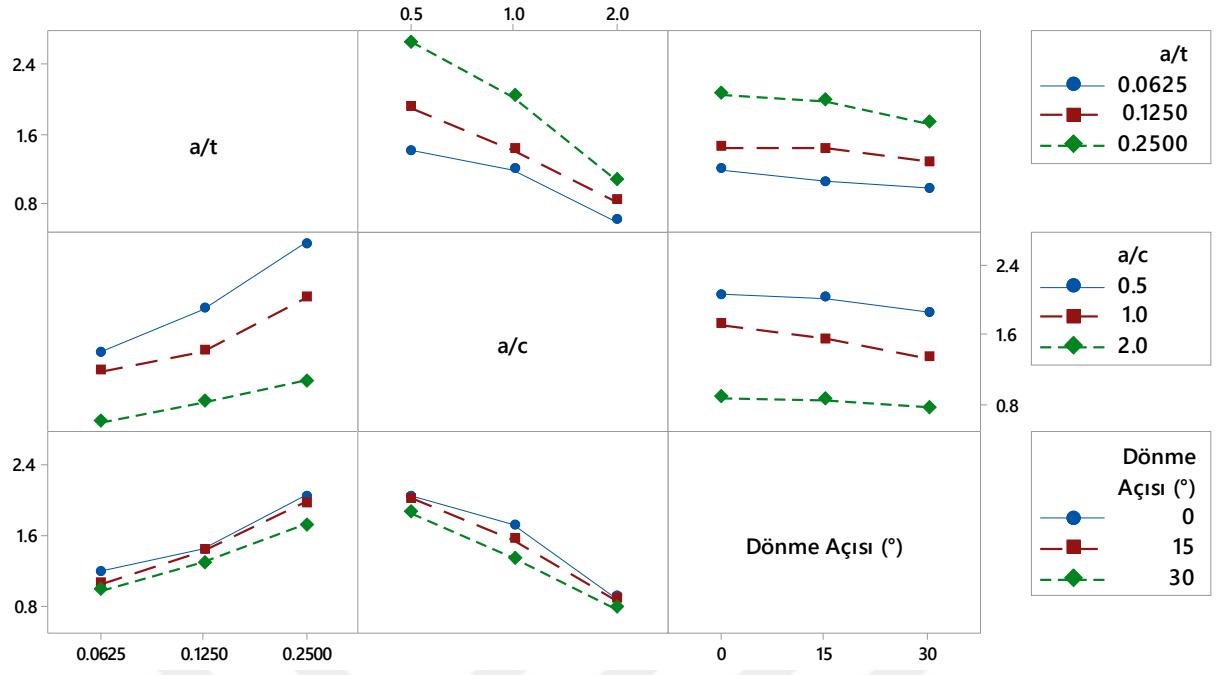
90° eğim açısında dönmüş çatlak analizleri açılmaya en az zorlanan çatlaklardır. 45° eğim açısında dönmüş çatlak analizlerinin sonuçlarına benzer şekilde dönme açısının artmasıyla birlikte mod-I ve mod-III GŞF azaldığı, mod-II GŞF ise arttığı görülmüştür.



Şekil 5.12. 90° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_I (MPa.√m) için etkileşim grafiği



Şekil 5.13. 90° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{II} (MPa.√m) için etkileşim grafiği



Şekil 5.14. 90° Eğim açısında dönmüş çatlakların GŞF K_{III} (MPa.√m) için etkileşim grafiği

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tasarım basıncı şartlarında AP1000 reaktör basınçlı kabının farklı boyutlardaki üç boyutlu eliptik köşe çatlaklarının farklı eğim ve dönme açıları için karışık modlu kırılma analizleri literatüre kazandırılmıştır. FCPAS paket programı sayesinde elde edilen sonuçlar ile geliştirilen empirik denklemler, analiz sonuçlarının tahmin edilmesine imkân sunmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen genel sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- Çatlak şekil oranının (a/c) 1 ve 2 olması durumunda, mod-I gerilme şiddet faktörü çatlak kenarlarından ($\theta=0^\circ$ ile $\theta=180^\circ$) çatlak ucu orta noktasına ($\theta=90^\circ$) doğru azalırken, 0.5 olması durumunda çatlak kenarlarından çatlak ucu orta noktasına doğru artmaktadır. Bu durum eliptik çatlaklar için $a/c < 1$ koşulunda beklenen bir sonuçtur. Çatlak derinlik oranı (a/t) artmasıyla birlikte mod-I, mod-II ve mod-III GŞF değerlerinin artışı gözlenmiştir.
- Eğim açısının (β) artmasıyla birlikte açılma modunun (mod- I) etkisi azalırken, kayma modunun (mod-II) etkisi artmaktadır. Düzlem dışı yırtılma modu (mod-III) ise; birbirini 90° eğim açısına tamamlayan açılarda eşit olma eğilimindedir. Açılma modu 0° eğim açısında, kayma modu 90° eğim açısında ve düzlem dışı yırtılma modu 45° eğim açısında en etkili durumdadır.
- Dönme açısı (α) arttıkça mod-I GŞF değerleri azalmaktadır. Mod-II GŞF değerleri $\alpha=60^\circ$ maksimumdur. Mod-III GŞF; 45° eğim açısında dönmüş çatlaklarda “ α ” açısının artmasıyla etkinliği artarken, 90° eğim açısında dönmüş çatlaklarda ise “ α ” açısının artmasıyla birlikte etkinliği azalmaktadır.
- FCPAS ile elde edilen GŞF sonuçları farklı çalışmalar ve standartlardan alınan denklemler ile bazı yükleme durumları için doğrulanmıştır.
- Elde edilen empirik denklemler yardımıyla mod-I, mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörü için; şekil oranının (a/c), derinlik oranının (a/t), eğim açısının (β) ve dönme açısının (α) çözümleri yaptırılmayan ara değerlerin tahmininde kullanılabileceği doğrulanmıştır.
- Gerilme şiddet faktörü için lineer regresyon analizi ile elde edilen empirik denklemler yerine lineer olmayan (non-lineer) regresyon analizi yapılarak elde edilen denklemler sadeleştirilebilir.

- $a/t=0.25$ ve $a/c= 0.5$ 'te çatlak minör ve majör geometrisinin en yüksek olduğu değerlerde GŞF sonuçları gürültülü elde edilmiştir. Bu durum maksimum GŞF'nin hangi açıda oluştuğunun gözlemlenmesinde istisnai sonuçlara sebep olabilmektedir. Bu hali önlemek için gürültülü değerlerde eğri uydurma işlemi gerçekleştirilebilir.
- Çalışma kapsamı genişletilerek reaktör statik tasarım basıncı yerine çalışma şartlarındaki dinamik basınç yükü uygulanıp ilave olarak; termal, radyasyon, olası deprem yüklerini içeren kırılma analizleri ve yorulma çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilebilir. Bu kapsamda çalışmalar nükleer fisyon reaktörlerinin analizleri tamamlandıktan sonra; laboratuvar ortamındaki daha yüksek termal sıcaklıklardaki nükleer füzyon reaktörlerinin analizlerinin yapılması hedeflenebilir.
- Ek olarak, kırılma analizleri için modelden bağımsız bir şekilde global koordinat sistemine göre herhangi bir konumda, "x", "y", "z" eksenlerinde istenilen açıda, şimdilik sadece $a/c= 1$ (dairesel çatlak) değerinde çatlak modelini oluşturan ve kırılma olayını tanımlayan makro geliştirilmesi üzerine temel oluşturulup ilk denemeleri yapılmıştır. Bu makro geliştirilip FCPAS ile gerçekleştirilen yorulma çatlak ilerleme analizlerine entegre edilerek, simülasyonun otomatik hale gelmesi sağlanabilir.

KAYNAKÇA

- ANSYS, (2009). Sürüm 12.0. Ansys Inc., Canonsburg, PA, USA.
- Ayhan, A. O., & Demir, O. (2019). A novel test system for mixed mode-I/II/III fracture tests – Part 1: Modeling and numerical analyses. *Engineering Fracture Mechanics*, 218,
- Ayhan, A. O., & Demir, O. (2021). Computational modeling of three-dimensional mixed mode-I/II/III fatigue crack growth problems and experiments. *Computers & Structures*, 243, 106399.
- Ayhan, A. O., & Nied, H. F. (1999). Finite element analysis of interface cracking in semiconductor packages. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 22(4), 503–511.
- Ayhan, A. O. (2000). *Finite element analysis of nonlinear deformation mechanisms in semiconductor packages*. Lehigh University.
- Barenblatt, G. I. (1962). *The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture* Advances in applied mechanics, 7, 55-129.
- Besuner, P. M., Cohen, L. M., & McLean, J. L. (1977). The Effects of Location, Thermal Stress, and Residual Stress on Corner Cracks in Nozzles With Cladding. *Transactions, Fourth International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. G, Structural Analysis of Steel Reactor Pressure Vessels, Paper No. G 4/5*.
- Bilby, B. A., Cottrell, A. H., & Swinden, K. H. (1963). The spread of plastic yield from a notch. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 272(1350), 304–314.
- Broek, D. (1982). *Elementary engineering fracture mechanics*. Springer Science & Business Media.
- Demir, O., Ayhan, A. O., & İriç, S. (2017). A new specimen for mixed mode-I/II fracture tests: Modeling, experiments and criteria development. *Engineering Fracture Mechanics*, 178, 457–476.
- Demir, O., Ayhan, A. O., & İriç, S. (2019). A novel test system for mixed mode-I/II/III fracture tests–Part 2: Experiments and criterion development. *Engineering Fracture Mechanics*, 220, 106671.
- Demir, O., Ayhan, A. O., Iric, S., & Lekesiz, H. (2018). Evaluation of mixed mode-I/II criteria for fatigue crack propagation using experiments and modeling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(7), 1525–1534.
- Demir, O. (2016). *Üç boyutlu karışık mod kırılma kriterlerinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi ve geliştirilmesi*.
- Demir, O. (2021). Prediction of crack initiation angle in brittle structures containing inclined cracks. *Mechanics of Solids*, 56(6), 1066–1075.
- Derby, R. W. (1972). Shape factors for nozzle-corner cracks. *Experimental Mechanics*, 12(12), 580–584.
- Diamantoudis, A. T., & Labeas, G. N. (2005). Stress intensity factors of semi-elliptical surface cracks in pressure vessels by global-local finite element methodology. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(9), 1299–1312.

- Du, Q., & Shi, G. Y.** (2016). Efficient Analysis of 3D Mixed-Mode Cracks of a Pressure Vessel Based on Schwartz-Neuman Alternating Method. *Applied Mechanics and Materials*, 853, 266–271. Trans Tech Publications Ltd.
- Dugdale, D. S.** (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2), 100–104.
- Foecke, T.** (1998). *Metallurgy of the RMS Titanic*. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Materials Science and Engineering Laboratory.
- Gao, Z., Xu, L., & Zhang, K.** (1990). Fatigue crack growth in the nozzle corner of a pressure vessel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 42(1), 1–13.
- Griffith, A. A.** (1921). VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 221(582–593), 163–198.
- Gross, D., & Seelig, T.** (2017). *Fracture mechanics: with an introduction to micromechanics*. Springer.
- Günalp, B.** (2017). Dünyada ve ülkemizde nükleer ve radyolojik kazaların tarihçesi. *Nucl Med Semin*, 3, 184–188.
- Hollomon, J. H., & Zener, C.** (1944). Conditions of fracture in steel. *Trans. AIME*, 158, 283.
- Inglis, C. E.** (1913). Stress in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Trans Inst Naval Archit*, 55, 219-241.
- Irwin, G R.** (1948). *Fracture dynamics, Fracturing of Metals*. American Society of Metals. Cleveland, Ohio, 296.
- Irwin, G. R.** (1968). Linear fracture mechanics, fracture transition, and fracture control. *Engineering Fracture Mechanics*, 1(2), 241–257.
- Irwin, G. R.** (1957). *Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate*.
- Kashyzadeh, K. R.** (2020.). *Online Course: Fatigue Failure in Different Fields of Engineering* (<https://www.coursera.org/learn/fatigue-failure-in-different-fields-of-engineering>).
- Kaya, F., & Göral, E.** (2016). TÜRKİYE’NİN NÜKLEER ENERJİ POLİTİKASI. *Akademik Bakış Dergisi*, (57), 421–438.
- Kolosoff, G.** (1914). Die Theorie der Elastizität und die Bedingungen der Festigkeitslehre. *Zeitschrift für Mathematik und Physik. Die Theorie Der Elastizität Und Die Bedingungen Der Festigkeitslehre. Zeitschrift für Mathematik Und Physik.*, 62: 384.-409.
- Kumar, V., German, M. D., & Shih, C. F.** (1981). *Engineering approach for elastic-plastic fracture analysis*. (No. EPRI-NP--1931). General Electric Co.
- Kurt, E., Demir, O., & Ayhan, A. O.** (2022). Three-dimensional non-planar crack growth analysis using enriched finite elements. *International Journal of Solids and Structures*, 241, 111497.
- Landes, J. D.** (1990). Fracture mechanics and the nuclear industry. *Metallurgical Transactions A*, 21(4), 1097–1104.

- Li, Y., Jin, T., Wang, Z., & Wang, D.** (2020). Engineering critical assessment of RPV with nozzle corner cracks under pressurized thermal shocks. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(11), 2638–2651.
- Liu, C., Jiao, G., Chandwani, R., & Timbrell, C.** (2021). Study on application range of SIF calculation method for nozzle corner crack in pressure vessel for ASME XI code. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 193, 104478.
- Liu, K. T., Huang, M., Lin, J. J., Jiang, H. P., Wang, B. X., & Matsuda, H.** (2020). The effects of thermal stress on the crack propagation in AP1000 reactor pressure vessel. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 110, 102798.
- Liu, R., Huang, M., Peng, Y., Wen, H. Y., Huang, J. J., Ruan, C. H., ... Li, Q.** (2018). Analysis for crack growth regularities in the nozzle-cylinder intersection area of Reactor Pressure Vessel. *Annals of Nuclear Energy*, 112, 779–793. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.10.021>
- Uslu M.** (2011). *Ansys Ve Fcpas Kullanarak Plakalardaki Kırılma Ve Çatlak İlerleme Problemlerinin Modellenmesi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- McGinty B.** Fracture Mechanics Historical Background. [Erişim: 21.11.2021, <https://www.fracturemechanics.org/history.html>]
- Mehta, H. S., Griesbach, T. J., Sommerville, D. V, & Stevens, G. L.** (2011). Additional Improvements to Appendix G of ASME Section XI Code for Nozzles. *Pressure Vessels and Piping Conference*, 44519, 973–984.
- Mehta, H. S., Griesbach, T. J., & Stevens, G. L.** (2008). Suggested Improvements to Appendix G of ASME Section XI Code. *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, 48241, 365–375.
- Minitab, (2017).** Sürüm 18, Statistical software. Minitab Inc., State College, PA, USA
- Miyamoto, H., Kikuchi, M., Okazaki, T., & Kubo, M.** (1983). The J integral evaluation of a nozzle corner crack under thermal transient loading condition. *Nuclear Engineering and Design*, 75(2), 213–222.
- Murtaza, U. T., & Javed Hyder, M.** (2015). The effects of thermal stresses on the elliptical surface cracks in PWR reactor pressure vessel. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 75, 124–136.
- Orowan, E.** (1949). Fracture and strength of solids. *Reports on Progress in Physics*, 12(1), 185–232.
- Perez, N.** (2004). *Fracture Mechanics*. Kluwer Academic Publishers
- Rice, J. R.** (1968). *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*.
- Ruiz, C.** (1973). Stress intensity factors for nozzle corner cracks. *Strain*, 9(1), 7–10.
- Schulz, T. L.** (2006). Westinghouse AP1000 advanced passive plant. *Nuclear Engineering and Design*, 236(14–16), 1547–1557.
- Sheykhi, S., Talebi, S., Soroush, M., & Masoumi, E.** (2017). Thermal-hydraulic and stress analysis of AP1000 reactor containment during LOCA in dry cooling mode. *Nuclear Science and Techniques*, 28(6).

- Siegele, D., Hodulak, L., Varfolomeyev, I., & Nagel, G.** (1999). Failure assessment of RPV nozzle under loss of coolant accident. *Nuclear Engineering and Design*, 193(3), 265–272.
- Smith, C. W., Jolles, M., & Peters, W. H.** (1977). Stress intensities for nozzle cracks in reactor vessels. *Experimental Mechanics*, 17(12), 449–454.
- Smith, C. W., Peters, W. H., Hardrath, W. T., & Fleischmann, T. S.** (1979). Stress intensity distributions in nozzle corner cracks of complex geometry, 5th SMiRT. *G4/4*.
- SolidWorks**, (2018). Sürüm Premium 2019 SP1.0. Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Waltham, MA USA.
- Şahin, H.** (2020). *Yayıllı yük altında bulunan levhalardaki eliptik karışık mod yüzey çatlaklarının FCPAS ile kırılma analizleri*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Wang, B., Xu, D., Ye, W., He, Y., & Liang, X.** (1992). Computation of SIF (stress intensity factor) of corner crack in interior wall of nozzle of nuclear vessel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 51(3), 349–359.
- Wells, A.** (1961). Unstable crack propagation in metals: cleavage and fast fracture. *Proceedings of the Crack Propagation Symposium*, 1(84).
- Westergaard, H. M.** (1939). Bearing Pressure and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 6, pp. A49–A53.
- Wood, J. D., Harvey, C., & Wang, S.** (2016). *Partition of mixed-mode fractures in 2D elastic beams with through-thickness shear forces*. Loughborough University. Conference contribution.
- Yaren M.F.** (2021). Probabilistic three-dimensional fracture mechanics and its applications using FCPAS. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Yaren, M. F., Demir, O., Ayhan, A. O., & İriç, S.** (2019). Three-dimensional mode-I/III fatigue crack propagation: Computational modeling and experiments. *International Journal of Fatigue*, 121, 124–134.
- Yayla, P.** (2019). *Kırılma mekaniği*. Birsen Yayınevi.
- Yin, S. S., Stevens, G. L., Bass, B. R., & Kirk, M. T.** (2011). Stress and fracture mechanics analyses of boiling water reactor and pressurized water reactor pressure vessel nozzles. *Pressure Vessels and Piping Conference*, 44519, 963–972.
- Zencrack**, (2018). Sürüm 8.3-1, Zentech International Limited, UK