

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

**ÜÇ BOYUTLU MOD-I/III KIRILMA
PROBLEMLERİNİN MODELLENMESİ VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat BOZKURT

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM ve İMALAT
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali Osman AYHAN

Haziran 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU MOD-I/III KIRILMA
PROBLEMLERİNİN MODELLENMESİ VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat BOZKURT

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 08.06.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Ali Osman AYHAN
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Abdullah MİMAROĞLU
Üye



Prof. Dr.
Mehmet Ali GÜLER
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Murat BOZKURT

08.06.2017

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı büyük bir özveri ve itina ile yöneten, yüksek bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Ali Osman AYHAN' a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam kapsamında fikir ve yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen Oğuzhan Demir, Hakan Dünder ve Mürsel Derya' ya, 113M407 nolu araştırma projesi kapsamında yapmış olduğum çalışmalarımı finansal olarak destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Ayrıca deneysel çalışmaların tüm adımlarında yardımlarını esirgemeyen M. Faruk Yaren'e, numune ve tutucuların imalatlarını gerçekleştirerek test çalışmalarında yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Sedat İriç'e de teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
KIRILMA MEKANİĞİNİN TANIMI VE TARİHÇESİ.....	1
BÖLÜM 2.	
KARIŞIK MODLU YÜKLER ALTINDA BULUNAN ÇATLAKLAR.....	3
2.1. Çatlak Yükleme Modları.....	3
2.1.1. Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod-I).....	3
2.1.2. Çatlak kayma deformasyon tipi (Mod-II).....	3
2.1.3. Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mod-III).....	4
2.2. Mod-I/III Yükleri Altında Bulunan Çatlaklar.....	4
2.2.1. Mod-I/III literatür çalışmaları özeti.....	4
BÖLÜM 3.	
SAYISAL ANALİZLER.....	7
3.1. Problem Tanımı.....	7
3.2. Mod-I/III Kırılma Analizleri için Deney Numunesi (CTT) ve Tutucu Geometrisi.....	7
3.2.1. CTT deney numunesi boyutları.....	8
3.2.2. CTT deney numunesi tutucusu boyutları.....	8

3.2.3. Mod-I/III numunesi malzeme özellikleri.....	10
3.2.4. Sonlu elemanlar modelinin doğrulanması.....	10
3.3. Analiz Prosedürü.....	11
3.4. Analiz Edilen Durumlar.....	14
3.4.1. Standart – Bonded Always (tamamen bağlı) temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler.....	14
3.4.1.1. Standart – Bonded Always (tamamen bağlı) temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler için gerilme şiddet faktörü değerleri.....	15
3.4.2. Sadece Bonded Always (Tümüyle Bağlı) temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler.....	21
3.4.2.1. Sadece Bonded Always (Tümüyle Bağlı) temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler için gerilme şiddet faktörü değerleri.....	22
3.4.3. Sadece tutucu ve pimlere standart temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler.....	27
3.4.3.1. Sadece tutucu ve pimlere standart temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler.....	28
3.4.4. Temas yüzeyi kullanmadan yapılan analizler.....	30
3.4.5. Strain Gage ölçümleri için yapılan analizler.....	31
3.4.6. 26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için yapılan analizler....	35
3.4.6.1. 25 mm ve 12,5 mm et kalınlığı ve 26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerilme şiddet faktörü değerleri.....	36
3.4.7. Cıvatalardaki sıkıştırma kuvvetini termal yüklerle sağlayarak yapılan analizler.....	43
3.4.8. Bağlantı (Link) elemanlar kullanılarak yapılan analizler.....	44

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER.....	46
4.1. Deney Seti Tanımı.....	46
4.2. Strain Gage Doğrulama Çalışması.....	50
4.3. Mod-I Analiz ve Deney Sonuçları (Kıc doğrulaması).....	55

4.4. Karışık Mod Altında Kırılma Yükleri.....	58
4.4.1. Mod-I/III kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme testleri.....	58
4.4.2. Mod-I/III yorulma ve çatlak ilerleme (da/dN) testleri.....	64
4.5. Karışık Mod Altında Yorulma Çatlak İlerleme Simülasyonları.....	67
 BÖLÜM 5.	
ANALİZ VE DENEY SONUÇLARININ MEVCUT 3-B KRİTERLER İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	72
5.1. 3-B Mevcut Temel Kriterler.....	72
5.1.1. Sih kriteri.....	72
5.1.2. Pook kriteri.....	73
5.1.3. Richard kriteri.....	73
5.2. Analiz ve Deney Sonuçlarının Mevcut Kriterler İle Karşılaştırılması	74
 BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	: Çatlağın derinlik yönündeki uzunluğu
a_{avg}	: Çatlağın derinlik yönündeki ortalama uzunluğu
COD	: Crack-Opening Displacement (Çatlak Açılma Deplasmanı)
CT	: Compact Tension
CTT	: Compact Tension Tear
ÇAY	: Çatlak açılma yerdeğişimi
DBEM	: Double boundary element method (Çift sınır elemanı yöntemi)
EPKM	: Elastik-Plastik Kırılma Mekanîği
FCPAS	: Fracture and Crack Propagation Analysis System (Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi)
FEM	: Finite element method (Sonlu elemanlar yöntemi)
FNK	: Forman-Newman-de Koning modeli
G	: Birim kalınlık ve çatlak uzunluğundaki birim artış için sönümlenen toplam enerji
GŞF	: Gerilme şiddet faktörü
K_c	: Kritik gerilme şiddet faktörü
K_{eq}	: Karşılaştırmalı gerilme şiddet faktörü
$K_{eş}$	: Eşdeğer gerilme şiddet faktörü
K_v	: Kırılma Tokluğu
KI	: Mod-I ile alakalı gerilme şiddet faktörü
KII	: Mod-II ile alakalı gerilme şiddet faktörü
KIII	: Mod-III ile alakalı gerilme şiddet faktörü
LEKM	: Lineer elastik kırılma mekaniği
Mod-I	: Açma veya çekme modu
Mod-II	: Kesme veya kayma modu (düzlem içi kayma modu)
Mod-III	: Yırtma veya düzlem dışı mod (düzlem dışı kayma modu)
3D-DIC	: Üç boyutlu dijital görüntü korelasyonu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. CTT deney numunesi boyutları	8
Şekil 3.2. CTT deney numune tutucusu boyutları.....	9
Şekil 3.3. Karışık modlu yüklemeler için modellenen CTT numunesi ve tutucusunun yükleme açıları.....	9
Şekil 3.4. CTT numunesinin $P=10\text{kN}$ deneysel kopma yükü altında , $t=12.5\text{ mm}$ ve 25 mm çatlak uzunluğu için Mod-I gerilme şiddet faktörleri.....	10
Şekil 3.5. Analiz modeli detay resmi	11
Şekil 3.6. Boyutsuz Çatlak Ucu Konumu Temsili Gösterimi	12
Şekil 3.7. ANSYS ve FCPAS programında gerçekleştirilen analizlerin proses şeması	13
Şekil 3.8. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$ ve $t=25\text{ mm}$ için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri	16
Şekil 3.9. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$ ve $t=25\text{ mm}$ için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri.....	16
Şekil 3.10. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$ ve $t=25\text{ mm}$ için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri	17
Şekil 3.11. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$ ve $t=20\text{ mm}$ için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri	17
Şekil 3.12. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$ ve $t=20\text{ mm}$ için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri.....	18
Şekil 3.13. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$ ve $t=20\text{ mm}$ için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri	18
Şekil 3.14. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$ ve $t=12,5\text{ mm}$ için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri.....	19
Şekil 3.15. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$ ve $t=12,5\text{ mm}$ için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri.....	19

Şekil 3.16. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri	20
Şekil 3.17. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=25$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri	23
Şekil 3.18. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=25$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri.....	23
Şekil 3.19. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=25$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri	24
Şekil 3.20. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=20$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri	24
Şekil 3.21. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=20$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri.....	25
Şekil 3.22. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=20$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri	25
Şekil 3.23. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet.....	26
Şekil 3.24. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri.....	26
Şekil 3.25. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri	27
Şekil 3.26. (a) Sadece pimlere temas yüzeyi uygulanmış olan model ve (b) Numune ve tutucunun birleşim noktalarının (keypoint) gösterilmesi.....	28
Şekil 3.27. CTT numunesinin $\theta=0^\circ$, $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri	29
Şekil 3.28. CTT numunesinin $\theta=45^\circ$, $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri	29
Şekil 3.29. CTT numunesinin $\theta=0^\circ$, $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri	30
Şekil 3.30. CTT numunesinin $\theta=45^\circ$, $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri	31
Şekil 3.31. Strain Gage yapıştırılacak olan numunedeki gerilme dağılımlarını görebilmek için ANSYS'te uygulanan işlem sırası	32

Şekil 3.32. Strain Gage yapıştırılacak olan numunenin düğüm noktalarının görüntüsü.....	33
Şekil 3.33. Numunede Strain Gage yapıştırılacak olan düğüm noktasının seçimi	33
Şekil 3.34. Seçilen düğüm noktasının gerilme yönü ve doğrultusu.....	34
Şekil 3.35. Strain Gage'nin yapıştırılacağı açı değerleri.	34
Şekil 3.36. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=25$ mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri	37
Şekil 3.37. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=25$ mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri	37
Şekil 3.38. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=25$ mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri.....	38
Şekil 3.39. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=25$ mm ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri	38
Şekil 3.40. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=25$ mm ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri	39
Şekil 3.41. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=25$ mm ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri.....	39
Şekil 3.42. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=12,5$ mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri	40
Şekil 3.43. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=12,5$ mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri	40
Şekil 3.44. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=12,5$ mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri.....	41
Şekil 3.45. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=12,5$ mm ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri	41
Şekil 3.46. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=12,5$ mm ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri	42
Şekil 3.47. CTT numunesinin $P=10$ kN, $t=12,5$ mm ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri.....	42
Şekil 3.48. CTT numunesinin $\theta=45^\circ$, $P=10$ kN, $t=25$ mm için gerilme şiddet faktörleri	43
Şekil 3.49. Bağlantı (Link) elemanlar kullanılarak analizi yapılan CTT Numunesi .	44

Şekil 3.50. CTT numunesinin bağlantı (link) elemanlar kullanılarak $\theta=45^\circ$, $P=10$ kN, $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri	45
Şekil 4.1. Mod-I/III testleri için kullanılan MTS yorulma cihazının genel görüntüsü.....	46
Şekil 4.2. Mod-I/III testi için kullanılan test düzeneği [10].....	47
Şekil 4.3. Deney takip ekranı.....	48
Şekil 4.4. 12,5 mm kalınlıktaki mod-I/III CTT numunesi	49
Şekil 4.5. Mod-I/III CTT numune tutucusu	49
Şekil 4.6. $\theta = 45^\circ$ Mod-I/III yüklemesinde 6 kN yüklemeye gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numunede oluşan 1. asal gerilmeler ve strain-gagelerin yerleştirildiği yerler	50
Şekil 4.7. $\theta = 45^\circ$ Mod-I/III yüklemesi altında 6 kN' ye kadar değişen yüklerde gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü	51
Şekil 4.8. Mod-I/III CTT numunesi için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana (yüke) bağlı değişim grafiği	52
Şekil 4.9. Mod-I/III CTT numunesi için strain-gagelerden ölçülen ortalama direnç ve birim şekil değişimi değerleri	53
Şekil 4.10. Mod-I/III CTT numunesi için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana (yüke) bağlı değişim grafiği	53
Şekil 4.11. Mod-I/III CTT numunesi için strain-gagelerden ölçülen ortalama direnç ve birim şekil değişimi değerleri	54
Şekil 4.12. Temsili çatlak derinlik değerleri, a_1 , a_2 ve a_3	56
Şekil 4.13. Kuvvet-Yerdeğiştirme (CMOD) kayıtlarının temel tipleri.....	57
Şekil 4.14. Mod-I/III testleri sonrası numunelerin genel görünümü.....	59
Şekil 4.15. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, (a) $\theta=0^\circ$, LT-01-020215-01, (b) $\theta=15^\circ$, LT-01-240215-02, (c) $\theta=30^\circ$, LT-01-150215-02, (d) $\theta=30^\circ$, LT-01-160215-02, (e) $\theta=30^\circ$, LT-01-270215-04, (f) $\theta=30^\circ$, LT-01-270215-05 kodlu numuneler.....	60
Şekil 4.16. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, (g) $\theta=45^\circ$, LT-01-020215-03, (h) $\theta=45^\circ$, LT-01-020215-05, (i) $\theta=45^\circ$, LT-01-020215-04, (j) $\theta=60^\circ$, LT-01-200215-	

02, (j) $\theta=60^\circ$, LT-01-220215-01, (k) $\theta=60^\circ$, LT-01-270215-01 kodlu numuneler.....	61
Şekil 4.17. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, (l) $\theta=75^\circ$, LT-01-250215-01, (m) $\theta=90^\circ$, LT-01260215-0 kodlu numune.....	62
Şekil 4.18. Farklı açılarda kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan bazı numuneler.....	62
Şekil 4.19. Farklı açılarda kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan bazı numuneler (sırt görünüşü).....	62
Şekil 4.20. Farklı açılarda yapılan da/dN testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri.....	65
Şekil 4.21. Farklı açılarda yapılan da/dN testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri (sırt görünüşü).....	65
Şekil 4.22. da/dN testlerinde kullanılan numuneler.....	66
Şekil 4.23. Mod-I/III testlerinde kullanılan tüm numunelerin üstten görünüşü.....	66
Şekil 4.24. Mod-I/III yorulma testlerinde yapılan fazla-yüklemelerden (over-load) elde edilen çatlak yüzeyleri, (a) $t = 12,5 \text{ mm}$, (b) $t = 25 \text{ mm}$	67
Şekil 4.25. Çatlak yerleştirilmiş olan CTT numunenin bütün ve yarım model olarak perspektif görünüşleri.....	67
Şekil 4.26. CTT numunenin çatlak ilerleme testinden sonraki yarım model perspektif görünüşü.....	68
Şekil 4.27. Manuel olarak 7 adım ilerletilen çatlak profillerinin ve ilerleme yüzeyinin yarı modelde gösterilmesi.....	69
Şekil 4.28. Çatlak yüzeyleri ve son çatlak ucu meshlenmiş model.....	69
Şekil 4.29. İlerleyen çatlağın her bir adımındaki çatlak ucu boyunca KI gerilme şiddet faktörleri dağılımı.....	70
Şekil 4.30. İlerleyen çatlağın her bir adımındaki çatlak ucu boyunca KII gerilme şiddet faktörleri dağılımı.....	70
Şekil 4.31. İlerleyen çatlağın her bir adımındaki çatlak ucu boyunca KIII gerilme şiddet faktörleri dağılımı.....	71

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Analizleri Yapılmış Olan Tüm Farklı Durumlar	14
Tablo 3.2. Standart – Bonded Always temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler	15
Tablo 3.3. Sadece Bonded Always temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler	21
Tablo 3.4. Sadece tutucu ve pimlere standart temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler	27
Tablo 3.5. Strain Gage ölçümleri için yapılan analizler.....	32
Tablo 3.6. 26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için yapılan analizler.....	35
Tablo 4.1. Kırılma tokluğu testlerinde elde edilen veriler.....	57
Tablo 4.2. Mod-I/III test matrisi.....	58
Tablo 4.3 Mod-I/III CTT numunesi kırılma tokluğu test sonuçları.....	63
Tablo 5.1. Uç noktadan alınan K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=25 mm)	75
Tablo 5.2. Orta noktadan alınan K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=25 mm)	76
Tablo 5.3. Maksimum K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=25 mm).....	77
Tablo 5.4. Uç noktadan alınan K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=12,5 mm)	78
Tablo 5.5. Orta noktadan alınan K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=12,5 mm)	79
Tablo 5.6. Maksimum K değerleri kullanılarak Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=12,5 mm).....	80

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kırılma, FCPAS, Çatlak İlerleme Analizi, Gerilme Şiddet Faktörü, ANSYS, Mod-I/III, CTT Numunesi ve Tutucusu, Strain-Gage

Bu çalışmada literatürde yer alan standart CT numunesi baz alınarak, bu numuneye bir yırtılma etkisini de verebilecek şekilde bir CTT numunesi ve CTT numune tutucusu tasarlanmıştır. Böylece, mod-I ve mod-III etkisi aynı numunede analiz edilebilmektedir.

113M407 nolu TÜBİTAK destekli araştırma projesi kapsamında, FCPAS (Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi - Fracture and Crack Propagation Analysis System) programı ile ANSYS kullanarak CTT numunelerinin farklı aç ve temas yüzeyi tipleri göz önüne alınmış ve analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin doğruluğunu test etmek amacıyla, Sakarya Üniversitesi Hesaplamalı ve Deneysel Kırılma Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan 100 kN ve 1100 Nm kapasiteli, hem eksenel çekme hem de burulma yorulma yüklemesi yapabilen MTS yorulma cihazında testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu testler strain-gageler kullanılarak noktasal bazda gerilme değerleri de doğrulanmıştır.

İlk defa bu kadar kapsamlı bir şekilde mod-I/III durumu için yapılan çalışmada son olarak elde edilen analiz ve deney sonuçları literatürdeki mevcut bazı kriterlerle mukayese edilmiş ve gelecek çalışmalar için bazı analizlerde bulunulmuştur.

MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THREE-DIMENSIONAL MOD-I / III FRACTURE PROBLEMS

SUMMARY

Keywords: Fracture, FCPAS, Crack Propagation Analysis, Stress Intensity Factor, ANSYS, Mod-I/III, CTT Specimen and Holder, Strain-Gage

In this study, a CTT sample and a CTT specimen holder were designed based on the standard CT specimen in the literature so that this specimen could have a tearing effect. In this case, the mod-I and mod-III effects can be analyzed using the same specimen.

In the scope of the research project supported by TÜBİTAK, 113M407, CTT samples were analyzed considering different angles and contact types using the FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System) program and ANSYS. In order to test the validity of these analyzes, tests have been carried out on the MTS fatigue device with a capacity of 100 kN and 1100 Nm., which is capable of both axial tensile and torsional fatigue loads, available at the Sakarya University Computational and Experimental Fracture Mechanics Laboratory. In addition, these tests were confirmed in terms of strain values at certain points on the specimen using strain gauges.

For the first time, the analysis and test results obtained for the mode-I / III situation in such a comprehensive manner have been documented and some comparisons with existing criteria have been done. Finally, recommendations are done for future research.

BÖLÜM 1. KIRILMA MEKANİĞİNİN TANIMI VE TARİHÇESİ

Makineler, binalar ve çelik konstrüksiyonlar gibi diğer yapısal elemanlar da dahil olmak üzere birçok mühendislik yapısında çatlaklara rastlanır. Tekrarlanan yüklere maruz kalan makine ve yapısal elemanlardaki başlangıç kusurları (mikro çatlaklar, taneler arası boşluklar, korozyon, döküm sırasında oluşan hava kabarcıkları), zamanla giderek artan çatlaklara dönüşebilir. Bu çatlaklar kırılma şeklinde ani hasara neden olabilir. Kırılma mekaniği, hemen hemen tümüyle kırılmayla belirlenen hasarları inceler. Bu alandaki ilk başarılı çalışmayı 1920 yılında Griffith gerçekleştirmiştir. Çalışmasında camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişini gözlemlemiştir. Bu çalışmada Griffith, önceden var olan bir çatlağın nasıl ilerlemeye başlayacağını basit bir enerji dengesi ortaya koyarak formülize etmiştir. Bir sistemde elastik şekil değiştirme enerjisi çatlak ilerledikçe azalma eğilimine girer ve bu enerji kırılma yüzeylerinin meydana gelmesi için gerekli olan enerjidir.

Griffith yaklaşımı, 1944 yılında Zener ve Hollomon tarafından metalik malzemelerin gevrek kırılmasına da uygulanmıştır [1]. Çünkü kalıcı şekil değişiminin Griffith'in yaklaşımında her malzemeye özgü sabit bir değer olarak bağıntıya dahil edilmesi mümkün olmadığından, bu bağıntı metallerde doğrudan kullanılamaz. 1950'li yıllarda Irwin, Griffith kriterlerinden yola çıkarak metalik malzemeler için kırılma esaslarını geliştirmiştir. Böylece Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) gelişmesine öncülük etmiştir. Ayrıca, gerilme şiddet faktörü yaklaşımıyla yapılan çalışmalar neticesinde malzemelerde meydana gelen yorulma çatlak ilerlemesi ya da gerilmeli korozyon çatlaması gibi kritik-altı çatlamaya olan hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir hale gelmesi sağlanmıştır [2].

Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM), çatlak uç bölgesindeki plastik deformasyonun sınırlı olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak uç bölgesinde

kayda değer ölçüde plastik deformasyon gerçekleştiğinde, Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) devreye girer. Bu çalışma 1961’de Wells’in çatlak açılması (COD) adı altında yaptığı çalışma ile başlamıştır.

Sanayi Devrimi’nden sonra, 19. Yüzyılda, yapılarda metal kullanımında çok büyük artışlar ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte bu yapılarda oluşan hasarlardan dolayı büyük can ve mal kayıplarına yol açan kazalar da görölmüştür. Kazaların bir kısmı tasarım hataları sebebiyle olsa da, zamanla bu hasarların çok daha büyük bir kısmının üretim hataları sebebiyle malzemelerde çatlağın başlaması ve yapı elemanlarının kırılması sebebiyle meydana geldiği anlaşılmıştır. Kırılma mekaniği ve çatlak ilerleme metotlarının geliştirilmesi ile birlikte daha iyi üretim yöntemleri kullanılmaya başlanmış, malzeme içyapılarındaki hataların önlenmesi ile oluşan hasarlar minimum seviyelere indirilmiştir. Günümüzde de hala bu çalışmaların geliştirilmesine çalışılmaktadır.

BÖLÜM 2. KARIŞIK MODLU YÜKLER ALTINDA BULUNAN ÇATLAKLAR

2.1. Çatlak Yükleme Modları

Malzemelerde yükleme durumuna bağlı olarak malzemedeki mevcut çatlaklar üç şekilde ilerleyebilir.

Mod-I – Açma veya Çekme Modu (Açılma modu)

Mod-II – Kesme veya Kayma Modu (düzlem içi kayma modu)

Mod-III– Yırtma veya Düzlem Dışı Mod (düzlem dışı kayma modu)

Bu kırılmalarda mod-I ile ilgili gerilme şiddeti faktörü K_I , mod-II olana K_{II} , mod-III ile ilgili olana K_{III} ile gösterilmektedir.

2.1.1. Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod-I)

Mod-I çatlak açılma deformasyon tipinde, gerilmenin normal bileşeni, y eksenine doğrultusunda çatlak yüzeyine dik olarak etki etmektedir.

2.1.2. Çatlak kayma deformasyon tipi (Mod-II)

Mod-II çatlak açılma deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlağa x eksenine doğrultusunda etki etmektedir.

2.1.3. Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mod-III)

Mod-III deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlağın uç kenarına ya da çatlak önüne paralel olarak z eksenini doğrultusunda etki etmektedir.

2.2. Mod-I/III Yükleri Altında Bulunan Çatlaklar

2.2.1. Mod-I/III literatür çalışmaları özeti

Bu çalışmada Wei ve arkadaşlarının [3] yapmış oldukları çalışma özetle şöyledir. Karışık mod-I/III kararlı yırtılma deneylerine tabi tutulmuş ince sac alüminyum ve çelik numunelerin deformasyonu, üç boyutlu dijital görüntü korelasyonu (3D-DIC) kullanılarak ölçülmüştür. Karışık mod-I/III deneylerindeki çatlak büyümesinin özellikleri, (a) numunenin deforme şekli ve 3D tam saha yüzey kaydırma alanları, (b) yük çatlama uzantı eğrileri ve çatlak yolları, (c) polar koordinatlardaki birim şekil değiştirme bileşenlerinin radyal dağılımları, ve (d) çatlak genişlemesinin bir fonksiyonu olarak COD (Crack-Opening Displacement) değişimi yani, Çatlak Açılma Deplasmanı olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, uzaktan karma mod-I/III yüklemeleri ($\Phi = 30^\circ, 60^\circ$) veya sadece mod-III yüklemesi ($\Phi = 90^\circ$) altında yüksek düzeyde sünek alüminyum ve çelik malzemeler için deformasyonların neredeyse aynı polar koordinatlardaki birim şekil değiştirmeye sahip olduklarını göstermektedir. Dağılımlar, nominal mod-I yüklemesi ($\Phi = 0^\circ$) altında ölçülen değerlerden modifiye edilmiştir. Sonuçlar, mod-III yük bileşeninin, çatlak ucu önündeki artan egemen zorlanma bileşeninin değerini düşürürken, radyal gerilme tekillikliğini mod-I yüklemesiyle karşılaştırıldığında arttırdığını doğrulamaktadır. Al6061-T6 (GM6208 çelik) için karışık mod-I/III ortalama kararlı COD, aynı malzemede mod-I'deki kararlı yırtılma sırasında ölçülen değerden 4 kat ve çelik için 3 kat daha büyüktür ve COD'nin yükleme açısı ile değişimi arasında net korelasyonlar bulunur [3].

Barlow ve Chandra'nın [4] yapmış olduğu çalışmada merkezkaç ve aerodinamik yükler altında tipik askeri uçak motoru fan kanadında üç boyutlu yorulma çatlak büyüme oranları hesaplamıştır. Cornell Üniversitesi'nde geliştirilen ve sınır

elemanları kullanan FRANC3D yazılımı ile doğrusal elastik kırılma mekaniği şartları altında üç boyutlu çatlak ilerleme simülasyonları yapılmıştır. Bu yazılımla, temas yüzeyi boyunca sürtünme bir zaman aşımı katsayısı ile varolan üç boyutlu sonlu elemanlar gerilme analizini, bunun yanında gerilme şiddeti faktörleri ile çatlak ilerleme yollarını ve büyüme oranlarını elde etmeye çalışmışlardır. Bu problemdeki farklı yükleme koşulları altındaki karmaşık geometrilerde, her üç modda kırılma olduğu kabul edilir ve ilişkili gerilme şiddeti faktörleri (GŞF), Çatlak Açılma Yerdeğişimi (ÇAY) yaklaşımı kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada yüksek yük frekansları (spektrum yük) altında yorulma çatlak büyüme hızı Forman-Newman-de Koning (FNK) modeli kullanılarak tahmin edilmektedir [4].

Yang ve arkadaşları [5] yaptıkları çalışmalarında dikdörtgen kaynaklı boru şekilli mafsallın stres konsantrasyon bölgelerinin köşebent ve kord kesişme köşelerinde bulunduğunu belirtmektedirler. Sonuç olarak, yorulma çatlaklarının bu köşelerden başlatılması ve yayılması mümkündür. Bu çalışmada, dikdörtgen oyuk kesitli kaynaklı T-mafsallın kaynak parmağı altındaki 3-boyutlu yorulma çatlak büyümesi sınır elemanı yöntemi kullanılarak simüle edilmiştir. 3-B analizlerine göre, yorulma çatlağı büyümesi, Paris yasalarına ve gerilme şiddet faktörlerine dayanan bir model kullanılarak öngörülmüştür. Deneysel ve öngörülen çatlak büyümesi ile çatlak şekli gelişimi arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Bu çatlak büyüme analizine dayanarak, bir numunenin yorulma ömrü tahmini ve oyuklu mafsallar için standart S-N eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Standart S-N eğrisinin güvenli olduğu bulunmuştur [5].

Favier ve arkadaşları [6] sonsuz izotropik elastik cisimlerdeki mod-I çatlaklarının düzlemsel yayılım yollarının sayısal simülasyonu için Rice'in teorik bir çalışmasına dayanan güçlü bir yöntem geliştirmişlerdir. Çatlağın bu yöntemde uygulanabilmesi için önce çatlak boyunca tek boyutlu (1-B) mesh uygulanmıştır. Bu çalışma, Rice teorik çalışmalarının bir uzantısı olmakta ve karışık mod (II + III) kayma yükleri için ilgili sayısal verileri sunmaktadır. Yayılımın, bazı zayıf düzlemsel tabaka boyunca yönlendirilmesi ve bu nedenle örneğin jeolojik bir fayın olması durumunda aynı düzlemde kalması beklenir. Metodun özellikleri yorulma ve gevrek kırılmalarda çeşitli başlangıç kontürleri (dairesel, elipsik, dikdörtgen, kalp şeklinde) olan çatlakların yayılım yollarının hesaplanması ile gösterilmiştir. Çatlak her durumda

hızlı, istikrarlı, neredeyse eliptik bir şekle ulaşır. Bu kararlı şeklin eksenlerinin oranı için yaklaşık ancak doğru analitik formül elde edilmiştir [6].

Citerella ve Buchholz'un [7] yaptıkları çalışmalarında, ilk oluşan çatlak için eğik düzlemler ile sırasıyla eğme veya burulma yüklemesi altında, 3PB numunelerinde veya konsol kiriş örneklerinde, 3-B yorulma çatlak büyüme davranışı çift sınır elemanı yöntemi (DBEM) ile araştırılmıştır. Çatlak kenarı boyunca karışık mod koşulları karakterize edilmiştir. Gerilme şiddet faktörleri (GŞF), J-integral yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve çatlak büyüme yönü, minimum şekil değiştirme enerji yoğunluk kriteri ile hesaplanmıştır. DBEM modeli ile hesaplanarak tahmin edilen çatlak şekli deneysel bulgular ve FEM sonuçları ile başarılı bir şekilde karşılaştırılmıştır [7].

BÖLÜM 3. SAYISAL ANALİZLER

3.1. Problem Tanımı

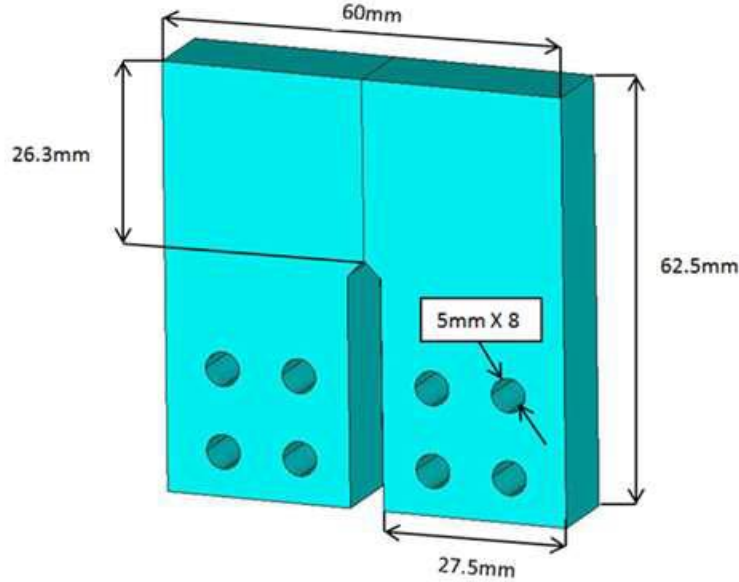
Çatlak ilerleme analizi yapılacak olan mod-I/III numunesi Şekil 3.1’de gösterilen ölçülerde ve 3 farklı et kalınlığında (25mm, 20mm ve 12,5mm) modellenmiştir. Her farklı kalınlığa uygun olarak tutucular, 0, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 derecelerde çekme kuvveti uygulanabilecek şekilde modellenmiştir. Bu tutucularda her bir açı için 10 kN değerinde çekme kuvveti uygulanmıştır. Her farklı kuvvet değeri için gerilme analizi sonuçları ile beraber pimlerde, tutucuda ve numunede oluşan gerilmeler ve FCPAS ile yapılan kırılma analizleri sonuçlarında ise çatlak ucunda oluşan gerilme şiddet faktörleri değerleri elde edilmiştir.

3.2. Mod-I/III Kırılma Analizleri için Deney Numunesi (CTT) ve Tutucu Geometrisi

Mod-I/III çatlak ilerleme ve kırılma analizleri için literatürde kullanılan Mod-I/III numunesinin [3] yüzey geometrisi baz alınmıştır, fakat şu ana kadar yapılan testlerle tutarlı olması amacıyla numune boyutları için standart CT Numunesinin boyutları kullanılmıştır. Bu numuneye, ek olarak bir yırtılma (tear) etkisi vermek amacıyla Şekil 3.1.’de gösterildiği gibi 8 adet delik açılarak Compact Tension Tear (CTT) numunesi olarak adlandırılmış ve Şekil 3.2.’de gösterildiği gibi, bu numuneye uygun bir CTT numune tutucusu tasarlanmıştır. Bu tutucu tasarlanırken değişik açılarda ($\Theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) yükleme yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bahsi geçen CTT numunesi ve CTT numune tutucusu kullanılarak Mod-I/III yükleme durumlarında çatlak ilerleme testleri ve kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Tutucu, numune ve kırılma analizleri ile ilgili detaylı bilgiler, alt başlıklar halinde verilmiştir.

3.2.1. CTT deney numunesi boyutları

Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi CTT deney numunesi standart CT numunesi boyutları baz alınarak ANSYS paket programı kullanılarak analiz edilmiştir. Numune üzerine gelen yırtma (tear) etkisini karşılamak amacıyla numuneye 5 mm çapında 8 adet cıvata deliği açılmıştır. ASTM E399-12 standartında yer alan minimum kalınlık hesabı bilgilerine göre $B \geq 2.5 \cdot (K_{IC} / \sigma_{YS})^2$ olmalıdır. Yapılan testlerde K_{IC} değeri 29 MPa $\sqrt{m}$ ve σ_{YS} değeri 570 MPa bulunmuştur. Bu sonuçlar sonunda CTT numunesinde gerçekleştirilecek olan analizlerde minimum et kalınlığı 6.47 mm'den büyük olmalıdır. 12,5 mm, 20 mm ve 25 mm et kalınlığındaki numunelerde gerçekleştirilen analizler bu şartı sağlamaktadır.

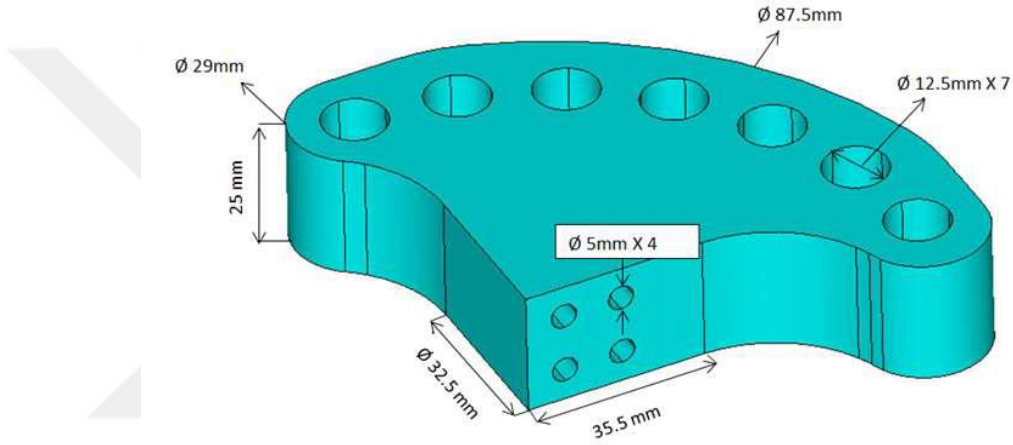


Şekil 3.1. CTT deney numunesi boyutları

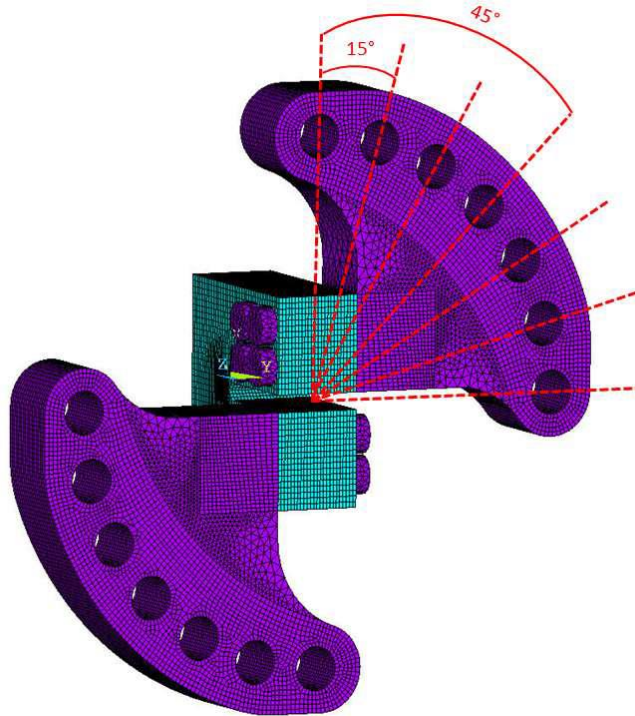
3.2.2. CTT deney numunesi tutucusu boyutları

CTT deney numune tutucusu 25 mm et kalınlığına sahip CTT numunelerinde sadece Mod-I etkisinin gözlemlendiği 0° lik yükleme koşulu için numune merkezine göre yüklemeyi sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. 12,5 mm ve 20 mm et kalınlığına sahip tutucularda ise, bu merkezci yüklemeyi sağlamak için ara levhalar tasarlanarak kullanılmıştır. Bu sayede tek bir tutucuya değişik kalınlıklardaki numuneler ile test yapabilme kabiliyeti kazandırılmıştır. CTT deney numune tutucusunun boyutları

Şekil 3.2.'de detaylarıyla verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.3.'de gösterildiği gibi numuneye 7 farklı açıda ($\Theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) yükleme yapabilecek şekilde yükleme delikleri açılmıştır. $\Theta=0^\circ$ de sadece Mod-I, $\Theta=90^\circ$ de sadece Mod-III ve diğer açılarda ise Mod-I/III (mixed mode) etkisi gözlenebilmektedir (bu problemde mod-III ve mod-II eşlenik olduğu için, yük altında çatlak yüzeylerinin birbirlerine göre relatif dönme hareketinden dolayı mod-II gerilme şiddet faktörü de ortaya çıkmaktadır). Ayrıca her iki tutucuya 5 mm çapında 4 adet cıvata deliği açılmıştır. CTT numune tutucusu, Şekil 3.3.'de gösterildiği gibi CTT numunesini en ve boy yönünde tam ortadan tutmaktadır.



Şekil 3.2. CTT deney numune tutucusu boyutları.



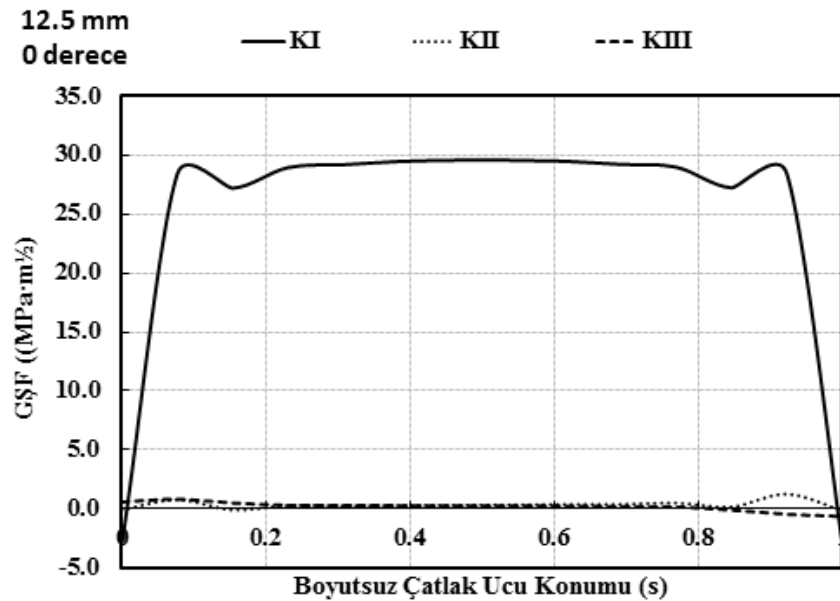
Şekil 3.3. Karışık modlu yüklemeler için modellenen CTT numunesi ve tutucusunun yükleme açıları

3.2.3. Mod-I/III numunesi malzeme özellikleri

Gerilme analizleri yapılmış olan Mod-I/III numunesinin geometrisi ve ölçüleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Gerilme ve kırılma analizleri 12,5 mm, 20 mm ve 25 mm olmak üzere 3 farklı et kalınlığında gerçekleştirilmiştir. Numune malzemesi Al 7075 alüminyum alaşımıdır. Alüminyum numunenin elastiklik modülü 70 GPa ve poisson oranı 0,33'tür [8].

3.2.4. Sonlu elemanlar modelinin doğrulanması

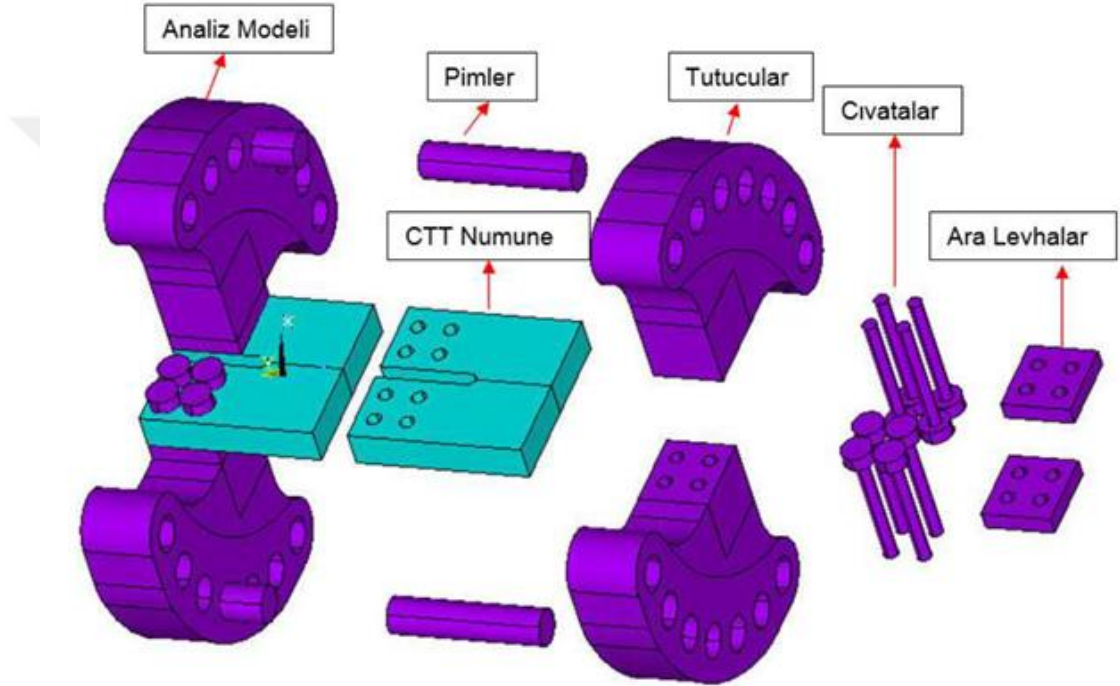
Şekil 3.3.'te görülen model için deneylere başlanmadan önce sonlu elemanlar ve deneysel doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Literatürdeki Al 7075 malzemesi için kırılma tokluğu değeri $29 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 'dir. Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi FCPAS çözümünde elde ettiğimiz, gerilme şiddet faktörü değeri de maksimum noktada $29.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ değerini almıştır. Bu kopma yükü altındaki elde edilen sonuç sonlu elemanlar modelinin doğru sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Ayrıca yapılan 2 farklı doğrulama testi sonucundan elde edilen değerler ise sırasıyla $29.15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ve $29.47 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ bulunmuştur. Bu doğrulama çalışması Bölüm 4.'te "Mod I Analiz ve Deney Sonuçları (K_{IC} doğrulaması)" başlığı altında detaylı olarak yer verilmiştir.



Şekil 3.4. CTT numunesinin $P=10\text{kN}$ deneysel kopma yükü altında, $t=12.5 \text{ mm}$ ve 25 mm çatlak uzunluğu için Mod-I gerilme şiddet faktörleri

3.3. Analiz Prosedürü

Şekil 3.5.'te analiz modelinin tüm parçalarının bulunduğu bir detay resmi verilmiştir. Bu detay resmi 12,5 mm et kalınlığına sahip CTT deney numunesinin 45 derece açıyla yüklemeye maruz kaldığı analizden alınmış bir şablondur. Şekil 3.5.'te gösterilen her bir parça ANSYS™ paket programında modellenmiştir ve daha sonraki işlem basamakları Şekil 3.7.'de özetlenmiştir.



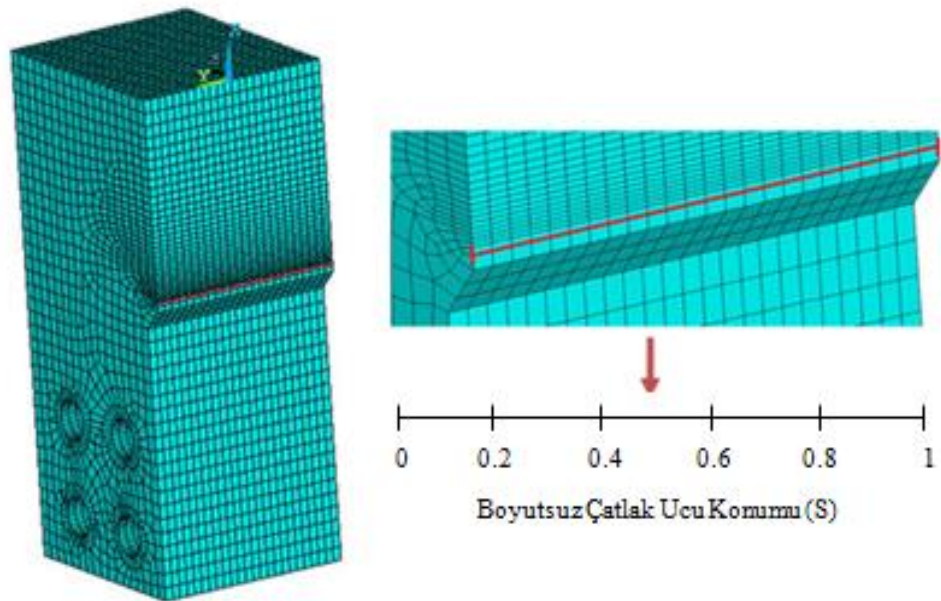
Şekil 3.5. Analiz modeli detay resmi

Deneysel çalışmalar gerçekleştirilmeden önce ANSYS™ [9] sonlu elemanlar programı kullanılarak değişik açılardaki ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) yükleme durumları için 10 kN yükte gerilme analizleri yapılmıştır. Deneyi birebir simüle etmek için analizlerde cıvata başı ile CTT numune, cıvata ile ara levha (12,5 mm ve 20 mm et kalınlığına sahip CTT numunesi analizlerinde), cıvata ile CTT numune, cıvata ile tutucu, tutucu ile pim ve CTT numune ile tutucu arasındaki temas yüzeyleri (contact) ANSYS™ programında tanımlanmıştır. Daha sonra, alt-modelleme (sub-modeling) yaklaşımı ile üç boyutlu kırılma ve çatlak ilerleme analiz programı, FCPAS (Fracture and Crack Propagation Analysis System) kullanılarak

çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerleri hesaplanarak, kritik eşdeğer gerilme şiddet faktörü ($K_{eş}$) değeri için gereken yükler ve bu yüklerde tutucu, pim, cıvata, ara levha ve numunede oluşması beklenen gerilmeler belirlenmiştir.

ANSYS'te gerçekleştirilen analiz sonrasında numune deliklerinin yüzeyleri ile numune ön ve arka yüzelerindeki düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler sub-modeling yöntemiyle programdan alınarak FCPAS programına deplasman yükü olarak girilmekte, ayrıca numune modelinin eleman ve nod listeleri ve çatlak ucu boyunca sıralanmış eleman ve nod listeleri FCPAS programına girilerek çatlak ucu boyunca gerilme şiddet faktörü (GŞF) değerleri hesaplanmaktadır.

Ayrıca hesaplanan gerilme şiddet faktörlerinin çatlak boyunca aldığı değerleri göstermek üzere, çatlak hacmi 24 elemana bölünerek mesh atılmıştır. Bu çatlak ucu uzunluğu Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi 1 birim kabul edilip boyutsuz çatlak ucu konumu olarak adlandırılmıştır. S parametresi ile grafiklerde gösterilmiştir. Yukarıda tarif edilen analiz prosedürü Şekil 3.7.'de akış şeması şeklinde verilmektedir.



Şekil 3.6. Boyutsuz Çatlak Ucu Konumu Temsili Gösterimi

3.4. Analiz Edilen Durumlar

Tanımlanan analizler, temas yüzeyi tipinin, çatlak uzunluğunun, cıvata ve pimlerin varlığının, kullanılan eleman tipinin yapılan analizlerde gerilme şiddet faktörlerine etkisini incelemek amacıyla farklı durumlarda tekrarlanmış ve birbirleriyle mukayese edilmiştir. Analiz edilen durumlar Tablo 3.1.'de verilmiştir. Tablodaki her bir madde ayrıntılı olarak alt başlıklar halinde incelenmiştir.

Tablo 3.1. Analizleri Yapılmış Olan Tüm Farklı Durumlar

Tekrar Edilen Analizler	
1	Standart – Bonded Always Temas yüzeyi Tipi Kullanılarak Yapılan Analizler
2	Sadece Bonded Always Temas yüzeyi Tipi Kullanılarak Yapılan Analizler
3	Sadece Tutucu ve Pimlere Standart Temas yüzeyi Tipi Kullanılarak Yapılan Analizler
4	Temas yüzeyi Kullanmadan Yapılan Analizler
5	Strain Gage Ölçümleri İçin Yapılan Analizler
6	26mm ve 27 mm Çatlak Uzunlukları İçin Yapılan Analizler
7	Cıvatalardaki Sıkıştırma Kuvvetini Termal Yükle Sağlayarak Yapılan Analizler
8	Link Elemanlar Kullanılarak Yapılan Analizler

3.4.1. Standart – Bonded Always (tamamen bağlı) temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler

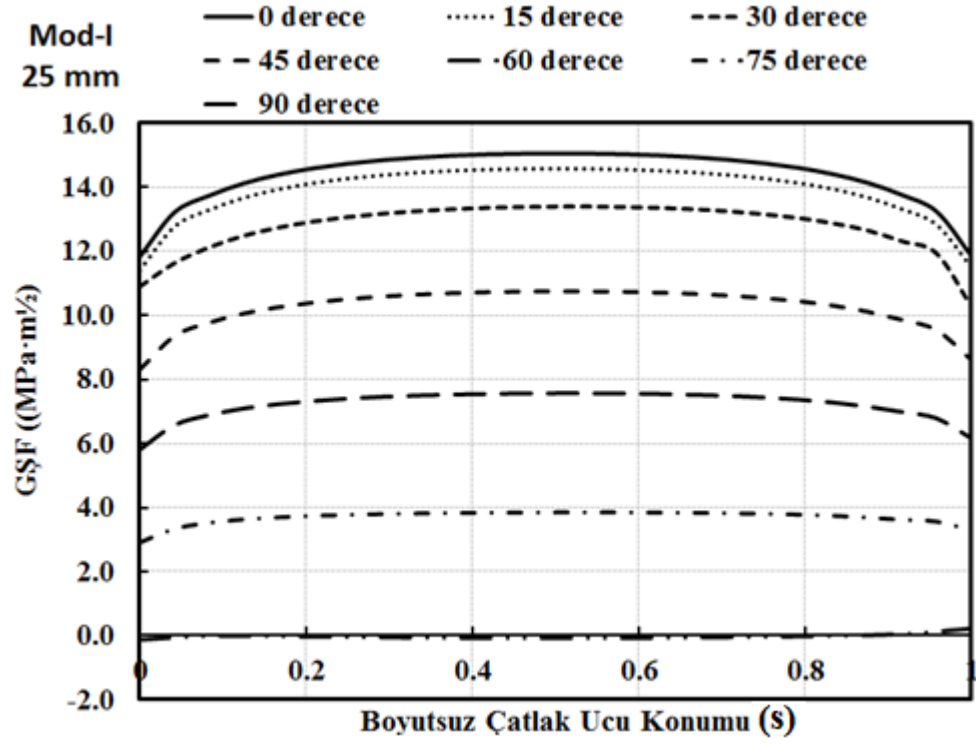
Standart ve bonded always temas yüzeyi tiplerinin birlikte kullanıldığı analizler, numune, tutucu, cıvata ve pimlerin deney ortamında maruz kalacağı yüzey etkileşimlerini en iyi şekilde yansıtmak amacıyla uygulanmıştır. Tablo 3.2.'de görüldüğü gibi tutucu ve cıvata arasındaki contact – target yüzey etkileşimi, bonded always temas yüzeyi tipi ile verilmiştir. Aynı şekilde cıvata başı ile numune yüzeyi arasındaki contact – target yüzey etkileşimi, bonded always temas yüzeyi tipi ile verilmiştir. Diğer yüzey etkileşimleri de sadece sürtünme kuvvetinin etkisinde olduğundan standart temas yüzeyi tipi ile gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Standart – Bonded Always temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler

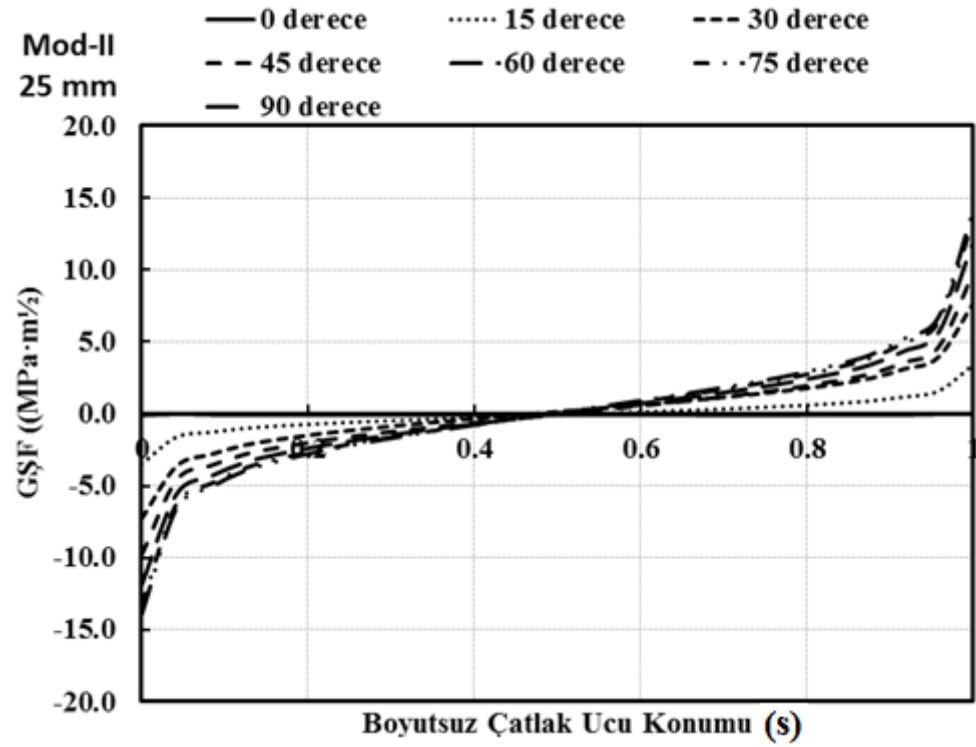
Et Kalınlığı	Çatlak Uzunluğu	Temas Yüzeyleri	Temas Tipi	Yükleme Açısı
25 mm	25 mm	Numune–Cıvata Başı	Bonded Always	
		Numune–Cıvata Yüzeyi	Standart	(0° - 15° -
		Numune – Tutucu	Standart	30° - 45° -
		Tutucu - Cıvata	Bonded Always	60° - 75° -
		Tutucu - Pim	Standart	90°)
20 mm	25 mm	Numune–Cıvata Başı	Bonded Always	
		Numune – Cıvata Yüzeyi	Standart	
		Numune – Tutucu	Standart	
		Tutucu - Cıvata	Bonded Always	(0° - 15° -
		Tutucu - Pim	Standart	30° - 45° -
		Numune – Ara Levha	Standart	60° - 75° -
		Tutucu – Ara Levha	Standart	90°)
		Cıvata – Ara Levha	Standart	
12,5 mm	25 mm	Numune – Cıvata Başı	Bonded Always	
		Numune – Cıvata Yüzeyi	Standart	
		Numune – Tutucu	Standart	
		Tutucu - Cıvata	Bonded Always	(0° - 15° -
		Tutucu - Pim	Standart	30° - 45° -
		Numune – Ara Levha	Standart	60° - 75° -
		Tutucu – Ara Levha	Standart	90°)
		Cıvata – Ara Levha	Standart	

3.4.1.1. Standart – Bonded Always (tamamen bağlı) temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler için gerilme şiddet faktörü değerleri

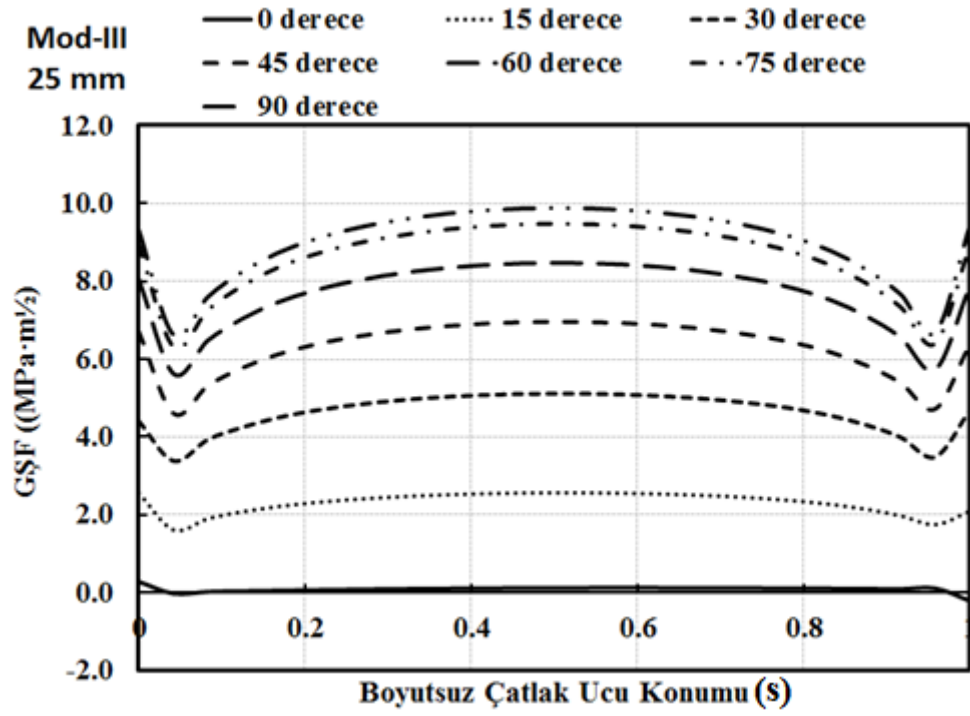
Bu alt başlıkta Bölüm 3.4.1.'de bahsi geçen temas yüzeyi tiplerinde 25 mm, 20 mm ve 12,5 mm et kalınlığına sahip CTT numunesi için 7 farklı açıda (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) gerçekleştirilen analizlerin gerilme şiddet faktörlerine yer verilecektir.



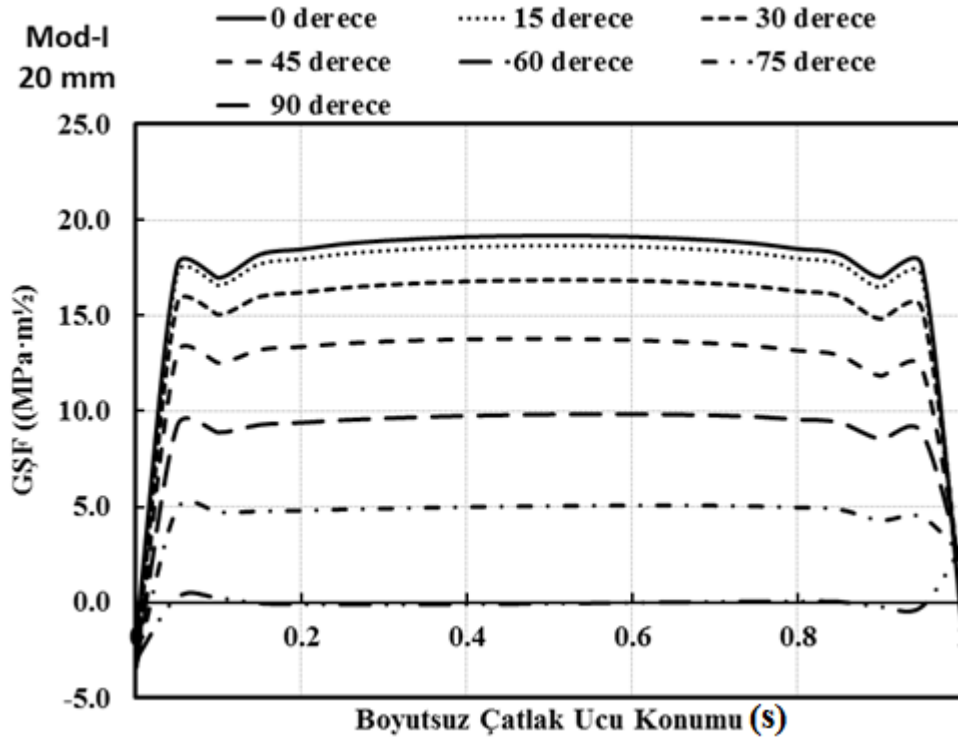
Şekil 3.8. CTT numunesinin P=10 kN ve t=25 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri



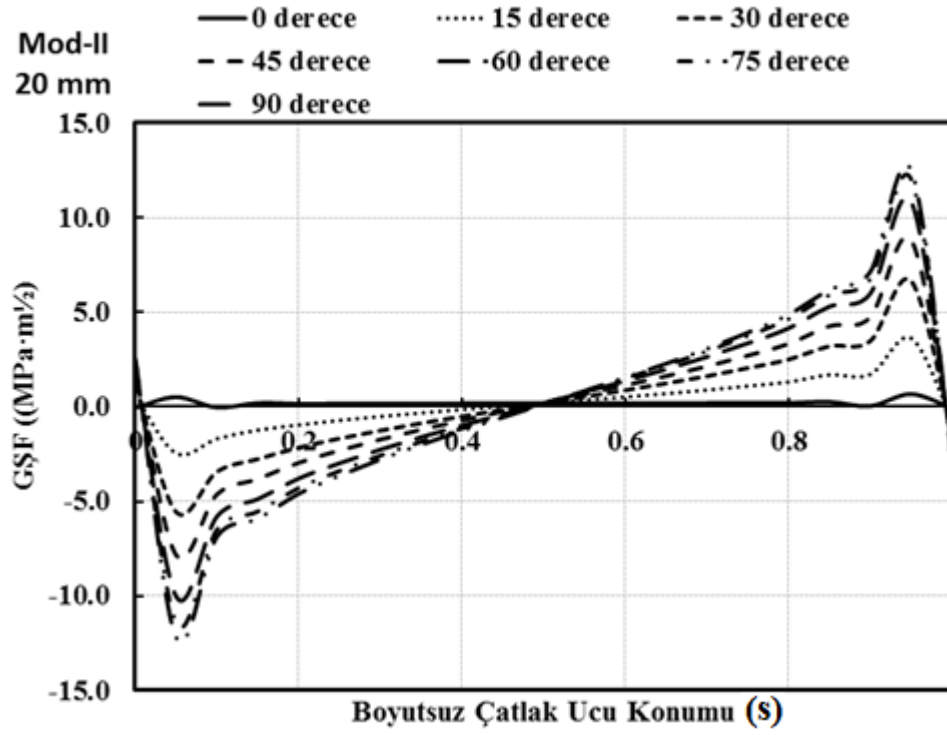
Şekil 3.9. CTT numunesinin P=10 kN ve t=25 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri



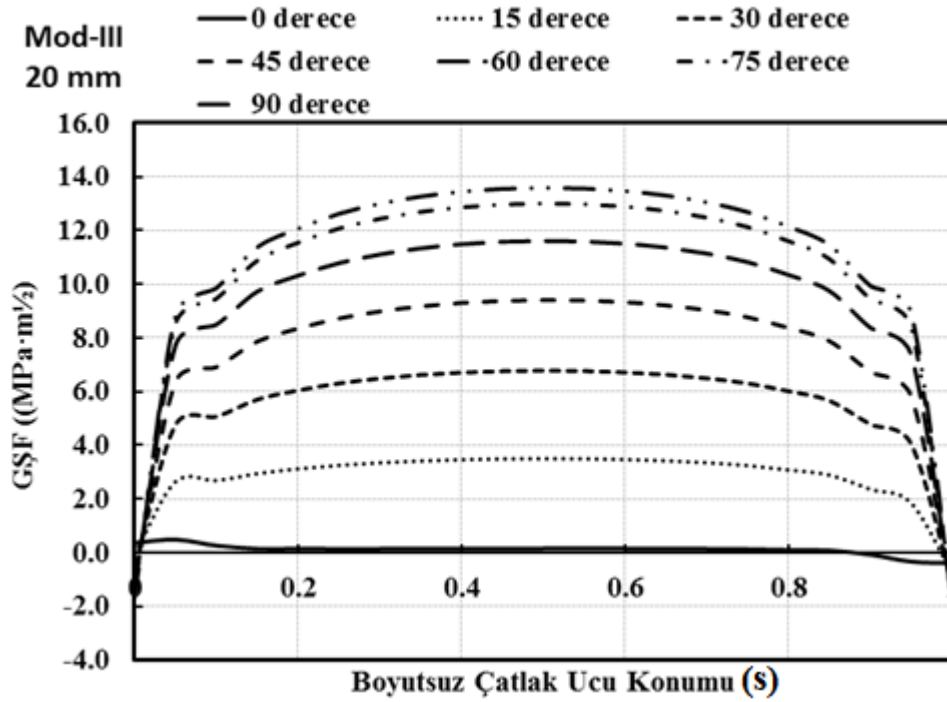
Şekil 3.10. CTT numunesinin P=10 kN ve t=25 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri



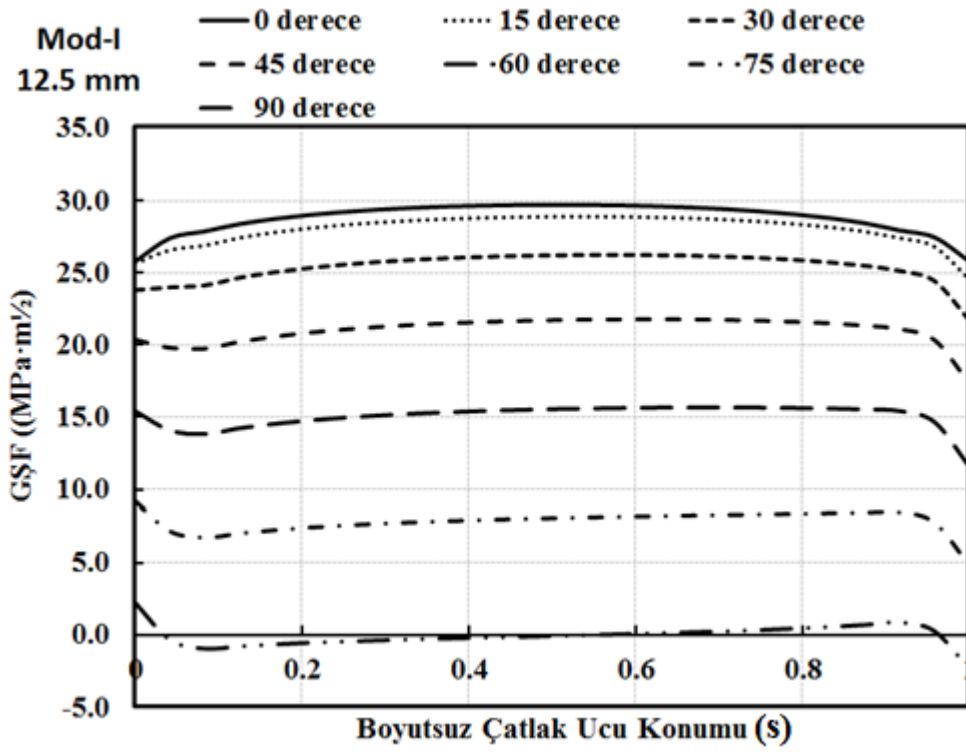
Şekil 3.11. CTT numunesinin P=10 kN ve t=20 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri



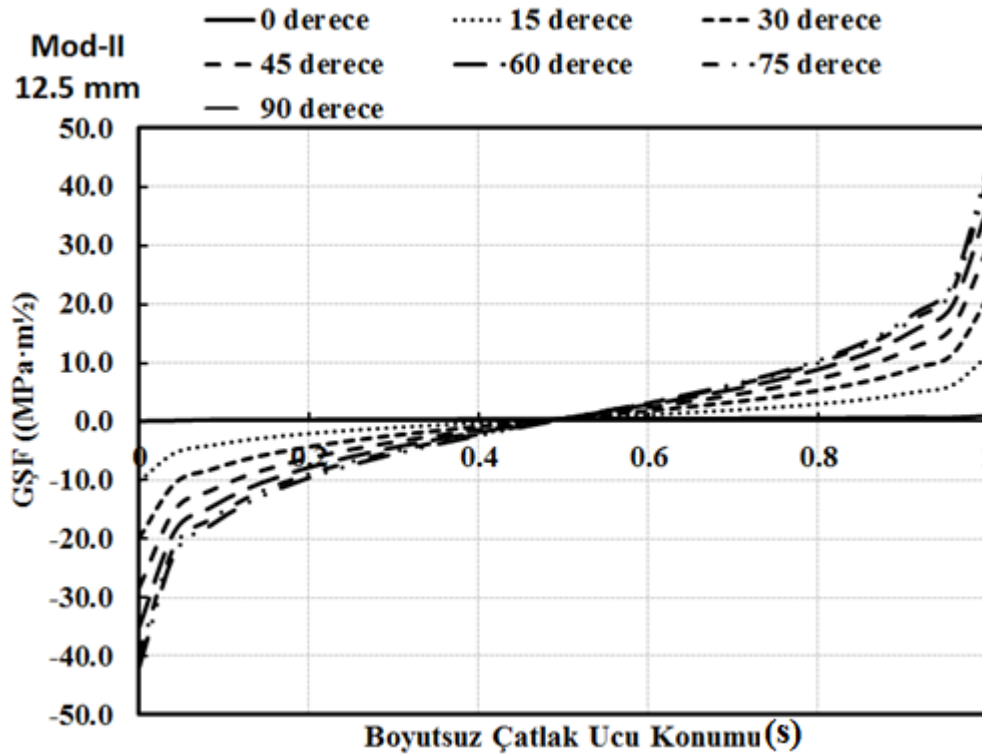
Şekil 3.12. CTT numunesinin P=10 kN ve t=20 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri



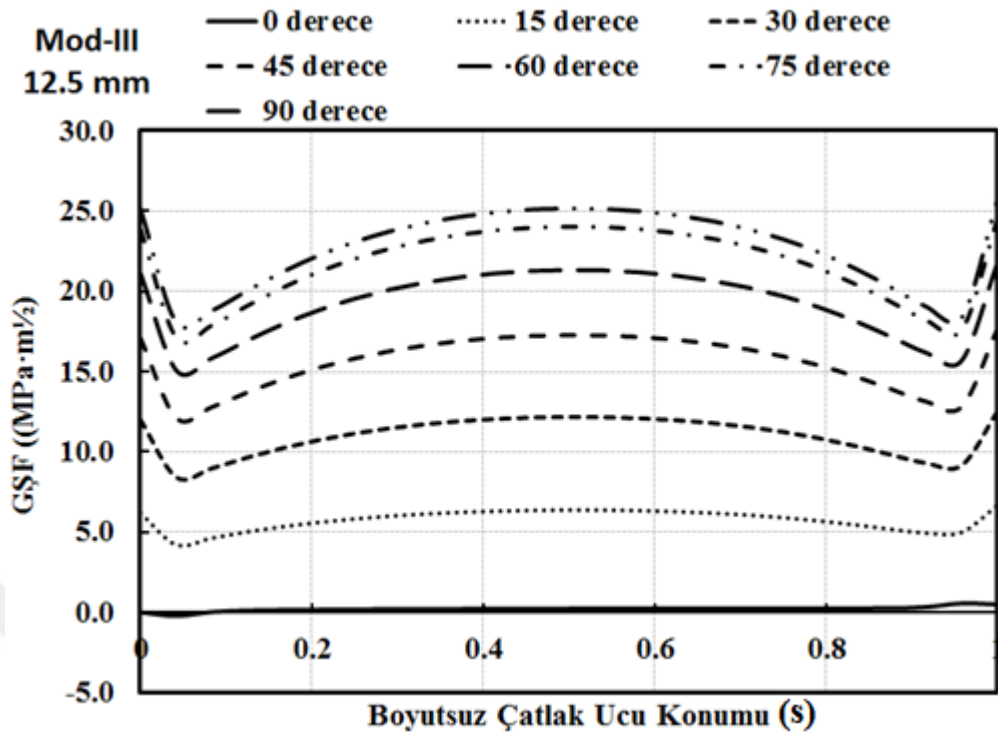
Şekil 3.13. CTT numunesinin P=10 kN ve t=20 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri



Şekil 3.14. CTT numunesinin P=10 kN ve t=12,5 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri



Şekil 3.15. CTT numunesinin P=10 kN ve t=12,5 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri



Şekil 3.16. CTT numunesinin P=10 kN ve t=12,5 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri

FCPAS ile kırılma analizi yapılan CTT numunesinin 7 farklı açı ve t=25 mm, t=20 mm ve t=12,5 mm et kalınlıkları için elde edilen gerilme şiddet faktörleri Şekil 3.8.– Şekil 3.16.’da verilmiştir. Şekil 3.8., Şekil 3.11. ve Şekil 3.14.’te görülebileceği üzere, karışık mod yükleme açısı arttıkça, verilen bir çatlak uzunluğu için mod-I gerilme şiddet faktörü düzenli olarak azalmakta, mod-II (Şekil 3.9., Şekil 3.12. ve Şekil 3.15) ve mod-III (Şekil 3.10., Şekil 3.13. ve Şekil 3.16.) gerilme şiddet faktörleri ise artmaktadır.

0, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 derecede uygulanan 10 kN’luk çekme kuvvetleri için, 12,5 mm et kalınlığından 25 mm et kalınlığına gidildiğinde ise K1 gerilme şiddet faktörlerinde yaklaşık 2 kat, K2 gerilme şiddet faktörlerinde yaklaşık 2,9 kat, K3 gerilme şiddet faktörlerinde yaklaşık 2,5 kat azalma gözlenmiştir. Özellikle 12,5 mm ve 25 mm et kalınlıklarındaki K1 gerilme şiddet faktörleri kıyaslandığında et kalınlığındaki 2 kat artışın lineer olarak K1 gerilme şiddet faktörlerinde %1 gibi kabul edilebilir bir farkla 2 kat azalmaya sebep oluşu yapılan analizlerin doğruluğunu desteklemektedir.

Bu gerilme şiddet faktörlerine bakılarak Mod-III yükleme açısı arttıkça K3 gerilme şiddet faktörü değeri artmakta ve K1 gerilme şiddet faktörü değeri azalmakta ve K1 gerilme şiddet faktörü değeri çatlak ucu boyunca sabit kalmaktadır. Tam Mod-III durumunda ise K1 gerilme şiddet faktörü yaklaşık olarak 0 değerine ulaşmaktadır.

Mod-III yükleme açısı arttıkça, mod-II gerilme şiddet faktörü artmakta ve çatlak ucu boyunca lineer olarak negatiften pozitif bir değere değişmektedir. Bunun nedeni, mod-III yüklemesi altında çatlak yüzeylerinin çatlak ucu orta noktası etrafında birbirlerine ters yönlü dönme deformasyonu eğiliminde olmalarıdır.

Mod-III yükleme açısı arttıkça, mod-III gerilme şiddet faktörü artmakta ve çatlak ucu boyunca yaklaşık sabit kalmaktadır.

Not: Gerilme şiddet faktörlerinde her iki çatlak uçlarında görülen ani artış veya azalma, literatürde geniş bir şekilde yer almış olan serbest-yüzey (free-surface) etkisi sebebiyle oluşmakta olup, hesaplamalarda dikkate alınmamaktadır.

3.4.2. Sadece Bonded Always (Tümüyle Bağlı) temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler

Tablo 3.3.'te gösterildiği gibi tüm Contact – Target yüzey etkileşimleri bonded always temas yüzeyi tipi ile verilmiştir. Bu analizlerin amacı temas yüzeyi tipinin numune, tutucu ve civatalar üzerindeki gerilme dağılımları ve gerilme şiddet faktörlerine etkisini incelemektir.

Tablo 3.3. Sadece Bonded Always temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler

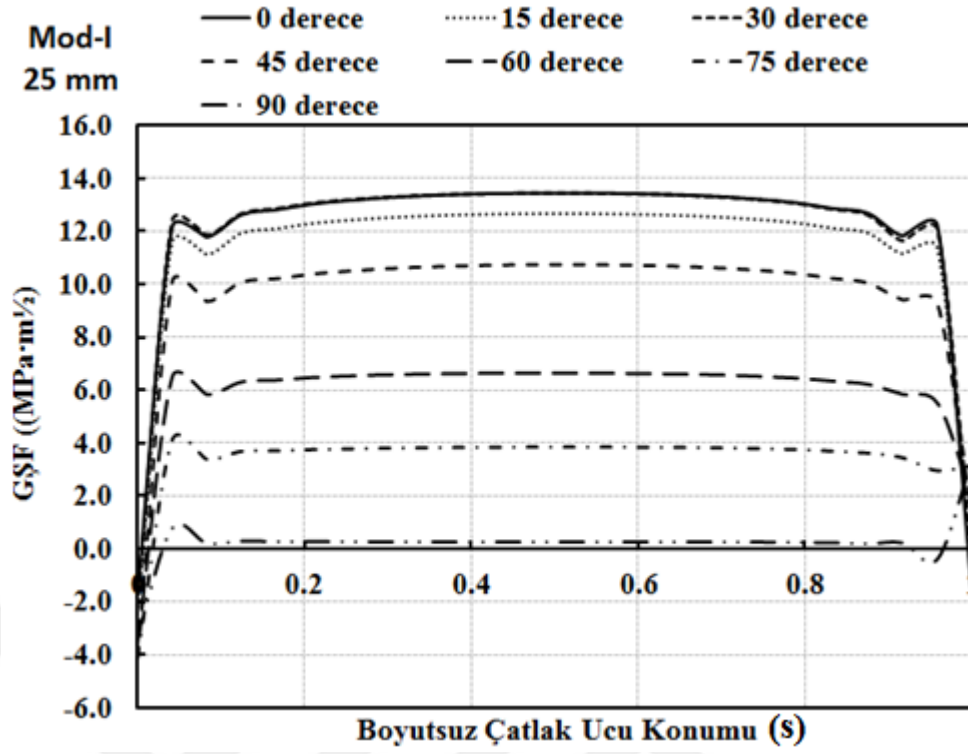
Et Kalınlığı	Çatlak Uzunluğu	Temas Yüzeyleri	Temas Tipi	Yükleme Açısı
25 mm	25 mm	Numune–Cıvata başı	Bonded Always	(0° - 15° - 30° - 45° - 60° - 75° - 90°)
		Numune–Cıvata Yüzeyi	Bonded Always	
		Numune – Tutucu	Bonded Always	
		Tutucu - Cıvata	Bonded Always	
		Tutucu - Pim	Bonded Always	

Tablo 3.3. (Devamı)

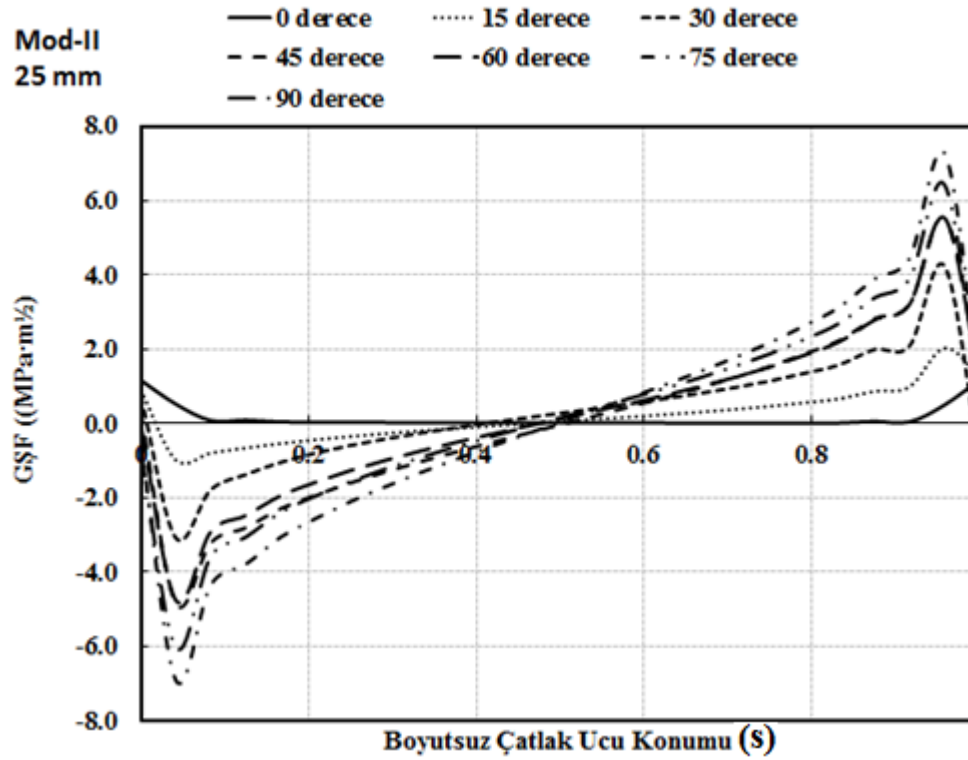
Et Kalınlığı	Çatlak Uzunluğu	Temas Yüzeyleri	Temas Yüzeyi	Yükleme Açısı
20 mm	25 mm	Numune – Cıvata Başı	Bonded Always	(0° - 15° - 30° - 45° - 60° - 75° - 90°)
		Numune – Cıvata Yüzeyi	Bonded Always	
		Numune – Tutucu	Bonded Always	
		Tutucu - Cıvata	Bonded Always	
		Tutucu - Pim	Bonded Always	
		Numune – Ara Levha	Bonded Always	
		Tutucu – Ara Levha	Bonded Always	
		Cıvata – Ara Levha	Bonded Always	
12,5 mm	25 mm	Numune – Cıvata Başı	Bonded Always	(0° - 15° - 30° - 45° - 60° - 75° - 90°)
		Numune – Cıvata Yüzeyi	Bonded Always	
		Numune – Tutucu	Bonded Always	
		Tutucu - Cıvata	Bonded Always	
		Tutucu - Pim	Bonded Always	
		Numune – Ara Levha	Bonded Always	
		Tutucu – Ara Levha	Bonded Always	
		Cıvata – Ara Levha	Bonded Always	

3.4.2.1. Sadece Bonded Always (Tümüyle Bağlı) temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler için gerilme şiddet faktörü değerleri

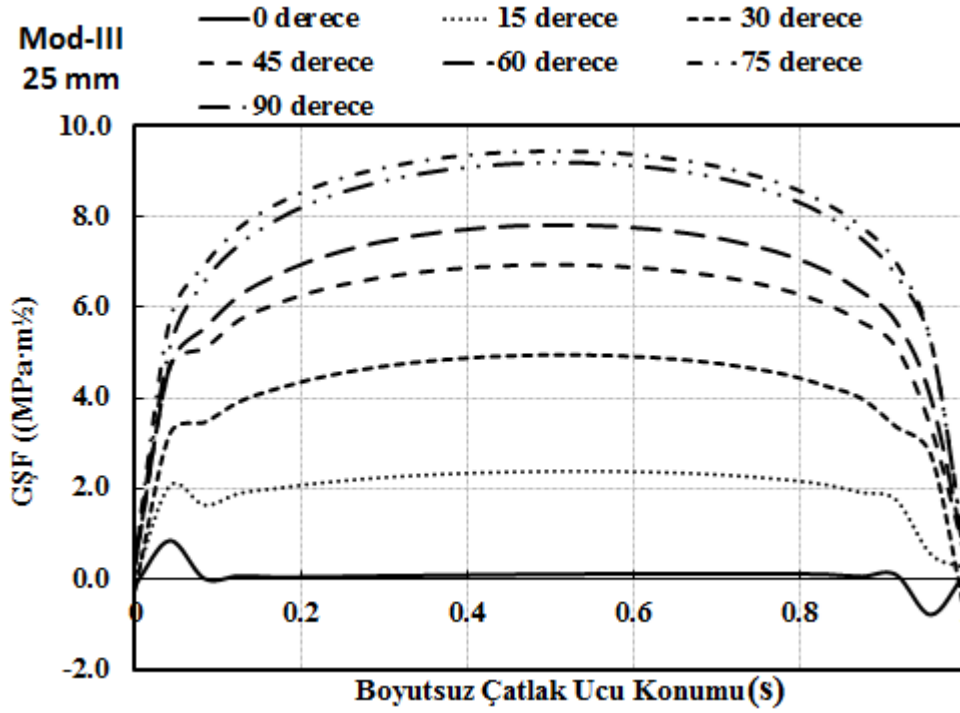
Bu alt başlıkta Bölüm 3.4.2.'de bahsi geçen temas yüzeyi tiplerinde 25 mm, 20 mm ve 12,5 mm et kalınlığına sahip CTT numunesi için 7 farklı yüklem açısında (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) gerçekleştirilen analizlerin gerilme şiddet faktörlerine yer verilecektir.



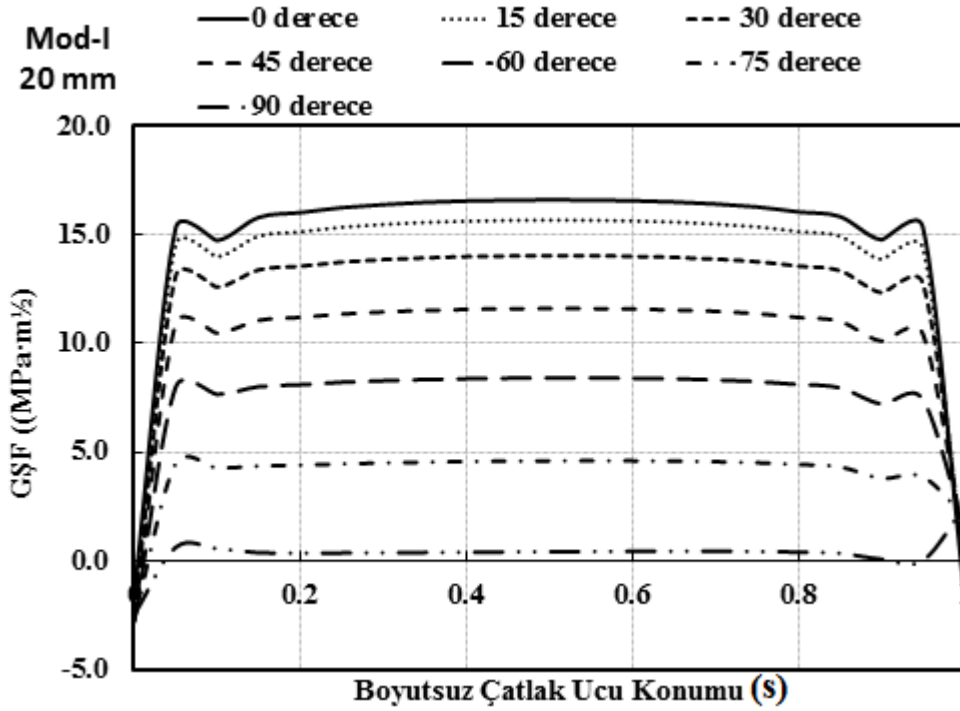
Şekil 3.17. CTT numunesinin P=10 kN ve t=25 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri



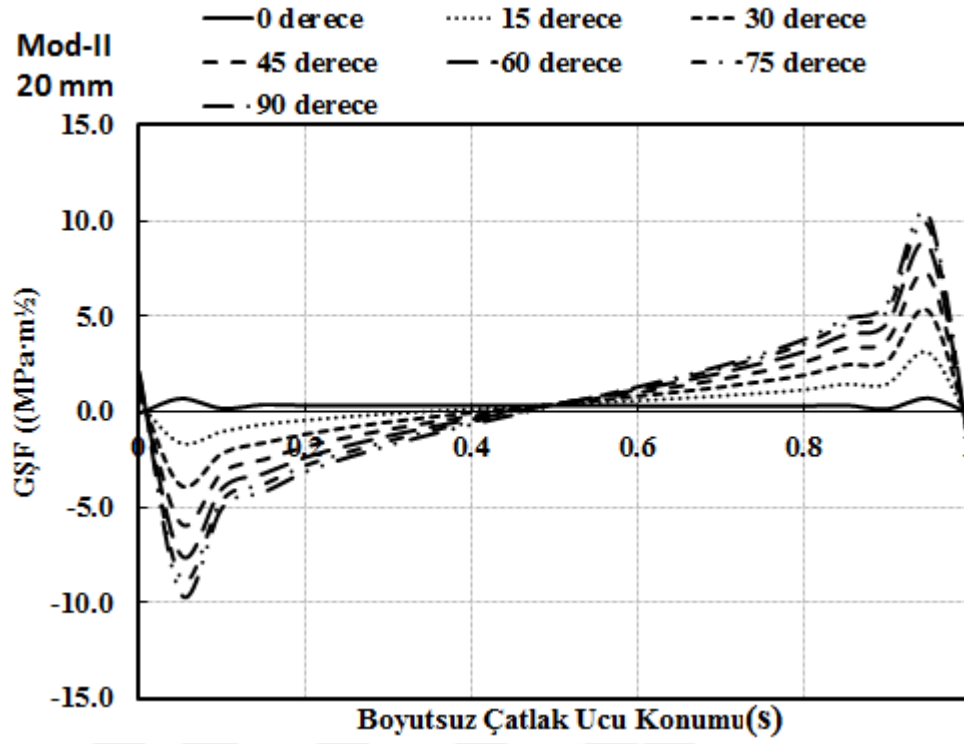
Şekil 3.18. CTT numunesinin P=10 kN ve t=25 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri



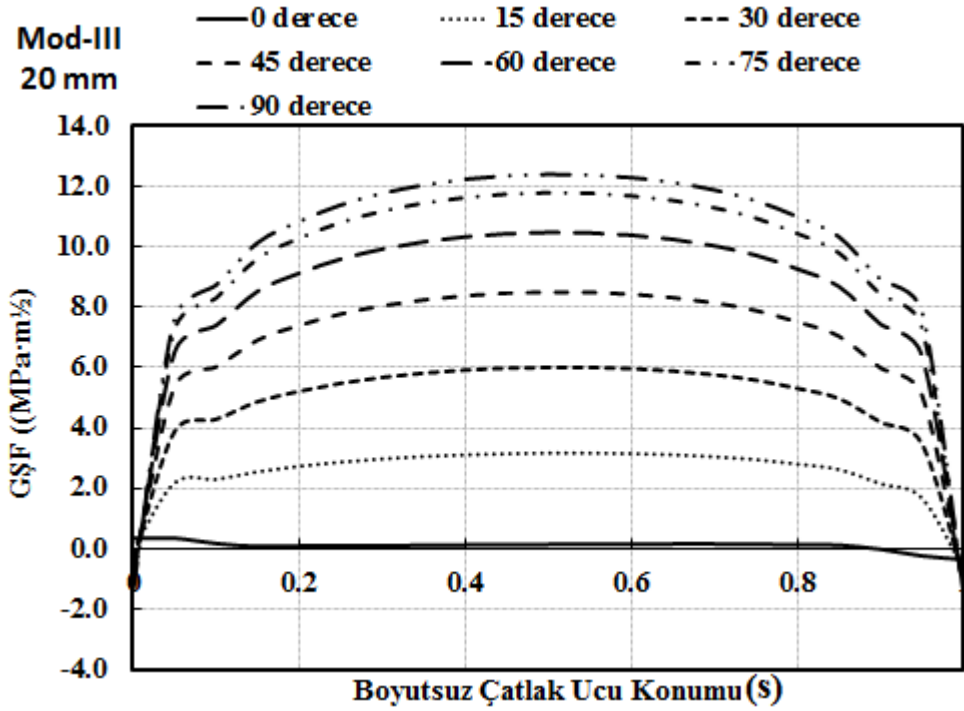
Şekil 3.19. CTT numunesinin P=10 kN ve t=25 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri



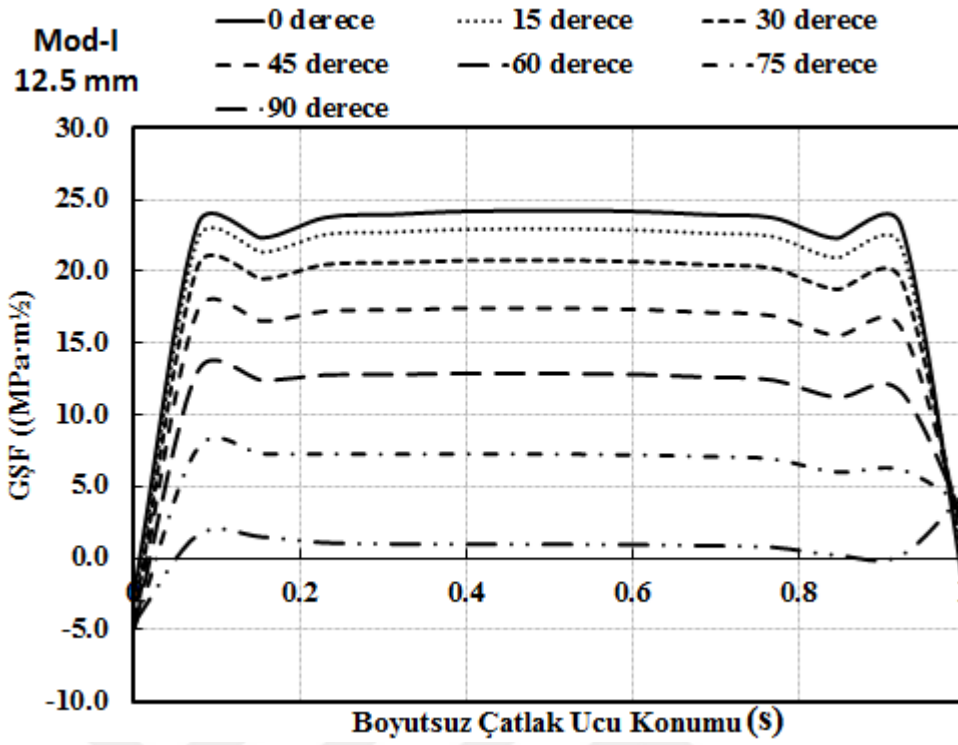
Şekil 3.20. CTT numunesinin P=10 kN ve t=20 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri



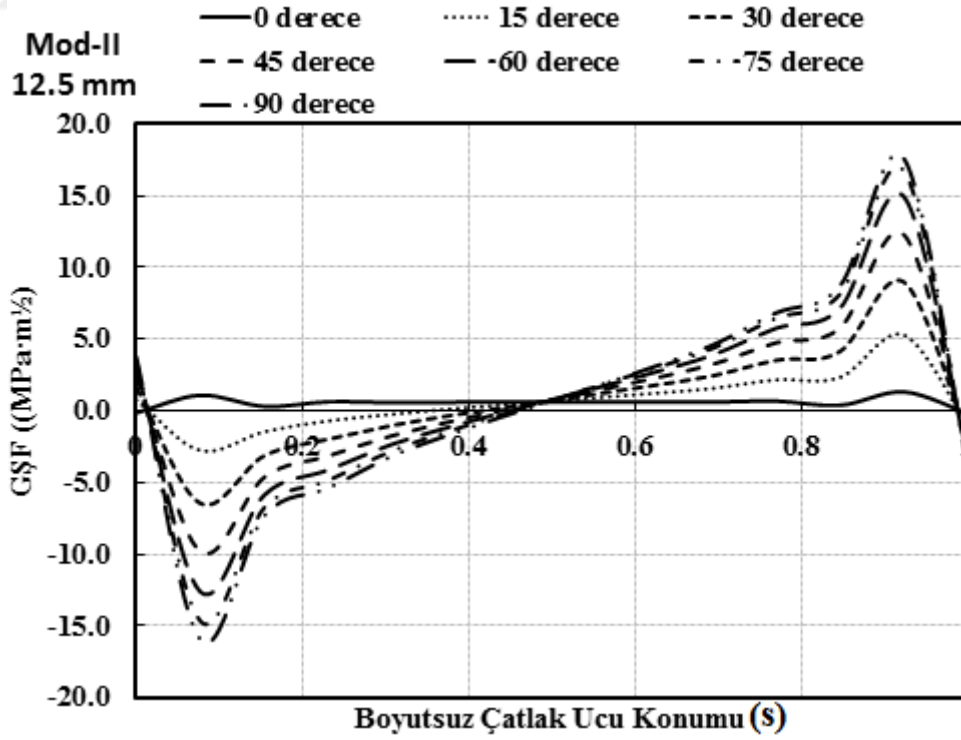
Şekil 3.21. CTT numunesinin P=10 kN ve t=20 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri



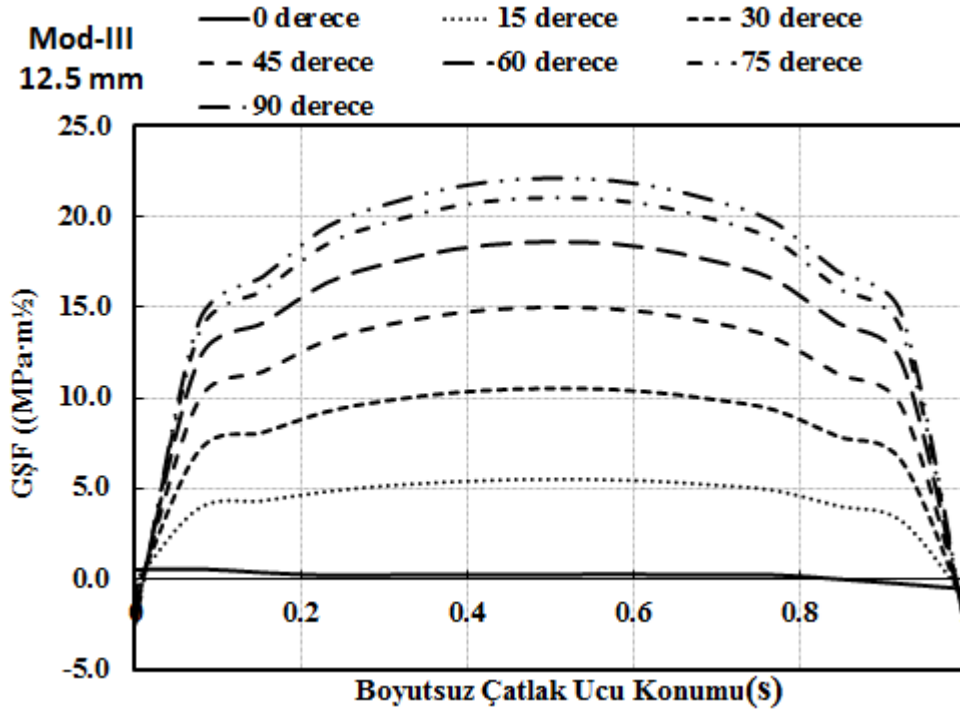
Şekil 3.22. CTT numunesinin P=10 kN ve t=20 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri



Şekil 3.23. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet



Şekil 3.24. CTT numunesinin $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri



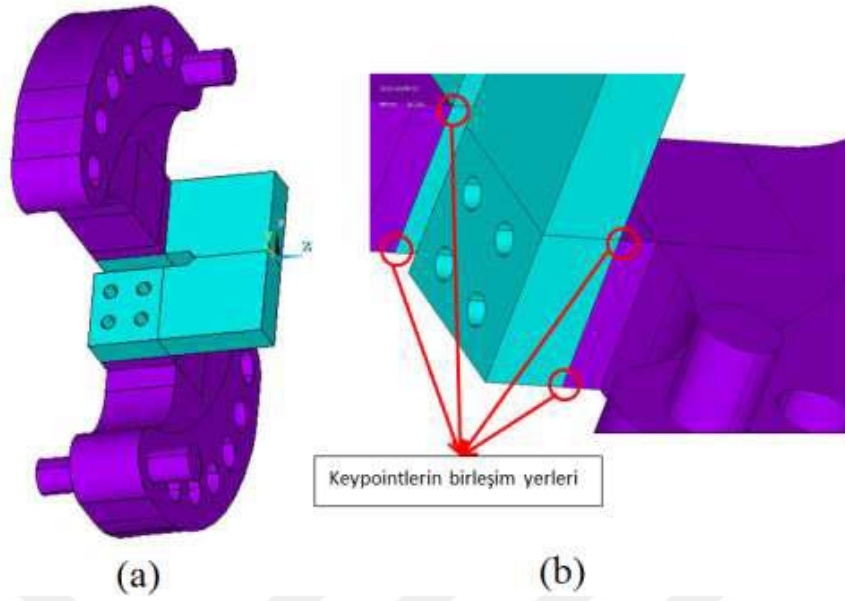
Şekil 3.25. CTT numunesinin P=10 kN ve t=12,5 mm için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri

3.4.3. Sadece tutucu ve pimlere standart temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler

Bu analizlerde ise “cıvataların gerilme şiddet faktörlerine etkisi nasıldır?” sorusuna cevap aranmıştır. Bu amaç için tüm cıvatalar genel modelden silinmiştir. Ardından Şekil 3.26.’da gösterildiği gibi CTT numune ve CTT numune tutucusu ortak anahtar noktalar (keypoint) yardımıyla birbirine tutturulmuş ve bu sayede temas yüzeyi etkileri de ortadan kaldırılmıştır. Tablo 3.4.’te gösterildiği gibi sadece yükleme durumu için tutucu pimleri ile tutucu arasında standart temas yüzeyi tipi kullanılarak sürtünme durumu gösterilmiştir.

Tablo 3.4.Sadece tutucu ve pimlere standart temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler

Et Kalınlığı	Çatlak Uzunluğu	Temas	Temas Yüzeyi	Yükleme Açısı
		Yüzeyleri	Tipi	
12,5 mm	25 mm	Tutucu - Pim	Standart	0°
25 mm	25 mm	Tutucu - Pim	Standart	45°

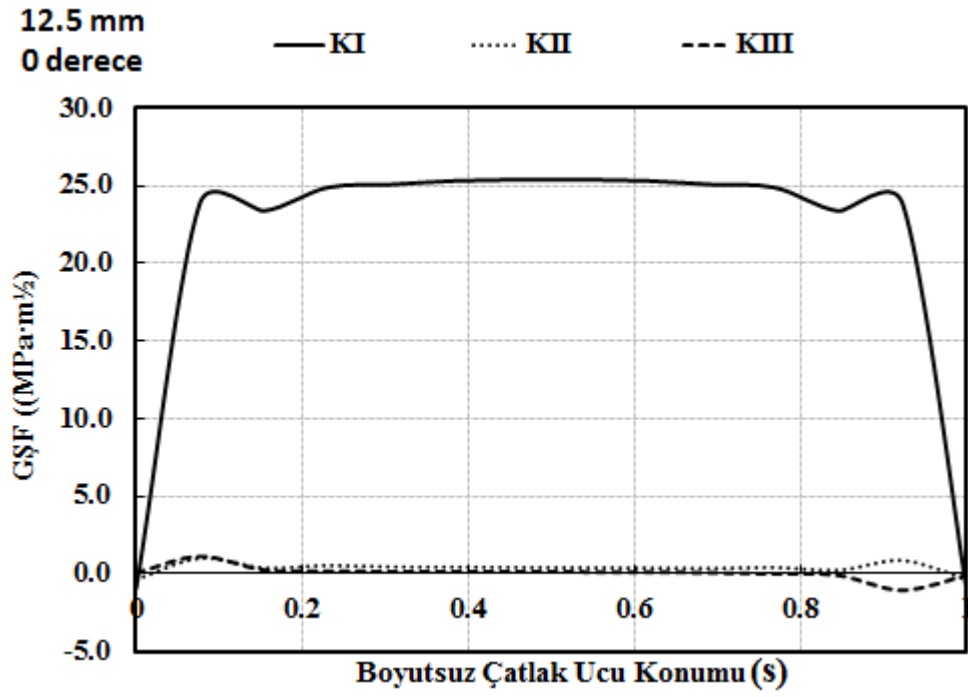


Şekil 3.26. (a) Sadece pimlere temas yüzeyi uygulanmış olan model ve (b) Numune ve tutucunun birleşim noktalarının (keypoint) gösterilmesi

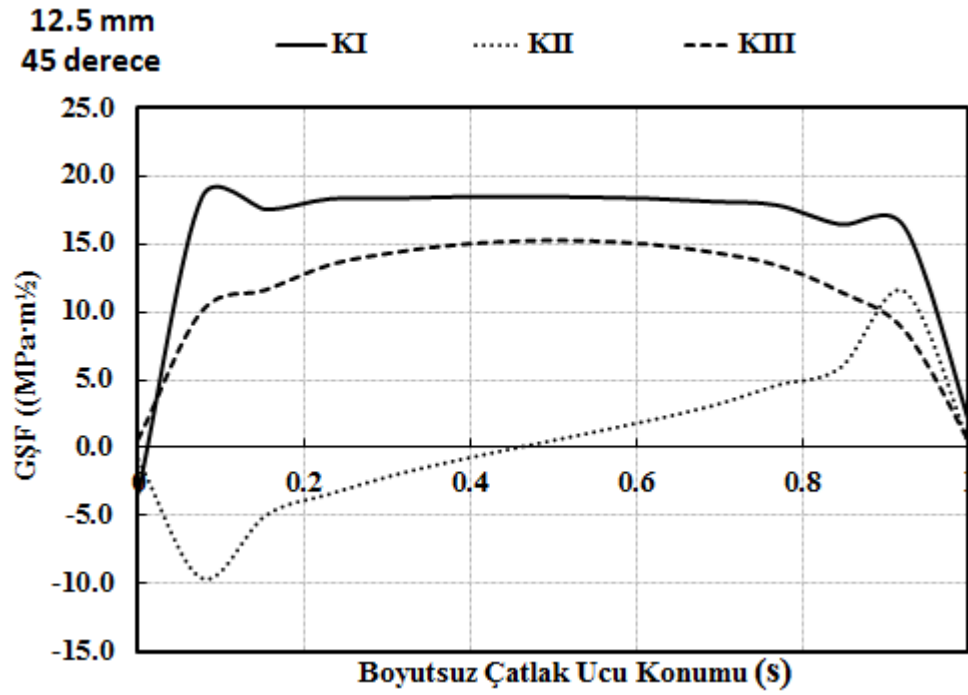
3.4.3.1. Sadece tutucu ve pimlere standart temas yüzeyi tipi kullanılarak yapılan analizler

Bu alt başlıkta 12,5 mm et kalınlığına sahip CTT numunesi için 2 farklı açıda (0° ve 45°) gerçekleştirilen analizlerin gerilme şiddet faktörlerine yer verilecektir. Bu analizlerin amacı temas yüzeyi tipi değişiminin analiz değerlerinin üzerindeki etkisini tespit etmek ve en doğru sonuca ulaşmak için hangi temas yüzeyi tiplerinin kullanılacağına karar vermektir.

Yapılan bu iki analiz sonucunda temas yüzeyi tipi değişiminin sadece KI değerleri için değişim oluşturduğu gözlenmiştir. 0° yük açısı içeren analiz için KI değeri yaklaşık yüzde 3'lük bir artış göstermiştir. 45 derecede ise bu artış devam etmektedir. Bununla beraber 45 derecelik analizde KII ve KIII değerleri için bir değişime rastlanmamıştır.



Şekil 3.27. CTT numunesinin $\theta=0^\circ$, $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri

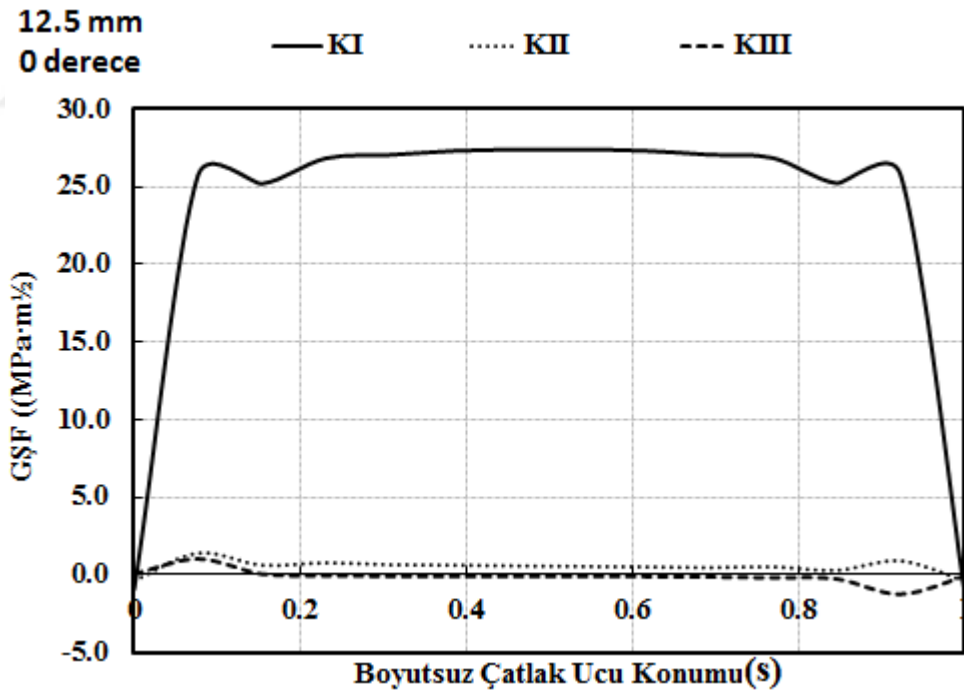


Şekil 3.28. CTT numunesinin $\theta=45^\circ$, $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri

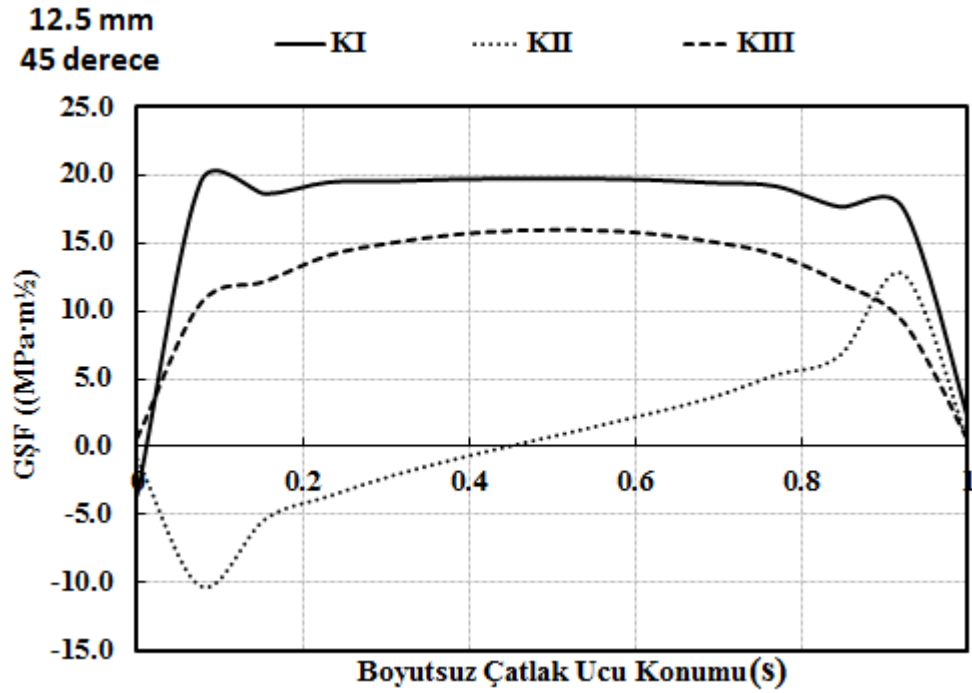
3.4.4. Temas yüzeyi kullanmadan yapılan analizler

Bölüm 3.4.3.'te uygulanan sadece pimlere temas yüzeyi tipi uygulanarak yapılan analizlere ek olarak, bu bölümde pim etkisini de ortadan kaldırarak, pimlerin analizlere etkisi görülmek istenmiştir. Bu amaç doğrultusunda genel modelden cıvatarla beraber pimler de çıkarılmıştır. Pimlere gelen deplasman ve yükler ise tutucuya yükleme deliği iç yüzeyindeki bir çizgi boyunca verilmiştir.

Gerçekleştirilen bu iki analiz neticesinde Bölüm 3.4.3.'teki benzer durumlar ortaya çıkmıştır. 0 derece için yapılan analizde KI değerindeki farkın %15'lere ulaştığı gözlenmiştir. Ayrıca yine benzer olarak 45 derece için KII değeri sabit kalmış, KIII te ise %1 gibi çok ufak bir farklılık meydana gelmiştir.



Şekil 3.29. CTT numunesinin $\theta=0^\circ$, $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri



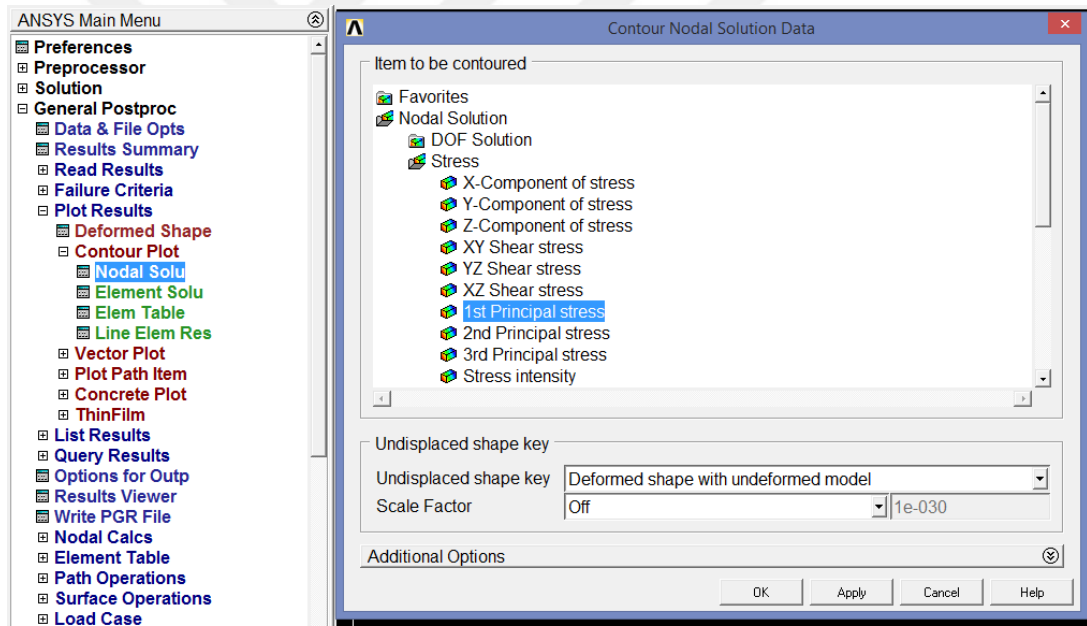
Şekil 3.30. CTT numunesinin $\theta=45^\circ$, $P=10$ kN ve $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri

3.4.5. Strain Gage ölçümleri için yapılan analizler

Yapılan analizlerde modeli oluşturan her bir parça belli bir gerilmeye maruz kalmaktadır. Fakat elde ettiğimiz gerilme değerlerinin deney ortamında doğruluğunu görebilmek amacıyla, önce 12,5 mm et kalınlığına sahip bir CTT numunesine Tablo 3.5'te gösterilen temas yüzeyi türleri kullanılarak 45 derecelik açıyla 10 kN değerinde bir yük uygulanmıştır. Analiz sonucunda Strain Gage yapıştırılacak olan numune seçilerek numunedeki gerilme dağılımlarını görebilmek için sırasıyla *General Postproc*, *Contour Plot*, *Nodal Solution*, *Stress*, *1st Principal Stress* seçenekleri seçilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus: Strain Gage'nin yapıştırılacağı nodun doğru tespit edilebilmesi için *Undisplaced shape key* seçeneği *Deformed shape with undeformed model* ve *Scale Faktor* seçeneği de *Off* olarak işaretlenmelidir.

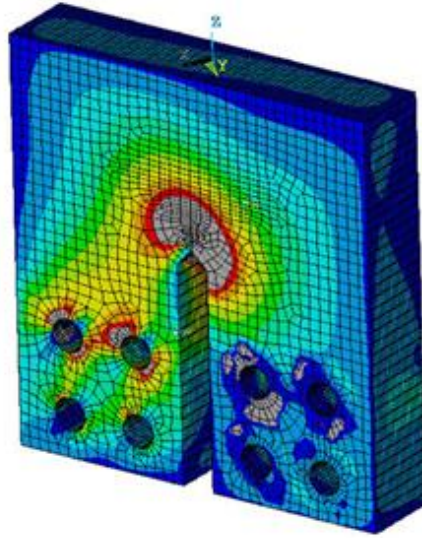
Tablo 3.5. Strain Gage ölçümleri için yapılan analizler

Et Kalınlığı	Çatlak Uzunluğu	Temas Yüzeyleri	Temas Yüzeyi Tipi	Yükleme Açısı
12,5 mm	25 mm	Numune – Cıvata Başı	Bonded Always	45°
		Numune – Cıvata Yüzeyi	Standart	
		Numune – Tutucu	Standart	
		Tutucu - Cıvata	Bonded Always	
		Tutucu - Pim	Standart	
		Numune – Ara Levha	Standart	
		Tutucu – Ara Levha	Standart	
		Cıvata – Ara Levha	Standart	



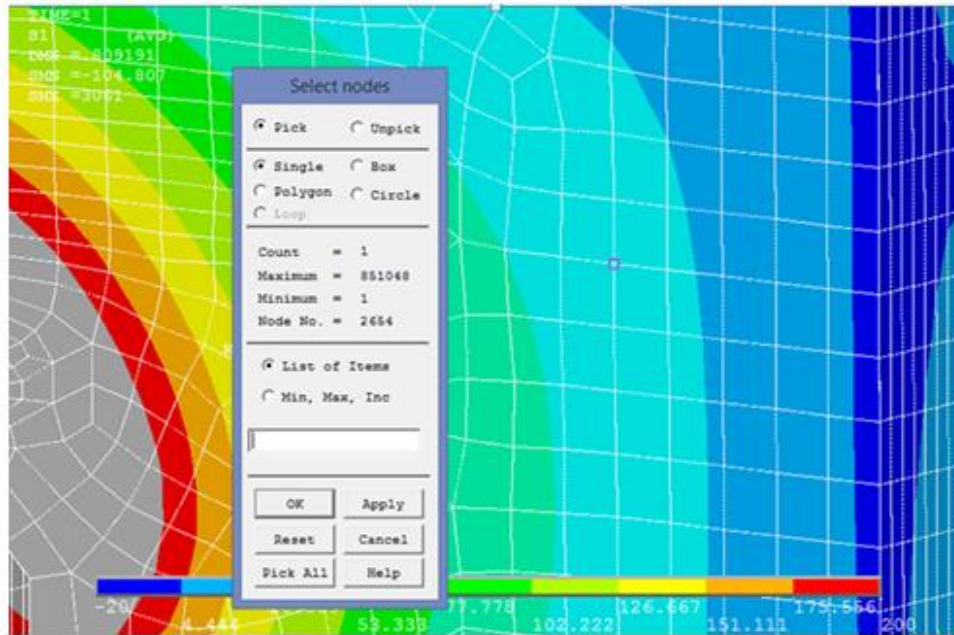
Şekil 3.31. Strain Gage yapıştırılacak olan numunedeki gerilme dağılımlarını görebilmek için ANSYS'te uygulanan işlem sırası

Gerekli seçimler yapıldığında numunenin tüm düğüm noktalarında kolaylıkla seçilebileceği bir görüntü elde edilmiş olacaktır. Gerilme dağılımları daha net görülmesi açısından renk scalası -20 ile 200 arasında daraltılmıştır.



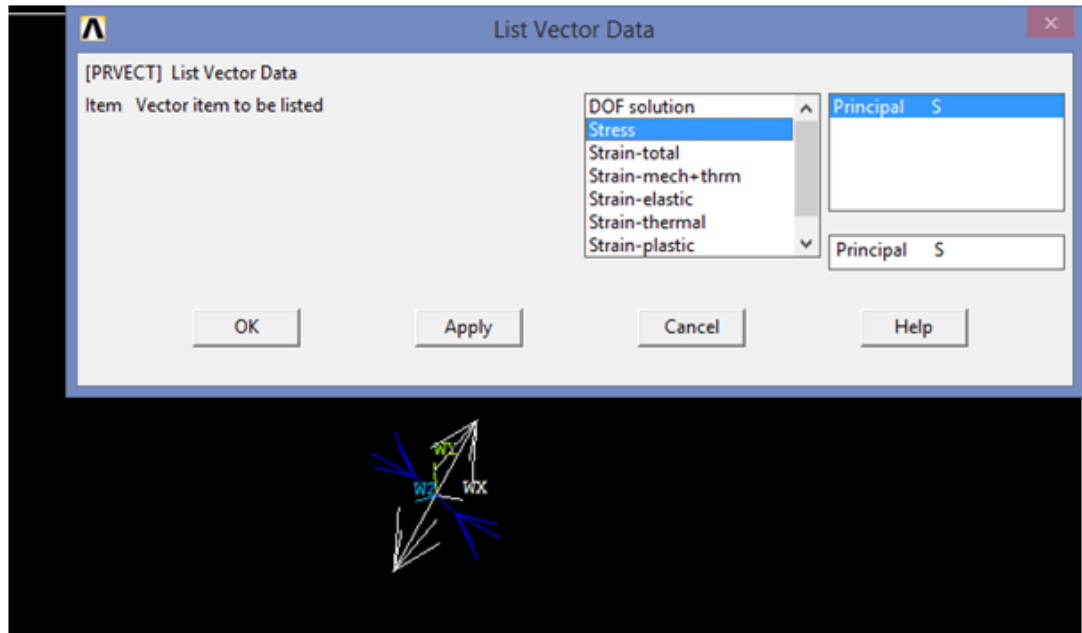
Şekil 3.32. Strain Gage yapıştırılacak olan numunenin düğüm noktalarının görüntüsü

Bu işlemin ardından kullanacağımız strain gagenin boyutuna uygun olarak, gerilme dağılımlarının da ani değişim bölgelerinden uzak kalmak kaydıyla yer seçimi yapılmalıdır. Bu çalışmalar için temin edilen strain gagelerin boyutları 3mm olduğundan ve gerilme dağılımlarının aniden değişmediği bölge olarak Şekil 3.33.'te gösterildiği gibi açık mavi renkle gösterilen yerden uygun bir düğüm noktası seçilmiştir.



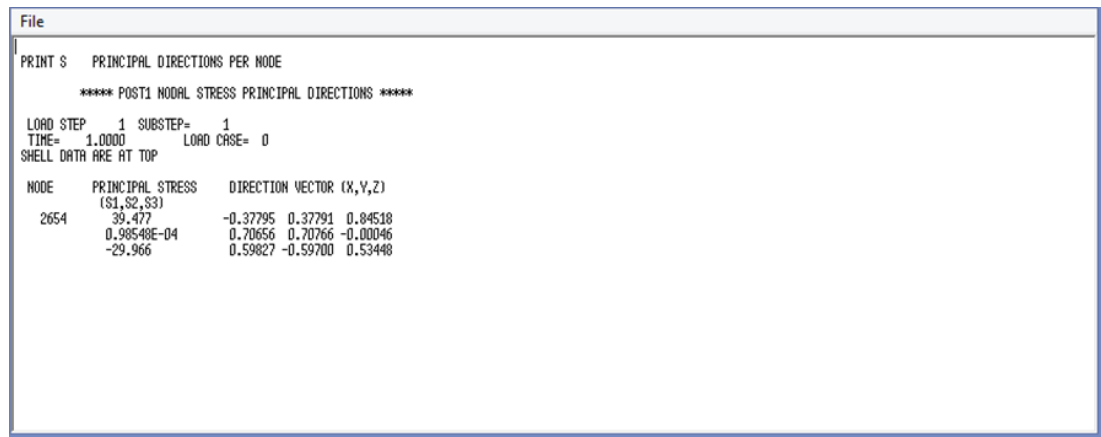
Şekil 3.33. Numunede Strain Gage yapıştırılacak olan düğüm noktasının seçimi

Ardından seçilen düğüm noktası için gerilme yönü ve doğrultusu Şekil 3.34.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.34. Seçilen düğüm noktasının gerilme yönü ve doğrultusu

Yapılan çalışmada tek eksenli strain gageler kullanıldığından, gageler birincil asal gerilme yönünde yapıştırılması gerekmektedir. Bu sebeple Şekil 3.35.'te görülen Direction seçeneğinin altındaki değerlerin arccos değerleri alınarak ilgili açılar bulunmuştur. Bulunan açılarda strain gageler aynı noktaya yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemleri ile alakalı daha detaylı bilgilere Bölüm 4.2.'de yer alan Strain Gage Doğrulama Çalışması başlığı altında yer verilmiştir.



Şekil 3.35. Strain Gage'nin yapıştırılacağı açı değerleri.

3.4.6. 26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için yapılan analizler

ANSYS programında yapılan analizler 25 mm çatlak uzunluğunda yapılmıştır. Analizlerin yapıldığı CTT numuneye, aynı CT numunesinde olduğu gibi cıvata merkezlerinden çentik ucuna (notch) kadar 23,7 mm'lik bir çatlak uzunluğu olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca çentikten sonrada 1,3 mm'lik bir ön çatlak (pre_crack) verilerek toplamda 25 mm lik bir çatlak uzunluğu elde edilmiştir. Fakat deney ortamında 1,3 mm'lik ön çatlak (pre_crack) uzunluğunu tam olarak yakalamak mümkün olmadığından 26 ve 27 mm'lik çatlak uzunluğuna sahip CTT numuneleri için de analizler yapılarak, deneylerden elde edilen ön çatlak uzunluğuna göre interpolasyon yaparak ilgili değerlerin kullanılması hedeflenmiştir. Yapılan analizlerin detayları Tablo 3.6.'da verilmiştir.

Tablo 3.6. 26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için yapılan analizler

Et Kalınlığı	Çatlak Uzunluğu	Temas Yüzeyleri	Temas Yüzeyi Tipi	Yükleme Açısı
25 mm	26 mm	Numune – Cıvata Başı	Bonded Always	
		Numune – Cıvata Yüzeyi	Standart	(0° - 15° -
		Numune – Tutucu	Standart	30° - 45° -
		Tutucu - Cıvata	Bonded Always	60° - 75° -
		Tutucu - Pim	Standart	90°)
25 mm	27 mm	Numune – Cıvata Başı	Bonded Always	
		Numune – Cıvata Yüzeyi	Standart	(0° - 15° -
		Numune – Tutucu	Standart	30° - 45° -
		Tutucu - Cıvata	Bonded Always	60° - 75° -
		Tutucu - Pim	Standart	90°)
12,5 mm	26 mm	Numune – Cıvata Başı	Bonded Always	
		Numune – Cıvata Yüzeyi	Standart	
		Numune – Tutucu	Standart	(0° - 15° -
		Tutucu – Cıvata	Bonded Always	30° - 45° -
		Tutucu - Pim	Standart	60° - 75° -
		Numune – Ara Levha	Standart	90°)
		Tutucu – Ara Levha	Standart	
		Cıvata – Ara Levha	Standart	

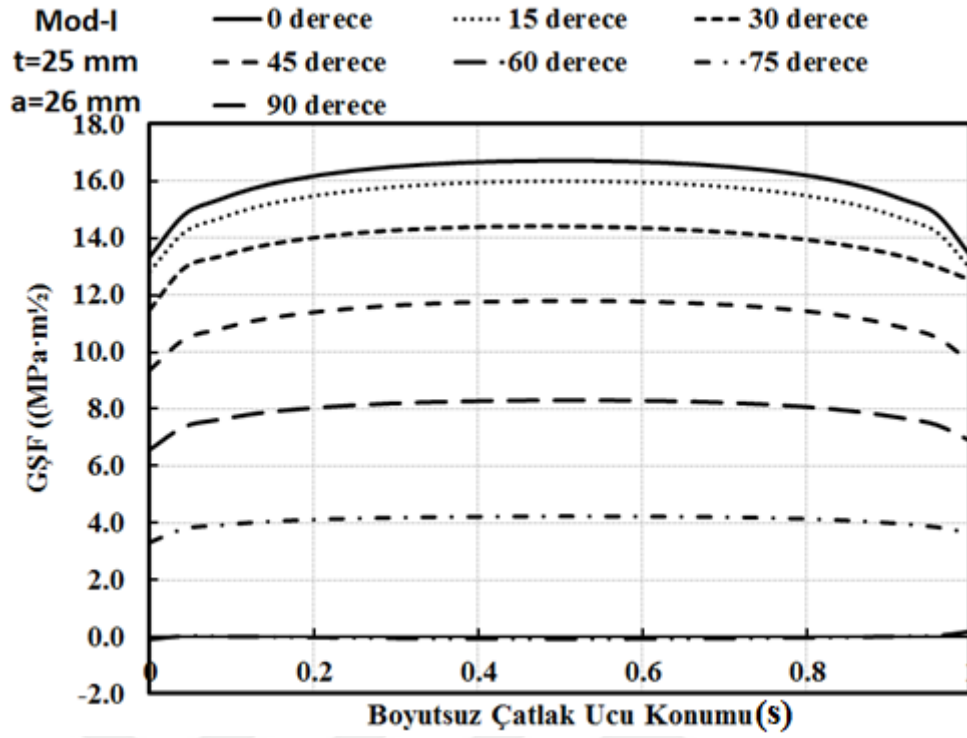
Tablo 3.6. (Devamı)

Et Kalınlığı	Çatlak Uzunluğu	Temas Yüzeyleri	Temas Yüzeyi Tipi	Yükleme Açısı
12,5 mm	27 mm	Numune – Cıvata Başı	Bonded Always	(0° - 15° - 30° - 45° - 60° - 75° - 90°)
		Numune – Cıvata Yüzeyi	Standart	
		Numune – Tutucu	Standart	
		Tutucu – Cıvata	Bonded Always	
		Tutucu - Pim	Standart	
		Numune – Ara Levha	Standart	
		Tutucu – Ara Levha	Standart	
		Cıvata – Ara Levha	Standart	

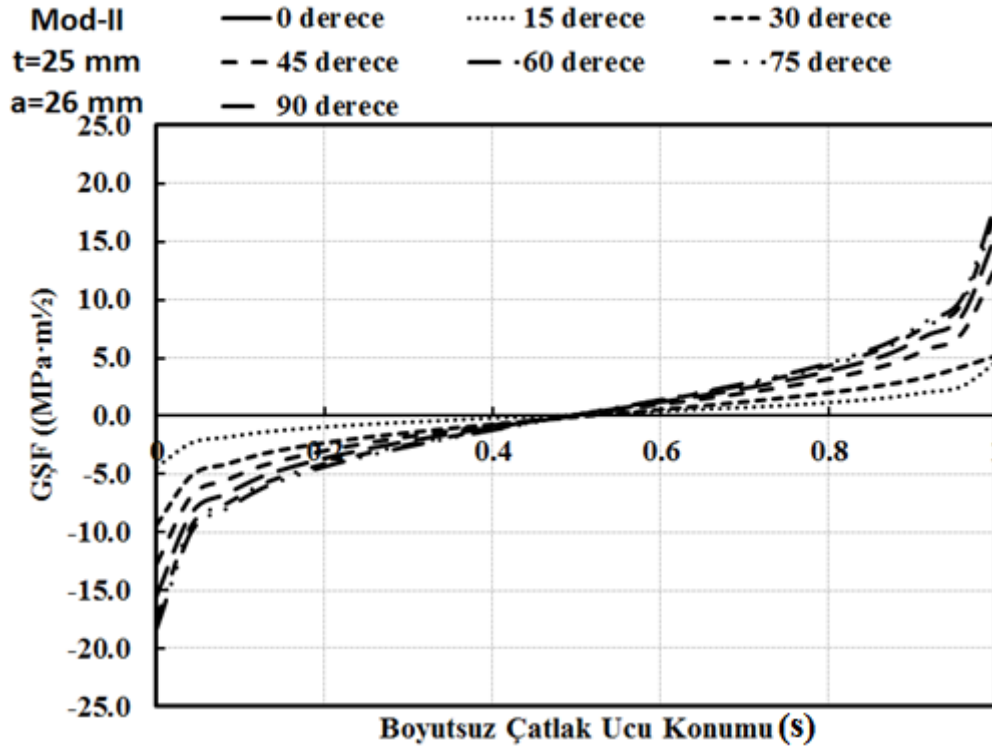
3.4.6.1. 25 mm ve 12,5 mm et kalınlığı ve 26 mm ve 27 mm çatlak uzunlukları için gerilme şiddet faktörü değerleri

26 ve 27 mm’lik çatlak uzunlukları için de 7 farklı açıda analizler yapılmıştır. Bu analizler 25 mm ve 12,5 mm et kalınlığına sahip CTT numunelerinin bu açılarda yapılmış olan testlerinde ön çatlak (pre_crack) uzunluklarına göre gerilme şiddet faktörlerinin doğru olarak mukayese edilebilmesi amacıyla yapılmıştır. Şekil 3.8. – 3.14.’ten görülebileceği üzere, karışık mod yükleme açısı arttıkça, verilen bir çatlak uzunluğu için mod-I gerilme şiddet faktörü azalmakta, mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörleri ise artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.36. – 3.47.’da görüldüğü üzere, verilen bir yükleme açısında, çatlak uzunluğu arttıkça her üç gerilme şiddet faktörlerinin değerleri de artmaktadır.

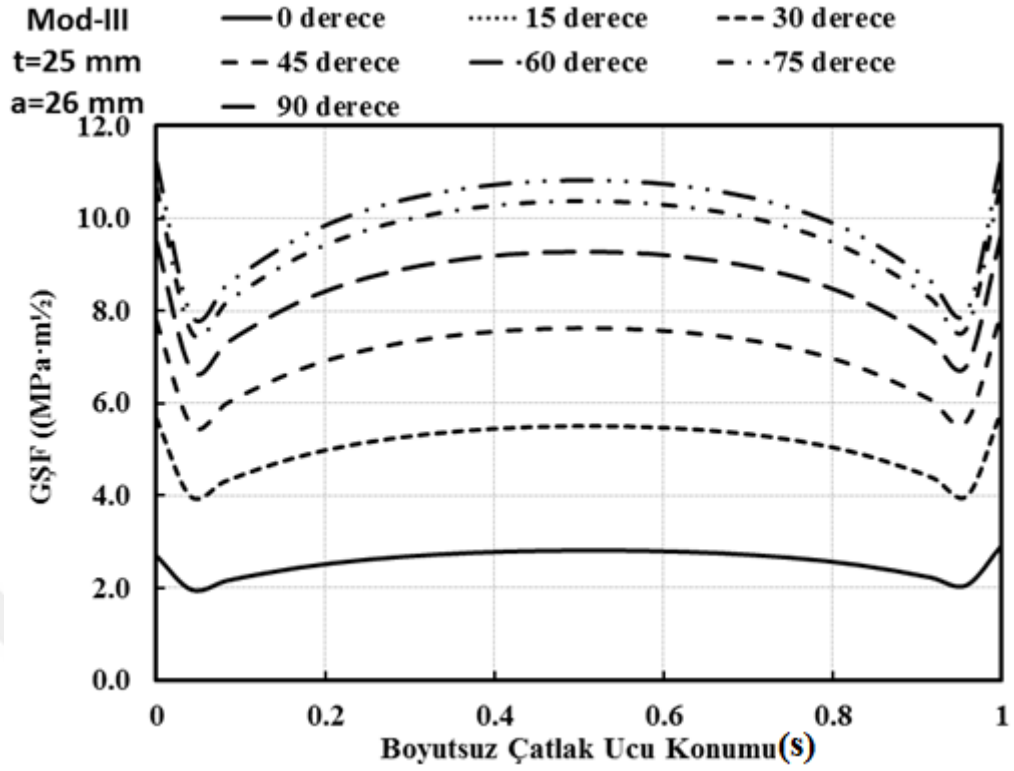
12,5 mm et kalınlığı için yapılan analizler ile 25mm et kalınlığında gerçekleştirilen 26 ve 27 mm çatlak uzunluğu için elde edilen analizler tatbik (uygulama) olarak birbirinin aynısıdır. Tek fark et kalınlığı yarıya düştüğü için KI ve KIII değerleride otomatik olarak yaklaşık 2 kat daha fazla değere sahiplerdir.



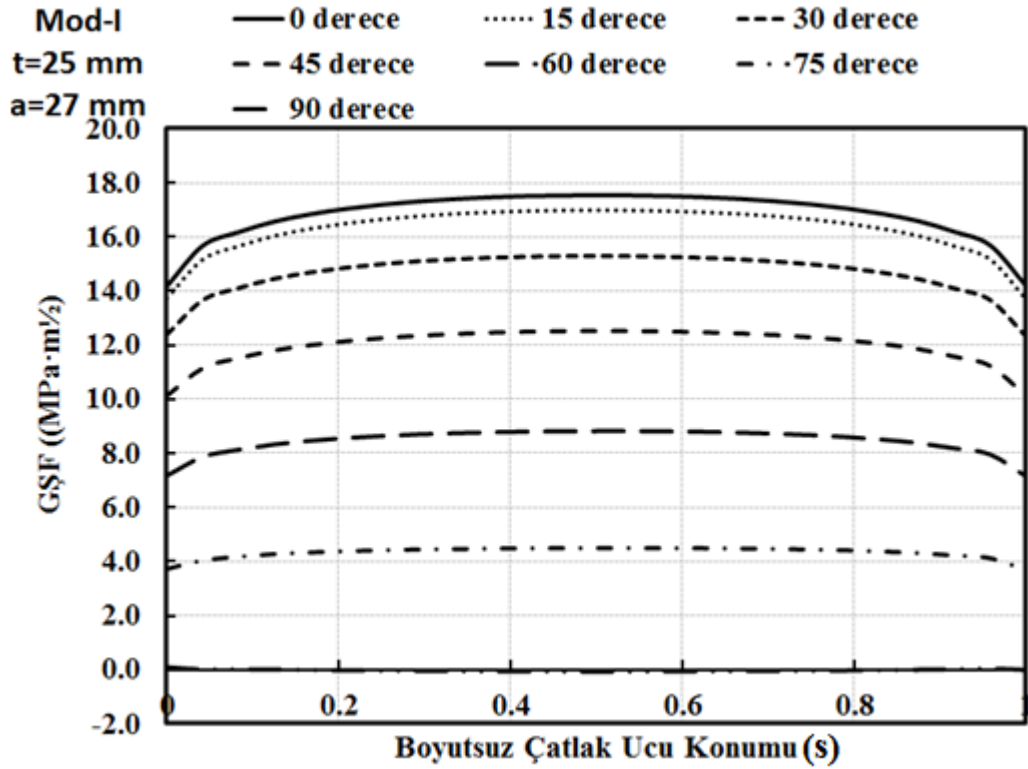
Şekil 3.36. CTT numunesinin P=10 kN, t=25 mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri



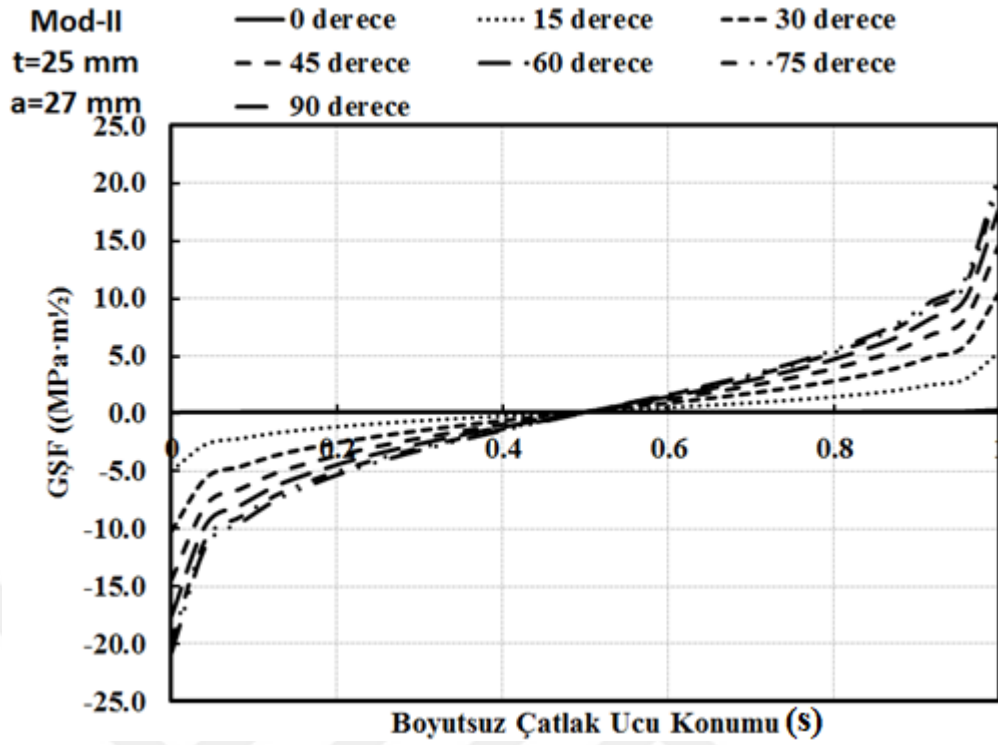
Şekil 3.37. CTT numunesinin P=10 kN, t=25 mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri



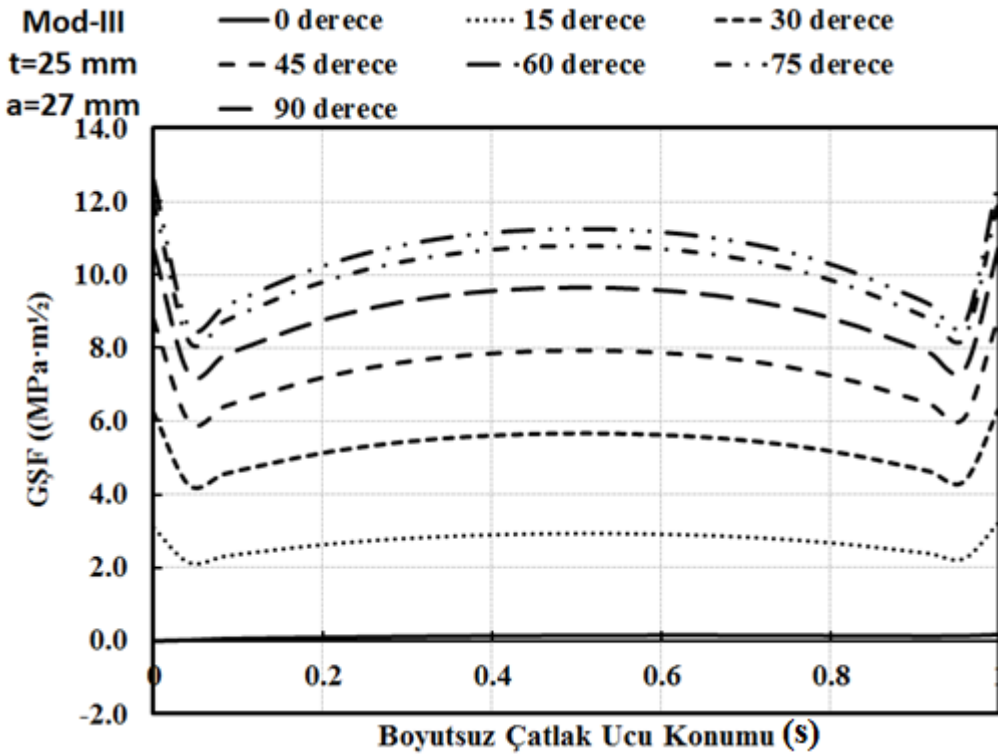
Şekil 3.38. CTT numunesinin P=10 kN, t=25 mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri



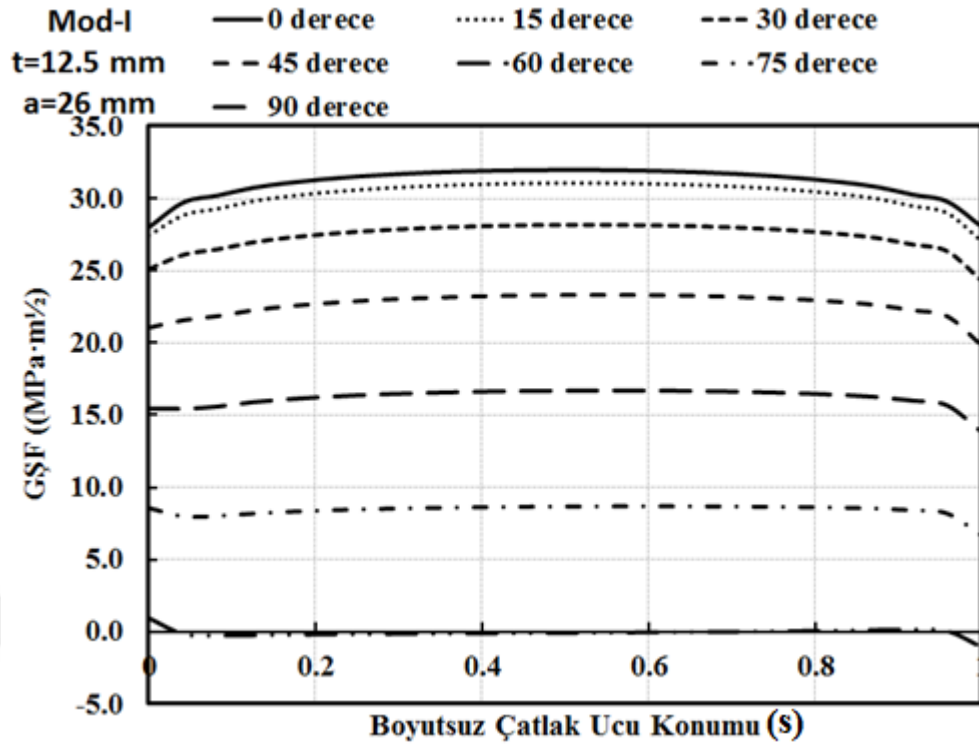
Şekil 3.39. CTT numunesinin P=10 kN, t=25 mm ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri



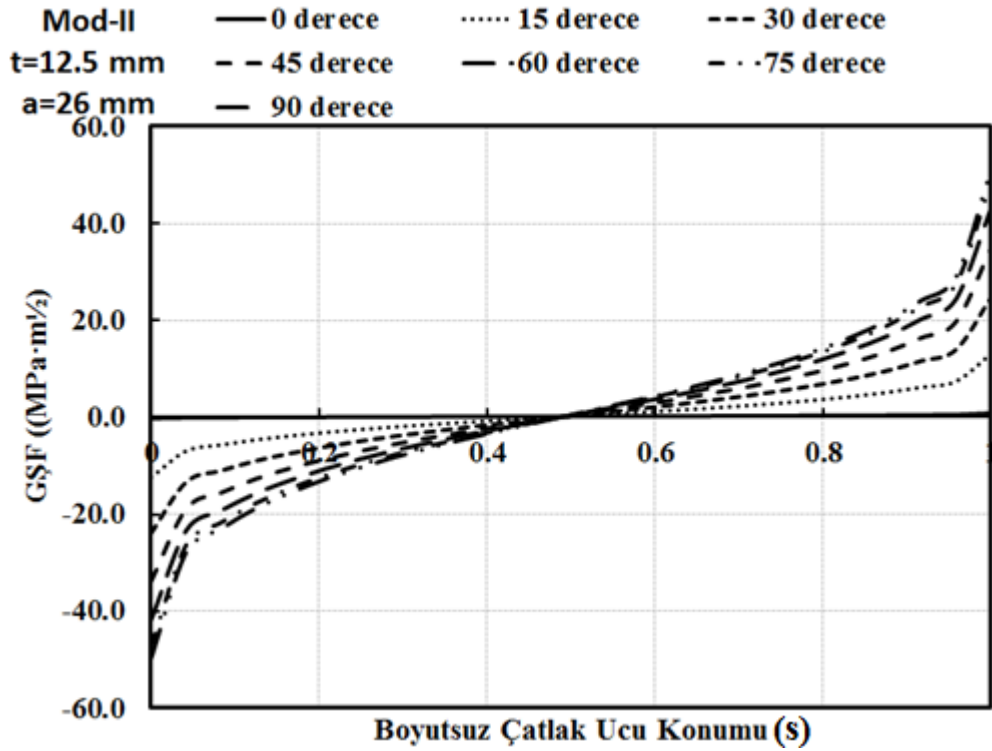
Şekil 3.40. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$, $t=25\text{ mm}$ ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri



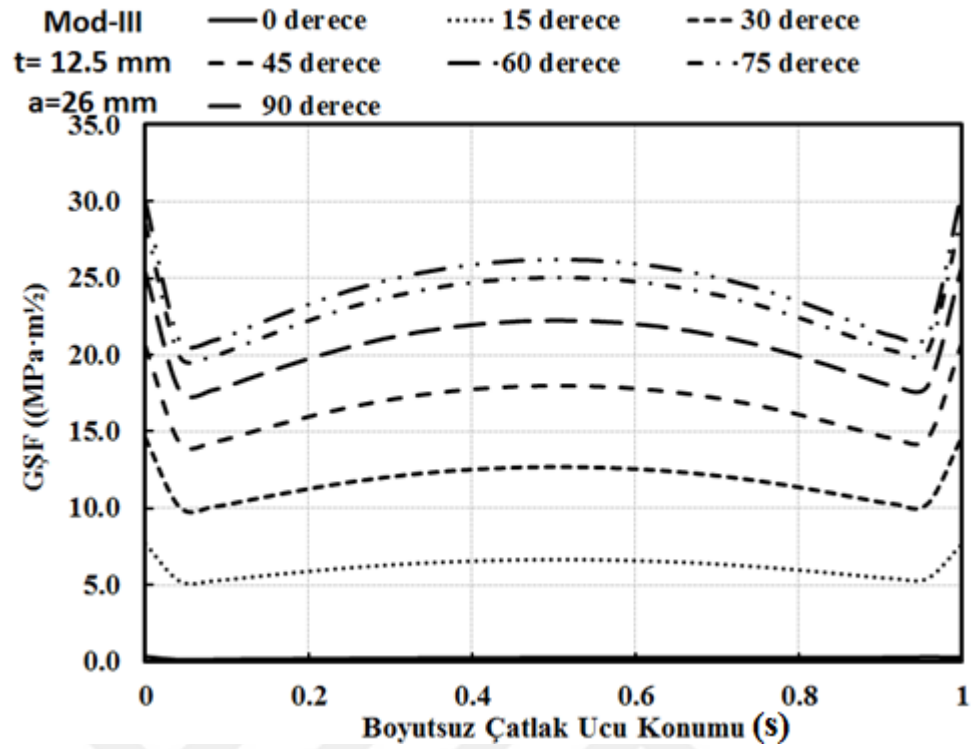
Şekil 3.41. CTT numunesinin $P=10\text{ kN}$, $t=25\text{ mm}$ ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri



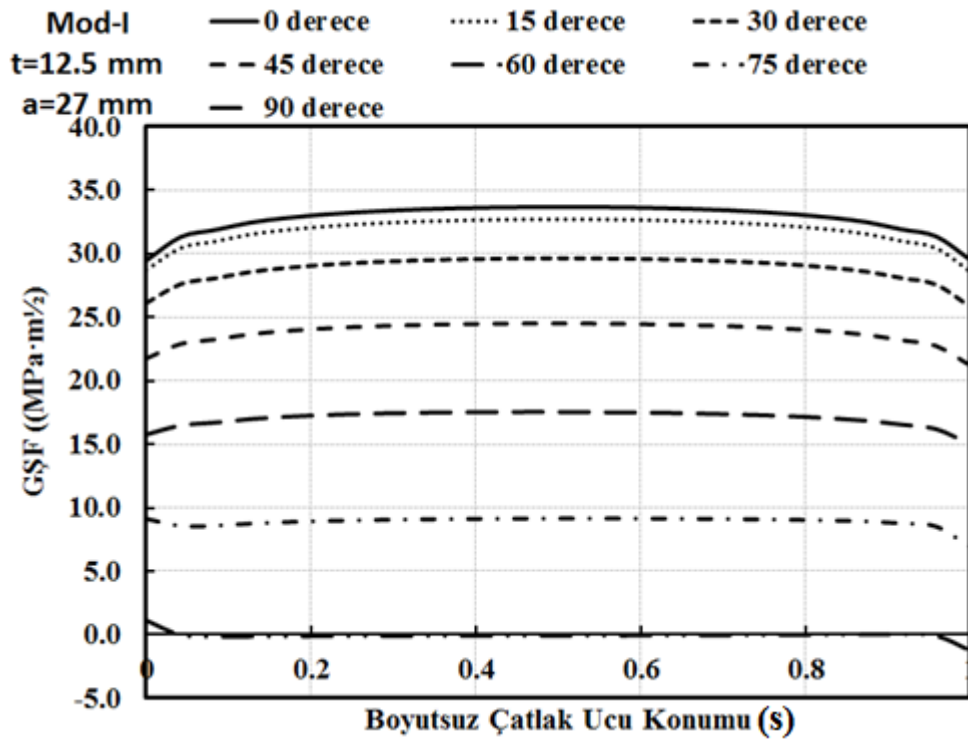
Şekil 3.42. CTT numunesinin P=10 kN, t=12,5 mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri



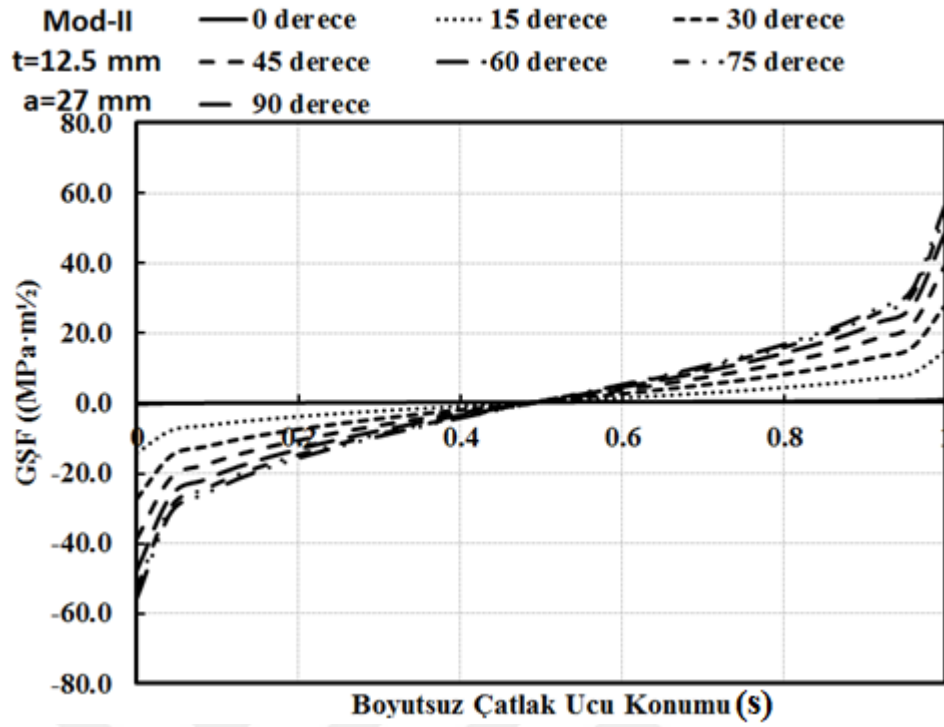
Şekil 3.43. CTT numunesinin P=10 kN, t=12,5 mm ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri



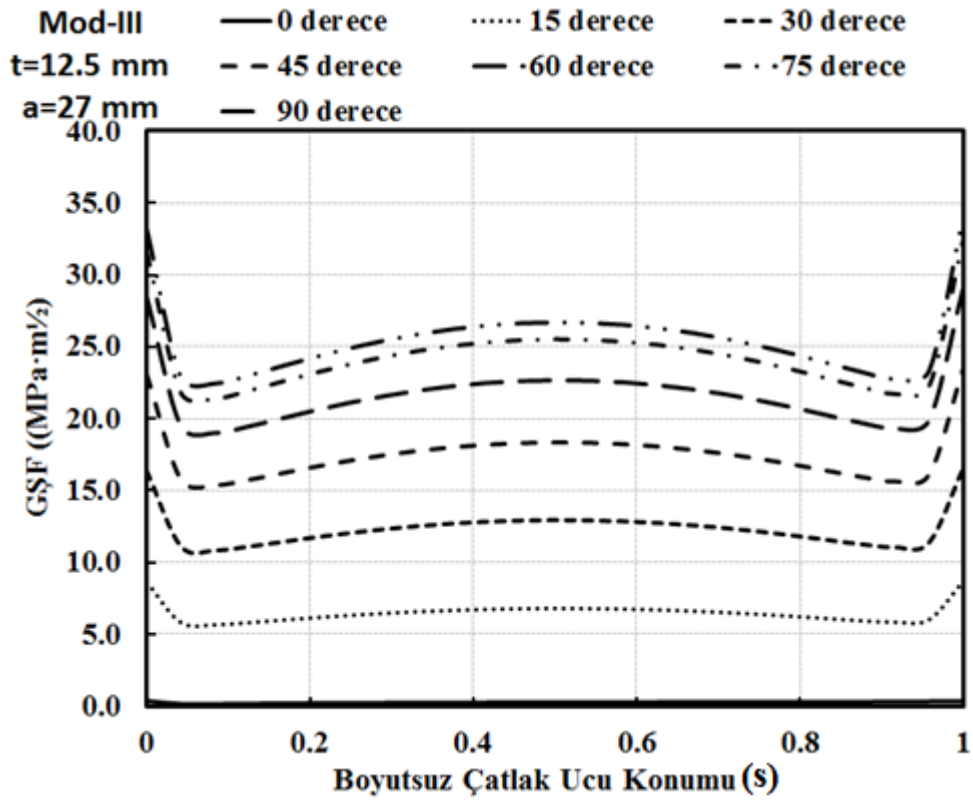
Şekil 3.44. CTT numunesinin $P=10 \text{ kN}$, $t=12,5 \text{ mm}$ ve 26 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri



Şekil 3.45. CTT numunesinin $P=10 \text{ kN}$, $t=12,5 \text{ mm}$ ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-I gerilme şiddet faktörleri



Şekil 3.46. CTT numunesinin P=10 kN, t=12,5 mm ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-II gerilme şiddet faktörleri

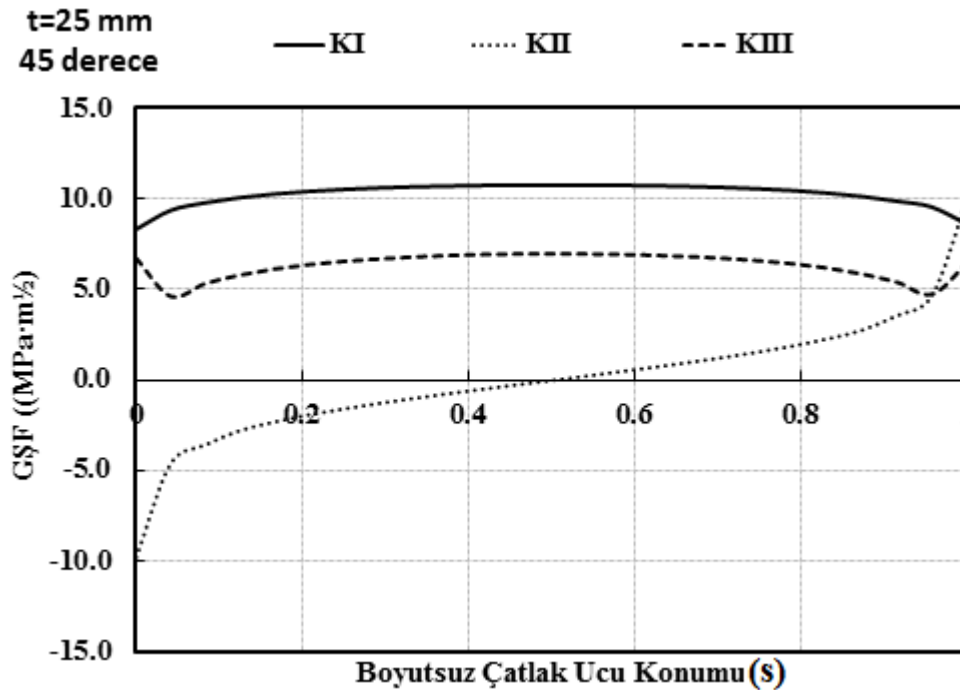


Şekil 3.47. CTT numunesinin P=10 kN, t=12,5 mm ve 27 mm çatlak uzunluğu için 7 farklı yükleme açısında Mod-III gerilme şiddet faktörleri

3.4.7. Cıvatalardaki sıkıştırma kuvvetini termal yüklerle sağlayarak yapılan analizler

Bu yapılan analizde cıvatalarda oluşan sıkıştırma kuvvetinin gerilme şiddet faktörlerine ve cıvata üzerindeki gerilme dağılımlarına etkisi araştırılmıştır. Çünkü daha önceki bölümlerde bahsi geçen analizlerde sadece temas yüzeyi durumları incelenmiş ve sıkıştırma kuvveti göz ardı edilmiştir. Bu amaçla cıvatalara -50°C lik bir sıcaklık uygulanarak sonuçlar mukayese edilmiştir. Böylece, cıvatalarda ön sıkıştırma kuvveti oluşturulmuştur.

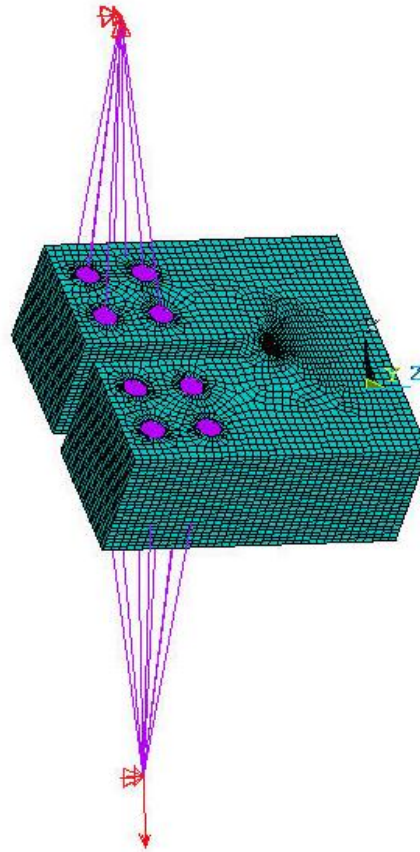
Şekil 3.48.'de 25 mm et kalınlığına sahip CTT numunesi için 45° 'lik açıda, 25 mm çatlak uzunluğu için gerçekleştirilen analizin gerilme şiddet faktörleri değerleri görülmektedir. Temas yüzeyi kullanılmadan sıkıştırma kuvvetinin termal kuvvetlerle verilmeye çalışıldığı bu analizlerden elde edilen sonuçlara göre, bu yöntemle elde edilen KI ve KIII değerlerinde yemas yüzeyli analizlere göre yaklaşık % 3 daha fazla GŞF değerleri elde edilmiştir. Bu yöntemin standart yemas yüzeyi tipi ile yapılan analizlere kıyaslandığında, çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.



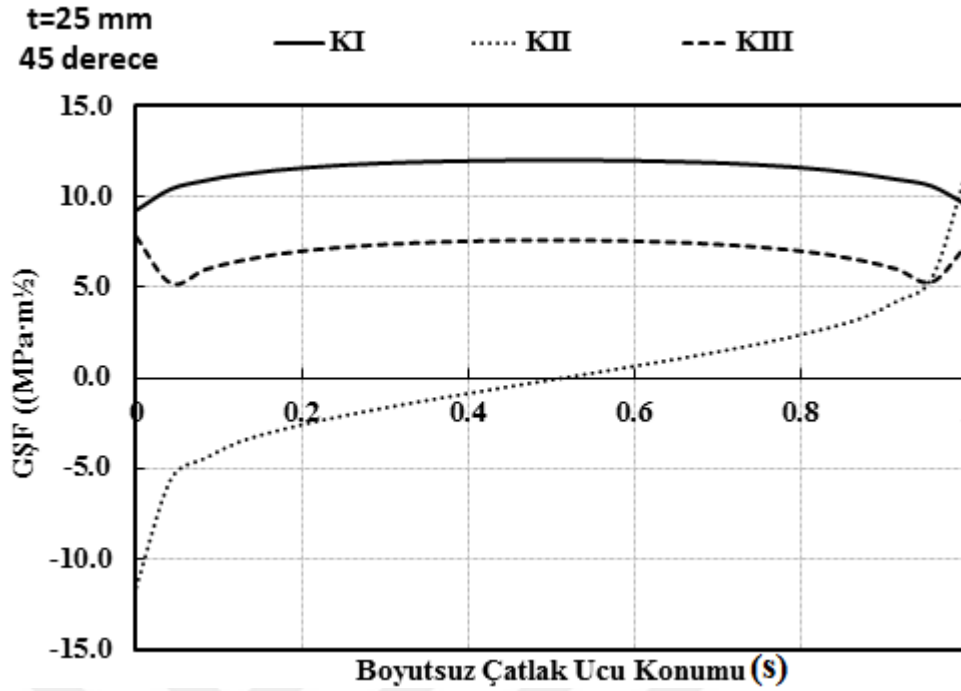
Şekil 3.48. CTT numunesinin $\theta=45^{\circ}$, $P=10$ kN, $t=25$ mm için gerilme şiddet faktörleri

3.4.8. Bağlantı (Link) elemanlar kullanılarak yapılan analizler

Bu bölümde anlatılacak olan analizde; “Tutucular, cıvatalar ve dolayısıyla temas yüzeyleri kullanılmadan, bunların yerine link elemanlar kullanarak aynı analiz sonuçları elde edilebilir mi?” veya “Bu sonuçlara ne kadar yaklaşılabılır?” sorularına cevap aranmıştır. Bu doğrultuda Şekil 3.49.’da gösterildiği gibi, numune link elemanlarla bağlanmaktadır. Bu işlem yapılırken sınır şartları ve uygulanacak kuvvet daha önceki analizlerde pimlerin bulunduğu noktalardan verilmiştir. Numune cıvata deliklerindeki gerilme dağılımlarının, cıvata kullanılan analiz değerlerine yakın sonuçlar elde edebilmek adına, olabildiğince çok düğüm noktası ile bağlantı kurulmuştur. Elde edilen sonuçlar ve gerilme değerleri temas yüzeyi analizleri ile mukayese edilmiştir.



Şekil 3.49. Bağlantı (Link) elemanlar kullanılarak analizi yapılan CTT Numunesi



Şekil 3.50. CTT numunesinin bağlantı (link) elemanlar kullanılarak $\theta=45^\circ$, $P=10$ kN, $t=12,5$ mm için gerilme şiddet faktörleri

Şekil 3.50.'de 25 mm et kalınlığına sahip CTT numunesi için 45° 'lik açıda, 25 mm çatlak uzunluğu için bağlantı (link) elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen analizin gerilme şiddet faktörleri değerleri görülmektedir.

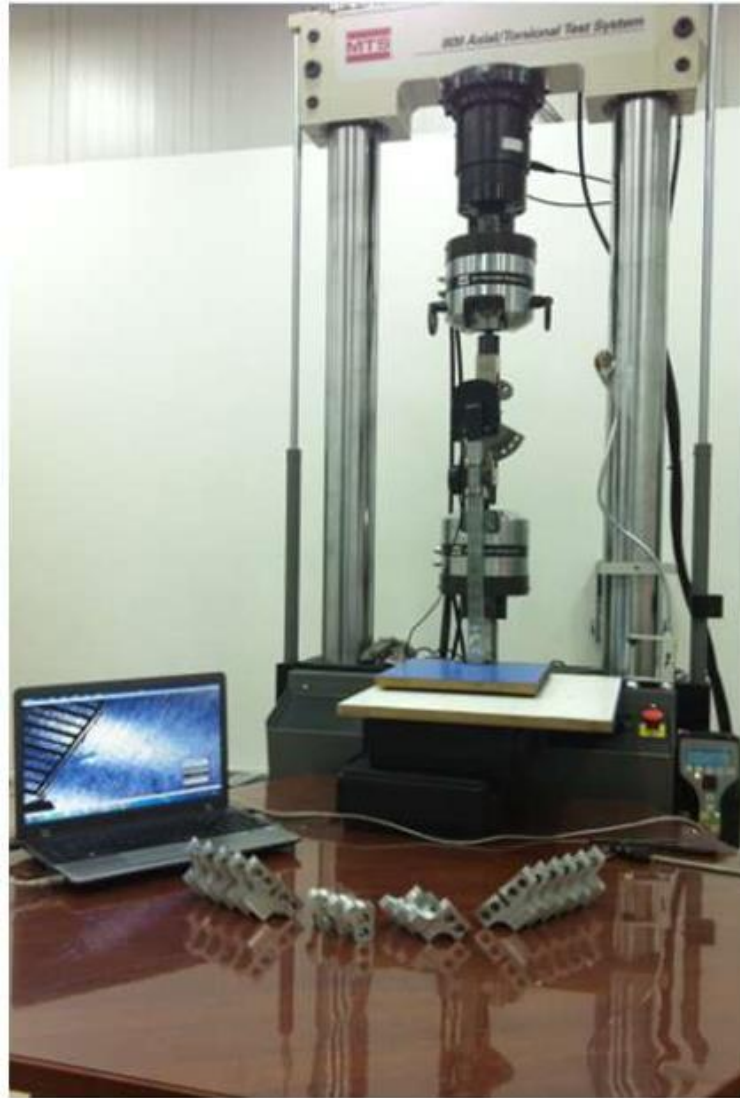
Yapılan analizlerde en doğru ve en yakın sonuçlara ulaştığımız standart yemas yüzeyi tipi ile yapılan analizler baz alındığında, bağlantı (link) elemanlar kullanılarak yapılan analizlerde, KII değerlerinde yaklaşık olarak %7-8, KI ve KIII değerlerinde ise %9 oranında artışlar olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, tutucular, pimler ve yemas yüzeyi tiplerinin deney sonuçlarına etkisinin göz ardı edilemeyeceği ortaya konmuştur.

Her ne kadar fark % 8-9 olarak görülse de, detaylı temas yüzeyleri vb. tanımlamalar gerektirmedikinden dolayı, bu sonuç diğer analizlere kıyaslandığında çok hızlı elde edilen bir sonuçtur. Dolayısıyla, mühendislikte ön sonuç elde etmek amacıyla yapılacak olan analizlerde kullanılabilir.

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER

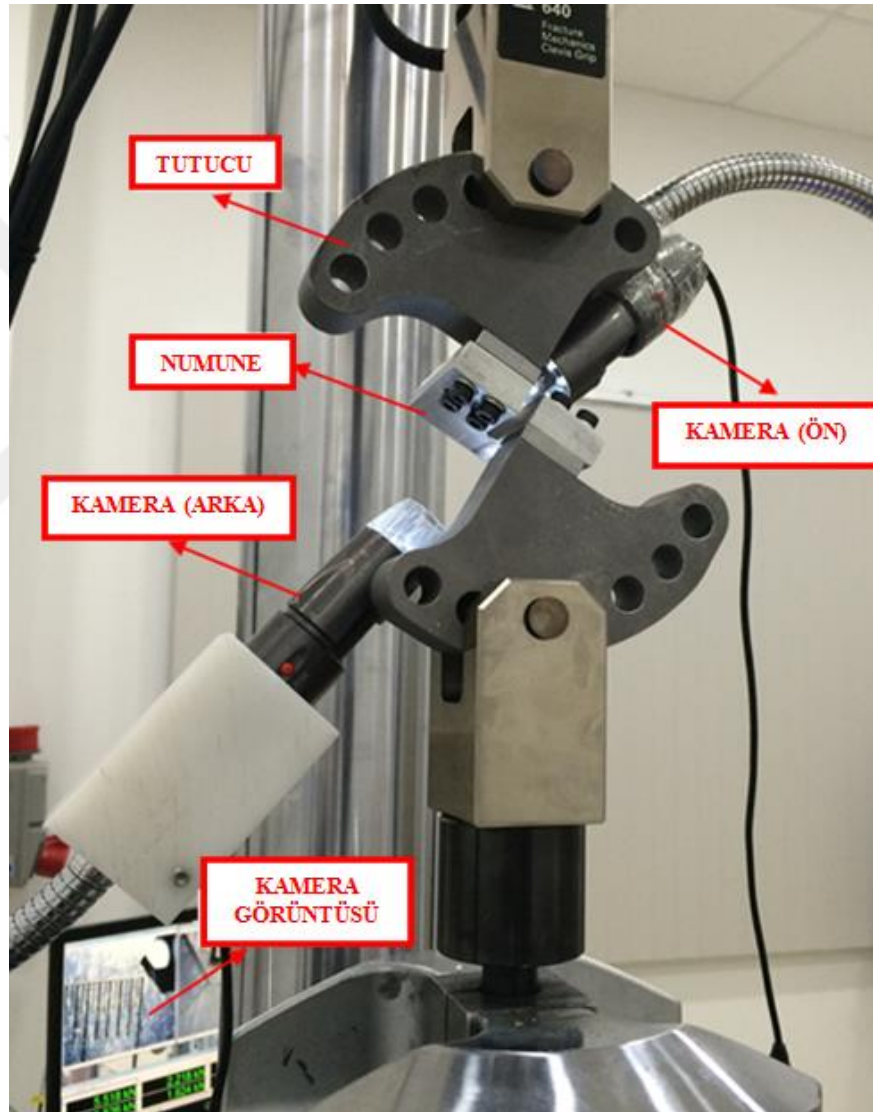
4.1. Deney Seti Tanımı

Mod-I/III CTT testleri Sakarya Üniversitesi Hesaplamalı ve Deneysel Kırılma Mekaniği Labaratuvarı'nda bulunan, 100 kN ve 1100 Nm kapasiteli, hem eksenel çekme hem de burulma yorulma yüklemesi yapabilen MTS yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Mod-I/III testleri için kullanılan MTS yorulma cihazının genel görüntüsü [10].

Mod-I/III CTT testlerinde çatlak ilerlemesi ön ve arka yüzeyden olmak üzere iki kamera ile izlenmektedir. Kullanılan kameralar 800X yakınlaştırma özelliğine sahiptir. Kameralardan gelen görüntü anlık olarak bilgisayar ekranına yansıtılmakta ve ekran görüntüsü belirli aralıklarla kaydedilmektedir. Yorulma testleri için, daha sonra ekran görüntüleri yardımı ile çevrim sayısı ve çatlak boyu arasındaki ilişki belirlenebilmektedir. Şekil 4.2.'de 60°'lik açı ile bağlanmış bir numune ve deney düzeneği detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 4.2. Mod-I/III testi için kullanılan test düzeneği [10].

Çatlak görüntüsü ve anlık deney verilerinin izlendiği ekranın görüntüsü Şekil 4.3.'de verilmiştir. Şekilde numunenin arka ve ön yüzündeki çatlaklar görülmektedir.

Ekranın alt kısmında çevrim sayısı, yük ve yer değıştirme değeri gibi veriler görölmektedir. Ekranın sağ tarafında görölen deney ayar ekranında ise frekans, yük-genlik değeri ve yorulma cihazına ait birçok ayarlar yapılabilmektedir.



Şekil 4.3. Deney takip ekranı [10]

Mod-I/III testlerinde kullanılmak üzere Compact Tension Tearing (CTT – Bu isim literatürde bulunamamıştır, ancak Mod-I/III deneylerinde kullanılan bu tür numuneler için uygun bir isim olduğu düşünülmüştür.) numunesi hazırlanmıştır. Şekil 4.4.’te CTT numunesine ait bir görüntü verilmiştir. Numunenin tasarımında, literatürde bulunan standart Compact Tension (CT) test numunesinin ölçü ve oranlarından yola çıkılmıştır. Mod-I/III testlerinde numuneye kayma yükü uygulanacağı için tutucu ve numune arasında cıvatalı bağlantı tipi kullanılmıştır. Bu şekilde cıvata dişleri numuneye verilen mod-III yırtma yükünü kaydırmadan numuneye uygulamaktadır. Şekil 4.4.’te görölen dört cıvata deliğinin merkezi ile çentik ucu arasındaki mesafe 23,7 mm olarak ayarlanmıştır. Bu mesafe, standart CT (compact tension) numunesinde de aynıdır.



Şekil 4.4. 12,5 mm kalınlıktaki mod-I/III CTT numunesi

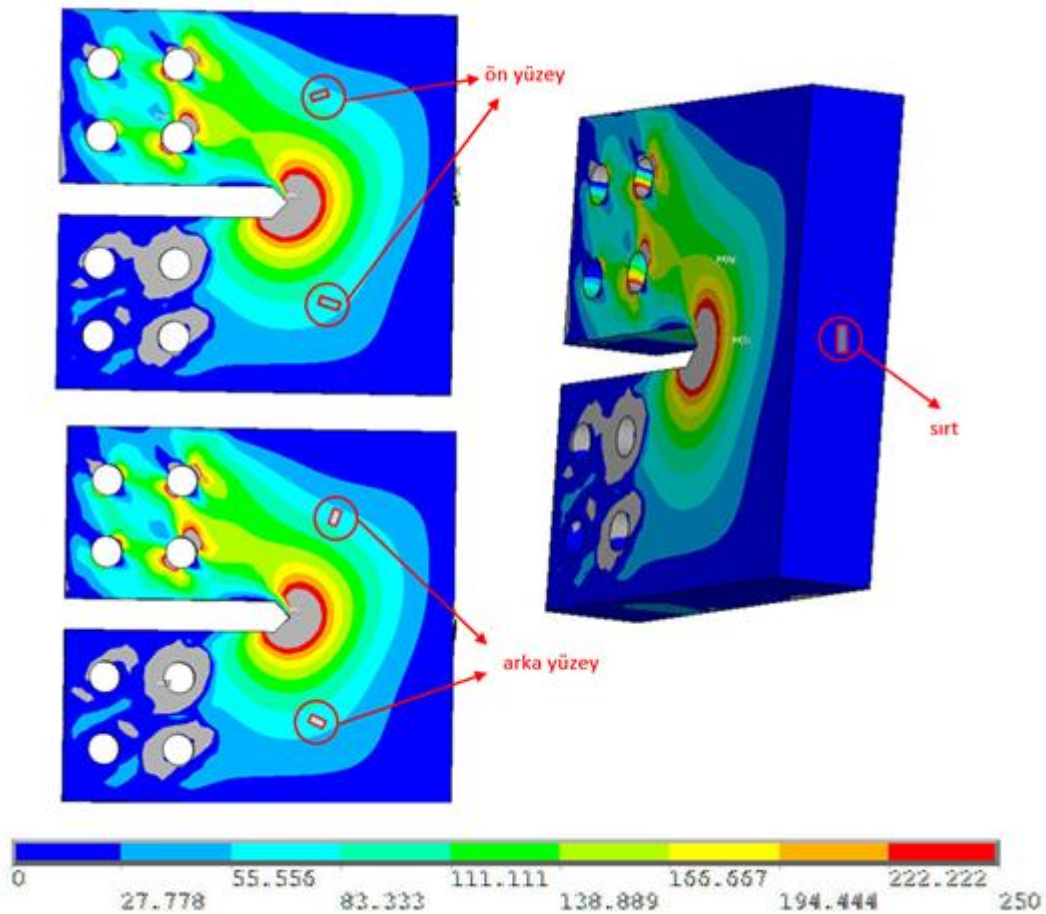
Mod-I/III CTT deney numunesi için değişik açılarda ($\theta = 0^\circ - 15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ - 90^\circ$) yükleme yapabilecek tutucu tasarlanmıştır. Tutucu, üzerindeki pim delikleri yardımı ile test cihazına bağlanmaktadır. Numuneye farklı açılarda yükleme yapmak için farklı açılara göre ayarlanmış pim delikleri kullanılmaktadır. Her açıda tutucuya uygulanan yük, numunenin ekseninden geçecek şekilde tasarlanmıştır. Tutucu ve üzerindeki farklı açılardaki pim delikleri Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Mod-I/III CTT numune tutucusu

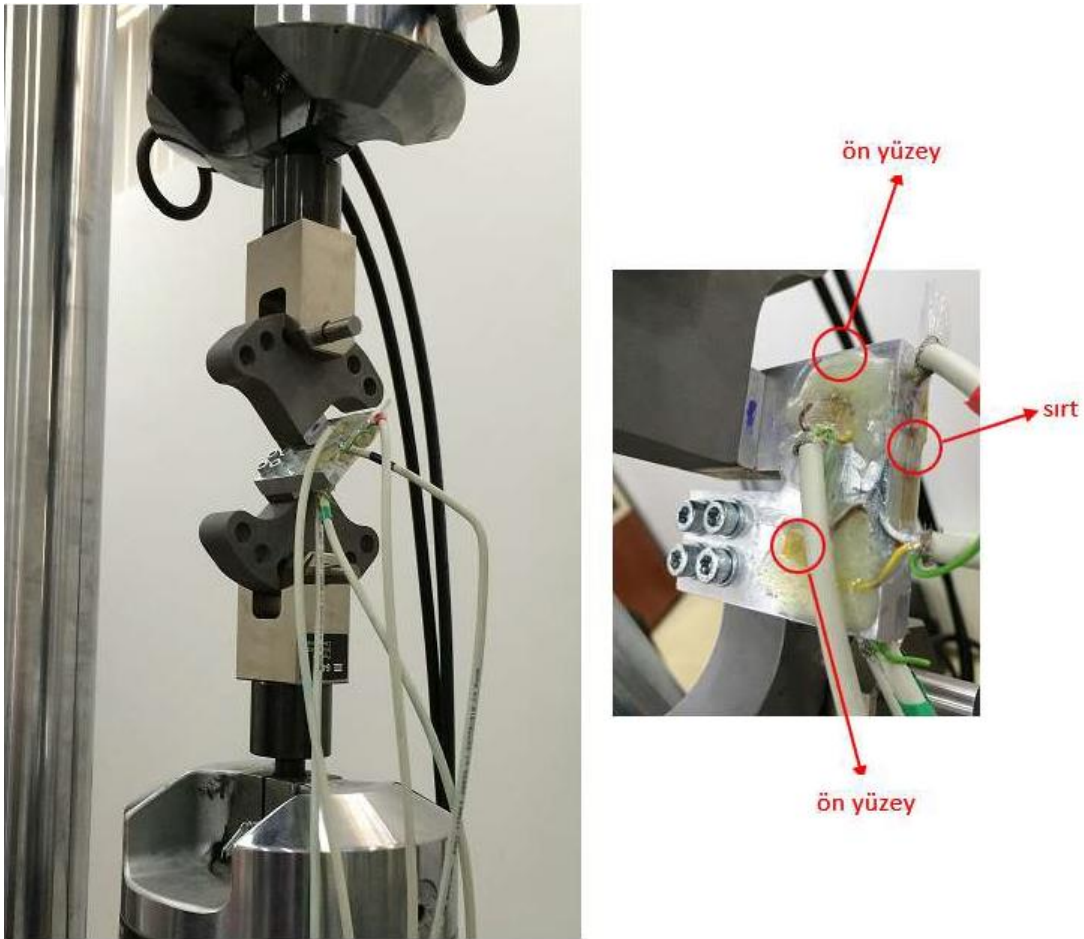
4.2. Strain Gage Doğrulama Çalışması

Simülasyon sonuçları ile deney sonuçlarını karşılaştırmak için ön çatlaksız mod I/III CTT numunesi ile strain-gage uygulaması gerçekleştirilerek önce bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6.'da görülen strain-gage yerleşim konumları, 45°'lik Mod-I/III yükleme durumunda elde edilen asal gerilmeler ve yönlerine göre belirlenmiş ve numune üzerine yapıştırılmıştır. Numunenin 5 noktasına strain-gage yerleştirilmiştir. Şekil 4.7.'de deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü verilmiştir. Deney numunesi üzerinde 0'dan başlayıp 1'er kN artırılarak 6 kN yük uygulanmış, daha sonra 1'er kN azaltılarak numune yüksüz konuma getirilmiştir.



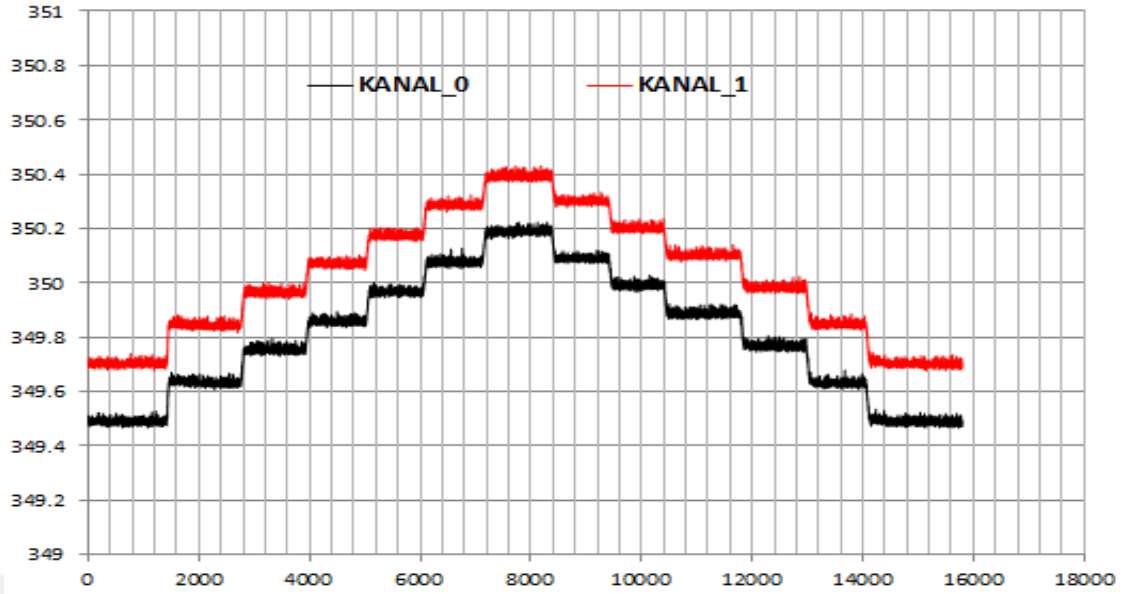
Şekil 4.6. $\theta = 45^\circ$ Mod-I/III yüklemesinde 6 kN yüklemeye gerçekleştirilen gerilme analizi sonrası numune oluşun 1. asal gerilmeler ve strain-gagelerin yerleştirildiği yerler.

Toplam beş adet strain-gage numune üzerine yapıştırılmıştır. Strain-gage verilerinin alındığı veri toplama cihazı dört kanallı olduğundan dolayı, aynı şartlarda iki aşamada test değerleri alınmıştır. İlk testte arka yüzeydeki strain-gage değerleri alınmıştır. İlk aşamada yapılan deney esnasında strain gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4.8.'de verilmiştir. İkinci aşamada numune ön yüzeyi ve sırtındaki birim şekil değişimi değerleri alınmıştır.



Şekil 4.7. $\theta = 45^\circ$ Mod-I/III yüklemesi altında 6 kN' ye kadar değişen yüklerde gerçekleştirilen deneyden bir kesit görüntüsü ve numuneye yapıştırılan strain-gagelerin yakın görünüşü [10].

Deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4.8.'de verilmiştir. Direnç değerlerinin yüke bağlı olarak lineer bir şekilde değişim gösterdiği şekilden görülmektedir.

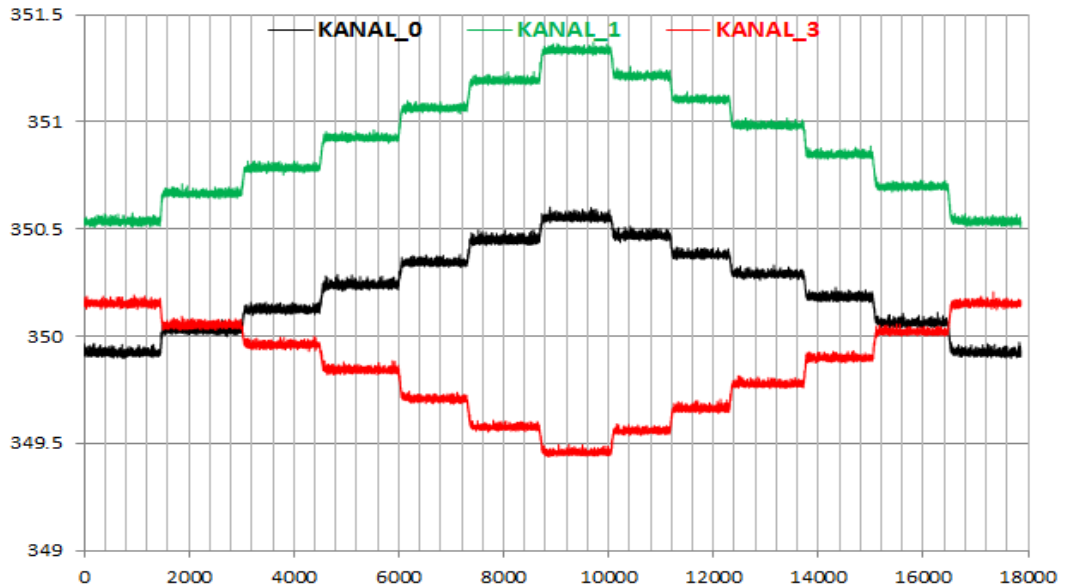


Şekil 4.8. Mod-I/III CTT numune için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana (yüke) bağlı değişim grafiği.

Deney sonrası her bir yük değeri için ölçülen direnç değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Daha sonra hangi yük değerleri arasındaki birim şekil değişimi miktarı hesaplanacak ise o yüklere karşılık gelen dirençlerin değişim oranı ($\Delta R/R$) belirlenmekte ve bu oran gage faktörüne (G) bölündüğünde ($\Delta R/R/G$), o yükleme arasındaki birim şekil değişimi miktarı hesaplanmış olmaktadır. Gage faktörü strain-gage' in türüne göre farklılık gösterdiği için bu değer strain-gage' in temin edildiği üretici firma tarafından gerekli testler gerçekleştirilerek belirlenmektedir. Simülasyon 10 kN yükleme durumunda gerçekleştirildiği için, deney sonrası herhangi iki yük arasındaki birim şekil değişimi miktarı hesaplandıktan sonra, aradaki yük farkının 10 kN olması durumunda beklenen birim şekil değişimi miktarı lineer interpolasyon yöntemiyle hesaplanarak, simülasyon sonucunda elde edilen birim şekil değişimi miktarı ile mukayese edilebilmektedir. Simülasyonda ve deneyde 25 mm kalınlıkta numune kullanıldığı için interpolasyon yöntemine gerek duyulmamıştır.

	ORTALAMA							
YÜK (kN)	KANAL_0		KANAL_1		KANAL_2		KANAL_3	
0	349.4896774		349.7016021		-		-	
1	349.6314059		349.8436167		-		-	
2	349.7522939		349.9637927		-		-	
3	349.8561341		350.070202		-		-	
4	349.9646772		350.1730627		-		-	
5	350.0744376		350.2852936		-		-	
6	350.188121		350.3920163		-		-	
5	350.0889826		350.2986096		-		-	
4	349.9901508		350.1999332		-		-	
3	349.8855071		350.1013412		-		-	
2	349.7670057		349.9811896		-		-	
1	349.6303573		349.8470392		-		-	
0	349.4885652		349.7017148		-		-	
	KANAL_0	FARK %	KANAL_1	FARK %	KANAL_2	FARK %	KANAL_3	FARK %
0-1 kN için şekil değişimi	0.001865876	77.39834964	0.001868509	38.2339858	-		-	
1-2 kN için şekil değişimi	0.001590861	51.25131463	0.001580532	16.92919469	-		-	
2-3 kN için şekil değişimi	0.001366043	29.87664444	0.001398995	3.498913603	-		-	
3-4 kN için şekil değişimi	0.001427488	35.71855052	0.001351929	0.016919263	-		-	
4-5 kN için şekil değişimi	0.00144305	37.19811508	0.001474652	9.096102231	-		-	
5-6 kN için şekil değişimi	0.001494156	42.05709015	0.001401827	3.708453373	-		-	
6-5 kN için şekil değişimi	0.001302936	23.87678629	0.001226872	-9.234852709	-		-	
5-4 kN için şekil değişimi	0.001299272	23.52846796	0.001296453	-4.087202877	-		-	
4-3 kN için şekil değişimi	0.00137609	30.8319206	0.001295709	-4.142289263	-		-	
3-2 kN için şekil değişimi	0.001558849	48.20775546	0.00157959	16.85949789	-		-	
2-1 kN için şekil değişimi	0.001798272	70.97088393	0.001764304	30.52479742	-		-	
1-0 kN için şekil değişimi	0.001866718	77.47838082	0.001912056	41.45567429	-		-	
	KANAL_0	FARK %	KANAL_1	FARK %	KANAL_2	FARK %	KANAL_3	FARK %
0-3 kN için şekil değişimi	0.00156348	48.64799403	0.001571671	16.27362255	-		-	
3-6 kN için şekil değişimi	0.001414931	34.52475636	0.001370737	1.408368516	-		-	
6-1 kN için şekil değişimi	0.001427238	35.69477258	0.001393655	3.103844628	-		-	
	KANAL_0	FARK %	KANAL_1	FARK %	KANAL_2	FARK %	KANAL_3	FARK %
0-1 kN için şekil değişimi	0.001865876	77.39834964	0.001868509	38.2339858	-		-	
0-2 kN için şekil değişimi	0.001728691	64.35550062	0.001724841	27.60533285	-		-	
0-3 kN için şekil değişimi	0.00160815	52.89507957	0.001616575	19.59572606	-		-	
0-4 kN için şekil değişimi	0.001563359	48.63652417	0.00155077	14.72737985	-		-	
0-5 kN için şekil değişimi	0.001539689	46.3861362	0.001533944	13.63054055	-		-	
0-6 kN için şekil değişimi	0.001532517	45.70424312	0.001513981	12.00570955	-		-	
	KANAL_0	FARK %	KANAL_1	FARK %	KANAL_2	FARK %	KANAL_3	FARK %
10 kN için ANSYS çözümündeki şekil değişimi	1.0518E-03	45.70	1.3517E-03	12.01	-		-	

Şekil 4.9: Mod-I/III CTT numune için strain-gagelerden ölçülen ortalama direnç ve birim şekil değişimi değerleri



Şekil 4.10: Mod-I/III CTT numune için deney esnasında strain-gagelerden ölçülen direnç değerlerinin zamana (yüke) bağlı değişim grafiği.

	ORTALAMA							
YÜK (kN)	KANAL_0		KANAL_1		KANAL_2		KANAL_3	
0	349.9223713		350.534474		-		350.1516201	
1	350.0275318		350.66454		-		350.0513383	
2	350.1237949		350.783661		-		349.9595299	
3	350.2377381		350.924834		-		349.8408557	
4	350.3418128		351.063761		-		349.7071002	
5	350.4483518		351.191862		-		349.5747001	
6	350.5521592		351.334204		-		349.456145	
5	350.4695195		351.215092		-		349.5560889	
4	350.379305		351.10474		-		349.7450231	
3	350.2842586		350.976967		-		349.780401	
2	350.1832342		350.846185		-		349.8969481	
1	350.0619771		350.697185		-		350.0187669	
0	349.9225899		350.532696		-		350.150789	
	KANAL_0	FARK %	KANAL_1	FARK %	KANAL_2	FARK %	KANAL_3	FARK %
0-1 kN için şekil değişimi	0.00138274	30.74323868	0.00170724	30.52280581	-		-0.001317728	-7.638039957
1-2 kN için şekil değişimi	0.001265369	19.64534305	0.00156299	19.49499159	-		-0.001206731	-15.41803418
2-3 kN için şekil değişimi	0.00149736	41.58093951	0.0018517	41.56711888	-		-0.001560263	9.36167852
3-4 kN için şekil değişimi	0.001367231	29.2767731	0.00182152	39.25964215	-		-0.001759142	23.30145944
4-5 kN için şekil değişimi	0.001399189	32.29849582	0.00167891	28.35666217	-		-0.001741981	22.0986132
5-6 kN için şekil değişimi	0.001362899	28.86715372	0.00186487	42.57388719	-		-0.001560415	9.372331885
6-5 kN için şekil değişimi	0.00108492	2.583187808	0.00156041	19.29773313	-		-0.001315525	-7.792452473
5-4 kN için şekil değişimi	0.001184671	12.01503231	0.00144612	10.55969141	-		-0.002485528	74.21520998
4-3 kN için şekil değişimi	0.00124846	18.04649874	0.00167502	28.05962351	-		-0.000465368	-67.38154334
3-2 kN için şekil değişimi	0.001327366	25.50734576	0.00171511	31.12436231	-		-0.001532572	7.420739998
2-1 kN için şekil değişimi	0.001593756	50.69552277	0.00195486	49.45382419	-		-0.001601337	12.24065173
1-0 kN için şekil değişimi	0.001832781	73.29626125	0.00215908	65.06708624	-		-0.001734807	21.59575507
	KANAL_0	FARK %	KANAL_1	FARK %	KANAL_2	FARK %	KANAL_3	FARK %
0-3 kN için şekil değişimi	0.001343842	27.0652234	0.0016605	26.94950213	-		-0.001323363	-7.243069488
3-6 kN için şekil değişimi	0.001338606	26.57012063	0.00173943	32.98363259	-		-0.001639713	14.93044397
6-1 kN için şekil değişimi	0.001252759	18.45302514	0.00162508	24.24178916	-		-0.001438072	0.797057933
	KANAL_0	FARK %	KANAL_1	FARK %	KANAL_2	FARK %	KANAL_3	FARK %
0-1 kN için şekil değişimi	0.00138274	30.74323868	0.00170724	30.52280581	-		-0.001317728	-7.638039957
0-2 kN için şekil değişimi	0.001324245	25.21226909	0.00163541	25.03106811	-		-0.001262057	-11.54014901
0-3 kN için şekil değişimi	0.001382237	30.69565835	0.00170794	30.57663076	-		-0.001361174	-4.592871474
0-4 kN için şekil değişimi	0.001378794	30.37006464	0.00173684	32.786154	-		-0.001460275	2.353353318
0-5 kN için şekil değişimi	0.001383208	30.78746733	0.00172576	31.93901791	-		-0.001516174	6.271404284
0-6 kN için şekil değişimi	0.001380165	30.49969918	0.00174953	33.75605971	-		-0.001523119	6.758191376
	KANAL_0	FARK %	KANAL_1	FARK %	KANAL_2	FARK %	KANAL_3	FARK %
10 kN için ANSYS çözümündeki şekil değişimi	1.0576E-03	30.50	1.3080E-03	33.76	-		-1.4267E-03	6.758191376

Şekil 4.11. Mod-I/III CTT numune için strain-gagelerden ölçülen ortalama direnç ve birim şekil değişimi değerleri

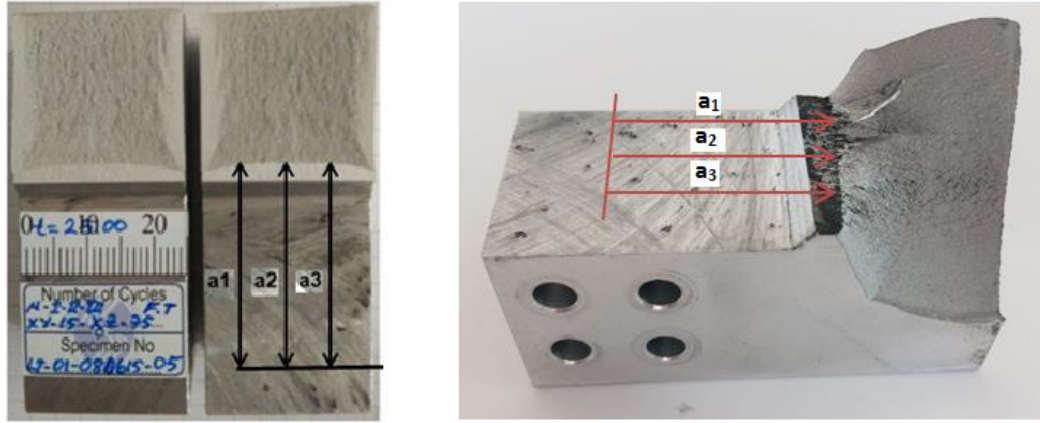
Şekil 4.10.'da CTT numunesi için her bir yük farkına karşılık gelen gerinim değerleri ölçülerek simülasyondan elde edilen gerinim değerleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi, arka yüzey için 0-6 kN arasındaki yüklemelerde hata oranları incelendiğinde, minimum %12, maksimum %45 mertebelerinde değişen bir hata oranı elde edilmiştir. Numune sırtı ve ön yüzey için de genel eğilimin ise Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi, ön yüzeyde yaklaşık %30, numune sırtında ise yaklaşık %7 mertebelerinde olduğu görüldüğü gerçekteştirilen simülasyonların, strain-gage ölçümleri ile makul seviyede yakınlık gösterdiği gözlemlenmiştir.

4.3. Mod-I Analiz ve Deney Sonuçları (K_{Ic} doğrulaması)

Daha karmaşık bir yükleme durumu olan mod-I/III yüklemeleri deneysel olarak incelenmeye başlamadan önce, deneysel sistemin mod-I kırılma tokluğu için doğru sonuçlar verdiği ispatlanmıştır.

Mod-I kırılma tokluğu testlerinden önce her bir numuneye 1,3 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Bu işlem için numune yüksek çözünürlüklü kameralarla izlenerek, ön çatlak uzunluğunun 1,3 mm'ye yakın bir değer elde edilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca numunelere de milimetrik gridler yerleştirilerek daha hassas sonuçlar alınması temin edilmiştir.

Ön çatlak oluşturulduktan sonra numuneye 5 N'luk bir ön yükleme uygulanmakta, ardından saniyede 500 N artan bir yük uygulanarak, yük kontrollü bir şekilde numune yüklenmektedir. Yükleme hızı standartta belirtilen sınırlar ($0,55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}} \geq \Delta K/\Delta t \geq 2,75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$) dikkate alınarak belirlenmiştir. Numune yükleme sonucu koptuktan sonra oluşan kuvvet-uzama grafiğinin tipine göre maksimum kritik yük (P_Q) belirlenmektedir. Bu işlem aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Test sonrasında kırılan numune yüzeyi milimetrik grid ve numara etiketi yapıştırılarak numune resmi hassas çözünürlüklü kamera ile çekilmektedir. Autocad programı veya sanal bilgisayar kumpası kullanılarak Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi a_1 , a_2 ve a_3 çatlak derinlik değerleri ölçülmektedir. Kırılma tokluğu için gerekli olan ölçümler alındıktan sonra, ASTM E399 [11] standartında yer alan ve aşağıdaki denklemde gösterilen formülasyon [12] kullanılarak numunelerin kırılma tokluğu hesaplanmaktadır.



Şekil 4.12. Temsili çatlak derinlik değerleri , a₁, a₂ ve a₃. [10]

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{B B_N} \sqrt{W}} \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0.866 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (4.1)$$

K_Q = Kırılma Tokluğu

P_Q = Belirlenen Kopma Yüğü

B = Numunenin Kalınlığı

B_N = Alternatif Yan Yivli Numunelerde Kalınlık ($B_N \geq 0.75 B$ olmalı)

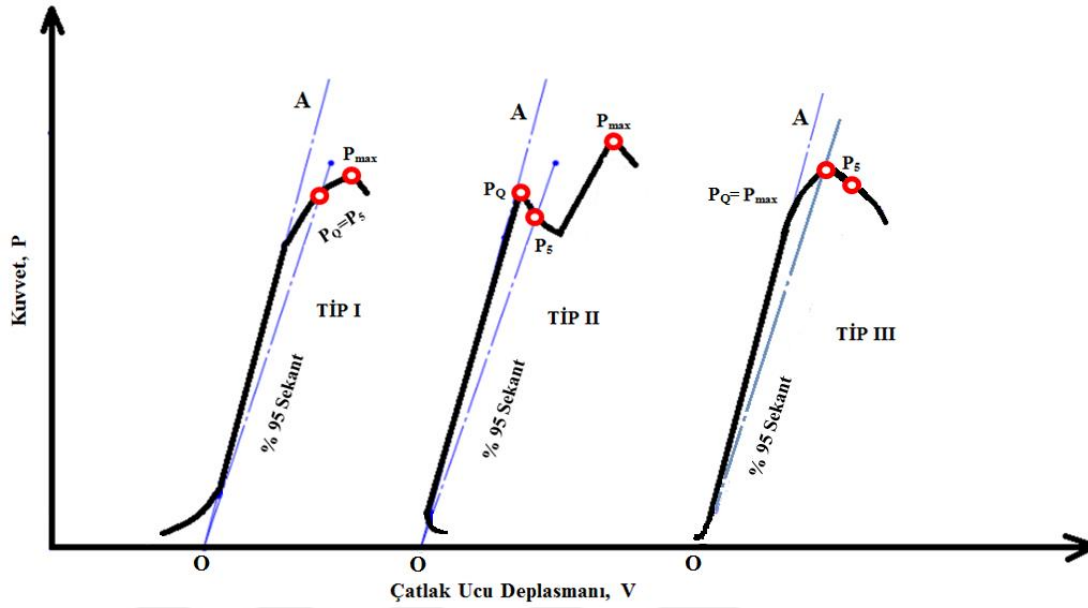
W = Numunenin Genişliği

a = Ortalama Çatlak Uzunluğu

Bir test esnasında, şartlı değer P_Q , Şekil 4.13.'te gösterildiği gibi sınır çizgisi OP_5 çizilerek belirlenir. Pratikte başlangıç noktası (O noktası), yer değiştirme ve kuvvet eksenlerinin kesişimi üzerinde olmak zorunda değildir. O noktası, çizginin başlangıçtaki doğrusal kısmı boyunca yer değiştirme eksenini ile kesiştiği yerde bulunmaktadır. Böylece, sekant hattı OP_5 'in hesaplanmasında, eğimin dönüş noktası, OA çizgisinin yer değiştirme eksenini ile kesiştiği noktada olmalıdır. P_Q kuvveti aşağıdaki gibi tanımlanır:

Kırılma tokluğu deneylerinde üç farklı grafik elde edilebilmektedir. Her bir durum için P_Q hesabı standartta ayrı bir tip olarak tanımlanmıştır. P_5 'in önündeki kayıta her noktadaki kuvvet P_5 'den düşükse (Şekil 4.13.-Tip I), P_5 değeri P_Q 'dur. Bununla

birlikte, P_5 'den önceki maksimum kuvveti aşılsa, (TİP II ve III), bu durumda maksimum kuvvet P_Q olur [11].



Şekil 4.13. Kuvvet- Yerdeğiştirme (CMOD) Kayıtlarının Temel Tipleri [11]

Bu sonuçlara göre 12,5 mm'lik numunede Mod-I için yapılan 2 test sonucunda a_1 , a_2 ve a_3 değerlerinin ortalama değerleri sırasıyla 25,6 mm ve 25,9 mm'dir. Bu değerler denklemde yerlerine konulduğunda kırılma tokluğu (K_v) değerleri sırasıyla 29,15 $\text{Mpa.m}^{0.5}$ ve 29,47 $\text{Mpa.m}^{0.5}$ bulunmuştur. Literatürde bu değer AL 7075 için kırılma tokluğu değeri 29 $\text{Mpa.m}^{0.5}$ 'dir. Bu veriler Tablo 4.1.'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1. Kırılma tokluğu testinde elde edilen veriler

	$K_Q(\text{MPa.m}^{0.5})$	$P_Q(\text{kN})$	B(mm)	W(mm)	a(mm)
Test 1	29,15	8,9	12,5	60	25,6
Test 2	29,47	9,1	12,5	60	25,9

Böylece, Mod-I/III test sisteminin Mod-I kırılma tokluğu için doğru sonuçlar verdiği ispatlanmıştır.

4.4. Karışık Mod Altında Kırılma Yükleri

4.4.1. Mod-I/III kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme testleri

Mod-I/III kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme testlerinden önce eksenel yük uygulanarak yorulma cihazında her bir numunede yaklaşık 1,3 mm ön çatlak oluşturulmuştur. Böylece, her bir numunede test öncesi çatlak uzunluğunun yaklaşık 25 mm olması hedeflenmiştir. Ön çatlak uzunluğunun belirlenmesinde numune üzerine yapıştırılmış olan ölçek etiketi ve kameralar kullanılmıştır.

Bu testlerde iki farklı kalınlıkta (25 mm ve 12,5 mm) numune üzerinde testler yapılmıştır. Mod-I/III için gerçekleştirilen deneylerin dağılımı Tablo 4.2.'de verilmiştir. Aşağıdaki tablodan da görüleceği üzere, farklı kalınlıklarda yapılan Mod-I/III kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme testleri için toplam 40 adet numune test edilmiştir.

Tablo 4.2. Mod I/III Test Matrisi

Kalınlık t=25mm							Kalınlık t=12,5mm					
K _c				da/dN			K _c			da/dN		
Toplam	Geçersiz	Geçerli		Toplam	Geçersiz	Geçerli	Toplam	Geçersiz	Geçerli	Toplam	Geçersiz	Geçerli
0 ⁰							3	1	2			
15 ⁰							1	-	1			
30 ⁰	2	-	2	2	-	2	2	-	2	5	1	4
45 ⁰	2	-	2	3	1	2	2	-	2	6	2	4
60 ⁰	2	-	2	2	-	2	2	-	2	2	-	2
75 ⁰							1	-	1	1	-	1
90 ⁰							1	-	1	1	-	1
Toplam	6	0	6	7	1	6	12	1	11	15	3	12

ASTM E399-12 standartında, yorulma ön çatlak oluşturulurken $K_{max} \leq 0,8K_Q$ olması gerektiği belirtilmiştir. Deneyler esnasında istenen limitler arasında kalabilmek için, maksimum K değeri kırılma tokluğu " K_{Ic} " değerinin yarısını geçmeyecek şekilde yük aralığı belirlenmiştir.

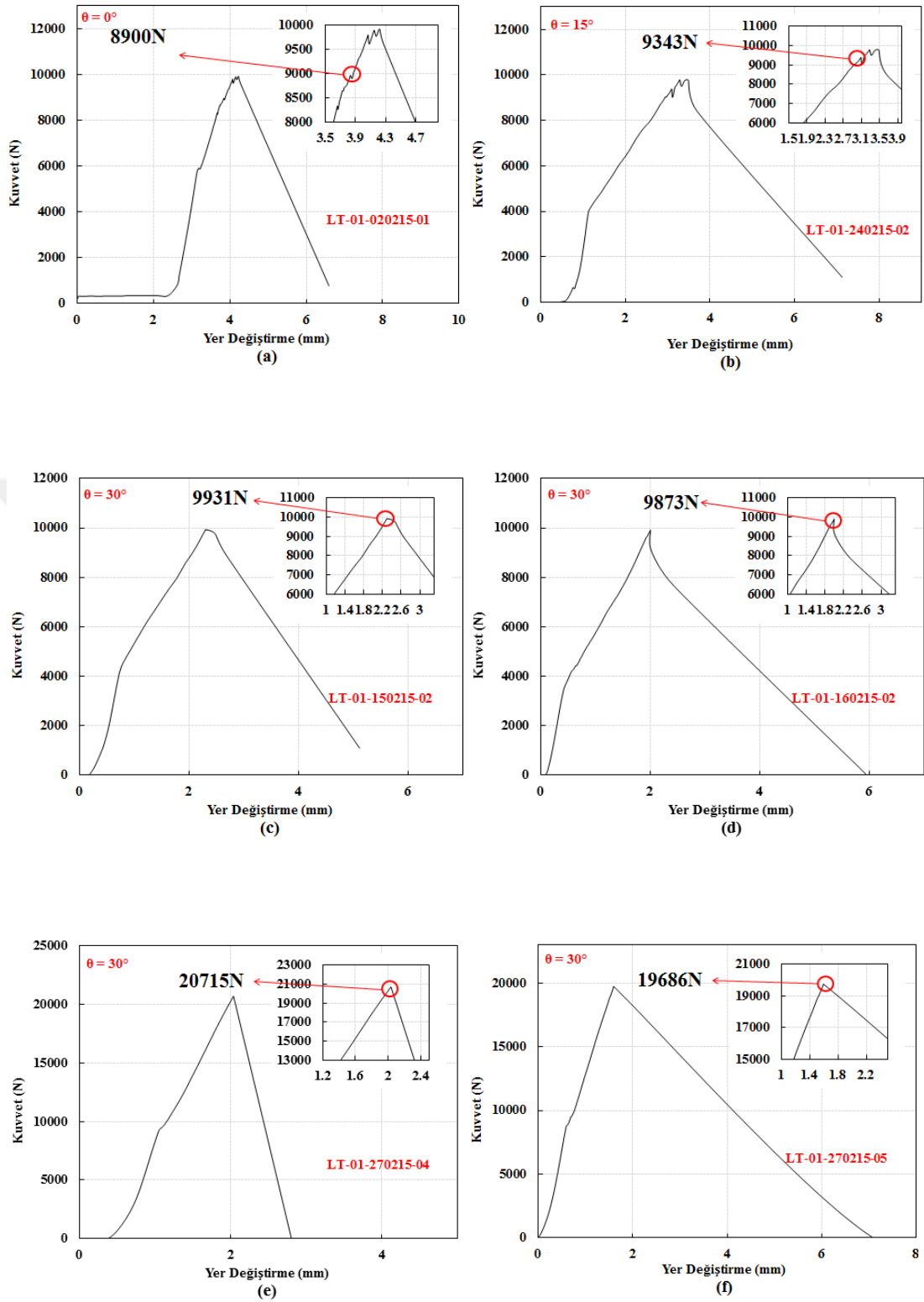
Maksimum K değeri, K_{Ic} 'nin yarısını geçmeyecek şekilde ($0,5K_{Ic}$) alınarak yorulma ön çatlaklığı için gerekli olan yük aralığı analizlerden elde edilen K değerleri kullanılarak belirlenmiştir. R-oranı (K_{min}/K_{max}) yine 0,1 alınmıştır.

Ön çatlaklı numune, tutucu üzerinde açılı olarak tasarlanmış delikler yardımı ile istenilen yükleme açısında test cihazına bağlanır. Mod-I/III kırılma tokluğu deneyi için ön çatlak oluşumu tamamlandıktan sonra eksenel çekme cihazı ile yük kontrollü olarak numune çekilerek kopartılmaktadır. Deneyde yükleme hızı aralığı ASTM E399-12 standardında yer alan “ $0,55 \text{ (Mpa.m)/s} \geq \Delta K/\Delta t \geq 2,75 \text{ (Mpa.m)/s}$ ” şartına göre farklı açılar için 0,35 – 0,7 kN/s aralığında alınmıştır. Şekil 4.14.’te mod-I/III kırılma tokluğu testleri için kullanılan numunelerin genel bir görünümü verilmiştir.

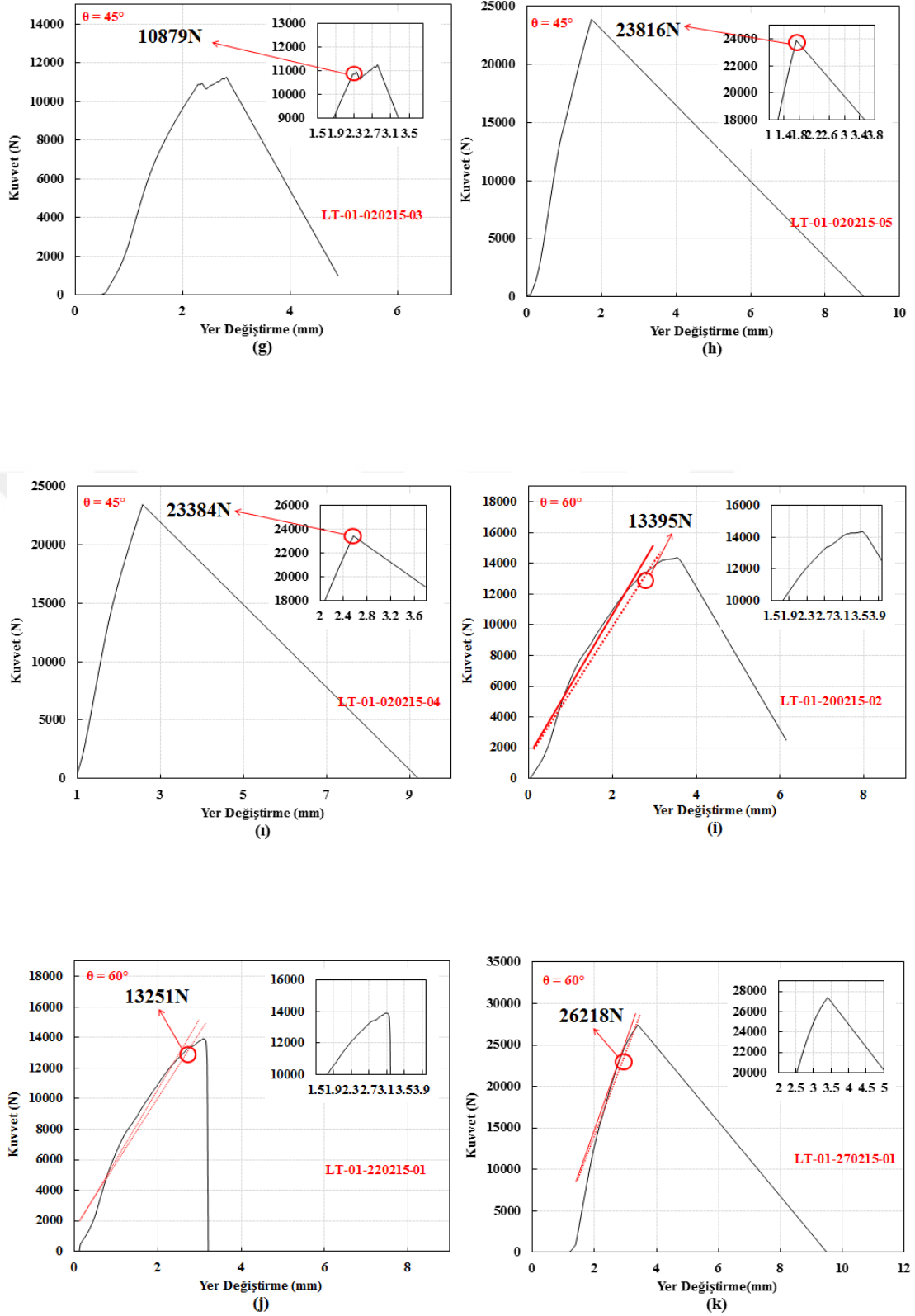


Şekil 4.14. Mod-I/III testleri sonrası numunelerin genel görünümü [10].

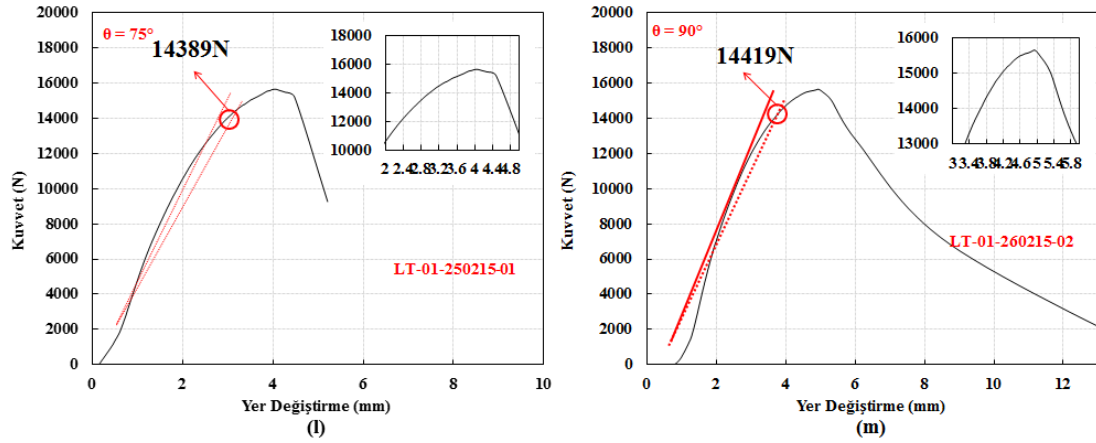
12,5 mm kalınlıktaki numunelerle yapılan kırılma tokluğu testleri sonucunda elde edilen yüzeylerde “shear-lip” alanının kırılma yüzeyine oranla yüksek olması nedeniyle, aynı deneyler (30° - 45° - 60° açı değerleri için) 25 mm kalınlıktaki numunelerle de tekrarlanmıştır. Kırılma tokluğu deneyleri sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.15. – 4.17.’de verilmiştir. $\theta = 15^\circ$ ve 30° testlerinden elde edilen grafiklerde, kopma noktasının oldukça altındaki bir değerde, grafikteki eğimde değişiklik gözlemlenmektedir. Bunun sebebinin, numune ile tutucunun birbirine cıvata ile bağlanması ve düşük açılarda yükleme sırasında cıvatalar arasındaki yük ve temas yüzeyi durumun değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.15. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri, (a) $\theta=0^\circ$, LT-01-020215-01, (b) $\theta=15^\circ$, LT-01-240215-02, (c) $\theta=30^\circ$, LT-01-150215-02, (d) $\theta=30^\circ$, LT-01-160215-02, (e) $\theta=30^\circ$, LT-01-270215-04, (f) $\theta=30^\circ$, LT-01-270215-05 kodlu numuneler



Şekil 4.16. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, **(g)** $\theta=45^\circ$, LT-01-020215-03, **(h)** $\theta=45^\circ$, LT-01-020215-05, **(i)** $\theta=45^\circ$, LT-01-020215-04, **(j)** $\theta=60^\circ$, LT-01-220215-01, **(k)** $\theta=60^\circ$, LT-01-270215-01 kodlu numuneler

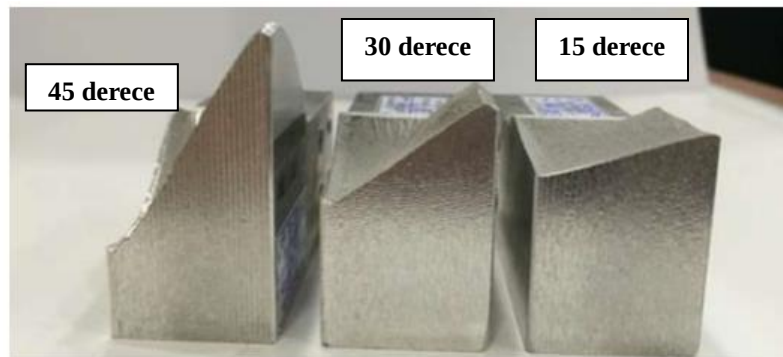


Şekil 4.17. Mod-I/III kırılma tokluğu testleri sonrasında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, **(l)** $\theta=75^\circ$, LT-01-250215-01, **(m)** $\theta=90^\circ$, LT-01260215-02 kodlu numuneler.

Şekil 4.18.'de ise $\theta=30^\circ$, 45° ve 60° için kırılan numune yüzeylerinin perspektif görüntüleri verilmektedir. Kırılan yüzeyler incelendiğinde beklenen ve birbirini tekrar eden tutarlı yüzeylerin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18. Farklı açılarda kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan bazı numuneler [10].



Şekil 4.19. Farklı açılarda kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan bazı numuneler (sırt görünüş) [10].

Tablo 4.3. Mod-I/III CTT numunesi kırılma tokluğu test sonuçları

Numune No	derece	W mm	t mm	a ₂₅ mm	a ₅₀ mm	a ₇₅ mm	P ^Q (N)	a _{avg} mm	P (N)
LT_01_02.02.15_01	0	90	12,5	2,09	2,08	2,22	8900	25,8	10000
LT_01_24.02.15_03	15	90	12,5	2,19	2,26	2,05	9343	25,8	10000
LT_01_15.02.15_02	30	90	12,5	1,89	2,39	2,39	9931	25,9	10000
LT_01_16.02.15_02	30	90	12,5	2,12	2,47	2,81	9873	26,1	10000
LT_01_27.02.15_04	30	90	25	2,25	2,58	2,35	20715	26,1	10000
LT_01_27.02.15_05	30	90	25	2,7	3	2,68	19686	26,5	10000
LT_01_02.02.15_03	45	90	12,5	2,02	2,13	1,74	10879	25,6	10000
LT_01_02.02.15_05	45	90	25	2,79	3,01	2,9	23816	26,6	10000
LT_01_02.02.15_04	45	90	25	3,06	3,16	2,95	23384	26,7	10000
LT_01_20.02.15_02	60	90	12,5	1,64	2,09	1,94	13395	25,6	10000
LT_01_22.02.15_01	60	90	25	1,61	1,85	1,78	13251	25,4	10000
LT_01_27.02.15_01	60	90	25	2,71	2,84	2,75	26218	26,4	10000
LT_01_25.02.15_01	75	90	12,5	2,19	2,26	2,05	14389	25,9	10000
LT_01_26.02.15_02	90	90	12,5	1,54	1,73	1,68	14419	25,3	10000

Tablo 4.3.'den açıkça görüleceği üzere 0 dereceden 90 dereceye gidildikçe (yükleme açısı arttıkça) kopma yükü de artış göstermektedir. Yine aynı şekilde et kalınlığının 12,5 mm'den 25 mm'ye çıkması ile birlikte, her yüklem açısını kendi içerisinde mukayese ettiğimizde kopma yükünde iki kata yakın artışlar görülmektedir. Bu elde edilen sonuçlar, yapılan analizlerinde doğruluğunu ortaya koymuştur.

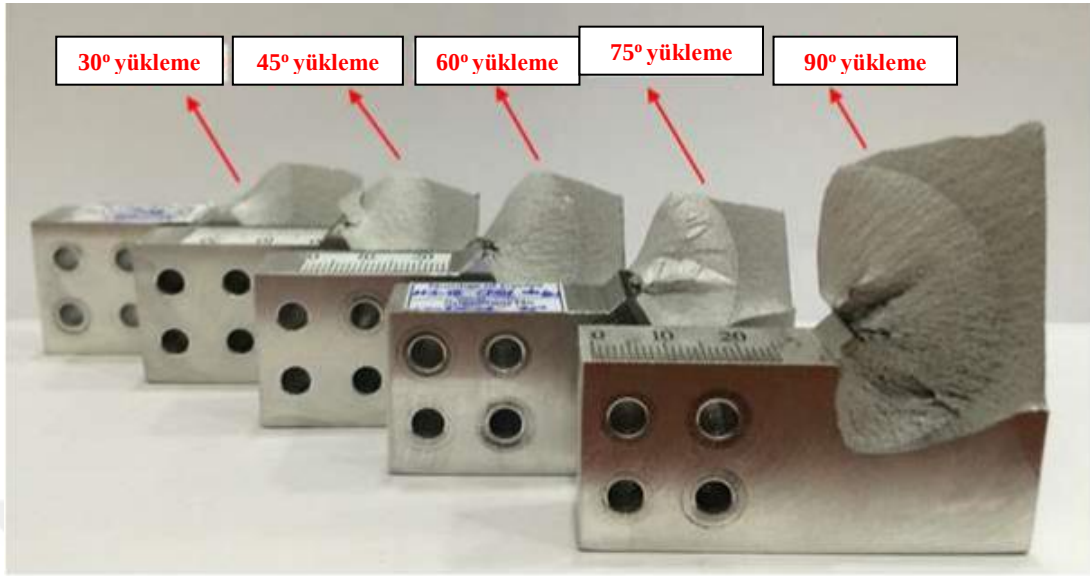
4.4.2. Mod-I/III yorulma ve çatlak ilerleme (da/dN) testleri

Yorulma ve çatlak ilerleme (da/dN) testlerine başlamadan önce numune üzerinde 1,3 mm ön çatlak oluşturulmuştur. ASTM E399-12 Standartında [11] belirtildiği gibi oluşturulan ön çatlak uzunluğu; numune kalınlığının 1/10'undan uzun olarak ayarlanmıştır. Ayrıca ön çatlak oluşumu için gerekli olan yük miktarı da da/dN testinde kullanılan yük miktarından küçük tutulmuştur. Yorulma testlerinde oluşan çatlak yüzeylerinin birbirine temas etmemesi için deneyler genel değişken olacak şekilde, $R = 0.1$ gerilme oranı ile yapılmıştır. Mod-I/III da/dN testi için gerekli olan ön çatlak mod-I yükleme koşullarında oluşturulmaktadır. Mod-I yükleme koşulunun sağlanması için tutucu 0° yükleme deliğinden cihaza bağlanmakta ve numune açılmaya zorlanarak düzlemsel çatlak oluşturulmaktadır.

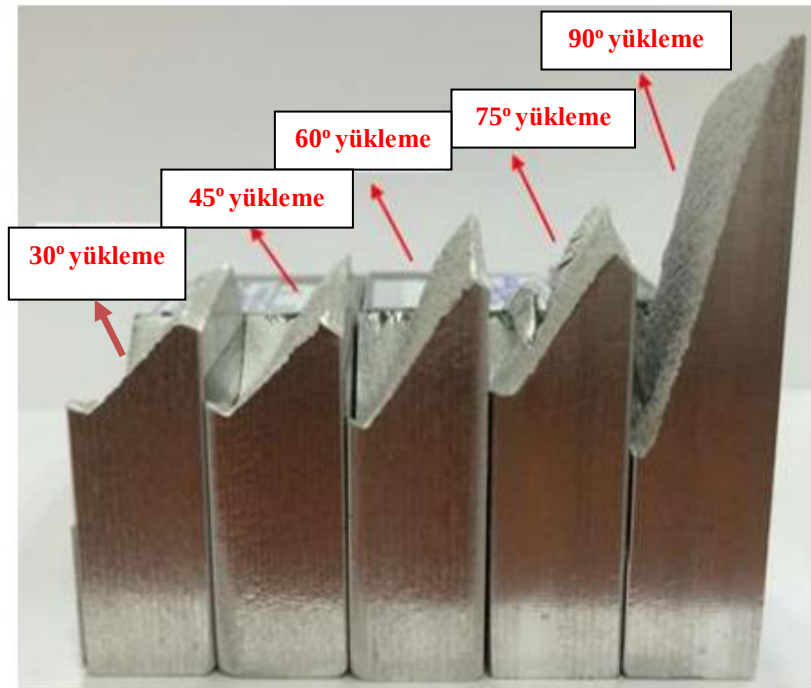
Mod-I/III da/dN testi için ön çatlaklı numune, tutucu üzerindeki yükleme delikleri yardımı ile istenilen açıda test cihazına bağlanır. Ön ve arka yüzeye yerleştirilen kameralarla çatlak ilerlemesi takip edilir. Bu işlem esnasında ekran görüntüsü belirli saniye aralıklarında otomatik olarak kaydedilmektedir. Bu şekilde farklı çevrim sayıları için çatlak görüntüsü alınarak, çatlak boyu ile çevrim sayısı arasındaki ilişki kurulur.

Testler sonrasında kırılma yüzeylerinin fotoğrafları alınmaktadır. Şekil 4.20.'de, farklı açılarda yapılan da/dN testleri sonunda elde edilen numune kırılma yüzeylerinin görüntüsü verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yükleme açısı arttıkça mod-III etkisi daha fazla ortaya çıkmakta (bu problemde eşlenik mod-II etkisi de güçlü bir şekilde bulunmaktadır.) ve elde edilen kırılma yüzeyinin eğim açısı da artmaktadır. Numune yüzeyleri dikkatli bir şekilde incelendiğinde çatlak ilerleme ve ani kırılma bölgeleri oldukça net görülebilmektedir. Kırılan yüzeyler incelendiğinde, kırılma tokluğu testinde elde edilen yüzeyler gibi birbirini tekrar eden tutarlı ve beklenen eğilimlerin olduğu görülmektedir.

da/dN testlerinde yükleme açısı değerinin artmasıyla birlikte kırılma yüzeylerinde küçük geometrik çıkıntılara rastlanmaktadır. Bu durum literatürde “factory roof” olarak isimlendirilmekte ve açıklanmaktadır [13].



Şekil 4.20. Farklı açılarda yapılan da/dN testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri [10].



Şekil 4.21. Farklı açılarda yapılan da/dN testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri (sırt görünüş) [10].

Mod-I/III durumu için gerçekleştirilen da/dN testlerinde kullanılan numunelerin toplu görüntüsü Şekil 4.22.'de verilmiştir. Yükleme açısının değişimi ile kırılma yüzeyleri arasındaki ilişki bu şekilde de görülmektedir.



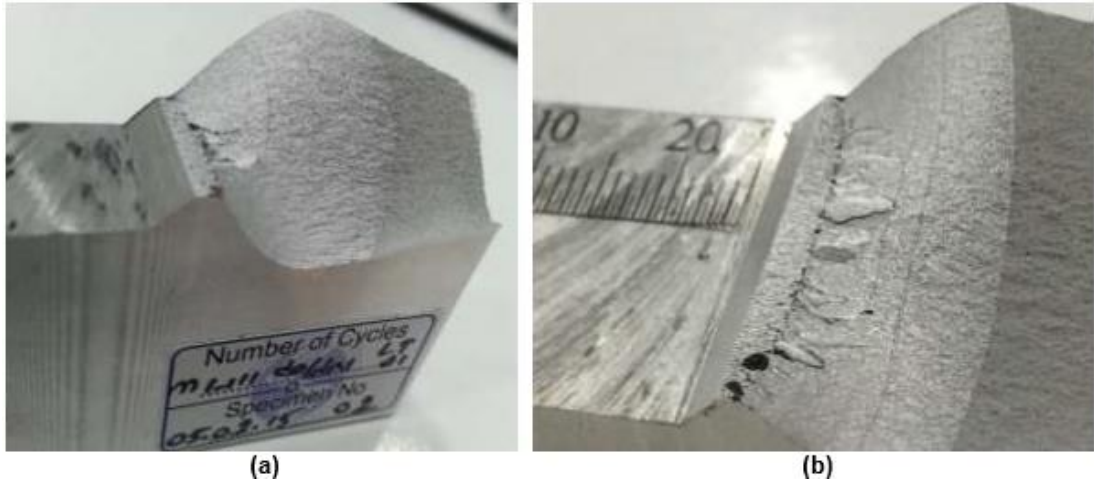
Şekil 4.22. da/dN testlerinde kullanılan numuneler [10].

Şekil 4.23.'te, mod-I/III testlerinde kullanılan numunelerin toplu bir resmi verilmektedir.



Şekil 4.23. Mod-I/III testlerinde kullanılan tüm numunelerin üstten görünüşü. [10]

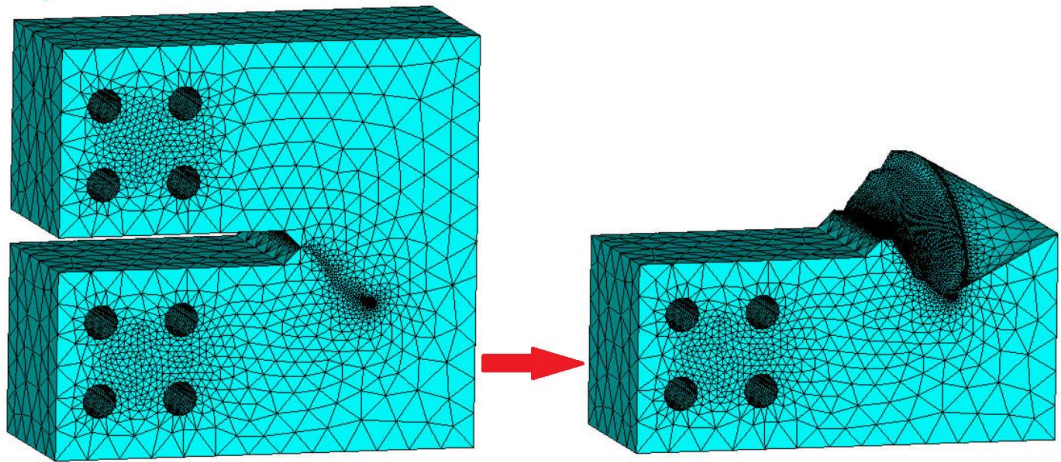
Şekil 4.24.'te ise, bazı mod-I/III yorulma testlerindeki çatlak yüzeylerinde, çatlak önü izi bırakmak için yapılan fazla yüklemelerden sonra elde edilen çatlak yüzeyleri gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Mod-I/III yorulma testlerinde yapılan fazla-yüklemelerden (over-load) elde edilen çatlak yüzeyleri, (a) $t = 12,5$ mm, (b) $t = 25$ mm [10]

4.5. Karışık Mod Altında Yorulma Çatlak İlerleme Simülasyonları

Bu bölümde bir CTT modeline çatlak yerleştirilerek 45 derece yükleme altında kırılma ve çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Problem tanımı bütün ve yarım modelli bir görsel olarak Şekil 4.25.'te verilmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere, bu problemde mod-I, mod-II ve mod-III gerilme şiddet faktörleri oluşmaktadır.



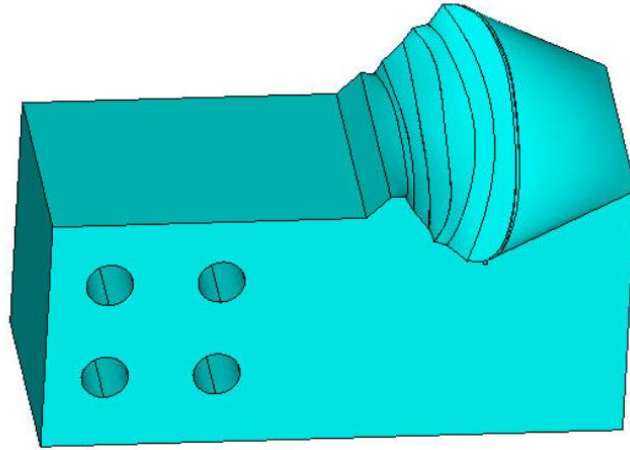
Şekil 4.25. Çatlak ilerleme analizi yapılan CTT numunenin bütün ve yarım model olarak perspektif görüntüleri.



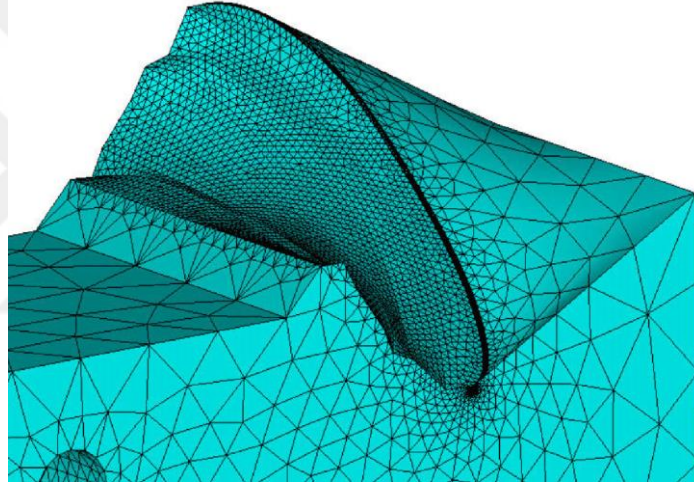
Şekil 4.26. CTT numunenin çatlak ilerleme testinden sonraki yarım model perspektif görünüşü

ANSYS kullanılarak modellenen CTT numunesine çatlak yerleştirildikten sonra, ANSYS 'ten alınan yük, deplasman, eleman ve node listeleriyle birlikte çatlak ucunda bulunan eleman ve node listeleri alınarak FCPAS çözücüsüne girilmiş ve kırılma analizi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler neticesinde FCPAS, çatlak ucu boyunca GŞF değerlerini hesaplayarak, bir sonraki çatlağın profilini tahmin etmektedir. Mevcut durumda bu test modellerinde, Erdoğan-Sih kriteri olarak bilinen maksimum teğetsel gerilme kriteri kullanılmıştır [14]. FCPAS 'ten bir sonraki çatlağın profilini veren düğüm noktaları alınarak üç boyutlu eğrileri fit edebilen DataFit programı [15] kullanılarak tahmin edilen artırımlı ilerlemiş yeni profil eğrisi uydurulmakta ve bir sonraki çatlak profili ANSYS 'te tekrar modellenerek prosedür bu şekilde devam etmektedir.

Bahsedilen işlem detayları takip edilerek, çatlak manuel olarak 7 adım ilerletilmiştir (Şekil 4.27.). Çatlak profillerinin gözükebilmesi için modelin sadece alt yarısı şekilde verilmiştir. Şekil 4.28.'de ise çatlak yüzeylerinin ve son çatlak ucunun meshlenmiş görüntüsü verilmiştir.

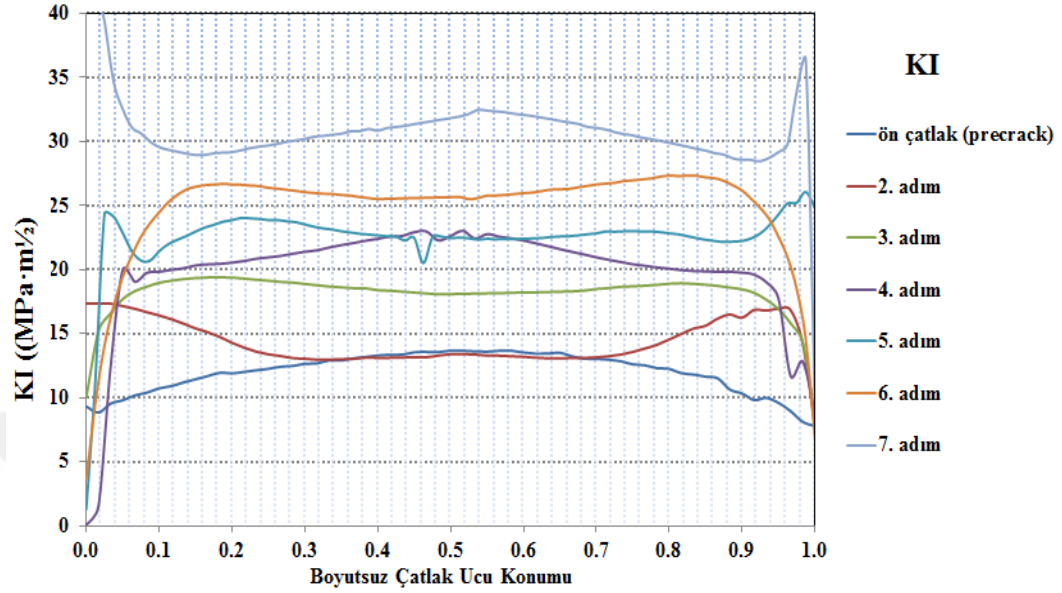


Şekil 4.27. Manuel olarak 7 adım ilerletilen çatlak profillerinin ve ilerleme yüzeyinin yarı modelde gösterilmesi.

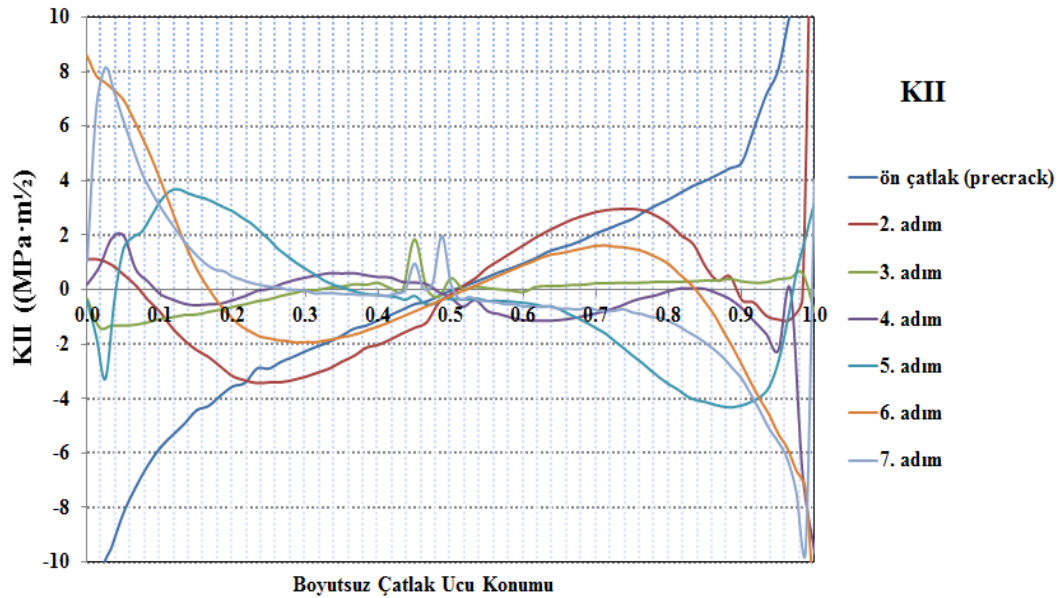


Şekil 4.28. Çatlak yüzeyleri ve son çatlak ucu meshlenmiş model.

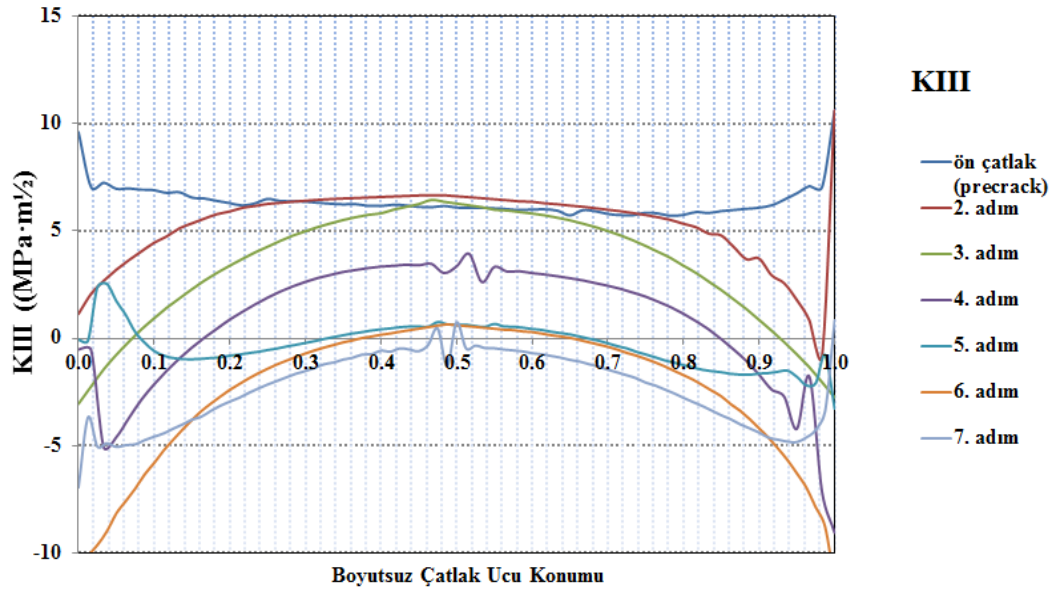
Şekil 4.29. - 4.31.'de verilen grafiklerde ise mod-I, II ve III gerilme şiddet faktörlerinin değişik ilerleme adımlarında çatlak ucu boyunca dağılımları gösterilmektedir. Bu şekillerden görüleceği üzere, çatlak ilerledikçe mod-I gerilme şiddet faktörü artmakta ve başlangıçta yüksek değerlere sahip olan mod-II ve III gerilme şiddet faktörleri ise azalmaktadır. Ayrıca, çatlak uçlarında (ön ve arka yüzey) ve merkezde görülen gerilme şiddet faktörlerindeki ani değişimler, serbest yüzey tekillik etkisi (free-surface singularity effect) olup analizlerde dikkate alınmamaktadır.



Şekil 4.29. İlerleyen çatlağın her bir adımındaki çatlak ucu boyunca KI gerilme şiddet faktörleri dağılımı.



Şekil 4.30. İlerleyen çatlağın her bir adımındaki çatlak ucu boyunca KII gerilme şiddet faktörleri dağılımı.



Şekil 4.31. İlerleyen çatlakın her bir adımındaki çatlak ucu boyunca KIII gerilme şiddet faktörleri dağılımı

Mevcut problemde önceki uygulamalardan farklı olarak çatlak eğimli olduğu için uygulanan mod-I yüklemesi sonucu çatlak ucunda her üç mod da (KI, KII ve KIII) aktif olmakta, yani çatlak düzlem dışı hareket etmektedir. Bu çalışmadan görüldüğü üzere, FCPAS eğik bir çatlak üç boyutlu düzlem dışı eğimi ile ilerletebilmekte ve ilerleme profili de beklendiği gibi, mod-I çatlakına dönüşecek şekilde devam etmektedir. Bir başka deyişle çatlak, yüklemenin etkisi sonucu düzlemsel hale gelmeye çalışmaktadır.

Şekil 4.25. ve Şekil 4.26.'da modelleme sonucu elde edilen çatlak yüzeyi ve deneyden elde edilen yüzey beraber verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, FCPAS ile elde edilen çatlak ilerleme yüzeyi deneysel sonuç ile uyum içerisindedir.

BÖLÜM 5. ANALİZ VE DENEY SONUÇLARININ MEVCUT 3-B KRİTERLER İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışma kapsamında yapılan analiz ve deney sonuçlarının tutarlılığı ve doğru sonuçlar vermesi son derece önemlidir. Bu bağlamda, literatürde bulunan ve gerilme şiddet faktörlerinin farklı kırılma modlarında nasıl hesaplanacağı ile ilgili çeşitli formülizasyonlar ve kriterler araştırılmıştır. Bu kriterler aşağıdaki alt bölümlerde özetlenmektedir.

5.1. 3-B Mevcut Temel Kriterler

5.1.1. Sih kriteri

Sih'in gerinim enerji yoğunluğu prensibi [16,17] gerilme şiddet faktörleri KI, KII, KIII kırılma modlarını göz önünde bulundurarak, üç boyutlu çatlak ilerlemesini kullanmaktadır. Gerinim enerji yoğunluğu faktörü aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$S = a_{11} K_I^2 + 2 a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2 + a_{33} K_{III}^2 \quad (5.1)$$

$$a_{11} = 1 / (16 \pi \cos \psi) \{ (3 - 4\theta - \cos \phi) (1 + \cos \phi) \}, \quad (5.2)$$

$$a_{12} = 1 / (8 \pi \mu \cos \psi) \{ \sin \phi (\cos \phi - 1 + 2\theta) \}, \quad (5.3)$$

$$a_{22} = 1 / (16 \pi \mu \cos \psi) \{ 4(1 - \theta)(1 - \cos \phi) + (3\cos \phi - 1)(1 + \cos \phi) \}, \quad (5.4)$$

$$a_{33} = 1 / (4 \pi \cos \psi) \quad (5.5)$$

5.1.2. Pook kriteri

Pook [18, 19, 20] çatlak ilerlemesini tanımlamak için iki yönlü çatlak sapma açısını (ψ_0 ve φ_0) kullanmaktadır.

$$K_I \sin \varphi_0 = K_{II} (3 \cos \varphi_0 - 1) \quad (5.6)$$

$$\tan 2\psi_0 = 2 K_{III} / (K_{eq \, I,II} (1 - 2\theta)) \quad (5.7)$$

Karışık modda yüklenmiş bir çatlak önü için Pook kriteri aşağıdaki stratejiyi önermektedir. Çatlak ilerleme tahminleri ile ilgili olarak çatlak sapma açısı φ_0 ilk olarak hesaplanmaktadır. Daha sonra, karşılaştırmalı gerilme şiddet faktörü $K_{eq \, I,II}$ için sırasıyla gerilme şiddet faktörleri, K_I ve K_{II} adım adım belirlenmektedir.

$$K_{eq \, I,II} = (0.83K_I + (0.4489K_I^2 + 3K_{II}^2)^{0.5}) / 1.5 \quad (5.8)$$

Ayrıca aşağıdaki denklemde $K_{eq \, I,II,III}$ değeri de hesaplanmaktadır.

$$K_{eq \, I,II,III} = (K_{eq \, I,II} (1 + 2\theta) + (K_{eq \, I,II}^2 (1 - 2\theta)^2 + 4K_{III}^2)^{0.5}) / 2 = K_{IC} \quad (5.9)$$

5.1.3. Richard kriteri

Bu kriterin [21] temeli aşağıda yer alan denklemdeki yaklaşıma dayanmaktadır:

$$(K_I / K_{IC})^U + (K_{II} / K_{IIC})^V + (K_{III} / K_{IIIC})^W = 1 \quad (5.10)$$

$u=1$ ve $w=2$ için yorulma çatlak ilerlemesini tanımlamak için çevrimli karşılaştırmalı gerilme şiddet faktörü aşağıdaki gibidir.

$$\Delta K_V = \Delta K_I / 2 + 0.5(\Delta K_I^2 + 5.336 \Delta K_{II}^2 + 4 \Delta K_{III}^2)^{0.5} \quad (5.11)$$

ΔK_V değeri yorulma çatlak ilerlemesinin eşik değeri olan ΔK_{th} değerine ulaştığı zaman yorulma çatlak ilerlemesi başlamaktadır. Kırılma tokluğu değeri olan K_{IC} değerine ulaşıldığında çatlak ilerlemesi kararsızlaşmaktadır.

5.2. Analiz ve Deney Sonuçlarının Mevcut Kriterler İle Karşılaştırılması

Mod-I/III CTT numunesi için farklı kalınlık ve açılarda toplam 40 adet test gerçekleştirilmiş ve uygulanan test matrisi Bölüm 4.4.'te verilmiştir. Yapılan tüm testler Pook ve Richard karışık modlu kırılma kriterleri ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki tablolarda detayları verilmiştir. (Tablo 5.1.- 5.6.) Karşılaştırma yapılırken izlenen yöntem şu şekildedir: Analizlerden elde edilen gerilme şiddet faktörleri, ilgili deneydeki ön çatlak uzunluğu için interpolasyon yöntemiyle hesaplanmaktadır. Daha sonra, bu uzunluktaki gerilme şiddet faktörü değerleri kullanılarak Pook ve Richard kriterlerine yerleştirilmekte ve eşdeğer gerilme şiddet faktörü elde edilmektedir. Eş değer gerilme şiddet faktörü ve malzemenin mod-I kırılma tokluğu kullanılarak tahmin edilen kritik kopma yükü, her iki kriter için de hesaplanmaktadır.

Tablolardan da görülebileceği gibi, yapılan testlerde açısı değeri arttıkça kritik kopma yüklerinde de doğru orantılı olarak artışlar gözlenmektedir. Et kalınlığı yarıya indirildiğinde ise (bkz. Tablo 5.4. – 5.6.) kritik kopma yüklerinde de % 48-50 aralığında bir düşüş olduğu saptanmaktadır. Bunun yanında KI değerlerinde açısı arttıkça bir düşüş gözlenirken, KII ve KIII değerlerinde ise artışlar görülmektedir.

Bunun yanında elde edilen sonuçlar mevcut Richard ve Pook kriterlerine entegre edildiğinde, elde edilen eşdeğer gerilme şiddet faktörleri ve kritik kırılma yüklerinde ciddi farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar deneylerden elde edilen kritik kopma yükleri ile mukayese edildiğinde, Richard Kriterinin daha yakın sonuçlar elde ettiği ortadadır. Fakat bu farklılıklar bile açısı değeri arttıkça % 30'lara yaklaşmaktadır.

Bütün bu farklılıklar göz önüne alındığında, yeni bir kriter gelişimine ihtiyaç olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 5.1. Uç noktadan alınan K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=25 mm)

Numune no	Derece	P (N) kritik Deney	a_{avg} (mm)	KI (Mpa.m ^{0.5})	KII (Mpa.m ^{0.5})	KIII (Mpa.m ^{0.5})	Kv 3D Richard Kriterine göre	P kritik Richard (N)	Kv 3D Pook Kriterine Göre	P kritik Pook (N)
1	0	17978	26,19	15,2	0,063	0,041	15,2	19076,9	22,04	13157,8
2	30	20715	26,09	13,04	4,26	4,385	15,8	18358,5	23,16	12518,7
3	30	19686	26,49	13,261	4,40	4,44	16,09	18017,7	23,59	12291,8
4	45	23384	26,76	11,5	4,34	6,77	16,0	18124,7	24,58	11795,3
5	45	23816	26,6	11,48	4,25	6,77	15,89	18251,7	24,41	11880,1
6	45	21990	26,3	10,85	-7,004	5,64	16,7	17369,3	25,37	11429,4
7	60	26218	26,47	7,983	5,72	7,93	15,07	19240	24,11	12025,8
8	60	27181	26,36	7,96	5,67	7,91	14,99	19338,6	23,98	12088,6

Tablo 5.2. Orta noktadan alınan K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=25 mm)

Numune no	Derece	P (N) kritik Deney	a_{avg} (mm)	KI (Mpa.m ^{0.5})	KII (Mpa.m ^{0.5})	KIII (Mpa.m ^{0.5})	Kv 3D Richard Kriterine göre	P kritik Richard (N)	Kv 3D Pook Kriterine Göre	P kritik Pook (N)
9	0	17978	26,19	16,52	0,063	0,13	16,52	17545,8	22,04	13157,8
10	30	20715	26,09	14,456	-0,062	5,51	16,32	17771,7	24,04	12060,8
11	30	19686	26,49	14,63	-0,016	5,54	16,49	17579,6	24,29	11936
12	45	23384	26,76	12,07	0,000	7,74	15,85	18291,9	25,04	12063
13	45	23816	26,60	12,02	0,000	7,72	15,78	18366,8	23,94	12111,8
14	45	21990	26,3	11,89	0,11	7,67	15,64	18538,4	23,72	12222,7
15	60	26218	26,47	8,41	0,000	9,31	14,42	20115,6	21,86	13266,2
16	60	27181	26,36	8,38	0,000	9,29	14,38	20167,2	21,81	13300,7

Tablo 5.3. Maksimum K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=25 mm)

Numune no	Derece	P (N) kritik Deney	a_{avg} (mm)	KI (Mpa.m ^{0.5})	KII (Mpa.m ^{0.5})	KIII (Mpa.m ^{0.5})	Kv 3D Richard Kriterine göre	P kritik Richard (N)	Kv 3D Pook Kriterine Göre	P kritik Pook (N)
17	0	17978	26,19	16,53	0,063	0,13	16,53	17545,9	22,04	13157,8
18	30	20715	26,09	14,46	4,26	5,512	17,57	16505,8	26,04	11136,5
19	30	19686	26,49	14,6	4,40	5,54	17,8	16279,08	26,39	10988,5
20	45	23384	26,76	12,073	4,39	7,74	17,1	16966,3	26,38	10989,5
21	45	23816	26,60	12,017	4,251	7,72	16,96	17100,5	26,17	11080,8
22	45	21990	26,30	11,88	-7,004	7,67	18,59	15602,1	28,85	10051,5
23	60	26218	26,47	8,41	5,72	9,31	16,4	17704,5	26,27	11035,7
24	60	27181	26,36	8,38	5,66	9,29	16,31	17783,3	26,15	11087,3

Tablo 5.4. Uç noktadan alınan K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=12,5 mm)

Numune no	derece	P (N) kritik Deney	a_{avg} (mm)	KI (Mpa.m ^{0.5})	KII (Mpa.m ^{0.5})	KIII (Mpa.m ^{0.5})	Kv 3D Richard Kriterine göre	P kritik Richard (N)	Kv 3D Pook Kriterine Göre	P kritik Pook (N)
25	0	9100	25,6	29,14	0,71	0,28	29,16	9943,9	38,89	7455,8
26	0	8900	25,9	29,45	0,743	0,29	29,47	9838,85	39,31	7377,1
27	30	9931	25,9	26,57	8,75	10,34	32,94	8804,01	48,92	5927,3
28	30	9873	26,17	26,95	10,08	11,09	34,47	8412,2	51,47	5633,9
29	45	8900	25,9	22,1	12,23	14,62	34,21	8477,4	53,19	5451,2
30	45	10957	25,67	21,91	11,75	14,4	33,61	8627,19	52,25	5549,7
31	45	10879	25,67	21,9	11,74	14,44	33,61	8629,4	52,24	5551,1
32	60	13395	25,59	15,81	14,25	17,76	33,41	8680,2	53,94	5376,3
33	60	13251	25,45	15,74	13,87	17,62	32,98	8792,6	53,23	5447,9

Tablo 5.5. Orta noktadan alınan K değerleri Kullanılarak Mod-I/III Kırılma Tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=12,5 mm)

Numune no	Derece	P (N) kritik Deney	a_{avg} (mm)	KI (Mpa.m ^{0.5})	KII (Mpa.m ^{0.5})	KIII (Mpa.m ^{0.5})	Kv 3D Richard Kriterine göre	P kritik Richard (N)	Kv 3D Pook Kriterine Göre	P kritik Pook (N)
34	0	9100	25,62	30,37	0,49	0,23	30,38	9544,5	40,52	7157,3
35	0	8900	25,9	30,68	0,51	0,23	30,69	9446,8	40,94	7083,9
36	30	9931	25,9	27,34	0,000	12,38	32,11	9031,01	47,89	6055,8
37	30	9873	26,17	28,23	0,000	12,6	33,04	8777,3	49,23	5891,2
38	45	8900	25,9	22,58	0,000	17,54	32,16	9018,47	48,94	5925,7
39	45	10957	25,67	22,33	0,000	17,43	31,87	9100,1	48,5	5979,1
40	45	10879	25,67	22,32	0,000	17,43	31,86	9101,31	48,49	5979,9
41	60	13395	25,59	15,90	0,00	21,49	30,87	9394,65	46,48	6238,9
42	60	13251	25,45	15,78	0,00	21,41	30,71	9443,8	46,23	6272,4

Tablo 5.6. Maksimum K değerleri kullanılarak Mod-I/III kırılma tokluğu testleri kriter karşılaştırılması (t=12,5 mm)

Numune no	Derece	P (N) kritik Deney	a_{avg} (mm)	KI (Mpa.m ^{0.5})	KII (Mpa.m ^{0.5})	KIII (Mpa.m ^{0.5})	Kv 3D Richard Kriterine göre	P kritik Richard (N)	Kv 3D Pook Kriterine Göre	P kritik Pook (N)
43	0	9100	25,6	30,37	0,71	0,23	30,4	9540,9	40,53	7154,2
44	0	8900	25,9	30,68	0,74	0,23	30,70	9442,9	40,96	7080,7
45	30	9931	25,92	27,33	8,753	12,38	34,7	8353,96	52,22	5553,1
46	30	9873	26,17	28,231	10,08	12,60	36,35	7978,1	54,65	5306,3
47	45	8900	25,9	22,58	12,22	17,54	36,51	7943,6	57,38	5053,8
48	45	10957	25,67	22,33	11,75	17,43	35,94	8069,57	56,47	5135,1
49	45	10879	25,67	22,32	11,74	17,4	35,93	8071,41	56,46	5136,3
50	60	13395	25,59	15,90	14,25	21,49	36,19	8012,4	58,86	4926,5
51	60	13251	25,45	15,78	13,87	21,41	35,8	8101,47	58,19	4893,9

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında genel olarak, Mod-I/III yükleri altında bulunan çatlaklar FCPAS kullanılarak analiz edilmiştir. Bu işlem için Mod-I/III durumunu temsil eden literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve bu doğrultuda yeni bir tutucu tasarlanarak 8 delikli CTT numunesinin analiz ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. 2. Bölümde ilgili literatür çalışmalarının özeti verilmiştir.

3. Bölümde, kullanılacak malzeme, yükler ve model geometrisi belirlenerek uygulanacak olan analiz prosedürü ortaya çıkarılmıştır. Bu işlemde modelleme, analiz ve sonuçlar için ANSYS ve FCPAS programları kullanılmıştır. Bu analizlerin güvenilirliğini test etmek için temas yüzeyi türleri ve deplasman şartları, bazı analizlerde değiştirilerek benzer problemler oluşturulmuş ve analizler tekrarlanmıştır. Ayrıca bu analizler her 15 derecede değişen 7 farklı açı için tekrar edilerek karışık modlu gerilme şiddet faktörleri altında numunenin davranışı incelenmiştir.

4. Bölümde, yapılmış olan analizlerin doğruluğunu test etmek için yapılan deneysel çalışmalar ve analizler anlatılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle strain gage ile doğrulama çalışmaları yapılmış, ardından mod-I için analiz ve deney sonuçları mukayese edilerek K_{IC} doğrulama çalışması yapılmıştır. Doğrulama sonucunda test matrisleri hazırlanarak her açı ve kalınlık için testler tekrarlanmış ve karışık mod altında kırılma yükleri tespit edilmiştir. Buna ek olarak, kırılan numunenin karışık mod altında yorulma çatlak ilerlemesi tekrar ANSYS programında simule edilerek deneysel yüzeyler ile birbirine çok yakın geometrik yapılar elde edilmiştir. Ayrıca link elemanlar kullanılarak yapılan analizlerde, tutucu, pimler ve civatalar mevcut geometriden çıkartılmıştır. Bu sayede analizlerin hızlandırılması hedeflenmiştir. Sonuçta ise KI, KII ve KIII gerilme şiddet faktörü değerlerinin her biri için % 10'un altında hata payları elde edilmiştir. Fark çok görülse dahi, mühendislikte ön sonuç

elde etmek amacıyla yapılacak olan analizlerde, bu yöntem sayesinde oldukça hızlı ön bilgiler edinilebilir.

5. Bölümde, literatürde bulunan bazı mevcut temel kriterler ile elde ettiğimiz analiz ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Mevcut kriterlerin, genel olarak elde edilen deney sonuçları ile tutarlı olmadığı görülmüştür. En yakın sonuçlar elde ettiğimiz Richard kriterinde dahi açığı değerleri 0 dereceden 90 dereceye kadar arttığında % 30'lara varan farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bu farklılıklar Pook kriterinde çok daha fazladır.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında ilk defa lineer elastik kırılma şartlarında bir Mod-I/III numunesi üzerinde geniş kapsamlı bir analiz çalışması yapılmış ve bu analizler temas yüzeyi tiplerinin değişimi, strain gage doğrulamaları ve test matrislerinde gösterilen deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Ayrıca literatür verileri ile de mukayese edilmiştir. Mevcut kriterler ile elde edilen farklılıklar göz önüne alındığında, literatürdeki mevcut diğer kriterlerin de incelenerek yeni bir kriterin ortaya konması gerektiği öngörülmektedir.

Yapılan tüm analizlerin deneysel sonuçlar ile olan uyumluluğu, FCPAS çatlak ilerleme ve analiz programının doğru çözümler elde ettiğini göstermektedir. İlerleyen çalışmalarda sadece literatürdeki numuneler için değil, daha karmaşık geometriye sahip gerçek yapısal ve makine parçaları için bu analizler tekrarlanabilir. Ayrıca, özellikle mevcut kriterler baz alınarak mod-I, mod-II ve mod-III değerlerinin daha doğru sonuçlar vermesi amacıyla kriter geliştirme çalışmaları yapılabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Griffith, A.A., The phenomena of rupture and flow in solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A221, pp.163-198, 1921.
- [2] Irwin, G. R., Tada, H., Paris, P. C., The Stress Analysis of Cracks Handbook, The American Society of Mechanical Engineers Three park Avenue, New York, NY 10016.
- [3] Wei, Z., Deng, X., Sutton, MA., Yan, J., Cheng, CS., Zavattieri, P., Modeling of mixed-mode crack growth in ductile thin sheets under combined in-plane and out-of-plane loading. Engineering Fracture Mechanics 2011; 78:3082–3101.
- [4] Barlow, K.W., Chandra, R., Fatigue crack propagation simulation in an aircraft engine fan blade attachment, International Journal of Fatigue, Volume 27, Issues 10–12, October–December 2005, Pages 1661–1668.
- [5] Yang, Z.M., Lie, S.T., Gho, W.M., Fatigue crack growth analysis of a square hollow section T-joint, Journal of Constructional Steel Research, Volume 63, Issue 9, September 2007, Pages 1184–1193.
- [6] Favier, E., Lazarus, V., Leblond, J.B., Coplanar propagation paths of 3D cracks in infinite bodies loaded in shear, International Journal of Solids and Structures, Volume 43, Issues 7–8, April 2006, Pages 2091–2109.
- [7] Citerella, R., Buchholz, F.G., Comparison of crack growth simulation by DBEM and FEM for SEN-specimens undergoing torsion or bending loading, Engineering Fracture Mechanics, Volume 75, Issues 3–4, February–March 2008, Pages 489–509.
- [8] <http://www.referansmetal.com/mak-oz.htm>, (2017 Alüminyum Alaşım Mekanik Özellikleri), Erişim Tarihi: 14.02.2015.
- [9] ANSYS, 2009. Version 12.0. Ansys Inc., Canonsburg, PA, USA.
- [10] 113M407 Nolu TÜBİTAK Araştırma Projesi Gelişme Raporu-2.
- [11] ASTM International, E399 – 12, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials", 2013.

- [12] Hertzberg, R.W., "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [13] Zhao, T., "FATIGUE OF ALUMINUM ALLOY 7075-T651", University of Nevada, Reno, PhD thesis, December, 2008.
- [14] Erdogan, F., Sih G.C., J. Basic Engng. 85, 519-525, 1963.
- [15] <http://www.oakdaleengr.com/>. Erişim Tarihi: 20.01.2017.
- [16] Sih, G.C., Int. J. Frac., 10, 305-321, 1974.
- [17] Sih, G.C., "Mechanics of fracture initiation and propagation", Kluwer Academic publishers, Dodrecht, Netherlands, 1990.
- [18] Pook, L.P., "In: Fracture and Fatigue: Elasto-Plasticity, Thin Sheet and Micromechanism Problems", Radon, J.C. (Ed.) Pergamon Press, Oxford. pp. 143-153, 1980.
- [19] Pook, L.P., "Multiaxial Fatigues", In: Miller, K.J., Brown, M.W. (Eds.), ASTM STP853, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 249-263, 1985.
- [20] Pook, L.P., "Linear elastic fracture Mechanics for engineers: theory and application", WIT press, Southampton, 2000.
- [21] Richard, H. A., In: CD-Rom Proceedings of ICF10, Honolulu, USA, 2001.

ÖZGEÇMİŞ

Murat Bozkurt, 13.06.1991’de Dazkırı’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Denizli’de tamamladı. 2009 yılında Nevzat Karalp Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2009 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünü 2013 yılında bitirdi. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2014-2015 yılları arasında Prof. Dr. Ali Osman AYHAN tarafından yürütülen Kırılma ve Çatlak İlerleme Analiz Sistemi (FCPAS) – Aşama 2 adlı ve 113M407 numaralı TÜBİTAK destekli araştırma projesinde bursiyer proje asistanı olarak çalıştı. Bu süre içinde kırılma ve çatlak ilerleme analizleri gerçekleştirdi ve deneysel çalışmalarda yer aldı.